MIGUEL KATZ

TEMAS DE HISTORIA DE LA FÍSICA

Tomo I

Asociación Química Argentina

TEMAS DE HISTORIA DE LA FÍSICA

TOMO I

MIGUEL KATZ

TEMAS DE HISTORIA DE LA FÍSICA

TOMO I

ASCIACIÓN QUÍMICA ARGENTINA

BUENOS AIRES

2018

Katz, Miguel
Temas de Historia de la Física, Tomo I
1a ed. - Buenos Aires: Asociación Química Argentina, 2018.
Avda. Santa Fe 1145 C1059ABR
Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina.
Tel-Fax (14 11) 4814 5942
Libro digital, PDF/A
Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-46579-8-5
CDD 530.09
1. Física. I. Título.
Libro de edición electrónica
Hecho en la República Argentina
Hecho el depósito de la Ley 11.723

A mis estudiantes, que dieron el motivo para escribirlo.

Agradecimientos
A la Asociación Química Argentina en las personas de
suPresidente, Dr. Carlos Cañellas,
Su Vicepresidente, Dr. Alberto Capparelli
y al impulso de la Dra. Lydia Galagovsky.

PRÓLOGO

Los que hemos estudiado alguna vez materias de Física, aún a nivel universitario, hemos aprendido a admirar a partir de breves relatos a algunos ilustres "héroes" que durante siglos dieron origen a las teorías y leyes que debimos aprender.

Es conocida la frase que Isaac Newton (1643-1727) escribió en una carta a Robert Hooke (1635-1703) con fecha 15 de febrero de 1676, en la que hacía mención a sus predecesores aludiendo a los hombros de los gigantes. Para el lector común parecería que Newton daba muestras de humildad, al escribirle a Hooke: *Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes.* Sin embargo, la frase era, probablemente, una ironía hacia la baja estatura de Hooke — quien no llegaba a medir un metro y medio— y hacía alusión a una situación conflictiva entre ellos. Hooke escribió su *Micrographia* (1665) y debía haber sido uno de esos gigantes. Al año siguiente de la muerte de Hooke, Newton asumió la Presidencia de la Royal Society y, curiosamente, desapareció el cuadro con la imagen de Hooke, que había estado en esa Institución durante casi cuarenta años.

La historia de la disciplina Física no se ha construido sobre personajes únicos y aislados, o sobre trabajos individuales de preclaros y exquisitos científicos; la historia es una trama, las personas involucradas tenían pensamientos insertos en los paradigmas de sus épocas y comulgaron con ellos, o propiciaron rupturas. Esa historia, impulsada por preguntas filosóficas muy arraigadas en la esencia temerosa y curiosa del ser humano, amalgamaba necesariamente aquellas ramas del conocimiento que sólo en siglos recientes fueron identificadas separadamente como Física, Química o Biología.

Los filósofos naturales –¡de los que trascendieron fundamentalmente hombres, aunque hubo mujeres destacadas!– formularon preguntas para desentrañar los misterios de la Naturaleza, inventaron formas de indagación muy particulares poniendo en juego complejas habilidades de manipulación, con metodologías insertas en concepciones teóricas que resultan extrañas al entendimiento de cualquier lector formado a partir de la segunda mitad del siglo XX.

El Dr. Miguel Katz, con su maravillosa pluma, nos presenta un texto entretenido, en el que esa intrincada articulación de personajes, hechos específicos, métodos, marcos filosóficos, causas y consecuencias resultan comprensibles... Los capítulos parten de una ilación histórica y, necesariamente, se abren en el devenir de las discusiones sobre contenidos específicos, a partir de la explosión de conocimientos que se produjo en el siglo XVIII.

Este libro permite a los lectores comprender aquella frase de Newton mencionada antes, ubicándonos en el trazo grueso e indeleble de las incertidumbres del conocimiento, de sus orígenes y desarrollos; presentándonos a los numerosos principales protagonistas de esa empresa humana llamada ciencia; iluminándonos con la advertencia de aquellas propuestas que encendieron fogosos conflictos humanos a través de los tiempos.

Lydia Galagovsky

PREFACIO

A lo largo de estas páginas, hemos tratado de dar un panorama de la evolución de la Física a lo largo del tiempo. En el proceso de la redacción hemos consultado las obras originales de los autores que marcaron hitos en la evolución histórica de esta disciplina y, lamentablemente, hemos debido omitir algunas contribuciones que no han sido las más relevantes, para evitar la producción de una enciclopedia que, más allá de su extensión, nos hubiera requerido muchísimo más tiempo en su redacción. De allí el título "*Temas de Historia de la Física*" y no *"Historia de la Física*".

En la medida de lo posible hemos tratado de recurrir a las fuentes pero, a pesar de que en algunos casos la tarea no fue sencilla, tuvimos la satisfacción de haber volcado el contenido de (las copias) de documentos originales. Donde hubo controversias, por ejemplo las que tuvo Newton a lo largo de su actividad, hemos buscado las opiniones de sus ocasionales adversarios.

La búsqueda de la información original, también nos ha deparado algunas sorpresas, como que el teorema de Pitágoras ya era conocido un milenio antes, que en ninguna parte de toda la obra de Newton él escribió $F = ma$; que las ecuaciones vectoriales del campo electromagnético de Maxwell no las escribió, Maxwell, etc.

Al comentar sobre la actividad astronómica de Aglaónice de Tesalia, aprovechamos para presentar las hipótesis que se han formulado sobre la ocurrencia de los eclipses totales de Luna.

También explicamos por qué tuvo éxito la expansión árabe en la Edad Media, lograda gracias a la espada de Damasco. Así como otros detalles, anécdotas y explicaciones que esperamos sea de interés para el lector.

Queda por completar un Segundo tomo — y si resulta muy extenso, quizás un tercero —que incluya los avances en la comprobación experimental de la teoría de Maxwell y sus aplicaciones, los experimentos que dieron por tierra la hipótesis del éter, los experimentos con gases a muy bajas presiones que llevaron al descubrimiento de partículas subatómicas, los fenómenos asociados a la radiación del cuerpo negro, que llevaron a la "*catástrofe del ultravioleta*", la teoría especial de la relatividad, los modelos propuestos para la estructura del átomo y lo que, a mi jucio, es la contribución más grande hecha al desarrollo de la Física: la "*Teoría de la relatividad generalizada*".

Si bien la Mecánica cuántica, y sus aplicaciones a otras disciplinas, se desarrollaron en el siglo pasado, su bibliografía es tan abundante que esta modesta recopilación de temas de la Historia de la Física, no le agregaría casi nada.

Esperemos que la redacción del texto sea del agrado de los lectores y que contribuyan, no sólo a a profundizar el conocimiento de estos temas sino a aclarar ciertas dudas que, desde hace mucho tiempo están insertadas en las mentes de los que disfrutan de esta disciplina.

Miguel Katz
Octubre de 2018

CONTENIDOS

I LA CIENCIA EN LA ANTIGÜEDAD

II CIENCIA GRIEGA

III. LA CIENCIA EN LA EDAD MEDIA

IV. LA CIENCIA EN EL RENACIMIENTO

V. LA CIENCIA EN EL SIGLO XVII. Primera parte

VI. LA CIENCIA EN EL SIGLO XVII. Segunda parte

I LA CIENCIA EN LA ANTIGÜEDAD

1 – 1.– Introducción

Tomando el concepto de Ciencia en sentido muy amplio, como conjunto de conocimientos sobre un campo de la realidad realizado metódicamente y orientado hacia fines que trascienden al científico, podríamos afirmar que se hace Ciencia desde más de 4000 años.

Los estudios y descubrimientos más antiguos se fueron perdiendo para la cultura occidental y, con el transcurso de los siglos el conocimiento de la Ciencia de la antigüedad fue quedando limitado a las actividades de los filósofos griegos y sus repercusiones en las regiones que bordean el Mediterráneo oriental.

En el siglo XX fue fundamentalmente la obra de Otto Neugebauer (1899 –1990) la que extendió este concepto de ―ciencia antigua‖ a la matemática y astronomía tanto egipcia como babilónica. En cuanto a la ciencia china de la Antigüedad, su divulgación se debe principalmente a la obra de Joseph Needham (1900-1995), a través de su monumental obra *Science and Civilization in China*[1]. También a principios del siglo XX, se pudieron conocer los orígenes y el desarrollo de la Ciencia en la India, gracias a los trabajos de Paphrulla Chandra Ray, de la universidad de Calcuta quien, entre otras obras publicó *A History of Hindu Chemistry*[2], de William Brennand y su libro *Hindu Astronomy*[3] y la obra *A History of Hindu Mathematics* de Bibhutibhusan Datta y Avadhesh Narayan Singh[4]. No obstante estos trabajos, todavía se sigue manteniendo la tradición de asociar los orígenes de la Ciencia, a los filósofos presocráticos, dejando de lado sus orígenes orientales.

1 – 2.– El estudio de las culturas de la ciencia antigua

El estudio de las culturas de la ciencia antigua de modo fructífero supone adoptar una posición que deje de lado la discusión epistemológica en torno a la idea de inconmensurabilidad. Si bien este concepto es importante para la discusión sobre el carácter no lineal del progreso científico, su utilización en sentido demasiado amplio llevaría a pensar que es imposible comprender una cultura del pasado a partir de nuestra cultura presente. Por otra parte, suponer que la ciencia experimenta un avance lineal bajo criterios históricos objetivos, llevaría a pensar que es posible hacer predicciones sobre la base del conocimiento del pasado. La tendencia contemporánea admite que el progreso es una característica no lineal de la ciencia y que se debe analizar cómo se han dado los hechos históri-

[1] En 15 volúmenes publicados entre 1954 y 1986.
[2] (1903) 2ª Ed. de B. C. Sanyal, Calcutta.
[3] (1896), Edición de C. Stracker, London.
[4] (1935) En dos volúmenes, Editados por Asia Publishing House, Bombay.

cos a lo largo del tiempo. Es decir, se debe estudiar cómo el ser humano ha hecho historia a lo largo del tiempo, especialmente teniendo en cuenta los métodos, las formas y los intereses dominantes en cada época y región.

1 – 3.– La aparición de la escritura

La aparición de la escritura implicó un enorme cambio cultural. El desarrollo de la escritura se dio en varias etapas. La primera es la de los pictogramas donde el signo escrito representaba en sí mismo al objeto.

Figura 1.1. Ejemplo de pictograma

Luego, — alrededor del año 3100 a.C. — aparecen los sistemas de signos (logogramas), como en los jeroglíficos egipcios. La palabra no sólo representaba al objeto, sino que se asocia a ciertos sonidos y sílabas. Estos logogramas son característicos de los jeroglíficos egipcios.

Figura 1.2. Ejemplo de logograma

Tuvieron que transcurrir 1500 años para el surgimiento de sistemas silábicos completos; es decir, aquellos en que los signos no silábicos se descartan. Esto hizo posible que se pudiese escribir todo lo que se podía decir.

Figura 1.3. Sistema silábico chipriota (900 – 800 a.C.)

Finalmente, se llegó a la escritura alfabética — en la cual hay un signo para cada sonido (tanto vocal como consonante) y que apareció en Grecia alrededor del año 800 a.C.

Figura 1.4. Escritura alfabética. (Odisea de Homero, probablemente siglo VII a.C.)

La función principal de la escritura fue la de fijar el contenido teórico de la tradición oral de cada pueblo, mediante la cual se transmitían los valores, las instituciones, las concepciones del mundo, del hombre y del más allá, y las reglas para la vida en comunidad.

Los primeros pueblos en contar con lenguaje escrito fueron, probablemente, los sumerios. Se han encontrado tablillas grabadas con caracteres cuneiformes que datan, aproximadamente, del 3100 a. C. los sumerios fueron los primeros habitantes de la región mesopotámica, entre los ríos Tigris y Éufrates. De ser nómades, pasaron al sedentarismo estableciéndose en lo que actualmente es Irak. Desarrollaron un sistema de canales que, por una parte, permitía morigerar el efecto de las inundaciones y por otra, les permitía contar con agua para los meses de sequía. A pesar de que, en el siglo XIX a.C., fueron desplazados por los acadios, su lenguaje siguió empleándose hasta los tiempos de Cristo, pero con la extinción de su pueblo, el lenguaje se olvidó. Incluso el nombre "Sumeria" permaneció desconocido hasta el siglo XIX. En los primeros tiempos, el lenguaje sumerio era el lenguaje "culto" de sus habitantes y era usado para documentos administrativos y de negocios. Las sucesivas invasiones hicieron que la gente común usara otros lenguajes como el acadio, el asirio y el caldeo.[5]

Figura 1.5. Tablilla cuneiforme. Circa 3100 a.C.

1 – 4.– Astronomía babilónica antigua

Entre los siglos XXIII y XXI a.C., en la Mesopotamia asiática, algunas personas interesadas en la observación del movimiento de los cuerpos celestes asociaron, de alguna manera, las crecidas de los ríos con los movimientos lunares y con el transcurso de los siglos se fue desarrollando una Astronomía primitiva. Parecería que a esos astrónomos "babilónicos" no les resultó sencillo establecer correctamente las lunaciones, por lo que intentaron cuantificar los movimientos del Sol. Obviamente, el Sol tampoco evidenciaba un movimiento regular. Pero a algún astrónomo se le ocurrió suponer que el Sol se movía con dos velocidades diferentes durante dos arcos desiguales de la eclíptica. Las velocidades y los arcos se adaptaron de manera tal que los hechos empíricos iniciales fueran explicados correctamente. Al mismo tiempo, el cálculo de las conjunciones se convirtió en algo suficientemente simple.

Es evidente que el hombre que ideó este método no creía que el Sol se movía alrededor de la mitad de un año con velocidad constante y a continuación, después de haber alcanzado un cierto punto de la eclíptica, de repente empezaba a moverse con otra velocidad, mucho más alta, durante el resto del año. Su intención debió haber sido el de resolver un problema muy complicado con las herramientas matemáticas disponibles en esa época, estableciendo como única condición que las consecuencias finales de los cálculos correspondieran correctamente con las observaciones, por caso, la

[5] Esto era bastante común en todos los pueblos de la Antigüedad. Así por ejemplo, en Palestina el lenguaje culto era el hebreo, mientras que la gente común hablaba arameo. La Iglesia Católica ha comprobado que Jesucristo predicaba en arameo.

desigualdad de las estaciones. Los griegos[6] llamaron a esta estrategia "el método para preservar los fenómenos", un método consistente en introducir operaciones matemáticamente útiles que en sí mismas no necesitaban tener algún significado físico.

1 – 5.– Matemáticas babilónicas.

Las matemáticas babilónicas alcanzaron un nivel relativamente alto. La determinación de las constantes características (por ejemplo, el período, la amplitud y la fase del movimiento periódico) no sólo requerían métodos de cálculo apropiados sino que conducían a la necesidad de resolver sistemas de ecuaciones con los datos empíricos. Las herramientas matemáticas para el desarrollo de la teoría lunar y planetaria de Babilonia fueron mucho más eficientes que las disponibles en Egipto y no sólo en la misma época sino también un milenio después.

En la actualidad se tiene un conocimiento bastante bueno del carácter de los problemas y los métodos matemáticos del período babilónico antiguo (ca. 1700 a.C.)[7]. Se han publicado casi un centenar de tablillas correspondientes a este periodo, que contienen colecciones de problemas o problemas con soluciones completas — que ascienden a mucho más de un millar de problemas.

No se sabe prácticamente nada acerca de las matemáticas sumerias de los períodos anteriores y muy poco del intervalo entre el período babilónico antiguo y la época seléucida.[8] Hay muy pocos textos de este último período pero permiten tener alguna idea de la clase de matemáticas que era familiar para los astrónomos de esos tiempos. Este material es suficiente para asegurarnos que todos los logros esenciales de los tiempos babilónicos viejos eran conocidos por los últimos representantes de la ciencia mesopotámica. Si se quisiera caracterizar a la Matemática babilónica mediante un solo término, se la podría llamar "álgebra". Incluso en aquellos casos donde la base es aparentemente geométrica, la esencia es fuertemente algebraica, como se puede deducir del hecho que operaciones frecuentes no admiten una interpretación geométrica, como la adición de áreas y longitudes, o la multiplicación de áreas. El problema más importante consiste en la determinación de cantidades desconocidas sujetas a condiciones dadas. Así encontramos preparadas las herramientas que más tarde se volverán de la mayor importancia para la Astronomía. Por supuesto, el término "álgebra" no cubre completamente a toda la Matemática babilónica. También se conocía un número importante de relaciones geométricas bien conocidas y algo muy importante, se desarrollaron las propiedades básicas de las progresiones aritméticas y geométricas. Los astrónomos de esa época se caracterizaron por llevar a cabo operaciones numéricas con gran facilidad y destreza.

---

[6] Por ejemplo, en Proclus, (1974): Hypotyposis astronomicarum positionum, V. 10 (ed. C. Manitius, 140, 21), Teubner, Stuttgart.

[7] Esos textos fueron publicados en Neugebauer, O., (1935 -38): Mathematische Keilschrift-Texte. 3 vols, Springer, Berlin y en Neugebauer, O., Sachs, A., (1945): Mathematical Cuneiform Texts, American Oriental Society, New Haven.

[8] A la muerte de Alejandro Magno, uno de sus generales Seleuco I Nicátor fundó el Imperio seléucida. En el año 305, fundó la capital de ese imperio a la que llamó Seleucia también conocida como Seleucia del Tigris por estar sobre la margen oeste de ese río y la confluencia de uno de los canales del Eufrates. Durante el período helenístico, esta ciudad se convirtió en una de las más grandes del mundo antiguo.

En la actualidad se cuenta con un gran número de textos para las operaciones matemáticas comunes. Corresponden a todos los períodos y contienen listas de números recíprocos, raíces cuadradas y cúbicas, tablas de multiplicar, etc., pero la mayoría de estas tablas rara vez van más allá de dos cifras sexagesimales (es decir, más allá de 3600). Hay otras tablas que, en su mayoría provienen del período seléucida que, sin duda, fueron realizadas para cálculos astronómicos, ya que son para cálculos numéricos especialmente extensos. Algunas son de inversos con entradas de hasta siete cifras sexagesimales (correspondientes a once cifras decimales) y hasta diecisiete cifras (correspondientes a veintinueve cifras decimales) para el resultado. Obviamente, cálculos numéricos de tales dimensiones sólo son necesarios en problemas astronómicos.

La superioridad de los métodos numéricos de Babilonia ha dejado huellas aun visibles en épocas actuales. La división del círculo en 360 grados y la división de la hora en 60 minutos y 3.600 segundos se reflejan en la utilización ininterrumpida del sistema sexagesimal en los cálculos de los astrónomos medievales y antiguos.

Pero aunque la base 60 es la característica más visible del sistema numérico babilónico, no es la esencial para su éxito. Sin duda, el gran número de divisores de 60 es muy útil en la práctica, pero la verdadera ventaja de su uso en los textos matemáticos y astronómicos radica en la notación de valor posicional[9] de cada dígito en un número, que se emplea sistemáticamente en todos los cálculos científicos. Esto le dio al sistema numérico babilónico una ventaja sobre todos los demás sistemas antiguos, similar a la que tiene nuestra moderna notación de valor posicional sobre los números romanos. La importancia de esta invención también puede ser comparada con la del alfabeto. Del mismo modo que el alfabeto elimina el concepto de la escritura como un arte que se adquiere sólo después de largos años de entrenamiento, la notación mediante valores posicionales elimina los cómputos numéricos como un arte complejo en sí mismo. Una comparación con Egipto o con la Edad Media ilustra esto muy claramente. Las operaciones con fracciones, por ejemplo, constituyeron un problema en sí mismo para los computadores medievales; en cambio, con la notación de valor posicional, no existe tal problema[10], eliminándose así uno de los obstáculos más graves para el desarrollo posterior de la técnica matemática.

1 – 6.- Los días extremales[11]

Uno de los problemas que tuvieron que enfrentar los babilonios fue el de describir numéricamente la longitud cambiante del día y de la noche a lo largo del año. La forma más simple era recu-

---

[9] La notación mediante valores posicionales consiste en el uso de una cantidad muy limitada de símbolos cuya magnitud queda determinada por la posición. Así 51 no significaba 5 más 1 (como eran las notaciones numéricas para los romanos y egipcios) sino 5 veces 10 más 1. Análogamente, en el sistema sexagesimal, cinco seguido de uno (que transcribimos 5.1) significa 5 veces 60 más 1 (es decir, 301).

[10] Ejemplo: sumar o multiplicas 1,5 y 1,2 requiere exactamente las mismas operaciones que la adición o la multiplicación de 15 y 12.

[11] El día más corto y el día más largo del año.

rrir al supuesto de la existencia una variación lineal entre dos valores extremales[12]. En varios textos del último período babilónico están incorporados dos esquemas mucho más refinados; aunque parece muy probable que sean de origen anterior. Estrechamente relacionados con esto hay otros dos problemas: la variabilidad de la longitud de la sombra del "gnomon"[13] y la medición de la longitud de los días mediante relojes de agua[14]. En este último caso, hay textos que muestran una proporción 2:1 para los valores extremales durante el año. Una relación 2:1 entre el día más largo y el día más corto, en lugar de la relación usual de 3:2, que se utiliza[15], correspondería a una latitud geográfica absolutamente imposible para Babilonia. Sin embargo, la discrepancia desaparece, si se toma en cuenta el hecho de que la cantidad de agua que fluye de un recipiente cilíndrico no es proporcional al tiempo transcurrido, sino que disminuye con el nivel de a medida que desciende[16]. Cabe destacar a este respecto que la salida de agua de un reloj de agua ya se discutía en los viejos textos matemáticos babilónicos[17].

Todo este grupo de textos, sin embargo, conduce nada más que a resultados muy aproximados. Esto surge del hecho de que, en aras de la simplicidad, se suponía que el año era de 360 días y estaba dividido en 12 meses de 30 días cada uno[18]. Este tratamiento esquemático tiene su paralelo en los esquemas conocido de la astronomía egipcia y que se encuentran de nuevo al comienzo de la astronomía griega.

1 – 7.– Astronomía y Astrología

Pocas afirmaciones están más profundamente arraigadas en la mente del público o se repiten más a menudo, que la afirmación de que el origen de la Astronomía se encuentra en la Astrología. No sólo falta evidencia histórica de esta afirmación, sino que todos los hechos bien documentados están en aguda contradicción con ella. Tanto en Babilonia como en Egipto y también en Grecia el desarrollo de la Astronomía se produjo por problemas de calendario. La determinación de las estaciones, la medición del tiempo y hasta los festivales lunares, fueron algunos de los problemas que impulsaron desarrollo astronómico durante muchos siglos.

La Astrología como una forma de predecir los eventos personales en función de cuales hayan sido las posiciones relativas de los planetas, el Sol y la Luna en el momento del nacimiento, es relativamente tardía. Fue precedida, durante muchos siglos, por otra forma de Astrología de carácter mu-

---

[12] Ver, por ejemplo, **Weissbach, F. H**. (**1903**): *Babylonische Miscellen.* Meissner, Leipzig, pp. 50 – 51.

[13] Cf. **Weidner, E. F**. "Ein babylonisches Kompendium der Himmelskunde," *AJSLL,* 40 (**1924**), pp. I98 y ss.

[14] **Weissbach, F. H.** *Loc. Cit*. **Schaumberger, J**., en Kugler F. X., (1935): *Erganzungen,* en tres partes (Part III), Aschendorff, Münster p. 377.

[15] **Schaumberger, J**., en Kugler F. X., (**1935**): *Erganzungen,* en tres partes (Part III), Aschendorff, Münster p. 377.

[16] **Neugebauer, O.** "The Water-Clock in Babylonian Astronomy", *Isis*, 37, **1947**, 37 – 43.

[17] **Thureau-Dangin, F**. "La Clepsydre chez les Babyloniens," *Revue d'assyriologie,* **29** (1932), 133 – 36.

[18] Por supuesto, este año esquemático de 360 días, no indica que se supone correcta la extensión de 360 días del año solar. Pero la utilización del calendario lunar hace muy dificultosa las predicciones correctas de fechas futuras. Por consiguiente, el uso del calendario esquemático es más conveniente para dar fechas futuras, las que, en todo caso, deberán ajustarse más tarde.

cho más general (con frecuencia llamada Astrología "judicial", en contraste con la "genético-lógica" o "Astrología de los horóscopos"

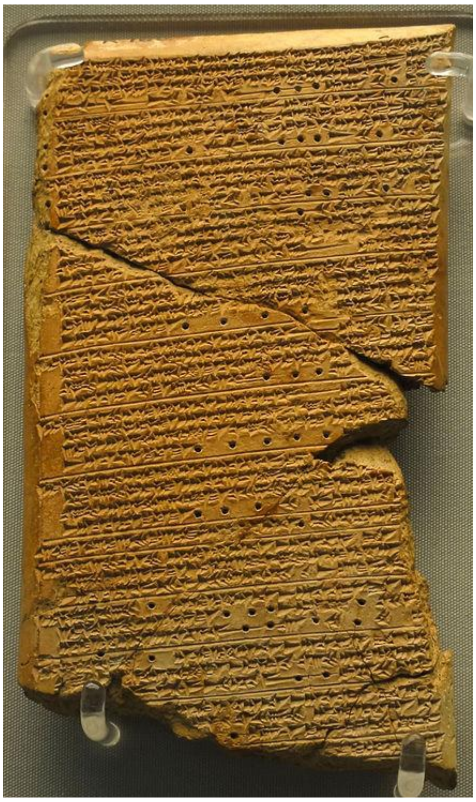


Figura 1.6. Tableta de Ammisa-duqa (yeso, 17,14 × 9,2 × 2,22 cm) British Museum.

En la Astrología judicial, los fenómenos celestes se utilizaron para predecir el futuro inminente del país o de su gobierno, (sobre todo del rey). De los halos de la Luna, de la proximidad o la invisibilidad de los planetas, de los eclipses, etc., se sacaban conclusiones en cuanto a la invasión de un enemigo desde el este o el oeste, el estado de las próximas cosechas, las inundaciones y tormentas, etc.; pero nunca se ha encontrado algo parecido a un "horóscopo" basado en la constelación estelar en el momento del nacimiento de un individuo. Históricamente, la Astrología en la Mesopotamia no fue más que una forma de predecir eventos futuros. Como tal, pertenece al enorme campo de la literatura de presagios.

Es probable que la Astrología haya surgido de la práctica general de pronosticar a través de presagios basados sobre irregularidades en la naturaleza. Esas anomalías se consideraban indicadoras de otras perturbaciones futuras. Al constatarse ese paralelismo entre diversos fenómenos de la naturaleza y la vida humana, su relación comenzó a considerarse como consistente y se fueron estableciendo otras relaciones entre irregularidades observadas y eventos siguientes.

Los documentos con presagios astrológicos que se disponen se remontan al siglo XIII a.C. Del período babilónico antiguo sólo se conserva un texto[19] que contiene presagios. Las predicciones derivadas de observaciones de Venus desde 1702 a.C. se hicieron durante el reinado de Ammisa-duqa (ca. 1600 a.C.) pero las copias que se disponen fueron escritas casi mil años después[20] y probablemente hayan sido modificados a lo largo del tiempo. No hay documentos astrológicos de origen sumerio.

No se sabe en qué época se pasó de la Astrología judicial, en la que los fenómenos cambiantes en el cielo vaticinaban consecuencias a corto plazo para el *país*, a la Astrología horoscópica, en que ese tipo de fenómenos vaticinaban consecuencias para el futuro de un *individuo*. La práctica horoscópica era común en el antiguo Egipto, por lo que es probable que se haya introducido en la Mesopotamia durante el período helenista (siglo IV a.C.). Un indicador de la época del cambio podría ser

[19] **Sllelko, V.,** "Mondlaufprognosen aus der Zeit der ersten babylonischen Dynastie", *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de I'URSS,* 1927. B, pp. 125 – 28.

[20] **Langdon S.**, **Fotheringham, J. K.**, **Schoch, C.**, (**1928**): *The Venus Tablets of Ammizaduga,* Oxford University Press, London.

el hecho de que en comparación con la gran cantidad de documentos astrológicos —judiciales disponibles del período seléucida, sólo se conservan siete horóscopos[21].

La Astrología horoscópica está íntimamente relacionada con la Astronomía matemática. Los horóscopos no podían ser emitidos antes de que existieran los métodos para determinar con bastante precisión la posición de los cuerpos celestes durante un período de, por lo menos, varias décadas. Además, para las predicciones horoscópicas es necesario conocer las posiciones de los cuerpos celestes en el zodíaco a una hora específica independientemente de su visibilidad. Esto demuestra cuán estrechamente entrelazadas están la historia de la Astrología y la historia de las teorías planetarias.

1 – 8.- La Astronomía en el período helenístico.

Las fuentes directas de información sobre la Astronomía y las matemáticas anteriores al reinado de Alejandro Magno son extremadamente escasas. La influencia dominante de los *Elementos* de Euclides tuvo como efecto que la mayoría de las referencias escritas anteriores fueran descartadas. Algo similar ocurrió con las obras de Ptolomeo.

Los escritos astronómicos de Autólico[22] y Euclides[23] tratan de una manera muy rudimentaria el problema de la salida y puesta de las estrellas, haciendo simplificaciones muy groseras a las que se vieron obligados por la falta de conocimientos apropiados de geometría esférica. El objetivo final era volver a establecer relaciones entre los fenómenos celestes y las estaciones anuales. Pero, además de estos sencillos tratados, encontramos una obra de carácter excepcional: la teoría planetaria de Eudoxo, el famoso contemporáneo de Platón. Él hizo el intento de explicar las peculiaridades de un movimiento planetario conocido como retrogradación[24] suponiendo que era el resultado de la superposición de la rotación de dos esferas concéntricas alrededor de ejes inclinados y en direcciones opuestas. Esta hipótesis sería utilizada por los astrónomos durante casi dos mil años para explicar las anomalías observadas en los cuerpos celestes.

Uno de los problemas que intentaron resolver los astrónomos griegos en el período helenístico era la determinación de la latitud geográfica mediante la relación entre el día más largo del año y el día más corto de ese período. Los métodos aritméticos se siguieron empleando hasta los inicios de

---

[21] Dos fueron publicados por **Kugler F. X.**, (**1935**): *Erganzungen*, in three parts (Part II), Aschendorff, Münster p. II. 554 ss. y se refieren a los años 263 y 142 a.C., respectivamente. Uno, (probablemente del 233 a.C.) fue publicado por **Thompson R. C**., (**1927**): *A Catalogue of Late Babylonian Tablets in the Bodleian Library*, Oxford University Press, London, p. 251. Entre los cuatro horóscopos inéditos, descubiertos por el Dr. A. Sachs, dos son fragmentos muy pequeños, uno podría datar de 235 a.C., y el otro sería del 263 a.C. Este último es el horóscopo más antiguo del mundo.

[22] *Autolycus*, ed. Hultsch (Leipzig, 1885).

[23] *Euclidis opera omnia,* Vol, VIII. ed. Menge (Leipzig, 1910) .

[24] La retrogradación de Marte fue observada por los astrónomos de Babilonia, quienes registraron su movimiento de oeste a este durante 780 días en el que la velocidad va disminuyendo hasta detenerse y luego parece retroceder durante 73 días hasta alcanzar una posición estacionaria desde la cual su movimiento retoma la dirección usual.

la Edad Media[25], a pesar de que Ptolomeo inventó métodos mucho más precisos[26] utilizando la trigonometría esférica desarrollada por Toedosio de Bitinia (ca. 200 a.C.) en su obra *Sphærica*[27].

1 – 9.- La determinación de las coordenadas terrestres.

Desde que Ptolomeo diera a conocer su *Analema* se fue perfeccionando el uso de las coordenadas esféricas para establecer los tiempos de salida y puesta del Sol. Esto no sólo era útil para adecuar el funcionamiento de los relojes de Sol, sino que a partir de la extensión de los días, se podía conocer cuál era el día más largo del año y cuál era el más corte. La relación entre esos días maximales daba la latitud del lugar donde se medían. Esto era muy útil para la confección de los mapas. Se decía que las zonas que guardaban la misma relación entre sus días maximales tenían el mismo clima. La diferencia en el carácter y la conducta de las naciones que vivían en diferentes climas suministró uno de los principales argumentos de la influencia de los fenómenos astronómicos sobre la vida humana[28].

La determinación de la longitud a la que se encuentra una determinada zona, ha sido más problemática. La diferencia de longitud entre dos lugares en la tierra es esencialmente equivalente a la diferencia en la hora local. Pero en la Antigüedad no existían relojes o señales que permitiesen comparar la hora local en lugares distantes. Sólo un fenómeno podría ser utilizado como una señal de tiempo, a saber: los registros de observaciones simultáneas de un eclipse lunar desde dos lugares diferentes. Si cada observador tomase nota de la hora local a la que se observa el principio y el final de un eclipse lunar, la comparación de estos registros proporcionaría la información necesaria. Hiparco propuso el uso de este método para una construcción exacta del mapa del mundo, pero su programa nunca se llevó a cabo. Sólo parece que se hizo un par de observaciones simultáneas durante el eclipse del 20 de septiembre de 331 d.C., que fue registrado horas antes en Cartago que en Arbela[29]. En realidad, la diferencia en el tiempo local entre estas dos localidades es mucho menor y, en consecuencia, el antiguo mapa del mundo sufrió una grave distorsión en la dirección de este a oeste. La magnitud de los errores no se debió a falencias en el método sino a errores experimentales, que aún en esa época no deberían haber ocurrido.

Con los trabajos astrológicos de Ptolomeo se conoce otro tipo de Astrología[30]. Esta es diferente a la Astrología de presagios ("cuando esto y esto otro suceden en los cielos, entonces la consecuencia importante será tal o cual acontecimiento") y a la astrología de horóscopos personales. Este tipo de Astrología descripto en los dos primeros libros de *Tetrabiblos* es, realmente, una Física cósmica

---

[25] Neugebauer [13] y [18].

[26] *Almagesto* II, 7 y 8. Cf. también *Tetrabiblos* I, 20 (ed. Robbins. p. 94). 21 (ed. Boll-Boer, pp. 46, 47 ss.)

[27] 27 Teodosio compiló en tres libros, el primero con 22 proposiciones, el segundo con 23 y el tercero con 14, todos los teoremas. Con ellos, Ptolomeo estableció los principios de su Astronomía geocéntrica y pudo explicar mediante demostraciones geométricas los diferentes fenómenos astronómicos.

[28] Ver p. ej. *Tetrabiblos* II, 2.

[29] Ptolomeo *Geographia* i. 4. 2 (ed. Nobbe, p, 11). Cf. también Mžik-Hopfner *PDE.* p. 21, n. *3. Para el programa de* Hiparco ver Strabo *Geography* i. C 7: también Berger *GFH,* pp. 12 ss.

[30] Si bien Ptolomeo la expuso con mucho detalle, no se sabe cuándo ni dónde se originó.

primitiva, construida sobre una vasta generalización de la evidente influencia que tiene la posición del Sol en el zodiaco sobre el clima de la Tierra. La Luna influye casi tanto como el Sol, por ejemplo, en la evolución de las mareas. A partir de estas concepciones Ptolomeo desarrolló un intrincado sistema de caracterización de las partes del zodiaco, la naturaleza de los planetas y sus relaciones mutuas[31]. Las relaciones están basadas sobre analogías y generalizaciones completamente ingenuas, pero, fáciles de aceptar por las personas que carecen de suficientes conocimientos científicos.

1 – 10.- Astronomía en la Antigua China.

En China, como en muchas otras culturas, se han encontrado evidencias de la observación del cielo, que son muy anteriores a las épocas de los documentos escritos. Como ejemplos, pueden mencionarse las cerámicas que se encuentran en el Observatorio de la Antigüedad en Beijing que datan del período neolítico, que muestran imágenes del Sol y las estrellas y eventos astronómicos como la explosión de una estrella que se supone ocurrido en el siglo XV a.C. Al igual que en otras civilizaciones, parece que las observaciones astronómicas realizadas en China, tenían por objeto el registro del tiempo y el establecimiento de un calendario. El calendario marcaba las épocas de la siembra y de la cosecha. El calendario chino estaba basado sobre las fases de la Luna con el agregado de meses adicionales debido a que el año solar no es divisible por un número entero de meses. Los antiguos astrónomos chinos calcularon que un año solar contiene 12.37 meses lunares, por lo que se agregaba un mes lunar más cada dos o tres años. El observatorio astronómico más antiguo que se conoce en la actualidad, fue descubierto en mayo de 2005. Estaba ubicado en la provincia de Shanxi y data del período Longshan (2300 – 1900 a.C.). Estaba sobre una vasta plataforma tallada de 60 metros de diámetro y se utilizada para detectar la salida del Sol en diferentes épocas del año. Como la tradición imperante en China decía que el Rey, y luego los emperadores, recibían del Cielo sus mandatos terrenales, la Astronomía se convirtió en una de las disciplinas más importantes. La principal responsabilidad del poder político era mantener a la tierra en total equilibrio con el Cielo, obligación que se llamó “Mandato del Cielo”. El propio Emperador era llamado *Tian Zi* (El hijo de los cielos).

A las distintas disposiciones de las estrellas en el firmamento se les fue asignando significados astrológicos, tanto para la predicción de eventos en la vida diaria como indicadoras de estrategias políticas. Eso hizo que la astronomía se convirtiese rápidamente en una herramienta política poderosa. Una consecuencia muy positiva del Mandato del Cielo fue que se formó un grupo de funcionarios imperiales que incluyó a astrónomos, astrólogos y meteorólogos cuya obligación era monitorear le Cielo para captar los presagios astrológicos y los fenómenos astronómicos. Las observaciones realizadas a lo largo de 4000 años, llevaron a importantes descubrimientos astronómicos. Fenómenos como eclipses, cometas y explosiones de estrellas fueron minuciosamente descriptos. El más antiguo documento sobre cometas, es un dibujo llamado *Atlas de seda de los cometas* y fue encontrado en 1973 en una tumba de la zona de Mawangdui, cerca de Changsha en la Provincia de Hunan. El atlas data de alrededor de 185 a.C., y se encuentra actualmente en el Museo Provincial de

[31] Para las justificaciones de la Astrología antigua, ver Duhem *SM,* II. 274 ss.

Hunan. Representa una variedad de formaciones de cometas que demuestran cuan cuidadosas eran las observaciones hechas durante la Antigüedad. Se describen formaciones conocidas como “adivinaciones vapor nube " y "adivinaciones estrella” que se consideraban presagios de victoria o de derrota en las batallas. En el manuscrito están pintadas diferentes tipos de cabezas y colas de los cometas, lo que demuestra que, en esa época, la observación de un cometa ya era algo muy preciso.

1 – 11.- Astronomía en la India.

Las primeras referencias a la Astronomía en la India se encuentran en el Rig Veda, que datan del siglo XXI a.C. Durante los siguientes 2500 años, la Astronomía constituyó uno de los estudios más importantes en la cultura de esa región, lo que se encuentra bien documentado en varios tratados escritos durante ese período. Al igual que en otras civilizaciones antiguas, las observaciones astronómicas fueron empleadas para explicar los cambios verificados en la región y también como medio para predecir cambios en el futuro próximo, es decir, como una astrología de presagios. Pero más allá de esta vinculación de la Astronomía con la Astrología, los conocimientos astronómicos se fueron ampliando en forma independiente, lo que permitió llegar a conclusiones originales, como:

- Cálculos para establecer la ocurrencia de eclipses.
- Determinación de la circunferencia terrestre.
- Esbozo de una teoría de la gravitación.
- Conclusión de que el Sol es una estrella.
- Determinación del número de planetas del sistema solar.

Se han encontrado documentos de hace unos 5000 años, que marcan el comienzo del año e indican el equinoccio de primavera. En varias ciudades milenarias de la India se han encontrado altares construidos y orientados como para hacer observaciones astronómicas. Los textos que describen sus diseños datan del primer milenio a.C. pero se refieren a altares construidos mucho antes.

El libro Shatapatha Brahmana de Yajnavalkya (*circa* 1800 a.C.) establece que cada 95 años el Sol y la Luna sincronizan su movimiento, aunque considera que ambos giran alrededor de la Tierra

Se ha encontrado un texto del primer milenio a.C., el Vedāṅga Jyotiṣa, atribuido a Lagadha, llamado el primer astrónomo de la India, que muestra no sólo los avanzados conocimientos astronómicos de esa época sino que contiene una sofisticada astrología de horóscopos.

El astrónomo Aryabhata, (456 – 550 d.C.) desarrolló un sistema matemático que considera a la Tierra girando sobre su propio eje y a los planetas girando alrededor del Sol. En su descripción heliocéntrica, desarrolla teorías matemáticas para explicar los movimientos de los planetas.

En este libro, modifica en concepto de duración del día y en vez de tomar el lapso de una medianoche hasta la otra, considera al día como el período que va de un amanecer hasta el siguiente. Aryabhata calculó la rotación sideral (rotación de la Tierra con respecto a las estrellas fijas) equivalente a 23 horas 56 minutos y 4,1 segundos — el valor aceptado actualmente es 23:56:4.091 — También calculó el año sideral medio en 365 días 6 horas 12 minutos y 30 segundos. Esto es, con un error de 3 minutos y 20 segundos por año sideral. Siendo el valor que calculó el más aproximado de todos los expresados en la Antigüedad. Estimó que el perímetro de la Tierra era 39968,06 *km*, que comparado con el valor actual 40075,88 *km* es un 0,27% menor. En vez de considerar que los eclipses se debían a nodos en las trayectorias del Sol y de la Luna, fue el primero en enfocar el problema desde el punto de vista de las sombras proyectadas o recibidas. De esta manera, un eclipse lunar se debe a que la Luna entra en el cono de sombra de la Tierra. Mediante este tratamiento desarrolló un aparato matemático para estimar la parte eclipsada de la Luna. Su método fue seguido por los astrónomos indios, y es tan bueno que en el siglo XVIII, el astrónomo Guillaume le Gentil, encontró que las predicciones hechas en la India respecto del eclipse lunar del 30 de agosto de 1765 quedaron cortas en 41 segundos, mientras que las suyas propias se habían excedido en 68 segundos. Aryabatha hizo también contribuciones importantes a las matemáticas. Para su época, encontró el valor más aproximado de π con cinco dígitos: 3,1416. Estableció que el área de un triángulo se obtiene multiplicando la perpendicular a un lado por la mitad de ese lado. También trabajó con ecuaciones indeterminadas.

Figura 1.7. Observatorio astronómico en Jaipur.

Bibliografía

Luckenbill, D. D., (**1927**):*Ancient Records of Assyria and Babilonia*, Vol. II.,University of Chicago Press, Chicago.

Neugebauer, O.,: ―The History of Ancient Astronomy. Problems and Methods‖, *Journal of Near Eastern Studies,* Vol. IV, Nº 1, January 1945, pp 2 -33.

Neugebauer, O., (**1969**): *The Exact Sciences in Antiquity,* Dover Publications Inc., Mineola, N.Y.

Neugebauer O., The Transmission of Planetary Theories in Ancient and Medieval Astronomy. *Scripta Mathematica* (22): 165-192.

Sarton, G., (**1952**): *A Guide to the History of Science*, Chronica Botanica Company, Waltham, Mass.

II CIENCIA GRIEGA

2 – 1.- Introducción

En la bibliografía científica, es bastante común considerar a la ciencia que se desarrolló en la Antigüedad en el Cercano Oriente, Norte de África y Europa como "*ciencia griega*". La mayoría de los autores concuerdan que el desarrollo de esta actividad comenzó en Grecia con Tales de Mileto que vivió, aproximadamente, entre el 625 y el 546 a.C. Si bien muchos documentos referidos a las actividades científicas efectuadas en ese período se conocen desde hace siglos, recién en el siglo XIX se descifraron los jeroglíficos egipcios y la escritura cuneiforme mesopotámica. De esta manera se pudo completar gran parte del conocimiento acerca de los logros científicos en Medio Oriente y Egipto.

2 – 2.- Homero y Hesíodo

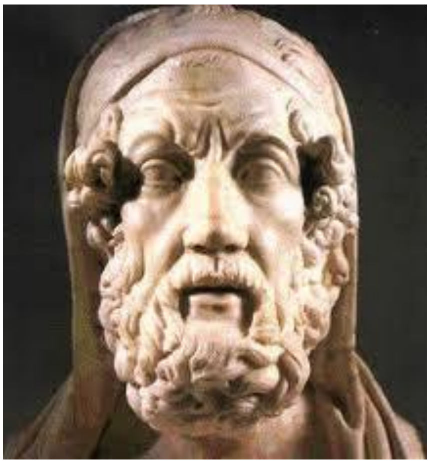


Figura 2.1. Homero

En el mundo griego antiguo, la función de la escritura fue la de fijar el contenido teórico de la tradición oral mediante la cual se transmitían los valores, las instituciones, las concepciones del mundo, del hombre y del más allá, y las reglas para la vida en comunidad. Eso fue plasmado en la Ilíada y la Odisea de Homero (s. IX - s. VIII a. C.), que, en conjunto, constan de 15000 versos. Luego, Hesiodo (s. VIII- s. VII a. C.) escribió Los trabajos y los días y la Teogonía. En esta segunda obra se realiza una genealogía de los dioses olímpicos.

Las obras de Hesíodo se consideran fundadoras de la poesía didáctica y moralista que rivalizaba con los valores heroicos y militares de la poesía de Homero.

Las diferencias entre ambos son representativas también de las diferencias culturales que se fueron produciendo entre el siglo VIII y el VII a. C. Tales diferencias se ponen en evidencia en el uso de tres términos griegos fundamentales:

Dike: en la mitología griega Dike, — hija de Zeus — representa a la justicia. Ella permitía la concordia entre nobles y campesinos. De modo general el término fue utilizado como "lo que debe esperarse en el curso normal de los acontecimientos" o "lo que se espera de un hombre en circunstancias normales", con lo que justo será "quien se ocupa de sus propios asuntos".

Areté: ese término se refiere a virtud, excelencia o perfección. Mientras que en el texto de Homero la areté representa la excelencia, perfección o virtuosismo de las destrezas aristocráticas tradicionales (vinculadas a la destreza militar), en la concepción de Hesíodo se refieren al esfuerzo, la constancia y el trabajo. Además, es un término siempre relativo, incompleto si está solo: areté es "lo que es bueno para alguien o algo". Por este motivo puede haber areté tanto de jinetes, como de atletas o zapateros.

Theos: "dios", entendido como aquello que por su fuerza supera a la persona y que ella no puede dominar. No se refería a la postulación de un Dios al que se atribuían todas las perfecciones, sino que mediante tal término se hacía referencia a todo lo que estaba fuera del control humano y que al hombre le provocaba asombro. A diferencia de la concepción judeo-cristiana, no se diría, por ejemplo, que Dios es bueno o que Dios es amor, sino que la amistad y el amor son dioses. En ese mismo sentido, la guerra, los cataclismos, etc., eran Theos.

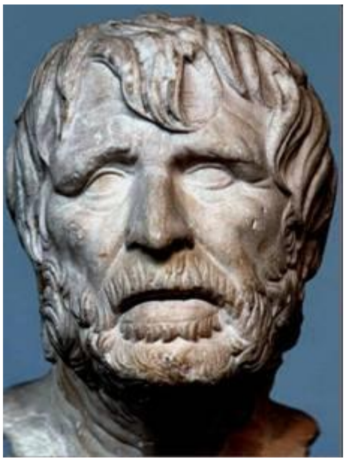


Figura 2.2. Hesíodo

Al extraer el contenido teórico de la poesía épica y didáctica griega, pueden señalarse las siguientes características:

Proyección de aspectos humanos y biológicos a la explicación de la naturaleza del universo.

Personalización e individualización de las causas; intencionalidad en el acontecer natural.

Figura 2.3. Modelo que reconstruye la visión del mundo según Homero.

Variación de la concepción del tiempo según la memoria colectiva recurriendo, en algunos casos, a la concepción circular del tiempo.

Pero para el surgimiento de la filosofía natural griega, la escritura representa algo de mayor importancia que su contenido teórico. Una vez que la tradición oral quedaba fijada en el leguaje escrito surgió la posibilidad de comparar y criticar, de dudar y desconfiar y de esta manera comenzar a abandonar las explicaciones míticas. En la medida en que tales explicaciones fueron abandonadas se hizo necesario su reemplazo por nuevas concepciones sobre la naturaleza, los dioses y el hombre.

Pero en lo que coincidieron Homero y Hesíodo fue en su idea de un mundo que era un disco plano que, si bien no está plasmada con muchas palabras, se deduce de sus escritos. Sólo en este supuesto podría

Poseidón desde las montañas de Solym en Pisidia, ver al Odiseo en Scheria en el lado opuesto de Grecia, o Helios en su salida y puesta divisar a su ganado en la isla de Thrinakia. Alrededor de este disco plano, en el horizonte, corre el río Oceanus, rodeando a la Tierra y que fluye de nuevo sobre sí mismo (ἀψόρροος) del cual todas las aguas toman su lugar y pasan a través de canales subterráneos apareciendo como manantiales y fuentes de otros ríos. Sobre la Tierra plana se encuentra la bóveda del cielo, como una especie de cúpula semiesférica que la cubre exactamente. Por debajo de la tierra está el Tártaro, cubierto por la Tierra y formando una especie de bóveda simétrica con el cielo; Se supone que Hades está por debajo de la superficie de la Tierra a una distancia hacia abajo tal como es arriba la altura del cielo. Las dimensiones del cielo y de la Tierra, sólo se indican indirectamente. Hefesto, arrojado del Olimpo, cae durante todo el día hasta la puesta del Sol. Por otra parte, de acuerdo con Hesíodo, un yunque de hierro tomaría nueve días para caer del cielo a la Tierra, y de nuevo nueve días para bajar desde la tierra al Tártaro. La bóveda del cielo permanece siempre en la misma posición, inmóvil; el Sol, la Luna y las estrellas se mueven alrededor del cielo, levantándose de Oceanus en el este y sumergiéndose otra vez en el oeste. No sabemos que pasa con los cuerpos celestes entre la aurora y el crepúsculo, No pueden pasar girando por debajo de la Tierra, porque el Tártaro nunca está iluminado por el Sol. Se supone que, posiblemente, deben flotar alrededor de Oceanus yendo por el Norte hacia los puntos en los que se levantan en el Este, pero sólo escritores posteriores representaron a Helios como llevado de vuelta sobre el agua, dormido y en una cama de oro, o en un cuenco de oro[1].

Analizando los poemas, se observa en Hesíodo un avance considerable en comparación con Homero. Homero menciona, además del Sol y la Luna, a la estrella de la mañana, a la estrella de la tarde, a las Pléyades, a las Híades, a Orión, a la Osa Mayor (que también es llamada “la carreta”, y que gira alrededor del mismo punto y mira a Orión); Sirio (la estrella que se levanta al final del verano … Llamada entre los hombres “el perro de Orión”. Al menos por los textos, parecería que la Osa mayor era la única constelación conocida por Homero. Los usos astronómicos para marcar localidades o fijar tiempos durante el día o la noche son muy vagos: el amanecer, mediodía y el crepúsculo, la noche se dividía en tres períodos.

Hesíodo menciona prácticamente las mismas estrellas que Homero, las Pléyades, las Híades, la Osa mayor, Orión, Sirio, y Arcturus. Pero, fue mucho más útil que Homero al hacer uso de los fenómenos celestes para determinar los tiempos y las estaciones del año. Por ejemplo, marcó el momento de la siembra en el comienzo del invierno por el ajuste de las Pléyades a principios del crepúsculo, estableció el tiempo óptimo para la cosecha con el levantamiento temprano de las Pléyades — el 19 de mayo en el calendario juliano — marcó el tiempo de trilla a principios del levantamiento de Orión (9 de julio en el calendario juliano), pudo establecer con buena aproximación los solsticios de verano e invierno, la fecha del inicio de la primavera, etc. En la parte final de “Los trabajos y los días” estimó el período lunar en 30 días y dividió al mes en tres partes de 10 días cada una.

[1] Athenaeus, Deipnosoph. xi. 38 – 9.

Figura 2.4. Una estatua de bronce que representa a Zeus (Museo Arqueológico, Firenze).

2 – 3.- Mito y filosofía:

Se atribuye a Jenófanes de Colofón (ca. 570 - ¿?)[2] el haber expresado una de las primeras críticas claras a la religión tradicional y a las formas sociales basadas en el mito. Expulsado por los medos en el año 546, peregrinó varias décadas como recitador de poemas homéricos y cantor ambulante hasta establecerse en la ciudad de Elea, al sur de Italia. Quizá por la propia independencia de su vida y su conocimiento de diversas costumbres y creencias formuló sus primeras críticas frente al dogmatismo mítico:

"Los etíopes sostienen que sus dioses son chatos y negros y los tracios. Que los dioses tienen azules los ojos y son rubios como ellos" (*DK* 21B16)[3].

"Pero es que si los bueyes, caballos y leones pudieran tener manos y pintar con ellas como los hombres, los caballos pintarían a sus dioses como caballos y como a bueyes los bueyes" (*DK* 21B15).

También se percibe en Jenófanes que ya se había desarrollado un fermento decisivo para acentuar la racionalidad, la claridad y la comunicación intelectual. A ello se debe, tal vez, su crítica a los juegos deportivos, en los que veía la exaltación, sin sentido, del apasionamiento:

"Pues más valiosa que la fuerza de los hombres y corceles es nuestra sabiduría. […] Pues si se contara entre los ciudadanos un buen púgil o uno excelente para competir en el pentatlón no por ello estaría la ciudad en mayor orden […] ni se llenarían con tales cosas sus graneros" (DK 21B2).

Jenófanes abordó también otras cuestiones filosóficas que luego fueron desarrolladas por otros filósofos de Elea:

"Jenófanes fue el primero que afirmó la unidad de todo y se dice que Parménides fue su discípulo" (*DK* 21A30).

Esa idea de unidad parece asomar en uno de sus propios fragmentos:

---

[2] Censorinus *De die natali* c. 15. 3, p. 28. 21, ed. Hultsch, dice que Jenófanes escribía poesía a los 92 y que murió después de los 100 años.

[3] De los trabajos de los presocráticos sólo quedan citas en escritos de autores posteriores. Estas citas fueron compiladas por Hermann Diels (1848-1922) en *Die Fragmente der Vorsokratiker* con revisiones de Walther Kranz y sucesivos editores que se ha vuelto un estándar en filosofía presocrática en la que cada cita tiene un número *DK*.

"De la tierra nacen todas las cosas y en la tierra terminan todas". "Porfirio dice que Jenófanes consideraba como principios lo seco y lo húmedo, es decir, tierra y agua, y menciona un pasaje que muestra esto: tierra y agua son todas las cosas que nacen y crecen" (*DK* 21A29).

Este pensamiento, unido a su crítica teológica, le aproximaba al parecer a esa forma de panteísmo que le atribuyó Aristóteles:

"Jenófanes, con la vista puesta en el universo entero dijo que lo uno es la divinidad" (*Metafísica*, I, 986 b21).

Pero esa unidad, que está llena de inteligencia y orden y que se manifiesta en la naturaleza, deja abierta a los hombres la esperanza de ir poco a poco entendiéndola y conociéndola:

"A los mortales los dioses no se les enseñaron todo desde el principio, sino que ellos, en su búsqueda a través del tiempo, fueron encontrando lo mejor." (*DK* B18).

Según Jenófanes, las estrellas, incluidos los cometas y meteoros están hechos de nubes envueltas en llamas que se extinguen cada día y son encendidas cada noche como carbones y esos sucesos constituyen su ascenso y su puesta. También el Sol está hecho de nubes en llamas que se forman cuando la humedad del aire se inflama y las partículas incandescentes se unen. La Luna se forma por compresión de las nubes y su luz es propia. Cuando el Sol se pone, se extingue y cuando sale se inflama nuevamente. El Sol también se apaga cuando hay un eclipse. Las fases de la Luna son causadas por su extinción parcial.

2 – 4.- Características de de la cosmología antigua: los filósofos milesios y el problema de la realidad última.

Las críticas e ironías de Jenófanes contra el mito son sintomáticas de una sensibilidad creciente: el rechazo de la contradicción. En el caso de Jenófanes esto está expresado al decir:

"Los dioses hacen leyes que ellos mismo violan" (*DK* 21B7).

Este rechazo manifiesto a la contradicción se convirtió en una de las características distintivas del pensamiento filosófico antiguo y, a partir de ese pensamiento, de toda la cultura occidental. Esto no significa que el mito careciera de cierta racionalidad, sino que el *tipo de explicación* que se utilizó para describir el mundo excluía la explicación mítica. La regularidad en la producción de ciertos fenómenos naturales no era el producto del capricho arbitrario de los dioses. Cuando los cambios en la naturaleza dejaron de adjudicarse a la intención de tal o cual dios, la búsqueda de la explicación de su ocurrencia comenzó a ser una forma rudimentaria de *método científico.* Las explicaciones *naturales* propuestas debían hacer referencia a aspectos constantes de la naturaleza y de sus procesos de transformación. Por eso, a los primeros filósofos del mundo griego se los llamó *filósofos de la physis* o *filósofos de la naturaleza*. Tales filósofos surgieron en Jonia, en particular en la ciudad de Mileto, por eso se los conoce también como filósofos jónicos o la escuela milesia.

El rechazo de las explicaciones de base mítica obligó a buscar nuevas explicaciones que cumpliesen con la intención de evitar las contradicciones. Para ello, los filósofos milesios comenzaron por formularse la pregunta más general de todas: ¿*Qué es la naturaleza*? Dejando de lado sus creencias primitivas, trataron de encontrar la respuesta mediante la observación y la reflexión.

Obviamente, la complejidad de los fenómenos naturales obligó a modificar la pregunta y a inquirir más bien por los *orígenes* de la naturaleza y por indagar cuáles son los *elementos fundamentales* a partir de los cuales se origina.

Al respecto, Aristóteles señaló:

“Los primeros filósofos creyeron que los principios de la naturaleza de la materia fueron los principios de todas las cosas, aquello de lo que todas están hechas” (*Metafísica*, 943 b).

Figura 2.5. Imágenes de las ruinas de Mileto.

Aristóteles señaló más adelante que:

“Los primeros filósofos creyeron que los principios de la naturaleza de la materia fueron los principios de todas las cosas, aquello de lo que todas están hechas” (Metafísica, 943 b).

Pero términos tales como “materia” y “elemento” fueron introducidos en el siglo IV a. C., lo que dificulta pensar que fueron efectivamente utilizados por los milesios en el siglo VI a. C. Por este motivo a veces se piensa que la pregunta de los primeros filósofos puede haberse referido más al *orden de surgimiento* de los elementos naturales, más que al *elemento último* a partir de lo cual todo está constituido.

Los tres grandes representantes de la filosofía jónica en su primer período son:

2 – 4.1.- Tales de Mileto.

Tales hijo de Examies, nació, probablemente, en el 624 a. C., aunque Apolodoro escribió que nació en el 640 ó 639 a.C., Según Heródoto, sus ancestros paternos eran fenicios, en cambio su madre Cleobulina era griega. Fue un verdadero polimata, al punto que en el 581 fue declarado uno de los 7 sabios, por sus conocimientos sobre Matemática, Astronomía, ingeniería, leyes, idiomas, Filosofía, etc. Entre los cosas que se le adjudican, está el haber predicho un eclipse de Sol, lo que requería conocimientos de Astronomía matemática desconocidos en su época y que recién comenzaron a desarrollarse con Hiparco (siglo II a.C.). Al respecto Theon de Esmirna, escribió[4]: "Eudemus cuenta en su Astronomía, que Tales fue el primero en *descubrir* (*εὗρε πρῶτος*) *el eclipse de Sol* y el hecho de que los solsticios no son siempre iguales"


Figura 2.6. Tales de Mileto

En lugar del "vacío abismal" de Hesíodo, lo primero debe haber sido una sustancia común: *el agua.* La mera observación de la "creación" de insectos en el agua podría haber dado fundamento a esa hipótesis

Esta idea del agua como sustancia común de la cual surgen todas las entidades individuales, se asocia con la idea de que el origen material de todas las cosas es el mismo y al cual todas las cosas retornan.

La sustancia material persiste, pero lo que cambia son sus cualidades: lo *húmedo*, lo *seco*, lo *frío* y lo *caliente.*

Dado que la sustancia fundamental en sí misma no cambia, sólo hay transformación y no cambio en un *sentido absoluto*.

El agua sería el elemento primordial cuyas transformaciones van más allá de lo que el hombre puede dominar. Las transformaciones del agua — las lluvias, las corrientes fluviales, las olas, etc., — hacen que para Tales el agua sea *theos.* De allí que haya afirmado "Todo está lleno de dioses". Sin embargo, a diferencia del pensamiento mítico, si bien el agua es *theos*, su comportamiento no obedece a caprichos divinos, sino que responde a ciertas *regularidades*.

En cuanto a la Astronomía, a diferencia de lo que hicieron Homero y Hesíodo, usar las recurrencias en el firmamento para asociarlas con regulaciones en la vida diaria, Tales se ocupó de estudiar las revoluciones de los cuerpos celestes, tratando de explicar esos fenómenos y de formular hipótesis sobre sus causas. Por ello, es que la Astronomía griega comienza verdaderamente con Tales. Diógenes Laercio, también mencionó esto[5]. Clemente de Alejandría[6] dio más detalles sobre esto diciendo que el eclipse que predijo Tales ocurrió durante la guerra entre Medos y Lydios y fue durante la 50º Olimpíada, o sea entre 580 y 577 a.C.

---

[4] Theon of Smyrna, ed. Hiller, p. 198. 14-18.
[5] Diog. L. i. 23 *DK*, i^2, p, 3. 19-21).
[6] *Stromat*, i. 65.

No es cierto que Tales haya considerado esférica a la Tierra. El mismo Aristóteles[7] escribió que Tales consideraba a la tierra como un disco o un cilindro, como un tronco flotando en el agua, con el cielo superpuesto en forma hemisférica cuyos bordes estaban unidos al agua primordial. De esta concepción se deduce que para Tales, el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas no continuaban su trayectoria circular entre la puesta y la salida, sino (como después propuso Anaxímenes) rodeaban lateralmente a la Tierra.

Tales falleció en el año 547 a.C.

2 – 4.2.-Anaximandro de Mileto.

Figura 2.7. Anaximandro de Mileto

Anaximandro, hijo de Praxíades, nació probablemente en el 611– 610 a.C. y fue amigo y discípulo de Tales. Muchos autores lo consideran el fundador de la filosofía griega. Expresó su pensamiento en un tratado formal llamado "*Sobre la Naturaleza*"[8] Elaboró aún más la idea de que las cosas se resuelven en lo mismo de lo cual provienen reparando las injusticias según el orden del tiempo. Dado que las cosas adquieren sus características propias y su límites a lo largo del tiempo, aquello de lo cual todo se origina no puede tener límite o característica alguna. Dicho de otra manera, aquello a partir de lo cual todo se origina carece de las características de cualquiera de las cosas individuales que de allí surgen, pero es al mismo tiempo el fundamento común para todas. A este fundamento común carente de características específicas Anaximandro lo llamó *Apeiron*: lo ilimitado (e infinito en tanto toda finitud implica límite).

Desde el punto de vista epistemológico, se podría considerar al *apeirón* como un *término teórico* (no observacional).

Lo caliente, lo frío, lo húmedo y lo seco se encuentran entremezclados en el *apeirón*, al separarse dan lugar a fuego, aire, agua y tierra, lo cuales a su vez generan la naturaleza.

Anaximandro desarrolló el primer modelo astronómico mecánico conocido. Los cuerpos celestes fueron concebidos como anillos fuego o, más precisamente, de porciones de aire comprimido rellenas de fuego. Tal presión hace que expulsen llamaradas. De los anillos sólo se observan porciones porque están rodeados por una capa de niebla que los oculta, aunque no de modo completo.

---

[7] Aristóteles, *De cœlo* ii. 13, 294 a 30.
[8] Se considera que éste es el primer tratado de filosofía de la cultura occidental.

Los eclipses también se explican como el *cierre* de uno de tales orificios por esa niebla. Esta "explicación" es de carácter *mecánico*.

Hay tres anillos: Sol, Luna y estrellas fijas con diámetros de veintisiete, diecinueve y nueve veces el de la Tierra. Las estrellas fijas están suspendidas por debajo del Sol y de la Luna, y el Sol es el más distante de los cuerpos celestes.

La Tierra es un cilindro aplanado con un ancho tres veces mayor al de su altura. Como la cosmología es *esférica* y la Tierra está en el centro de los anillos, — equidistante de todos los puntos exteriores de la esfera — se concluye que no es necesario preguntarse sobre qué está *apoyada*. Dado que en una esfera todo cae hacia el centro, el centro es el *fondo* y el punto de mayor apoyo. De esta manera se asocia el geo*centrismo* con el *geoestaticismo*[9]. Mover la tierra implicaría alejarla del centro y, por ende, de su punto de apoyo.

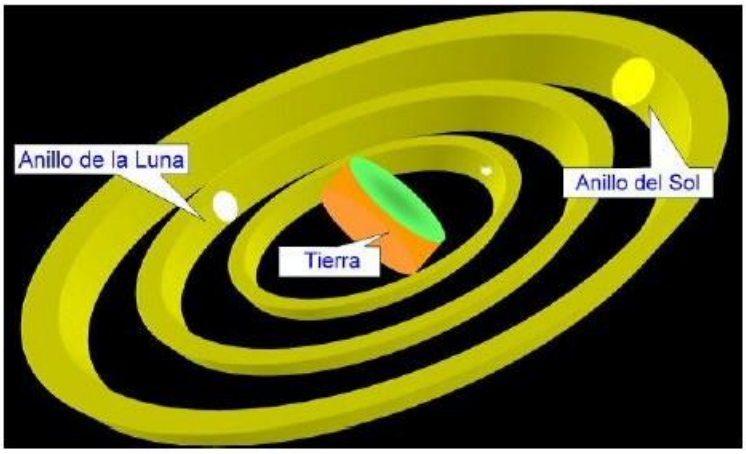


Figura 2.8. Esquema del modelo de Universo de Anaximandro

La historia de que Anaximandro inventó el gnomon[10] (o reloj de Sol con aguja vertical) es incorrecta, ya que Herodoto escribió que los griegos aprendieron el uso de gnomon de los babilonios.[11] Anaximandro debe haber sido el primero en introducir el gnomon en la Astronomía griega y mostrar con se establecen los solsticios, el tiempo, las estaciones y los equinoccios.

[9] Aristóteles admitió esta hipótesis, pero afirmó que no es cierta con un argumento interesante: Supongamos que hay un hombre hambriento y sediento con todo tipo de alimentos, agua y vino dispuestos a igual distancia alrededor de él, pero que moriría de inanición al no tener alguna razón para estirar el brazo en una u otra dirección.(*De Cælo* ii 295 b 32.

[10] Diog. Larcio. ii. I (*DK.* i^2, p. 12. 3).

[11] Herodoto, II. 109.

Otro de los méritos de Anaximandro es el de haber confeccionado el primer mapa de la tierra habitada[12] sobre la base de las informaciones de los viajeros que llegaban a Mileto. Se dice que Hecatacus corrigió el mapa de Anaximandro y que fue objeto de gran admiración.

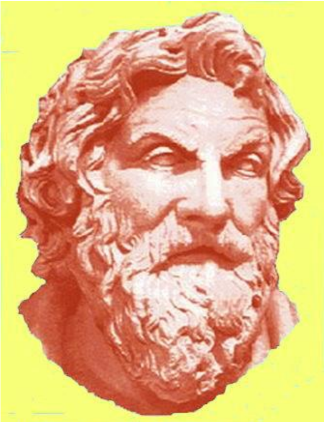


Figura 2.9. Anaxímenes de Mileto

Teoría del origen de la vida: los seres vivientes surgieron a partir de lo húmedo la acción del sol (aquí tomó en cuenta su observación acerca del surgimiento de seres vivos en el agua estancada). La generación es espontánea. Dada la invalidez inicial del ser humano, de ello se concluye que debe haber nacido de otra especie (aparentemente cierto tipo de pez).

Anaximandro falleció en el año 546 a.C.

2 – 4.3.- Anaxímenes de Mileto.

Según Diels, Anaxímenes nació en el año 585/84 y falleció en el año 528/24.

Elaboró una teoría menos abstracta que la de Anaximandro: sus afirmaciones se relacionan con procesos observables en la naturaleza.

Consideró al *aire* como elemento fundamental (*anterior* al agua). El aire es al mismo tiempo *a*) un principio infinito de los cuerpos simples y *b*) un principio vivo y dinámico (*pneuma*) que se opone a la pasividad de la materia.

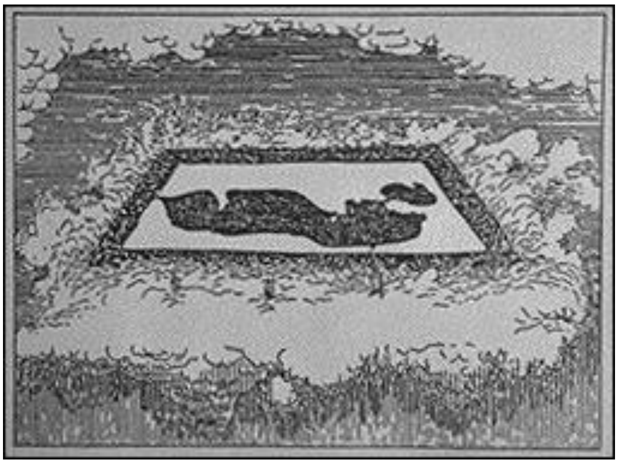


Figura 2.10. Mundo flotando en el aire según Anaxímenes

Anaxímenes desarrolló ideas más elaboradas de los mecanismos mediante los cuales las entidades adquieren sus características individuales. Además de observar el carácter fundamental del aire para todos los seres vivos, observó también que las plantas transpiran. Los mecanismos serían concebidos como *condensación* y *rarificación*.

De la escuela milesia puede decirse de modo general que contribuyeron a la tradición de escritura en prosa, justamente porque reaccionaron contra los cantos homéricos que utilizaban la rima para asegurar la transmisión fiel dentro de la cultura oral.

[12] Agathemero (de *Eratosthenes*), i. i (*DK.* I^2, p. 12. 36).

La sustancia última del mundo fueconsiderada por Anaxímenes como la sustancia misma de la vida, contribuyendo con ello a la imagen del universo como un *ser viviente*. Tal vez por este mismo motivo, ninguno de los fil´pososfos milesios hizo de la tierra el elemento fundamental (a pesar de su solidez), sino que la tierra fue concebida como condensación de elementos más *etéreos* y cambiantes.

En cuanto a su concepción del Universo, también sostuvieron que la Tierra es plana como una tabla[13] pero, en vez de que carece de apoyo como creía Anaximandro, sostuvo que flotaba sobre una masa de aire[14]

"El Sol, la Luna, los planetas y las estrellas, evolucionaron a partir de la Tierra, ya que de la Tierra surgió la humedad. Cuando la humedad se rarificó se produjo fuego y las estrellas *están compuestas de fuego que se ha levantado en alto*".[15] Si bien tanto el Sol como las estrellas están hechas de fuego, las estrellas no suministran calor debido a su lejanía. Las estrellas y el Sol no giran por debajo de la Tierra sino que al girar alrededor de ella (durante la noche) quedan tapadas por las montañas del Norte,

Anaxímenes introdujo una innovación, supuso que rodeando al Sol y a las estrellas hay cuerpos celestes de naturaleza térrea, que al no ser de fuego no se pueden ver pero que, en su movimiento pueden tapar a las estrellas de manera similar a la de la Luna cuando tapa al Sol. También permitía explicar la iluminación de la Luna por el Sol durante la noche y cómo la sombra de la Tierra puede provocar un eclipse de Luna.

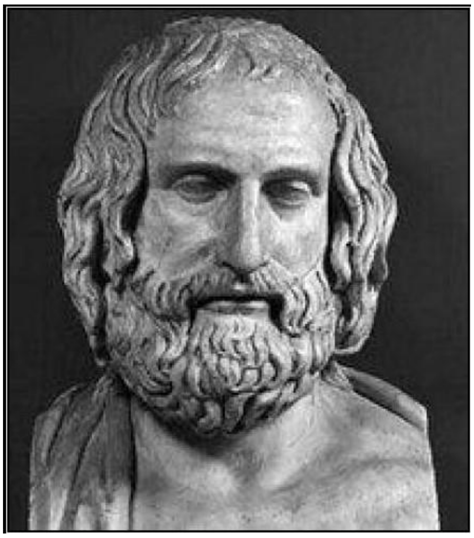


Figura. 2.11. Pitágoras de Samos

2 – 5.- Pitágoras de Samos.

Pitágoras hijo de Mnesarco nació en la isla de Samos en el año 572 a.C., aunque hay quienes a partir del hecho de que tanto la vida como las doctrinas de Pitágoras están cubiertas de un espeso velo legendario, llegan a dudar incluso de su existencia. En general, se admite que fue discípulo de Anaximandro y Anaxímenes y que estas doctrinas fueron ampliadas a partir de haber viajado a Egipto y entrado en contacto con las doctrinas sacerdotales. Se dice que fundó en Crotona — al sur de Italia — una comunidad de índole político religiosa que terminó despertando hostilidades que lo obligaron a huir y establecerse en Metaponto. Falleció a una edad avanzada, algunos dicen a más de ochenta años.

[13] Aecio. iii. 10. 3 (*D. G.* p. 377 ; *DK***.** i^2, p. 20. 26).
[14] {*D. G.* p. 560; *DK* i^2 p. 18. 40)
[15] {*D. G.* p. 560; *DK.* i^2 p. 18. 40)

De la observación de la relación existente entre la altura de los sonidos y las longitudes de las cuerdas de la lira dedujo la proporcionalidad numérica que rige la armonía tonal: 4, 6, 8, 9, 12, 16. Al comienzo esta idea de armonía se aplicó sólo a la octava o a una escala musical, y luego se la extendió a todas las esferas de la realidad. De su aplicación al cuerpo humano resultaba un concepto de "salud" como el *restablecimiento de la armonía*. En medicina, lo caliente y lo frío, lo húmedo y lo seco fueron considerados como *opuestos armónicos*. La *armonía* fue considerada el "catecismo de todas las virtudes", y lo más bello que existe. La armonía regula el derecho a la existencia por formar parte de un todo. En este sentido, la música puede ser utilizada con el fin de purificar el alma.

Pitágoras realizó ciertos *experimentos* acústicos simples (relación de los pesos de los martillos o recipientes con diferentes niveles de agua y las diferentes notas musicales). En este punto es necesario tener en cuenta el problema de los fragmentos y relatos: muchos de los experimentos aludidos no conducen a los resultados mencionados.

El descubrimiento de que los tonos musicales dependen de proporciones numéricas, la octava representa a la proporción 2:1, la quinta representa 3:2, la cuarta, 4:3, constituye la primera exposición de la *teoría de las medias* y de las proporciones en general, aplicada a entidades conmensurables (en que las cantidades se pueden expresar como una relación entre números enteros)

Los pitagóricos aceptaron una cosmología que, en parte, se basaba en la de Anaximandro. Sugirieron que los cuerpos celestes mantenían una disposición armónica y estaban distanciados de un fuego central según intervalos que correspondían con intervalos de la octava musical. Los movimientos circulares de los cuerpos celestes producían una música armónica: la *música de las esferas*. Esta música era imperceptible para el ser humano pues al escucharla desde el nacimiento estaba incorporada a su cotidianeidad.

La armonía del Universo y de la naturaleza no sólo era musical, sino también numérica. Posteriormente, Aristóteles escribiría

"… los llamados pitagóricos, que fueron los primeros en cultivar las Matemáticas, no sólo hicieron avanzar a éstas, sino que, nutridos de ellas, creyeron que sus principios eran los principios de todos los entes…" (*Metafísica*, A 5, 985B)

Las propiedades de los números, especialmente al combinarlos, resultaron tan sorprendentes que los pitagóricos buscaron constantemente analogías entres los números y las cosas, y llegaron a fundar una especie de mística numérica que tuvo enorme influencia en todo el mundo antiguo. Fórmulas como: $1 + 3 + 5 + ... + (2n - 1) = n^2$, que muestra que los cuadrados pueden formarse como sumas de los números impares sucesivos, aparecían a los pitagóricos como maravillosas. Otras fueron, por ejemplo, la divisiones de los números: pares, impares, perfectos (iguales a la suma de sus divisores), lineales y planos.

Los números fueron considerados, además como principios. Dentro de la escuela pitagórica algunos afirmaron la existencia de 10 principios u posiciones fundamentales:

1	Limitado	Ilimitado
2	Impar	Par
3	Uno	Muchos
4	Derecho	Izquierdo
5	Masculino	Femenino
6	En reposo	En movimiento
7	Recto	Curvo
8	Luz	Oscuridad
9	Bueno	Malo
10	Cuadrado	Oblongo

La tabla tenía una significación *moral*, la primera columna representan algo *perfecto* y la segunda algo *imperfecto*. Este *dualismo* (entre lo perfecto y lo imperfecto) puede ser *superado* cuando se considera lo perfecto como algo *limitante* de toda posible imperfección. Así, por ejemplo, lo recto es limitado mientras que lo curvo es ilimitado ya que puede tomar cualquier dirección[16]. Los pitagóricos consideraron que la armonía numérica rige no sólo para el mundo terrenal, sino en la relación entre el orden cósmico y el orden moral.

La cosmología pitagórica, según Filolao de Crotona (siglo V a.C.) que fuera discípulo de Pitágoras, es la primera conocida que desplaza la Tierra del centro y la concibe como una esfera girando en torno a un núcleo ardiente (Hestia)[17]. Filolao sostenía que la Tierra no era lo suficientemente noble para ocupar el lugar central, Algunos autores dudan que Pitágoras haya compartido esa opinión. Filolao postularía también que, además de la Tierra girando alrededor de la Hestia, existía una anti-Tierra girando también alrededor de ese núcleo ardiente.

Al leer las hipótesis de los antiguos astrónomos, uno podría pensar: Partiendo de esas hipótesis disparatadas ¿Qué tipos de resultados podrían obtener? Pero el razonamiento debería ser de este tipo: A partir de los resultados experimentales, ¿como podrían justificarlos teóricamente? El comportamiento de los cuerpos celestes son datos de la base empírica y, de acuerdo con el instrumental disponible y la habilidad del observador, pueden conocerse con bastante precisión, En cambio, las hipótesis astronómicas son entes teóricos, y lo que intenta el observador es encontrar alguna relación que las vincule con los hechos experimentales. Para dar una explicación "teórica" debe recurrir a un "salto creativo", imaginar que existe alguna regla de correspondencia entre la suposición teórica y los hechos de la realidad. En la generalidad de los casos, el experimentador corrobora su teoría mediante la contrastación con la realidad pero basta que aparezcan resultados que refutan la hipótesis para que esta deba ser modificada, restringida a determinados casos y aún descartada .Veamos

[16] Por supuesto, hoy generaría una gran polémica afirmar que lo masculino es perfecto y lo femenino no.

[17] Pitágoras no dejó nada escrito. Sus enseñanzas se transmitieron por tradición oral. Filolao fue el primer pitagórico en escribir una exposición sobre el sistema pitagórico. Fue contemporáneo de Sócrates y de Demócrito y se sabe que vivió en Tebas en las últimas décadas del siglo V a. C.

algunos resultados experimentales, publicados por Filolao (que él adjudicó a Pitágoras) sobre los períodos de revolución de los cuerpos celestes[18].

	Período de revolución	
	Filolao (siglo V a.C.)	Valores actuales
Saturno	10.752,75 días	10.759,22 días
Júpiter	4.301,10 "	4332,58 "
Marte	693,71 "	686,98 "
Venus Mercurio Sol	364,50 "	365,26 "
Luna	29,50 "	29,53 "

Tratando de solucionar uno de los tres grandes problemas de la matemática antigua, el de la *duplicación del cubo*, Pitágoras encontró la "demostración" del teorema del cuadrado de la hipotenusa[19].

En la formulación antigua, el Teorema de Pitágoras se enunciaba como: "El área del cuadrado construido sobre la hipotenusa, de cualquier triángulo rectángulo es igual a la suma de las áreas de los cuadrados construidos sobre los catetos"[20].

En la formulación moderna el teorema se enuncia como: "En *todo* triángulo rectángulo, el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos"

Además del desarrollo de métodos matemáticos *deductivos*, entre los pitagóricos existían algunos aspectos religiosos, el más importante era la inmortalidad del alma. El cuerpo era la prisión del alma y por su calidad material menos puro que ella.

Pitágoras sostuvo una *jerarquía* entre los hombres — que es un antecedente de la teoría platónica del alma *tripartita* — los que compran y venden (amantes de la ganancia), los que compiten (amantes del honor), los que contemplan (amantes de la sabiduría.)

El universo era concebido como una criatura viviente pero, además, como Uno, Eterno e indiviso. Por el contrario, los hombres eran concebidos como Múltiples, Mortales y Divididos.

---

[18] Schiaparelli, *I precursori* pp. 7 – 8.

[19] Existen evidencias de que en otras culturas también se conocía el teorema. Por ejemplo, los hindúes explícitamente enuncian una regla equivalente a este teorema en el documento *Sulva – Sutra* que data del siglo VII a.C. Por otra parte, los Babilonios aplicaban el teorema 2000 años a. C., pero tampoco se conoce de la existencia de una demostración, ya que la geometría no era para ellos una teoría formal sino un cierto tipo de aritmética aplicada, en la cual las figuras venían representadas en forma de números. A su vez, los egipcios conocían que el triángulo de lados 3, 4 y 5 es rectángulo pero no se conoce de la existencia de alguna regla que sustentase el conocimiento del teorema.

[20] En las escuelas se suele "demostrar" el teorema de Pitágoras, dibujando tres cuadrados cada uno de lado igual a uno los lados del triángulo rectángulo y comparando los cuadrados de las áreas de sus superficies. En rigor, esa no es una "demostración" ya que implica que la superficie de todo triángulo rectángulo es plana.

2 – 6.- El problema del cambio y la solución atomista.

2 – 6.1.- Heráclito de Éfeso.

Pocas son las cosas que se saben de la vida de Heráclito. Nació en Éfeso, ciudad al norte de Mileto, probablemente en 544/40. Pertenecía a una familia aristocrática y, — si nos atenemos a alguno de los fragmentos que se conservan de su libro, y a testimonios de sus contemporáneos — no se llevó muy bien con sus conciudadanos. Escribió una obra llamada "Sobre la naturaleza" que era un título común de libros escritos por otros filósofos anteriores. Es probable que se tratara de un conjunto de sentencias recopiladas en forma de libro, hipótesis apoyada en el carácter enigmático y oracular de los fragmentos que hoy en día se conservan, carácter que ya en su época le valió el sobrenombre de "El oscuro".

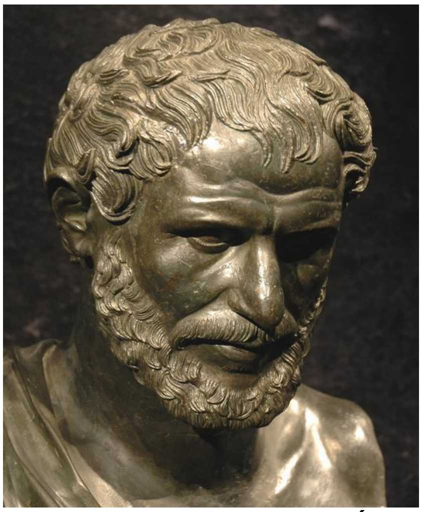


Figura 2.12. Heráclito de Éfeso

Contra la teoría de la existencia de un único elemento fundamental estable escribió:

"El fuego vive por la muerte del aire, y el aire por la del fuego; el agua vive por la muerte de la tierra y la tierra por la del agua"

Su pensamiento muestra una evolución respecto de los primeros filósofos jónicos: ya no se encasilla en el problema de la *sustancia material originaria*.

Según Teofrasto[21] (filósofo y botánico griego, discípulo y sucesor de Aristóteles en la dirección del Liceo en el 323 a. C.) Heráclito sostenía que el fuego era el elemento primordial de todas las cosas (en el mismo sentido en que Tales había postulado el agua, Anaximandro el apeirón y Anaxímenes el aire). Sin embargo, el fuego proporciona una especie de símbolo del mundo en constante evolución, de metáfora del cambio constante. Esto está claramente expresado en sus dos principios centrales:

todo nace de la lucha

todo está en constante flujo (teoría del fluir universal).

Según Copleston[22]:

[21] Teofrasto de Lesbos (371 – 287 a.C) Filósofo y botánico griego, discípulo y sucesor de Aristóteles en la dirección del Liceo en el 323 a. C.

[22] **Copleston F.**, (**1984**): *Historia de la Filosofía*, Vol. I. Ariel Filosofía. Teruel, p. 245.

"Heráclito decía que el cambio sigue dos vías, una hacia abajo y la otra hacia arriba, y que en virtud de este cambio es como se hace el cosmos. El fuego, al condensarse, se humedece y comprimido se convierte en agua; el agua, al congelarse se transforma en tierra. Y a esto él lo llama la vía hacia abajo. Viceversa, la tierra se licua y de ella sale el agua, y del agua todo lo demás, pues él lo atribuye casi todo a la evaporación del mar. Y esta es la vía hacia arriba." (Copleston, Historia de la Filosofía, Vol. I)

Heráclito sostuvo que:

"El orden del mundo nada tiene que ver ni con los dioses ni con el hombre: siempre fue, es y será así: un fuego eterno que llega a ser según ciertas proporciones y que deja de ser según ciertas proporciones"

Es importante destacar que si bien todo está en constante transformación — es decir, dejando de ser lo que es y llegando a ser lo que no es — tal transformación y cambio no es azaroso, sino que está regulado por ciertas proporciones.

De esta manera, Heráclito incorpora a la noción de ser de sus predecesores, la noción de devenir o flujo, al que consideró una realidad básica subyacente a todas las cosas, incluso a las que aparentan ser las más estables.

Heráclito fue el primero en utilizar el término *logos* en una dimensión metafísica. La palabra logos se interpreta como *discurso* o *razón*. En la concepción de Heráclito sería la razón superior que actúa como principio ordenador del Universo, que establece las proporciones de los cambios y que la razón humana es capaz de captar.

"Mira dentro de ti y verás el *logos* que es lo común a todas las cosas"

Ese *logos*, que el hombre busca en su interior es algo tan primigenio como el fuego lo es en el mundo exterior.

La idea de que todo cambio está regulado por proporciones subyacentes, es de origen pitagórico. En la concepción de Heráclito, el *logos* implica proporciones inmutables, de carácter matemático, que regulan todas las tensiones entre los elementos que generan el cambio.

En los cambios, el énfasis deja de estar puesto en las *características individuales* (límites, determinaciones esenciales) y pasa a estar puesto en las *características relacionales* (los límites y determinaciones de las cosas son *interdependientes* de las límites y determinaciones de las cosas con las que están relacionadas). Estas características relacionales están en constante tensión y transformación mutua.

El orden se logra cuando se *equilibran* fuerzas opuestas. El reposo es siempre aparente y surge solamente como *equilibrio dinámico*.


Figura 2.13. Parménides de Elea

Supuso que todos los movimientos de los cuerpos celestes se debían a intercambios de materia entre la Tierra y el Cielo[23]. Ese intercambio se daba a través de la "vía hacia arriba", cuando la tierra al fundir, forma agua que se vaporiza y eleva dando lugar al aire y al fuego que se dirigen al Cielo y al interactuar con los cuerpos celestes provocan sus movimientos. Consideraba que el Sol calienta e ilumina más que las estrellas porque está a una distancia más corta de la Tierra y que si el Sol se apagase sería noche permanente sobre la Tierra porque el fuego de las estrellas estaría muy lejos para iluminar nuestro planeta.

2 – 6.2.- Parménides de Elea.

Se dice que nació entre el 530 y el 515 a.C., que fue pitagórico y que abandonó dicha escuela para fundar la suya propia, — con claros elementos anti-pitagóricos — en la ciudad de Elea, al sur de Italia. Se discute si fue o no discípulo de Jenófanes de Colofón. Los argumentos de Parménides establecerían, además, una influencia de la concepción del cosmos de los primeros filósofos de Mileto, sobre todo en la concepción de la legalidad de la naturaleza y la tendencia monoteísta que subyace a la búsqueda de un elemento originario único. También habría recibido, en este caso, la idea de la cultura no como un *don de los dioses*, sino como logro del *esfuerzo inquisitivo* del hombre.

Si bien hay mucha discusión sobre si Parménides reaccionó contra afirmaciones de Heráclito o viceversa, lo cierto es que ambos responden de un modo completamente diferente la pregunta ¿qué es lo que es?

De sus escritos sólo se han conservado 160 versos, pertenecientes a 19 fragmentos de un poema didáctico, titulado *Sobre la naturaleza*.

En este tratado, considerado el primero sobre el ser, abogaba por la existencia del "Ser absoluto", cuya no existencia declaraba inconcebible, pero cuya naturaleza admitía ser también inconcebible, ya que el "Ser absoluto" está disociado de toda limitación bajo la cual piensa el hombre. Sostenía que los fenómenos de la naturaleza son sólo aparentes y debidos, en esencia, al error humano; parecen existir, pero no tienen entidad real. Postulaba también que la realidad, "Ser verdadero", no es conocida por los sentidos, sino que sólo se puede encontrar en la razón. Esta creencia le convirtió en un precursor de la Teoría de las Ideas de Platón. La teoría de Parménides de que el ser no puede originarse del no ser, y que el ser ni surge ni desaparece, fue aplicada a la materia por sus sucesores Empédocles y Demócrito, que a su vez la convirtieron en el fundamento de su explicación materialista del Universo.

23 **Tannery, P.**, *Recherches sur l'histoire de l'Astronomie ancienne*. pp. 168, 169.

Entre sus afirmaciones más famosas se cuenta: "*El ser es y el no-ser no es*"; es decir, que el ser existe y la nada no existe. El fundamento de todo es el ente inmutable, único y permanente, el ente "es", simplemente, sin cambio ni transformación alguna.

Parménides escribió un poema filosófico en hexámetros del que se conservan la mayoría de los versos a través de Simplicio.

En dicho poema, luego de un proemio de carácter religioso, — en el que el autor realiza una serie de invocaciones para conseguir el favor de una diosa no identificada con el objeto de poder acceder al verdadero conocimiento, — Parménides expone su doctrina: la afirmación del ser y el rechazo del devenir, del cambio. El ser es uno, y la afirmación de la multiplicidad que implica el devenir, y el devenir mismo, no pasan de ser meras ilusiones.

El poema expone su doctrina a partir del reconocimiento de dos caminos para acceder al conocimiento: la vía de la *verdad* y la vía de la *opinión*. Sólo el primero de ellos es un camino transitable, siendo el segundo objeto de continuas contradicciones y apariencia de conocimiento.

Parménides escribió que la vía de la *opinión* parte de la aceptación del *no ser*, lo cual resulta inaceptable, pues el no ser no es. Y no se puede concebir cómo la nada podría ser el punto de partida de algún conocimiento. ("*Es necesario que sea lo que cabe que se diga y se conciba. Pues hay ser, pero nada, no la hay*"). Por lo demás, lo que no es, no puede ser pensado, ni siquiera "nombrado". Ni el conocimiento, ni el lenguaje permiten referirse al no ser, ya que no se puede pensar ni nombrar lo que no es. ("*Y es que nunca se violará tal cosa, de forma que algo, sin ser, sea*"). Para alcanzar el conocimiento sólo nos queda pues, la vía de la verdad. Esta vía está basada en la afirmación del ser: el ser es, y en la consecuente negación del no ser: *el no ser no es*.

En esas líneas Parménides afirma la *unidad* e identidad del ser. El ser es, lo uno es. La afirmación del ser se opone al cambio, al devenir, y a la multiplicidad. Frente al devenir, al cambio de la realidad que habían afirmado los filósofos jonios y los pitagóricos, Parménides sostuvo que, si algo cambia esto supone el reconocimiento de que ahora "es" algo que "no era" antes, lo que resultaría contradictorio y, por lo tanto, inaceptable. La afirmación del cambio supone la aceptación de este paso del "ser" "al "no ser" o viceversa, pero este paso es imposible, dice Parménides, puesto que el "no ser" no es.

La nada es imposible pensarla, pues no existe, por lo tanto, no existe el vacío, argumento que más tarde sería usado contra los atomistas.

El ser al que se refiere Parménides es *material*, por lo que difícilmente él puede ser considerado el padre del idealismo. El hecho de que Platón, posteriormente, aceptando los postulados parmenídeos, identificara a ese ser con la Idea, no debe ser extrapolado históricamente hasta el punto de llegar a afirmar que Parménides interpretaba el ser como algo no material. La afirmación de que el ser es Uno, finito, parece indicar claramente su concepción material.

2 – 6.3.- Empédocles de Agrigento.

Empédocles, fue filósofo, político y poeta. Nació en la ciudad siciliana de Acraga (actual Agrigento, Sicilia), probablemente en el 484 a.C., y fue discípulo de Pitágoras y de Parménides y maestro del sofista Gorgias de Leontini, atribuyéndosele también la creación de la retórica. Su personalidad está envuelta en la leyenda ya que, además de filósofo, fue conocido por sus habilidades como médico y sus actividades relacionadas con la magia o con el chamanismo.

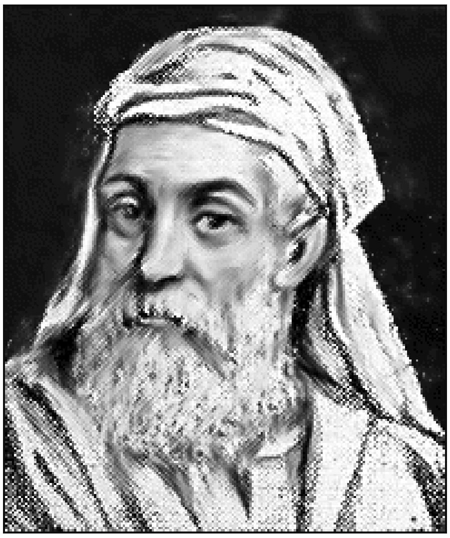


Figura 2.14. Empédocles de Acraga

Una de las concepciones más conocidas de Empédocles fue su "Teoría de los cuatro elementos": Esta teoría de cuatro elementos fundamentales (agua, aire, tierra y fuego) y eternos surge como una reacción contra la negación del conocimiento sensible por parte de los eleatas (Parménides, Zenón[24], Meliso[25]). Por otro lado va a ser adoptada por Aristóteles (384 – 322 a. C.) y va a constituir la base de su física tiva. A diferencia de los pensadores de la escuela milesia, no trató de reducir la naturaleza a un elemento originario único, sino que afirmó la eternidad de los cuatro elementos fundamentales. El cambio, la generación y la corrupción, no son más que la reunión o separación de tales elementos *eternos* e *inmutables*.

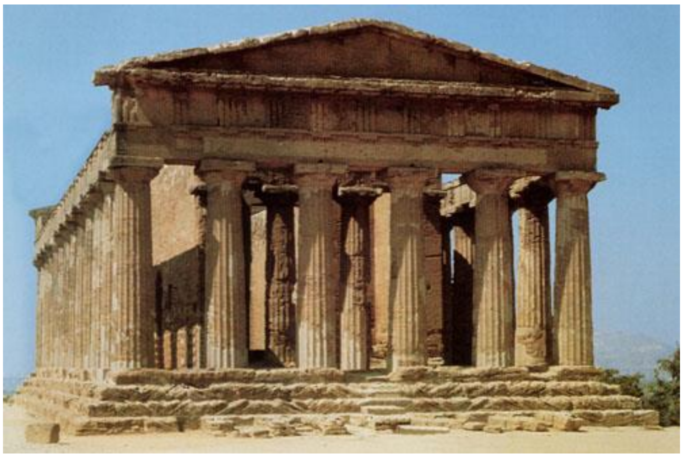


Figura 2.15. Acraga. Templo de la concordia

"*Te diré otra cosa más: no hay nacimiento para ninguna de las cosas mortales; y no hay fin para la muerte funesta; hay solamente mezcla y separación de los componentes del conjunto. Nacimiento, no es más que el nombre que le dan los hombres a ese hecho*" (fr. 8). DK21

"*Cuando los elementos mezclados vienen a la luz del día bajo la forma de hombre, o de bestia salvaje, o de una planta, o de un pájaro, entonces decimos que hay nacimiento; cuando se separan, empleamos la palabra muerte dolorosa. Pero ese nombre no se justifica, aunque también yo siga al respecto la costumbre*" (fr. 9).

Con esta teoría Empédocles combinó aspectos eleáticos — como la afirmación de que a nivel de los elementos fundamentales no hay verdadero cambio (*Monismo estructural*) — y anti-eleáticos,

[24] Zenón de Elea, (490 – 430 a.C) fue discípulo dilecto de Parménides.

[25] Meliso de Samos (470 a.C - ¿?) filósofo y comandante naval, fue también discípulo de Parménides.

por la afirmación de que no hay un único Ente, sino cuatro elementos fundamentales (*pluralismo materialista*).

Por influencia de Pitágoras, afirmó que la combinación de tales elementos para dar lugar a las entidades materiales sigue una determinada *proporción*. Esta proporción características de cada tipo de entidad, debe ser considerada su *esencia.*

Por influencia de Heráclito, Empédocles postuló una teoría del cambio basada en contrarios. Los elementos (agua, aire, tierra y fuego) se modifican por la acción de cualidades (calor, frío, húmedo y seco).

El principio general de individuación y cambio estará dado por la *simpatía* y la *antipatía*, lo cual puede entenderse como amor y odio o, de modo más físico, como *condensación* y *rarificación*.

"*Pues todos estos elementos: Sol, tierra, cielo y mar, están adaptados en sus diferentes partes para todo lo que anda por el mundo mortal. Y si todo lo que se muestra más propio de la mezcla se atrae recíprocamente, por la acción de la semejanza y del Amor, por el contrario lo que es enemigo de ella se mantiene a gran distancia; naturaleza, composición, formas que revisten, todo contribuye absolutamente a oponerse a la reunión, bajo el imperio del Odio que le ha dado nacimiento*" (fr. 22).

"*Los elementos predominan alternativamente en el curso de un ciclo y desaparecen los unos en los otros o aumentan, según el signo fatal que les es asignado. Son siempre los mismos, pero circulan los unos a través de los otros, tomando la forma de hombres y de diferentes especies de animales. Tanto, por efecto de la Amistad, se reúnen para no formar más que un solo organismo, tanto por el contrario, por efecto del Odio que les opone, se separan hasta el momento en que la Unidad, realizada anteriormente, ha desaparecido por completo. Así en la medida en que lo Uno y lo Múltiple se constituye, en esta medida aparecen y no duran eternamente. Pero, en la medida en que ese cambio perpetuo no se detiene subsisten siempre en un ciclo inmutable*" (fr. 26)

Es decir, son dos las fuerzas activas y opuestas, amor y odio, o afinidad y antipatía, que actúan sobre los elementos, combinándolos y separándolos dentro de una variedad infinita de formas. La realidad es cíclica. Al comenzar un ciclo, los cuatro elementos se encuentran unidos por el principio del amor. Cuando el odio penetra en el círculo, los elementos empiezan a separarse. El amor funde todas las cosas; entonces el odio reemprende el proceso. No es posible ningún cambio que implique la creación de nueva materia; sólo puede ocurrir un cambio en las combinaciones de los cuatro elementos ya existentes.

Empédocles siguió Anaxímenes al sostener que el cielo es una bóveda de cristal y que las estrellas fijas están adosadas a la misma.

La bóveda, que es "sólida y está hecho de aire condensado o coagulado como cristal, por la acción del fuego,"[26], no es exactamente esférica. "La altura desde la Tierra hasta lo más alto del cielo,

[26] Aecio . ii. II. 2 (*D. G.* p. 339; *DK.* i^2, p. 161. 40)

es menor que su distancia lateral, por lo que el Universo tiene la forma de un huevo”.[27] Mientras que las estrellas fijas están adheridas a la bóveda de cristal, los planetas tienen libertad de movimiento.

La trayectoria del Sol rodea la máxima circunferencia del Universo (literalmente;”es el circuito del límite del mundo”)[28], en este tema, Empédocles siguió a Anaximandro.

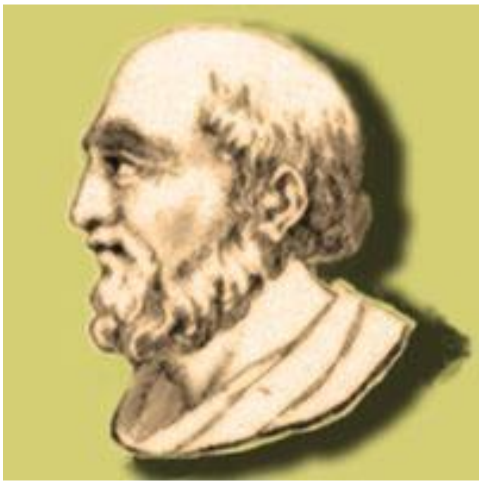


Figura 2.16. Anaxágoras de Clazomene.

2 – 6.4.- Anaxágoras de Clazomene.

Anaxágoras nació en Clazomene, alrededor del 500 a.C., cerca de la actual Izmir (Turquía), viviendo su juventud en una época, en la que Clazomene había sido sometida al imperio persa tras la represión de la revuelta Jonia. Posteriormente se trasladó a Atenas, ciudad en la que residiría la mayor parte de su vida, siendo maestro, y posteriormente amigo, de Pericles, entre otros atenienses ilustres. Precisamente esa amistad le supuso ser acusado de impiedad por los enemigos de Pericles y verse obligado a abandonar Atenas, refugiándose en Lámpsaco, una de las colonias de Mileto en Jonia,

Anaxágoras profundizó las ideas de Empédocles. Al reflexionar sobre los procesos digestivos se preguntó: “¿Cómo puede ser que los alimentos que ingerimos (carnes, frutas, cereales) hagan crecer nuestro cuerpo constituido de carne, sangre y huesos?” “Debe haber partes de carne, sangre y huesos en los alimentos ingeridos y que luego el proceso digestivo separa”, se respondió.

Teoría de todo en todo: Anaxágoras generalizó este resultado y afirmó que en todas las cosas de nuestra experiencia hay partes de todas las demás. Las diferencias entre las cosas se explican por la diferente proporción en que están combinados. De acuerdo con esta teoría, para Anaxágoras en vez de los cuatro elementos fundamentales y eternos existen *infinitos* elementos originarios, o semillas, que se diferencian unos de otros *cualitativamente*.

“*Todas las cosas estaban juntas infinitas en número y en pequeñez. Pues lo infinitamente pequeño existía también. Y en tanto las cosas estaban juntas, ninguna podía ser distinguida a causa de su pequeñez. El aire y el éter lo ocupaban todo, siendo ambos infinitos; pues, en todas las cosas, son éstas las que predominan por el número y el volumen*.” (fr. 1)

Esta teoría supone la *divisibilidad infinita* de la materia, para que pueda haber aunque sea un elemento de cada una de las *infinitas* semillas.

[27] Aecio . ii. 31. 4 (*D. G.* p. 363; *DK.* i^2 p. 161. 34).
[28] Aecio . ii. I.4 (*D.G.* p. 328; *DK.* i^2, p. 161. 37)

"*Ya que, en lo que es pequeño, no hay un último grado de pequeñez, sino que siempre hay algo más pequeño. En efecto, no es posible que lo que es deje de ser, (en cuanto a la división). Igualmente, en relación con lo grande, siempre hay algo más grande y es igual a lo pequeño en cantidad y, por relación a ella misma, cada cosa es a la vez pequeña y grande*." (fr. 3)

"*Y puesto que hay, en la pluralidad, igualdad en la división de lo grande y lo pequeño, puede haber también de todo en todo. Pero no es posible que algo sea aislado y todas las cosas tienen su parte de todo. Tercer momento en que no puede haber un último grado de pequeñez, las cosas no pueden estar separadas ni venir a la existencia. Es necesario que sean ahora como eran al principio, cuando estaban todas juntas. En todas las cosas hay, pues, pluralidad y, a la vez en la más grande y la más pequeña, igualdad en la pluralidad de cosas separados*" (fr. 6)

Para evitar la confusión entre "*cualidad*" y "*elemento*" pasa del modelo de la mezcla bajo *proporciones* (Empédocles) al de *yuxtaposición* (de partes idénticas) bajo proporciones.

¿Cómo se produce esa agregación y esa separación de las semillas? Para explicarlo, Anaxágoras hace intervenir un elemento novedoso en la especulación filosófica: el *Nous* o inteligencia. El movimiento de las partículas o semillas estaría sometido a la inteligencia; sin embargo, el papel de la inteligencia queda reducido al de causa inicial del movimiento que, una vez producido, sigue actuando por sí mismo sometido a causas exclusivamente mecánicas. Las partículas son sometidas por el Nous a un movimiento de torbellino que será la causa de la constitución de todas las cosas tal como nosotros los conocemos.

Este Nous, Mente o inteligencia, es concebido por Anaxágoras como algo infinito, autónomo, autorregulado, y separado de las semillas y de todas las demás cosas que existen. Por otro lado es de naturaleza *material*, pero es la sustancia más sutil y etérea de todas

"*la más fina y pura de todas las cosas, poseedor de todo el saber sobre cualquier asunto y del mayor poder*".

"*Las otras cosas tienen una parte de todo; pero el Nous es infinito, autónomo y no se mezcla con nada; sólo él es sí mismo y por sí mismo, pues, si no fuera por sí mismo y si estuviera mezclado con cualquier otra cosa, participaría de todas las cosas en la medida en que estuviera mezclado con una de ellas. Pues, en todo, hay una parte de todo, como hemos dicho anteriormente. Y lo que estuviera mezclado al Nous le impediría tener poder sobre cada cosa, como lo tiene ahora estando sólo por sí mismo. De todas las cosas es la más ligera y la más pura; posee todo tipo de conocimiento y la fuerza más grande...*" (fr. 12)

Refiriéndose al Nous, Aristóteles escribió:

"*Según Anaxágoras, todo está mezclado, excepto la inteligencia; la inteligencia sólo existe pura y sin mezcla. Resulta de aquí, que Anaxágoras admite como principios: primero, la unidad, porque es lo que aparece puro y sin mezcla; y después otro elemento, lo indeterminado antes de toda determinación, antes que haya recibido forma alguna*." (Aristóteles, *Metafísica*, 1,7).

Anaxágoras falleció en el año 428 a.C.

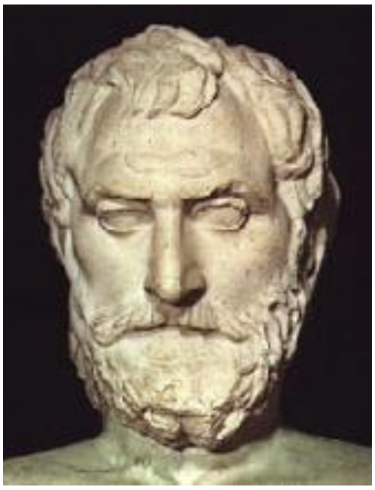


Figura 2.17. Leucipo de Abdera

2 – 7.- Los filósofos atomistas.

2 – 7.1.- Leucipo de Abdera. (c. 450 – c.370 a.C.)

Según Aristóteles, Leucipo fue el fundador de la escuela atomista. Los filósofos atomistas, afirmaron que la materia está constituida por *atomoi* (indivisibles).

La doctrina de Leucipo buscó conciliar la pluralidad de las cosas y la unidad y permanencia del ser. Según él, todos los cambios se reducen a la unión y separación de los átomos, partículas primitivas e indestructibles. El devenir se explica por su combinación y descomposición.

En la concepción de Leucipo sólo existen los átomos y el vacío. La existencia del vacío se prueba por la posibilidad del movimiento, por la compresibilidad y porosidad de los cuerpos, y por el fenómeno fisiológico de la nutrición. La idea del vacío no era fácil de aceptar por los filósofos griegos, — especialmente, a partir de las ideas de Parménides — pero era necesario para entender el movimiento de los átomos y, por ende, el movimiento de los cuerpos. Al respecto, Aristóteles escribió:

"*Algunos filósofos antiguos creyeron que lo que es debe ser necesariamente uno e inmóvil, ya que siendo el vacío no-ente no podría existir el movimiento sin un vacío separado (de la materia) ni existir una pluralidad de cosas sin algo que las separe*. [...] *Pero Leucipo creyó tener una teoría que concordando con la percepción de los sentidos no hacía desaparecer el nacimiento, la corrupción, el movimiento ni la pluralidad de sere*s". (Aristóteles, *Sobre la generación y la corrupción*, I,8,325*a*)

Leucipo se manifestó en contra de la doctrina de las cuatro cualidades (caliente, frío, húmedo y seco) Por el contrario sostuvo que la explicación del cambio y de las entidades contingentes se debe a sus formas y velocidades. Esta idea sería recuperada en el siglo XVII.

2 – 7.2.- Demócrito de Abdera.

Demócrito nació en Abdera, en el año 460 a. C. Se le atribuyen numerosos viajes, a Egipto y a la India, entre otros, habiendo adquirido en el curso de ellos conocimientos de teología, astrología, geometría, etc. También se le sitúa en Atenas escuchando las lecciones de Sócrates o de Anaxágoras, según recogió Diógenes Laercio. Se dice también que fue discípulo de Leucipo, de quien tomó y difundió la teoría del atomismo.

Al igual que Empédocles y Anaxágoras la filosofía de Demócrito esta inspirada por la necesidad de conjugar la permanencia del ser con la explicación del cambio, adoptando una solución basada en la postulación de infinitos *átomos* (*ατομοι*) que poseen las características de inmutabilidad y eternidad del ser parmenídeo.

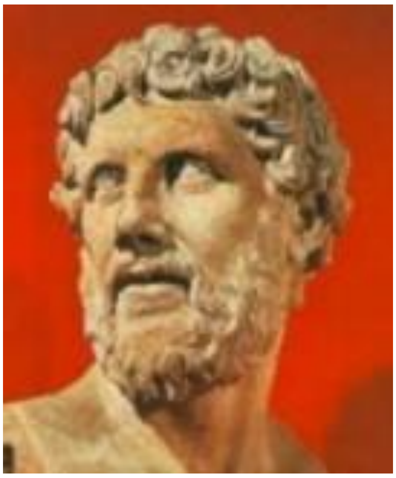


Figura 2.18. Demócrito de Abdera

Estos átomos existen desde siempre en el vacío, sometidos a un movimiento que les es consustancial. Por lo tanto, todo lo que existe son los átomos y el vacío.

El espacio se identifica con el vacío infinito y su postulación junto a Leucipo constituye una excepción a la *tesis plenista* que era generalmente aceptada en esa época.

Los cuerpos macroscópicos resultan del agregado de una cantidad infinita de *formas atómicas*. En el vacío, los átomos se mueven en línea recta y, por causas estrictamente mecánicas, algunos de ellos chocan contra otros, desviando sus trayectorias. Muchos de esos choques provocan la agregación en conjuntos de átomos cada vez mayores y eso da lugar a la constitución de los objetos tal como nosotros los conocemos. Aunque los átomos no poseen diferencias cualitativas sí poseen diferencias en cuanto a su forma, configuración, posición y orden.

Simplicio transmite este fragmento (De Coelo 242,21):

"... estos átomos se mueven en el vacío infinito, separados unos de otros y diferentes entre sí en figuras, tamaños, posición y orden; al sorprenderse unos a otros colisionan y algunos son expulsados mediante sacudidas al azar en cualquier dirección, mientras que otros, entrelazándose mutuamente en consonancia con la congruencia de sus figuras, tamaños, posiciones y ordenamientos, se mantienen unidos y así originan el nacimiento de los cuerpos compuestos." (fr. 582)

El movimiento inicial de los átomos inicialmente es el rectilíneo de caída libre, dado que todos los átomos son pesados y caen en el vacío (se mueven hacia arriba sólo al ser empujados por otros).

El pensamiento de Demócrito ejerció cierta influencia en la antigüedad, a través de la escuela de Epicuro, entre otros; pero fue retomado, sobre todo en el Renacimiento, como base de la constitución de la ciencia moderna.

Puede decirse que la característica del atomismo de Leucipo y Demócrito, a diferencia del pluralismo de Empédocles y Anaxágoras, consiste en que no buscaron una *causa eficiente* para el movimiento de los átomos. Del mismo modo que Empédocles afirmó la *eternidad* de los cuatro elementos, los atomistas afirmaron también la *eternidad del movimiento*. Por este motivo no les parecía necesario tener que postular una causa. A lo largo del tiempo esta doctrina muchas veces ha sido condenada como materialismo ateo ya que si sólo existen átomos y vacío ¿Dónde está el alma?

Sin duda hay una gran influencia del concepto de Anaxágoras de *cuerpo como yuxtaposición de partes* (es decir, sin mezcla), pero al mismo tiempo, los atomistas negaron la divisibilidad infinita.

La divisibilidad es infinita en sentido matemático, pero no en *sentido físico*. En este caso nos encontramos con algo que no es ya divisible. A esto se denomina justamente *átomo*. Por este camino se solucionan las paradojas de Zenón. A nivel atómico no hay cambio (solución del problema de Parménides). El cambio es *superficial (*a nivel de observación).

Las ideas de Demócrito juegan un papel importantísimo en la historia de los orígenes de la alquimia. Entre los textos que se disponen actualmente y que contienen recetas y fórmulas prácticas, la obra más antigua, que los autores que tuvieron alguna autoridad histórica citaron, pero que su autor no citó a ninguno, es la que se atribuye a Demócrito, titulada *Física y Mística*. Si bien quien escribió esta obra usó como seudónimo Demócrito, su contenido se relaciona con la obra auténtica de Demócrito por lazos fáciles de entrever.

Demócrito había viajado por Egipto, por Caldea y por diversas regiones de Oriente y había sido iniciado en los conocimientos teóricos y en las artes prácticas de estas comarcas.

Estos viajes eran una tradición entre los antiguos filósofos griegos, quienes tenían esa costumbre para completar así su educación. Los viajes de Heródoto son ciertos y están contados por él mismo. La tradición nos ha transmitido los de Platón, de Pitágoras y los de de Demócrito. Los de este último, en particular, fueron atestiguados por varias fuentes. Diógenes Laercio lo señaló y también Antístenes, autor casi contemporáneo de Demócrito; quien escribió que éste había aprendido la geometría de los sacerdotes y había visitado Egipto, Persia y el mar Rojo. Cicerón y Strabo, también hablaron de estos viajes. Según Diodoro, Demócrito permaneció cinco años en Egipto. Clemente de Alejandría, en un pasaje de su obra, que según Friedrich Wilhelm Auguste Mullach[29], habría sido tomado de Demócrito mismo, dijo también que fue a Babilonia, a Persia, a Egipto y que estudió bajo los magos y los sacerdotes. También se le atribuía ciertas obras sobre las escrituras sagradas de los caldeos y sobre las del reino de Meroé.

Estas narraciones, que parecen auténticas, cambian de fisonomía en Plinio el viejo. Plinio es el primer autor que transformó el carácter del filósofo racionalista de Demócrito, y le atribuyó la calidad de mago, afirmando que había sido iniciado en la magia y en la Alquimia por Ostanés el mago y por los sacerdotes egipcios. Esta imagen permaneció desde entonces ligada al nombre de Demócrito durante toda la Edad Media.

Las obras de Demócrito y de sus seguidores, formaron una suerte de enciclopedia filosófica, técnica y gnóstica. En tiempos del emperador Tiberio, fue reunida y clasificada en tetralogías por el gramático y astrólogo Trasilo de Alejandría. Desgraciadamente estos libros hoy están perdidos, a excepción de diversos fragmentos encontrados aquí y allá y reunidos primero por Adolphe Franck, en 1836[30], luego por Mullach.

En su colección, Mullach hizo una crítica severa y analizó las partes auténticas de las obras de Demócrito apartando cuidadosamente todo lo que le pareció seudónimo o apócrifo. No obstante, una separación absoluta entre ambos órdenes de escritos puestos bajo el nombre de Demócrito sea

[29] **Mullach, F. W. A**. *Democriti Abderitæ operum fragmenta*. Berlin, 1843.
[30] **Franck, A.** " Fragments qui subsistent de Démocrite," en *Mémoires de la Société royale de Nancy*, 1836.

tal vez imposible, a causa de imitaciones e interpolaciones sucesivas; sobre todo en lo que toca las obras de historia natural y de agricultura, tan a menudo citadas por Plinio y sus contemporáneos, entre las que se han conservado extensos fragmentos de la *Geoponica*[31].

Diógenes Laercio atribuyó a Demócrito tratados sobre el jugo de las plantas (citado también por Petronio), sobre las rocas, los minerales, los colores, los metales, la tintura del vidrio, etc. Séneca[32] dijo también que Demócrito descubrió los procedimientos usados en su tiempo para ablandar el marfil, preparar la esmeralda artificial, colorear las materias vitrificadas: *quemadmodum decoctus calculus in smaragdum converteretur*. *Quâ hodièque coctura invent i lapidas in hoc útiles colorantur*. Esto recuerda los cuatro libros sobre la tintura del oro, plata, piedras preciosas y la púrpura, asignados más tarde por Sinesio de Cirene y por Georgius Syncellus en su *Ecloga crhono-graphica* a Demócrito[33]. Olimpiodoro, autor alquimista del siglo IV, mencionó también cuatro libros de Demócrito sobre los elementos: el fuego y lo que a él se vincula; el aire, los animales y lo que a ellos se relacionan; el agua, los peces y todo lo relacionado; la tierra, las sales, los metales, las plantas y todo lo que se vincula, etc.[34] Todo esto parece remitirse a tratados antiguos.

La distinción rigurosa entre las obras auténticas, las obras de los discípulos y de los imitadores de Demócrito, que se sucedieron durante cinco o seis siglos, es hoy difícil; sobre todo por la ausencia de obras completas y absolutamente seguras. Sin embargo, estas obras, hasta las de seudónimos, a veces parecen incluir fragmentos de libros más antiguos. Por otra parte, como conjunto es interesante, ya que llevan el sello del tiempo en que han sido escritas, tanto desde el punto de vista de las doctrinas místicas o filosóficas como de los conocimientos prácticos.

En lo que respecta a su *Física y Mística*. Es una reunión incoherente de varios fragmentos de diferente origen. Se inicia, sin preámbulo, con un procedimiento técnico para teñir de púrpura. Este fragmento, cuyo carácter es puramente técnico, no tiene ningún lazo con el resto. Los manuscritos incluyen a continuación una evocación de los infiernos del maestro de Demócrito (Ostanés), más las recetas alquímicas.

En cambio, el segundo fragmento (*evocación mágica*) dice que el maestro (Ostanés) ha muerto, sin haber tenido tiempo de iniciar a Demócrito en los misterios de la ciencia y se le aparece desde los infiernos. “He aquí la recompensa por lo que hice por ti”, exclama la aparición. A las preguntas de Demócrito, la aparición responde: “Los libros están en el templo”. Sin embargo, Demócrito no consiguió encontrarlos. Un tiempo después, Demócrito vio que se entreabría una de las columnas del templo y percibió que allí estaban los libros del maestro, los cuales contenían solamente los tres axiomas místicos: “La naturaleza gusta de la naturaleza; la naturaleza triunfa sobre la naturaleza; la

[31] En griego, Γεωπονικά. Es el nombre de una colección de veinte libros sobre agronomía y agricultura escrita en griego y compilada durante el siglo X en Constantinopla por el emperador bizantino Constantino VII.
[32] *Épistola*. XC.
[33] También en el Manuscrito de la *B.N.F* 2.327, fol. 31 de la *Bibliotheque Nationale de France*
[34] Manuscrito de la *B.N.F* 2.327, fol. 201; Manuscrito de San Marcos, folio. 166 reverso.

naturaleza domina a la naturaleza" axiomas que reaparecen luego como un estribillo, al fin de cada uno de los párrafos del opúsculo alquímico propiamente dicho[35].

Si bien Demócrito es considerado un filósofo y naturalista, y como tal un libre pensador, algunos autores, como Eduard Zeller[36], han encontrado una similitud entre sus ideas sobre fantasmas y sueños y las de Epicuro y Lucrecio[37] quienes les asignaban una cierta realidad sustancial.

La actividad de Demócrito como mago no solamente fue resaltada por Plinio. Su nombre se menciona dos veces en el ritual mágico de los papiros de Leiden[38], papiros que contienen tanto recetas mágicas como recetas alquímicas. Encontramos también en estos papiros[39], bajo el título de *La esfera de Demócrito*, una tabla de números destinada a pronosticar la vida o la muerte de un enfermo; tabla totalmente igual a las tablas de Hermes y de Petosiris que existen en los manuscritos de la Biblioteca Nacional de Francia. A partir, del día del mes en que el enfermo guardó cama, el día de su nacimiento se calculaba un número. Si este número caía en la parte superior de la tabla el enfermo se curaría, si caía en la parte inferior, el enfermo moriría.

Los diversos procedimientos alquímicos y mágicos se leen también en un opúsculo atribuido a Bolos de Medes, conocido como Pseudo-Demócrito. Este opúsculo fue traducido, con licencias, al latín y publicado en Padua por Doménico Pizzimenti, en 1573, bajo el título de *Democriti Abderitæ de Arte magnâ*, que incluyen los comentarios de alquimistas posteriores como Sinesio de Cirene, de Pelagio el heresiarca y de Stefanus de Alejandría. Este texto es similar a *Física y Mística*, excepto que faltan algunos fragmentos.

Marcelin Berthelot, menciona una carta de Demócrito a Philarete[40] que comienza con una lista de cuerpos. "He aquí el catálogo de las especies: el mercurio extraído del huevo filosófico[41], la magnesia, el antimonio, el litargirio de Calcedonia y de Italia, el plomo, el estaño, el hierro, el cobre, la soldadura del oro, etc.". Luego viene el misterioso arte de las tinturas metálicas.

Según un escrito de Sinesio, reproducido por Georgius Syncellus, Demócrito había escrito cuatro libros de tinturas sobre el oro, la plata, las piedras y la púrpura[42]: lo que recuerda, a la vez, la carta precedente.

---

[35] Este cuento fantástico ha sido reproducido más de una vez en la Edad Media, bajo diferentes nombres, y atribuido a diversos maestros célebres.

[36] **Zeller, E**, (**1882**): *La Philosophie des Grecs*, de Zeller, t. II, p. 351, 353. Trad. Boutroux.

[37] *De rerum natura.* IV. 333.

[38] **Reuvens, C. J. C**. (**2011**) : *Lettres à M. Letronne,* Nabu Press, Paris. p. 163.

[39] Re**uvens**, *loc. cit.* p. 148.

[40] Manuscrito 2.327 de la *B.N.F.*, folio 31 reverso.

[41] Llamada "piedra de Egipto", o "piedra de cobre" era una aleación de cobre y plomo o cobre amalgamado con mercurio.

[42] Manuscrito. 2.327, folio 118.

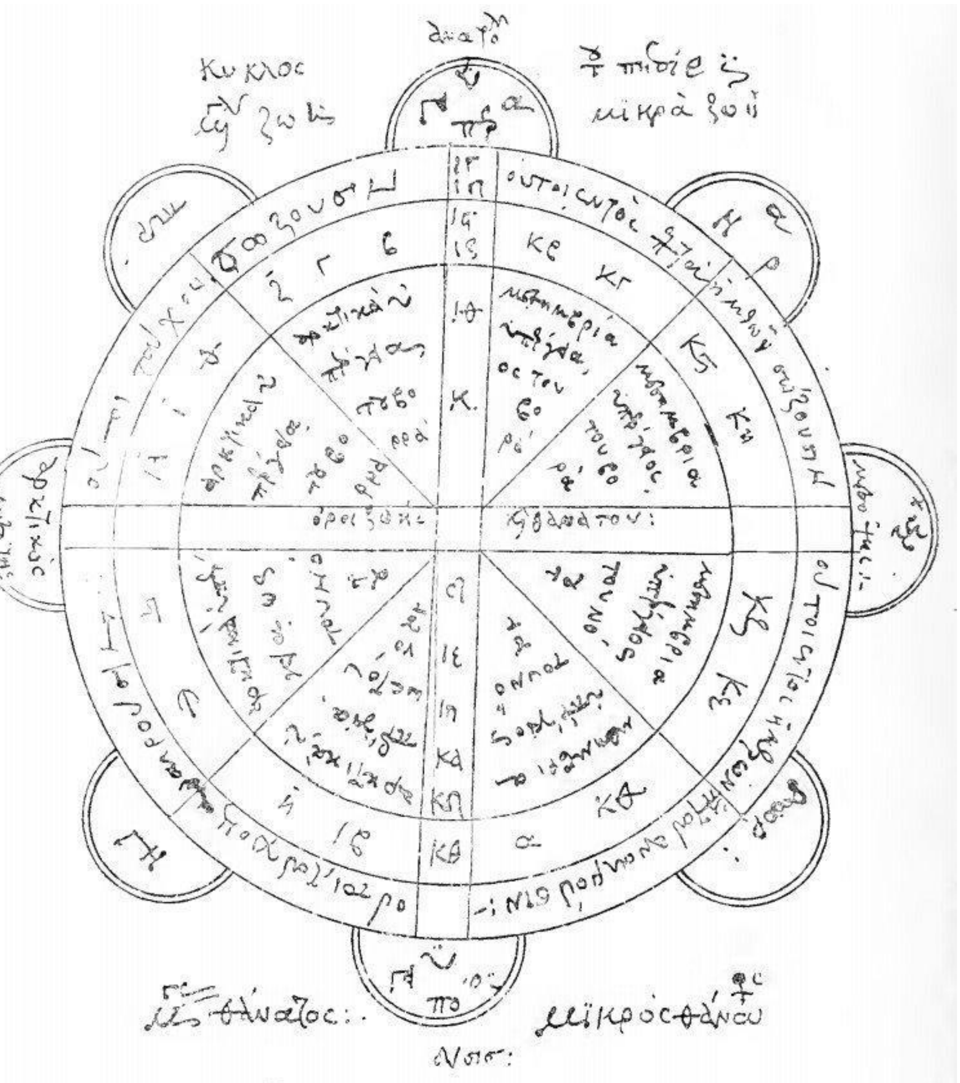


Figura 2.19. Esfera de Demócrito

Sinesio dijo que Demócrito había confeccionado un catálogo de los objetos blancos y otro de los amarillos. Al primero lo llamó Argiropea, o el arte de hacer plata y al segundo, Crisopea, o el arte de hacer oro.

Demócrito falleció en el año 370 a. C.

2 – 8.- Aristóteles de Estagira.

Aristóteles nació en Estagira (Tracia), el año 384-3 a. C. Era hijo de Nicómaco y Efestiada, y su padre ejerció la medicina en la corte del rey Amintas (II) de Macedonia, "por causa de la medicina y por amistad", lo que se ha tratado de asociar con el posterior interés naturalista de Aristóteles. (Diógenes Laercio, *Vidas de filósofos ilustres*, libro V, 1).

A los diecisiete años se trasladó a Atenas donde se incorporó a la Academia de Platón en la que permanecería durante veinte años. A la muerte de Platón, en el 348, Espeusipo, sobrino de Platón,

Figura 2.20. Aristóteles de Estagira

se hizo cargo de la dirección de la Academia, bien por designación directa de éste o bien por decisión de sus condiscípulos, imprimiendo una orientación de carácter más especulativo y místico-religioso a las actividades de la Academia, lo que no fue del agrado de Aristóteles quien la abandonó, (ya fuera por esta razón, ya por sentirse frustrado al no haber sido designado él mismo como director, como sostienen otros.)

En el 345 – 4, se trasladó a Mitilene, en la isla de Lesbos, entrando allí en relación con Teofrasto, que sería posteriormente el más destacado discípulo y continuador de la obra de Aristóteles. Allí continuó con su actividad filosófica hasta que en el año 343-2 fue llamado por Filipo de Macedonia para hacerse cargo de la educación de su hijo Alejandro, el futuro Alejandro Magno, que tenía entonces trece años. Allí permaneció siete u ocho años, hasta el 336-5, cuando Alejandro subió al trono, regresando entonces Aristóteles a Atenas.

Una vez en Atenas, en el 335, fundó su propia escuela, el Liceo, una comunidad filosófica al estilo de la platónica, llamada así por estar situada dentro de un recinto dedicado a Apolo Likeios. Además del propio edificio contaba con un jardín y un paseo (perípatos) del que los aristotélicos recibirán el nombre de peripatéticos, ya sea porque Aristóteles impartiera sus enseñanzas paseando, como recoge Diógenes Laercio, o porque, simplemente, se impartieran dichas enseñanzas en el paseo. (Excavaciones realizadas a mediados de la década de 1990 en Atenas, cerca de la Plaza Sintagma, dejaron al descubierto los cimientos de varios edificios, como se puede observar en la imagen, que los arqueólogos consideran pueden ser los restos del Liceo de Aristóteles).

Figura 2.21. Restos de lo que se considera el Liceo de Aristóteles

Según la tradición el orden de las actividades en el Liceo estaba fuertemente establecido, dedicándose las mañanas a las cuestiones más difíciles de carácter filosófico, reservadas para los discípulos, y las tardes a las lecciones de retórica y de dialéctica, entre las que se podía encontrar un público más amplio.

2 – 8.1.- La metodología inductivo - deductiva.

Para Aristóteles, toda ciencia es ciencia de *lo universal*, y toda ciencia implica demostración *necesaria*. Este ideal de conocimiento es en parte una herencia platónica y en parte, de modo más general, una herencia del ideal de conocimiento axiomático de la geometría. La ciencia estaba caracterizada por su *infalibilidad*, como un grupo de enunciados organizado *deductivamente* y donde se partía de axiomas necesarios e *indemostrables*.

El problema que se planteó Aristóteles fue el de encontrar el instrumento apropiado para alcanzar este ideal de conocimiento. Para ello, desarrolló la teoría del silogismo. El silogismo trata de encontrar relaciones *formales* entre dos premisas que tienen un término común, sea en los sujetos o en los predicados. A este término común lo llamó *término medio* y consideró dos aspectos formales de las premisas, uno cuantitativo (es particular o es universal) y otro cualitativo (es afirmación o es negación). Del examen de todas las combinaciones posibles, separó aquellos en los que es *formalmente imposible* que si las premisas son verdaderas, la conclusión sea falsa, estableciendo lo que hoy se conoce como argumentos *válidos*. Cuando las premisas son *necesariamente verdaderas* el silogismo es *científico*. Con la teoría del silogismo Aristóteles logró axiomatizar la lógica.

Para evitar los problemas que surgen de todo esquema *deductivo* (regreso al infinito y círculo vicioso), Aristóteles afirmó la necesidad de postular premisas indemostrables *inmediatas* (axiomas en sentido amplio). Tales premisas debían:

Ser verdaderas

Ser necesarias

Ser causa de la conclusión (con relación a la doctrina de las cuatro causas)[43]

Ser generales

A su vez, los "axiomas en sentido amplio" podían ser:

Axiomas en sentido estricto: se imponen a todo sujeto por el sólo hecho de considerarlas, y no se restringen a una ciencia única.

Principios: son propios de cada ciencia, y surge a partir de las verdades aceptadas y no cuestionadas.

---

43 Aristóteles reconoció que ciertos hechos tienen una causa material —referida a aquello de lo que algo está hecho — o una causa formal — aquello a lo que algo llega a ser — o una causa eficiente — la que origina el movimiento — y lo que llamó causa final, que es el fin al que se dirigen todas las cosas y que también forma parte de la explicación del por qué algo es como es, o cambia del modo en que lo hace. La causa final es igual a la causa formal en potencia que llega a ser forma en acto gracias a la causa agente. Con ello Aristóteles inauguró las explicaciones teleológicas, explicaciones a través de su fin (telos). Este tipo de explicaciones le permitiría una concepción global del cambio natural, como actualización *de la forma* hacia su punto máximo de *perfección* (el fin entendido, al igual que la idea de bien de Platón, como *areté* pura).

Definiciones: primitivos semánticos. Puntos de partida *necesarios* para el conocimiento de algo. Su existencia se *supone* (por *hipótesis*).

El carácter necesario de los axiomas generó el problema de cómo definir los términos cuando se sale del aspecto formal.

Cuando el número de entes a definir es infinito o, al menos, indeterminado, caben dos tipos de definiciones; operacionales y esenciales. En las definiciones operacionales, la cualidad distintiva de todos los entes a definir resulta de efectuar una operación física o matemática. En cambio, en una definición esencial se deben establecer el género próximo y, al menos, una diferencia específica. Para captar la esencia de un ente se debe reconocer cuál es la clase más próxima (género próximo) a la que pertenece lo que se quiere definir, y luego se debe especificar la característica distintiva por la que se reconocen tales entes dentro de dicha clase (diferencia específica).

Un ejemplo de definición esencial es el dado por Sócrates para el hombre: "El hombre es un animal racional". El género próximo es "animal" y la diferencia específica con los demás animales es que posee razón[44].

La ventaja de la organización deductiva es fundamentalmente la de poder obtener *nuevo* conocimiento a partir del conocimiento verdadero disponible.

En cuanto a la metodología inductiva, Aristóteles partió de aceptar que el ser humano experimenta sensaciones. La sensación permite un contacto con lo particular. Ese contacto con la realidad hace posible proposiciones del tipo: *S* es *P*.

Los animales con *memoria*, como el hombre, pueden comparar diferentes sensaciones que se *repiten* y reconocer elementos comunes. Esta generalización que se remite a los objetos de los que se tuvo sensación constituye la *experiencia* de tales objetos (a esto se hace referencia cuando se habla del *empirismo* aristotélico) La experiencia permite encontrar características comunes a varios objetos y formular enunciados que incluyen cuantificadores existenciales del tipo "Algunos *S* son *P*". Sensación: contacto infalible con lo particular (por este apoyo en la sensación se habla de sensualismo de la propuesta aristotélica). Ese contacto con la realidad hace posible proposiciones del tipo: *S* es *P*.

[44] Esta definición le acarreó un problema social grave a Sócrates. El vivió en una sociedad estratificada en la que había ciudadanos, extranjeros y esclavos. Si el esclavo es tan "animal racional" como el ciudadano, ¿por qué es esclavo? La justificación de la esclavitud la produjo Aristóteles agregando a la definición de Sócrates, otra diferencia específica:"que busca la felicidad". En la concepción aristotélica, la felicidad sólo se logra a través de la virtud, pero de la "virtud griega". Un utensilio es virtuoso si cumple a la perfección con el objetivo para el que fue creado, un instrumento musical es virtuoso si sus sonidos son perfectos. De modo que un esclavo es un animal racional que busca la felicidad y sólo la encuentra a través de la virtud, o sea, siendo un buen esclavo. Quince siglos después de la muerte de Aristóteles, Santo Tomás aplicaría esta definición pero dándole a la virtud el carácter teologal, (fe, caridad, esperanza, prudencia, fortaleza, templanza, justicia, etc.). En el mundo terrenal, el hombre sólo puede tener momentos felices, pero la felicidad plena sólo la alcanzará en el reino de los cielos mediante el ejercicio, en la Tierra, de las virtudes teologales y cardinales. Esta adaptación, convirtió a un filósofo pagano en el filósofo oficial de la Iglesia cristiana.

Las sensaciones y la experiencia llevan a establecer inductivamente una regularidad de hecho, afirmando que esta experiencia es común para todos los miembros de esta misma clase (S). Esto permite la generalización empírica "Todos los S son P", (que tendrá validez en tanto no se encuentre un contraejemplo). Esta inducción es enumerativa y se basa en la experiencia pasada. Tal experiencia dice que de hecho se cumple que cierta clase de individuos comparten cierta característica. Sin embargo, en una afirmación del tipo "Todos los S son P" no se sabe por qué, no se conoce la causa de esa regularidad.

2 – 8.2.- La filosofía natural aristotélica.

Para Aristóteles, la Naturaleza estaría formada por el conjunto de las sustancias naturales uno de cuyos rasgos fundamentales es su tendencia al cambio. Pero existen otros entes que carecen de esa tendencia natural a transformarse. Al respecto escribió:

"Entre los seres, unos son por naturaleza, otros por otras causas. Por naturaleza son los animales y sus partes, las plantas y los cuerpos simples, como la tierra, el fuego, el agua, el aire. De estas cosas y de otras semejantes, se dice que son por naturaleza. Ahora bien, todas las cosas de las que acabamos de hablar se diferencian claramente de las que no existen por naturaleza; cada ser natural tiene en sí mismo un principio de movimiento y de reposo, unos en cuanto al lugar, otros en cuanto al aumento y la disminución, otros en cuanto a la alteración. Por el contrario, una cama, una capa y cualquier otro objeto de ese tipo, si bien cada uno tiene derecho a ese nombre, es decir, en la medida en que es un producto del arte, no poseen ninguna tendencia natural al cambio, sino solamente tienen el accidente de ser de piedra o de madera…" (*Física*, libro II, 1)

Aristóteles distinguió diversos tipos de cambios, según afecten a la sustancia o a los accidentes, o según se produzcan de manera natural o artificial. El cambio puede ser producido espontáneamente por la sustancia, y en ese caso es un cambio natural; o puede ser producido artificial o violentamente, por la intervención de un agente externo a la sustancia misma y a esta clase la llamó cambio artificial.

El cambio sustancial supone la modificación radical de una sustancia, es decir, que algo deje de ser lo que es y pase a ser otra cosa: que una sustancia se "convierta" en otra. Las dos formas propias de este tipo de cambio son la generación y la corrupción. La generación supone el nacimiento, o el surgimiento de una nueva sustancia; la corrupción supone la muerte o la desaparición, la destrucción de una sustancia. La germinación de una semilla y el paso de ser semilla a ser planta supone un cambio sustancial: la semilla desaparece, deja de ser semilla, y surge la planta.

El cambio accidental supone la modificación de algún accidente de la sustancia, la pérdida o la adquisición de una característica, es decir, la sustitución de una forma accidental por otra. Este tipo de cambio puede ser local, cuantitativo, o cualitativo. El cambio local supone la traslación de la sustancia de un lugar a otro; que puede producirse de una forma natural, como ocurre con el movimiento de las aguas de un río, o de una forma artificial, por ejemplo, al cambiar de lugar la mesa de trabajo. El cambio cuantitativo consiste en el aumento o de la disminución de la cantidad en una sus-

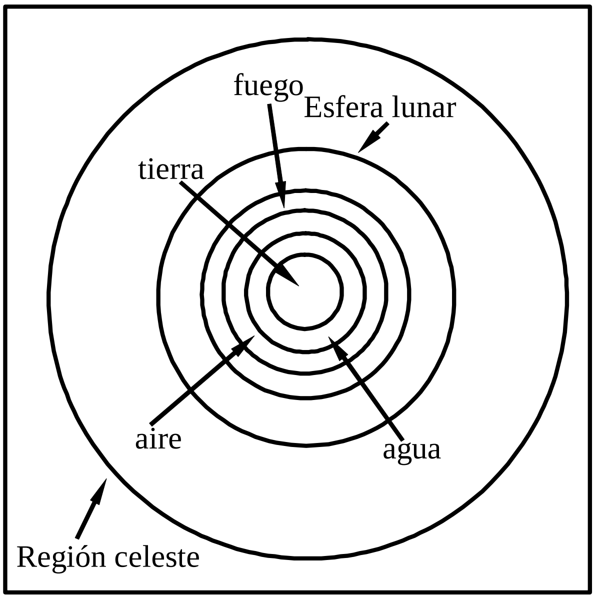


Figura 2.22. Ubicación de los elementos en el mundo sublunar

tancia: el aumento o la disminución del peso de un individuo es un ejemplo típico de cambio cuantitativo.

El cambio cualitativo supone la sustitución de una cualidad de una sustancia por otra; una fruta que madura y cambia de color experimenta un cambio cualitativo, por ejemplo; una mesa que es pintada de un color diferente también experimenta un cambio cualitativo. Todas las formas de cambio accidental pueden, a su vez, ser un tipo de cambio natural o artificial.

La filosofía natural de Aristóteles se basa en una cosmología esférica y en la teoría de los cuatro elementos de Empédocles a los que agregó el éter.

El marco cosmológico aristotélico determina los movimientos *naturales* (no *forzados*) de los cuerpos, según la proporción de los elementos naturales que los constituyan. En los que domine la *tierra*, si dirigirán naturalmente hacia el *centro de la tierra*, cayendo a través del fuego, el aire y el agua. Del mismo modo, el agua lo hará a través del fuego y el aire, pero no a través de la tierra. Esto es plenamente compatible con la observación. Al mismo tiempo se observa que el aire asciende (se aleja del centro de la tierra) en el agua y el fuego en el aire. Por esto Aristóteles hizo una diferencia *cualitativa* fundamental entre los cuerpos en los que predominan la tierra y el agua lo que hace que naturalmente se dirigen hacia el centro de la Tierra (*cuerpos graves*) y los cuerpos en los que predominan el aire y el fuego los que naturalmente se alejan del centro de la Tierra (*cuerpos leves*).

Al utilizar esta teoría para explicar los movimientos naturales, en la Física de Aristóteles no se puede explicar ni siquiera por qué cae una hoja, sin suponer que la Tierra se encuentra en el centro de la esfera del cosmos. Este nexo entre Física y cosmología es una de las dificultades más difíciles de sortear si se trata de afirmar el movimiento terrestre.

Según Aristóteles, las transformaciones se producen por la acción de las cualidades según el siguiente cuadro de oposiciones

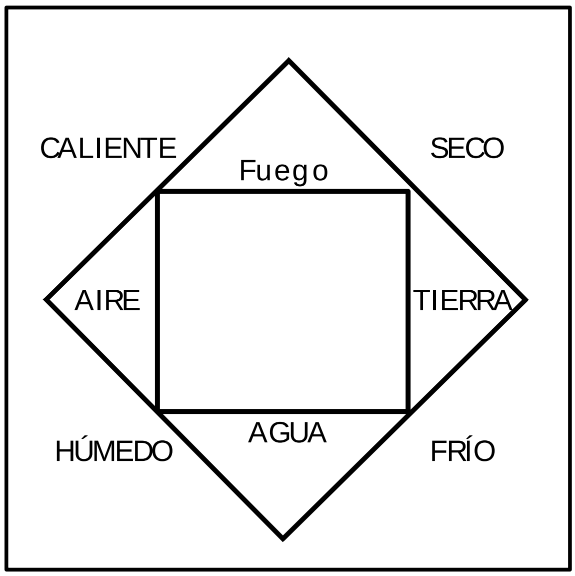


Figura 2.23. Los elementos y sus cualidades

La utilización de este cuadro para explicar las transformaciones físicas se basa fundamentalmente en la acción de cualidades como causas *eficientes*. Por este motivo es que se habla del carácter *cualitativo* de la Física de Aristóteles.

Esta explicación no podía aplicarse al *movimiento de los astros*. El Sol, los planetas, las estrellas son cuerpos graves pero se mueven de modo perfectamente circular sin acercarse ni alejarse del centro terrestre. Por este motivo, Aristóteles hizo una división fundamental entre el movimiento de la Luna, el Sol, los planetas y todo el resto del Universo, zona a la que llamó *esfera celeste o supralunar*, o de la Luna para abajo, llamada *esfera terrestre o sublunar*. Al resultado de esta división se lo conoce como la *teoría de las dos esferas*.

El movimiento circular y perfecto en la esfera supralunar no puede explicarse mediante el cuadro de oposiciones de cualidades y elementos. Por ello, Aristóteles postuló la existencia de un *quinto elemento*, el *éter*, del que está constituida la esfera celeste. El éter es el elemento más sutil de todos, es perfectamente traslúcido y tiene la cualidad natural de moverse de modo circular a velocidad constante arrastrando en su movimiento a todos los cuerpos de esa esfera.

La imposibilidad fáctica de obtener el vacío, llevó a Aristóteles a negarlo. "La Naturaleza tiene horror al vacío". Esa concepción *plenista* le impedía a Aristóteles concebir a los planetas moviéndose por sí mismos describiendo órbitas circulares. Por ello concibió a las esferas celestes como engarzadas en una esfera de éter y arrastradas por esta última en su movimiento circular.

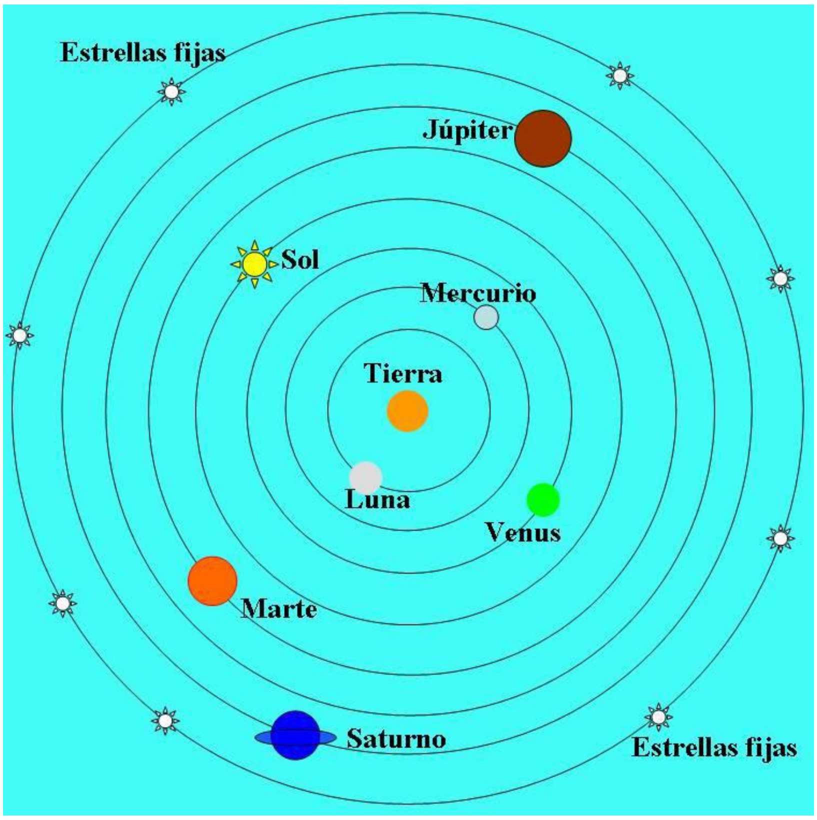


Figura 2.24. Cosmología aristotélica.

Para responder a la pregunta acerca de qué es lo que provoca el movimiento de las esferas celestes Aristóteles recurrió a la idea del "motor inmóvil". El giro de las esferas está provocado por una esfera celeste inmóvil en la que se encuentran engarzadas las llamadas "estrellas fijas" más allá de la cual no hay nada. La esfera de las estrellas fijas provoca el movimiento tanto en el mundo supralunar como en el sublunar. Movimiento se rige bajo el principio que *lo superior siempre gobierna lo inferior*. Este motor inmóvil es considerado por Aristóteles como una forma pura, como un ser perfecto que es la causa final de todos los cambios en el Universo. Para poder explicar la acción del motor inmóvil como causa final Aristóteles se vio obligado a dotar de *alma* a las esferas intermedias: dichas esferas aspiran a ser perfectas como el motor inmóvil, y es esa aspiración la que mueve el universo; pero, para poder aspirar a esa perfección, han de tener alma.

2 – 9.- Oenópides.

Oenópides fue un matemático y astrónomo que nació en Quios, — una isla en el Mar Egeo, proxima a lo que hoy es Turquía — alrededor del año 495 a. C. La fecha de su nacimiento se estima por la afirmación de Proclo que era un poco más joven que Anaxágoras, quien nació alrededor del año 500 a.C. Según Eudemo, fue un geómetra de cierto renombre. Eudemo le atribuyó haber sido el primero en investigar el problema de Euclides I. 12 (dibujar una perpendicular a una recta dada desde un punto dado fuera de ella), que Euclides pensó que era útil para la Astronomía, y resolvió el problema de Euclides I. 23 (la construcción de una línea recta dada y en un punto determinado colocar un ángulo recto dado). Indudablemente muchísimas perpendiculares habían sido dibujadas previamente por medio de diversos dispositivos mecánicos, tal como pudo ser una escuadra. Pero fue el primero en hacer la construcción teórica como lo encontramos en Euclides. Similarmente, se dice que hizo un análisis del problema de Euclides I. 33 y de la solución particular dada por el mismo Euclides.

Diversos historiadores aseguran que Oenópides hizo dos descubrimientos de importancia en Astronomía. El primero fue el de la oblicuidad de la eclíptica[45], aunque no se le puede acreditar el valor de 24º, ángulo que después determinaría Eratóstenes. El segundo descubrimiento que se le adjudica es lo que en la Antigüedad se llamó “el Gran Año”, lapso al cabo del cual el Sol, la Luna y los cinco planetas regresan a las posiciones que tenían al comienzo del ciclo y que Oenópides estableció en 59 años[46].

Según Censorinus, Oenópides estableció la duración del año en $365\frac{22}{59}$ días[47]. Valor bastante próximo al aceptado actualmente.

Oenópides falleció en Atenas en el año 420 a. C.

2 – 10.- Aristarco de Samos.

Sabemos que Aristarco de Samos fue discípulo de Stato de Lampsacus[48] un filósofo natural muy original[49] que sucedió a Teofrasto como director de la Escuela peripatética en el año 288 ó 287 a.C.

[45] Aecio, (ii. 12. 2 (*D. G*. p. 340 – 1): “se dice que los pitagóricos han sido los primeros en observar la oblicuidad del círculo del zodiaco, un hecho que Oenópides adjudica como su propio descubrimiento”

[46] Theon of Smyrna, p. 198. 15 (*DK*. i^2, p. 230. 13)

[47] Censorinus, *De die natali* 19. 2.

y que estuvo a cargo de de ella durante dieciocho años. Otros dos hechos nos permiten estimar con aproximación las fechas en que vivió Aristarco. En el año 281 ó 280 a.C. hizo una estimación del solsticio de verano[50] y el libro en el cual formuló su hipótesis heliocéntrica fue publicado ante de la fecha en que Arquímedes escribió sus *Psammites* o *El contador de arena*[51] una obra escrita antes del 216 a.C. Sobre esta base se estima que Aristarco vivió, probablemente, entre el 310 y el 230 a.C., esto es vivió unos 75 años después de Heráclides y fue unos 25 años mayor que Arquímedes.

Aristarco fue llamado "el matemático" sin duda para distinguirlo de muchos contemporáneos con el mismo nombre. Fue incluido por Vitruvius entre las pocas personalidades que poseían un conocimiento profundo de todas las ramas de la Ciencia, Geometría, Astronomía, Música, etc. "Hombres de este tipo, son raros, tales como Aristarco fueron Filolao y Architas de Tarento, Apolonio de Perga, Eratóstenes de Cyrene, Arquímedes u Scopinas de Siracusa, que dejaron para la posteridad muchos aparatos mecánicos y gnomónicos que inventaron y explicaron sus fundamentos matemáticos y sus principios naturales"[52]. Que Aristarco fue un geómetra notable, lo prueba su obra "*Sobre los tamaños y distancias del Sol y de la Luna*. En el campo de la Mecánica se le acredita el descubrimiento de una mejora en el reloj de Sol, llamado entonces *σκάφη*[53] cuya superficie no era plana sino cóncava y semiesférica, con un puntero levantado verticalmente en el medio, que al proyectar sombras permitía que la dirección y la altura del Sol pudieran ser leídas sobre las líneas marcadas en la superficie del hemisferio[54]. Aristarco también escribió sobre la visión, la luz y los colores[55].

Aristarco fue el primero en proponer la hipótesis heliocéntrica. Los testimonios antiguos son unánimes sobre este tema y el primer testigo fue Arquímedes, quien fue un contemporáneo algo más joven, por lo que no hay posibilidad de error. La descripción que hace Arquímedes sobre la hipótesis heliocéntrica es:

"Usted sabe [Usted es el Rey Gelón] que "Universo" es el nombre que le da la mayoría de los astrónomos a la esfera, el centro de la cual es el centro de la Tierra, mientras que su radio es igual a la línea recta entre el centro del Sol y el centro de la Tierra. Esta es la acepción común [*τὰ γραφόμενα*], tal como Ud. la ha escuchado de los astrónomos. Pero Aristarco sacó un libro, *consistente en ciertas hipótesis* donde parece, como consecuencia de haber hecho ciertas suposiciones, que es muchas veces más grande que el "Universo" recién mencionado. Sus hipótesis son que *las*

---

48 Aecio, i. 15. 5 (*D. G.* p. 313) *D. G. Doxographi Græci*. Compilación de textos griegos antiguos hecha por Hermann Diels en 1879.

49 Galen, *Histor. Philos*. 3 (*D. G.* p. 601. i)

50 Ptolemy, *Syntaxis*, iii. 2 (i, pp. 203, 206, ed. Heiberg)

51 *Archimedis Syracusani Arenarius & Dimensio Circuli*, Obra en la que Arquímedes tomando el modelo de Aristarco, trató de calcular cuántos granos de arena deberían ser necesarios para llenar el Universo. Sobre la base de suponer el perímetro de la Tierra, de que la Luna no es más grande que la Tierra y que el tamaño del Sol no supiera más de 30 veces al de la Tierra, calculó que si el Universo es esférico, su diámetro sería de 10^{14} estadios (alrededor de dos años luz) y para llenarlo se requerirían 10^{63} granos de arena; cifra coincidente con la estimación de Eddington sobre el número de nucleones en el Universo.

52 Vitruvius, *De architectura*, i. i. 16.

53 En griego: *arte*

54 Vitruvius, *De arquitectura* ix. 8 (9). I.

55 Aecio. i. 15. 5 (*D. G.* p. 313), iv. 13. 8 (*D. G.* pp. 404 y 853).

estrellas fijas y el Sol permanecen inmóviles, que la Tierra gira alrededor del Sol en una circunferencia en la que el Sol yace en el medio de la órbita y que la esfera de las estrellas fijas está situada sobre el mismo centro que el Sol y que es tan grande que el círculo en el cual él supone que la Tierra gira tiene la misma proporción a la distancia a las estrellas fijas como el centro de la esfera dista de su propia superficie[56]. Ahora, es fácil ver que esto es imposible, ya que como la esfera carece de magnitud, no podemos concebir que tenga alguna relación con su propia superficie."

"Sin embargo, debemos considerar que Aristarco quiso expresar esto: dado que concebimos a la Tierra como si fuera el centro del Universo, la relación entre [la distancia de] la Tierra y lo que él describe como Universo, es igual a la relación [de distancias] entre [el radio de] la esfera que contiene a la circunferencia en la cual él supone que gira la Tierra y [el radio de] la esfera de las estrellas fijas."

"Él adaptó las pruebas del fenómeno [de la existencia de estrellas fijas] a una hipótesis de este tipo, en particular, suponiendo que el tamaño de la esfera dentro de la cual se mueve la Tierra es igual al tamaño de la esfera de lo que llamamos 'el Universo'"[57]

Otra evidencia de la paternidad de Aristarco sobre la hipótesis heliocéntrica fue dada por Plutarco[58]:

"Mi buen amigo, sólo no proponga una acción en mi contra por impiedad, al estilo de Cleantes, que pensaba que era el deber de los griegos acusar a Aristarco de Samos bajo el cargo de impiedad, por poner en movimiento el Hogar del Universo, siendo este el efecto de su intento de salvar los fenómenos suponiendo que el Cielo permanece en reposo y que la Tierra debe girar en un círculo oblicuo mientras que, al mismo tiempo, gira sobre su propio eje."

Aristarco incluyó al Sol entre las estrellas fijas y sostuvo que la Tierra se mueve alrededor del círculo del Sol [es decir, la eclíptica] y se pone a la sombra según sus inclinaciones [es decir, de la Tierra]".[59]

Salvo Seleuco de Seleucia del Tigris, astrónomo caldeo que vivió en el siglo II a.C., nadie más apoyó las ideas de Aristarco y las opiniones de este último fueron eclipsadas por las explicciones sobre el geocentrismo de Hiparco, contemporáneo de Seleuco y por la teoría de los epiciclos desarrolada y publicada, en el siglo II de nuestra era, por Claudio Ptolomeo en el *Almagesto*.

En un pasaje del *Contador de arena*, Arquímedes, dice que "Aristarco descubrió que el tamaño aparente del Sol es de alrededor de la 720ava parte del círculo zodiacal"[60], valor bastante alejado del real, y que determinó el año en $\mathbf{365\frac{1}{4}\frac{1}{1623}}$ días.

[56] Si el radio de la esfera de las estrellas fijas es [casi] igual a la distancia entre la Tierra y la superficie de esta esfera, entonces se explica por que, desde la Tierra, las consideramos "estrellas fijas".

[57] *Archimedes*, ed. Heiberg, vol. ii, p. 244 (Arenarius I. 4 – 7); *The Works of Archimedes*, ed. Heath, pp. 221, 222.

[58] Plutarch, *De facie in orbe lunæ apparet*, c. 6, pp. 922 F - 923 A.

[59] Aecio. iu 24. 8 {D. G. p. 355. 1-5).

2 – 11.- Arquímedes de Siracusa.

Según diversas referencias históricas, Arquímedes nació entre los años 285 – 287 a.C. en Siracusa, ciudad-Estado griega, independiente, que, en esa época, ya contaba con casi 500 años de historia. Era hijo de un astrónomo de nombre Fidias y se supone que tenía cierto parentezco con Hieron II, — quien en el 265 a.C. se coronaría como rey de Siracusa. No se sabe si se casó o si tuvo hijos. Según Diodorus de Sicilia estudió en Alejandría, tanto Matemáticas, con Conón de Samos y otros discípulos de Euclides, como Astronomía con Eratóstenes. Se dedicó al estudio de las fuerzas que actúan sobre los sólidos en reposo (Estática) y a las aplicaciones de los fluidos en reposo (Hidrostática), a la medida de volúmenes y densidades de los líquidos (Picnometría). Inventó un gran número de dispositivos basados sobre la conservación de los momentos de las fuerzas que actúan sobre cuerpos rígidos en equilibrio, (que luego fueron utilizados como maquinaria bélica para la defensa de Siracusa). Desarrolló sistemas de movimientos de cuerpos mediante poleas simples y compuestas. Inventó el *planetarium*, un dispositivo formado por esferas que representaban al Sol y a la Luna y que podían girar alrededor de otra que representaba a la Tierra, permitiendo entender la producción de los eclipses. También se le adjudica la invención del tornillo de agua, el órgano de agua y los espejos parabólicos incendiarios, (aunque esto último es muy poco probable)[61]. Entre sus escritos merecen destacarse "*Sobre la esfera y el cilindro*", en dos volúmenes, que es su obra más extensa[62] en ella demuestra que la relación entre el volumen de un cilindro y el de una esfera inscrita en él es $^4/_3$ [63], "*Sobre los conoides y esferoides*", donde trata la ecuación de la parábola y la del paraboloide — cuerpo sólido que se origina por la revolución de una parábola alrededor de su eje principal — así como otros cuerpos de revolución: hiperboloides y elipsoides. También escribió "*Sobre las espirales*", donde desarrolla la ecuación de la que hoy se llama *espiral de Arquímedes*. Su cuarta obra se llama "*Sobre la cuadratura de la parábola*" en la que ¡sumando una serie infinita! (algo que no haría ningún matemático hasta el siglo XVII) demostró que la superficie de cualquier sección de una parábola es igual a cuatro tercios la superficie del triángulo inscripto. Este en un cálculo diferencial sobre la base de la exhaustación de figuras inscriptas y circunscriptas a una dada.[64] También han llegado hasta nuestros días "*Sobre los equilibrios planos*", "*Sobre los cuerpos*

---

[60] *Archimedes,* ed. Heiberg, ii, p. 248. 19; *The Works of Archimedes*, ed. Heath, p. 223.

[61] Se ha escrito que, gracias al diseño de espejos parabólicos de bronce pulido, los siracusanos concentraban los rayos solares sobre las velas de las naves romanas incendiándolas. Esto es imposible ya que esas naves carecían de velas, siendo impulsadas por remeros.

[62] Entre las diversas proposiciones, resolvió el problema de la superficie de la esfera, demostrando que es cuatro veces su círculo máximo ($4\pi r^2$), calculó el volumen de la esfera ($^4/_3\ \pi r^3$) y la relación entre el volumen de un cilindro y una esfera circunscripta. Cicerón, quien descubrió la tumba de Arquímedes y la restauró, cuenta en su *Tusculanarum Dsiputationun* (V. 23) que en la lápida estaba grabado un cilindro circunscripto por una esfera.

[63] Arquímedes lo consideró como su mayor logro y le pidió a sus amigos que, al morir, lo grabaran sobre su lápida. Cicerón, que fue quæstor en Sicilia, encontró la tumba de Arquímedes y la hizo restaurar para que se vea el dibujo y la fórmula grabados en la lápida.

[64] Por ejemplo, para calcular el perímetro de una circunferencia y, por ende, el valor de p, dibujó una circunferencia, inscribió en ella un cuadrado y le circunscribió otra. El perímetro de la circunferencia tendrá una longitud intermedia entre los perímetros de los dos cuadrados. Repitió la operación pero usando dos octógonos regulares, las diferencias entre el perímetro de la circunferencia y cualquiera de los octógonos se reduce, repitió la

flotantes", en dos volúmenes; "*Medida de un círculo*", en esta obra encontró un valor casi exacto para la raíz cuadrada de 3. Afirmó que $^{1351}/_{780} > \sqrt{3} > {}^{265}/_{153}$ aunque no dio ningún indicio de cómo lo obtuvo. "*El contador de arena*", donde inventó un sistema para expresar con palabras cualquier número, sin importar cuan grande sea[65] y estableciendo que el número de granos de arena que podía caber en el Universo[66] no era infinito sino del orden de 10^{63}, en esta obra, Arquímedes menciona la hipótesis heliocéntrica de Aristarco de Samos. "*El libro de los lemas*"[67] se le ha adjudicado a Arquímedes, pero es altamente problable que sea apócrifo. Quizás el texto más importante, donde revela el método que usó para sus demostraciones sea "*Sobre el método de los problemas mecánicos*". Sus escritos, exceptuando "*El contador de arena*" versan todos sobre problemas de álgebra y geometría. No escribió absolutamente nada sobre los dispositivos que había inventado[68]. Esos dispositivos, fueron descriptos por varios historiadores. Entre ellos, el historiador griego Polibius (*c*. 200 – 118 a.C.) quien en el Libro VIII de su "*Historia Universal*" describió con lujo de detalles algunas máquinas bélicas diseñadas por Arquímedes para la defensa de Siracusa. El relato de Polibius quizás sea el más confiable pues puede haberse contactado con sobrevivientes del sitio y el saqueo de Siracusa (212 a.C.). El historiador romano Tito Livio (59 a.C. – 17 d.C.) también describió varios de los dispositivos mecánicos inventados por Arquímedes[69]. También se encuentran descripciones de los inventos de Arquímedes en la obra del historiador griego Plutarco (c. 45 – 120 d.C,)[70] y del griego Dio Cassius (c. 155 – 235 d.C.)[71].


Figura 2.25. Eratóstenes

2 – 12.- Eratóstenes de Cirene.

Eratóstenes **(**Ἐρατοσθένης,) fue un matemático, geógrafo y astrónomo griego nacido en Cirene, una antigua ciudad griega en lo que actualmente es Libia, muy probablemente en el 276 a.C. Fue discípulo del filósofo estoico Aristón de Quios y también estudió en Atenas y Alejandría, donde se radicó. En el año 236 a.

operación con dos hexadecágonos regulares, con lo que las diferencias se reducían aún más. Debido a los límites que le imponía el arenero donde hacía los dibujos sólo pudo inscribir y circunscribir dos polígonos regulares de 96 lados. A partir de los datos obtenidos encontró que $^{223}/_{71} < \pi < {}^{220}/_{70}$, o sea, $\mathbf{3{,}140845} < \pi < \mathbf{3{,}142857}$.

65 En la época en que vivió, la cantidad más grande expresada con palabras era la *miríada* (*μυριάς*) equivalente a 10.000 unidades.

66 El Universo, según Arquímedes, era una esfera que contenía a las *estrellas fijas*.

67 Se refiere a teoremas auxiliares.

68 Plutarco cuenta que desde que Platón se había disgustado con Eudoxo y Arquitas porque "degradaban y echaban a perder lo más excelente de la geometría al trasladarla de lo incorpóreo e ideal a lo sensible y emplearla en los cuerpos que son objeto de oficios toscos y manuales" escribir sobre aplicaciones a la Mecánica, rebajaba al filósofo.

69 **T. Livius** *T. Livii Ab Urbe Condita Libri, Liber XXIV*. Commento e note di Umberto Moricca. Chantone Editore. Torino 1946.

70 **Plutarco:** *Vidas paralelas, Marcelo.* Traducción de Antonio Ranz Romanillos, Editorial Planeta, Barcelona (1991). Páginas 443 – 483.

71 **Dio** *Roman History* (*Volume* II*: Fragments of Books* XII – XXV) Translated by E. Cary, Loeb Classical Library, Harvard University Press, Cambridge, 1914.

C., el Rey Ptolomeo III lo convocó para hacerse cargo de la Biblioteca de Alejandría, cargo que ocupó hasta su muerte, probablemente en el 194 a.C.[72]

Se dice que Eratóstenes inventó la *esfera armilar*[73], instrumento mediante el cual pudo determinar la ubicuidad de la eclíptica, encontrando que el intervalo entre los trópicos — que es el doble de la oblicuidad de la eclíptica — era equivalente a $\frac{11}{83}$ del perímetro terrestre, lo que daba para la oblicuidad 23º 51' 19''[74].

Según Plutarco, Eratóstenes estableció la distancia entre la Tierra y el Sol en 80400 miríadas[75] de estadios y entre la Tierra y la Luna en 78 miríadas de estadios. No se sabe si usó el mismo valor para el estadio que el usado por Claudio Ptolomeo (184,9 *m*) que era un octavo de la milla romana, o el estadio egipcio, equivalente a 300 codos reales egipcios de 0,523 *m*, o sea 156,9 *m*.[76] Según Macrobio (siglo IV d.C.) , también estableció que el diámetro del Sol era 27 veces mayor que el de la Tierra (en rigor, es 109 veces mayor).

A Eratóstenes se lo recuerda principalmente por determinar las dimensiones de la Tierra. En Alejandría se sabía que en Siena, — hoy Asuán en el sur de Egipto, — cuando llegaba el solsticio de verano, un objeto insertado verticalmente en el suelo, no proyectaba sombra alguna y que la luz del Sol iluminaba la superficie del agua de un pozo sin importar su profundidad. Que la luz del Sol incidiese verticalmente sobre el suelo significaba que el lugar estaba situado justamente sobre la línea del trópico y su latitud era igual a la de la eclíptica que Eratóstenes conocía muy bien. Eratóstenes supuso que Alejandría y Siena estaban ubicadas sobre la misma longitud (aunque en realidad están sobre meridianos que difieren en 3º). También supuso que, al estar el Sol tan alejado, los rayos solares que llegan a las dos localidades pueden considerarse paralelos. Entonces, para el mediodía del día del solsticio de verano en Siena, midió en Alejandría la sombra de un objeto colocado verticalmente sobre el suelo (algunos dijeron que fue una torre) y encontró que el cenit en esa ciudad difería en la 50 ava parte de una circunferencia, es decir 7º 12. El dato que le faltaba era conocer la distancia exacta entre Alejandría y Siena. Hay varias versiones al respecto. Una de ellas sostiene que el la Biblioteca de Alejandría había un papiro que decía que entre ambas localidades había una distancia de 5000 estadios; Otra sostiene que la información se la suministraron los comerciantes que usualmente integraban las caravanas que viajaban entre esos dos lugares; otra que empleó un regimiento, haciendo marchar a los soldados contando sus pasos uniformes y la última, que él mismo hizo el trayecto a pie contabilizando los 5000 estadios.

---

[72] Aunque la Biblioteca bizantina Suda, afirma que falleció en el 190 a.C.

[73] La esfera armilar, conocida también con el nombre de astrolabio esférico, es un modelo del Universo considerado como una esfera "celeste" que se utilizaba para mostrar el movimiento aparente de las estrellas alrededor de la Tierra.

[74] Tres siglos más tarde, Claudio Ptolomeo adoptaría ese valor en su *Almagesto*, algunos autores sostienen que Eratóstenes encontró 24º y que el refinamiento del valor lo hizo Ptolomeo.

[75] 1 miríada equivalía a 10000 unidades.

[76] Si el estadio era de 184,9 m, entonces la distancia de la Tierra al Sol, por él calculada sería de 148.659.600 kilómetros una diferencia del 1% con el valor que se acepta hoy en día, Pero para la distancia a la Luna, habría calculado 144.222 kilómetros estimación muy imprecisa frente a los 384.440 *km* que nos separan de nuestro satélite.

En la época en que vivió Eratóstenes, no estaba muy desarrollada la trigonometría, por lo que debe haberse ayudado con un compás para hacer cálculos rudimentarios. Primero estableció que el perímetro era de 250.000 estadios aunque luego corrigió el dato a 252.000 de modo que al dividir esa longitud por 360 le diese 700 estadios por cada grado. Pero este valor, contabilizando cada estadio a 184.9 m daría para el perímetro de la Tierra 46594,8 km, casi un 16,5% más que el valor aceptado actualmente, 40.008 km[77].

Los supuestos que empleó Eratóstenes son las principales fuentes de error.

Por la creencia griega acerca de la perfección de la esfera, Eratóstenes no podía dudar que la Tierra era una esfera perfecta. Un grado de latitud no es una distancia uniforme entre dos latitudes consecutivas. Varía desde 110,6 km en el ecuador hasta 111,7 km en los polos, de donde 7º entre Alejandría y Siena no representan la misma distancia que 7º en cualquier otro lugar a lo largo de todo el meridiano. Más aún, Alejandría y Siena no se encuentran sobre el mismo meridiano, lo que introdujo otra fuente de error.

La distancia entre las dos localidades no es 5000 estadios, 924,5 km, sino unos 830 km por tierra.

Siena no está ubicada exactamente sobre el paralelo del trópico de Cáncer (durante el solsticio de verano, sobre ese paralelo los rayos solares caen verticalmente a tierra). Se ha calculado que, en la época en que vivió Eratóstenes el solsticio de verano ocurría a 41 km de lo que era el centro de Siena[78].

La medida de la sombra que determinó Eratóstenes hace 2.200 años debió ser de 7,5º o la 48ava parte de una circunferencia y no 7,2º. Al carecer del conocimiento del cálculo trigonométrico Eratóstenes debió haberse valido de un compás para la determinación del ángulos lo que no le podía dar un resultado muy preciso.

150 años más tarde, Posidonio de Apamea rehizo los cálculos de Eratóstenes y obtuvo una circunferencia sensiblemente menor. Este valor fue adoptado por Ptolomeo y se dice fue en el que probablemente se basó Cristóbal Colón para justificar la viabilidad del viaje a las Indias por occidente.

A Eratóstenes también se lo recuerda por haber inventado un método para conocer los números primos de manera rápida. Consistía en una lámina metálica en la que estaban ordenados los números naturales del 1 al 4000. Eratóstenes perforó todos los números compuestos sin tocar los numeros primos, con lo que eran fácilmente individualizados. Actualmente es uno de los tantos algoritmos que se emplean en computación.

---

[77] Algunos autores han sostenido que para estos cálculos Eratóstenes empleó el estadio egipcio, 156,9 m, con lo que su resultado hubiese sido 39.539 km, muy próximo al valor real, Pero entonces, si se considera también el estadio egipcio para la distancia entre la Tierra y el Sol, la diferencia hubiese sido muy importante.

[78] Debido a las variaciones del eje de la Tierra con el transcurso del tiempo, el solsticio de verano ocurre hoy a 72 km del centro de la ciudad de Asuan.

También se destacó en Geografía y a él se debe la confección de un mapa de la zona del Mediterráneo oriental.

2 – 13.- Hierón de Alejandría.

Muy poco se sabe de la vida de Hierón de Alejandría. Algunos autores han sostenido que fue alumno de Ctesibius, quien vivió entre el 285 y el 222 a.C. en Alejandría y, probablemente, fue el director del Museo de esa ciudad. A él se lo considera el "Padre de la neumática" por sus investigaciones sobre la elasticidad del aire, tema sobre el cual también escribió Hierón. A partir de sus trabajos, se desprende que conoció, entre otros, el libro "Sobre los cuerpos flotantes" de Arquímedes de Siracusa (c. 287 – 212 a.C.).

Figura 2.26. Imagen de Hierón mostrando uno de sus inventos.

De los escritos de Hierón queda muy en claro que era atomista. Si bien sostenía que no existen grandes extensiones de espacio vacío, afirmaba que el aire esta formado por microscópicas partículas dispersas y en equilibrio entre los intersticios de vacío. Si, de alguna manera, por ejemplo, por medio de compresión, se forzaba al aire a ocupar más intersticios vacíos, una vez cesada la causa, las partículas de aire retornaban a su posición natural. Para demostrar la naturaleza material del aire, con sumo cuidado invertía verticalmente un frasco de boca angosta en agua, comprobando que aún con una leve presión, el agua no ingresaba al frasco.

Hierón escribió varios tratados de aplicaciones de la Física a la Mecánica y a lo que hoy es la Termodinámica. Entre sus obras se encuentran: Tratado de la Neumática, Sobre el método para levantar cuerpos pesados, Sobre el autómata[79], Sobre la Dioptra[80]. Describió gran número de máquinas sencillas y también generalizó el principio de la palanca de Arquímedes. No sólo se ocupó de temas vinculados con la ingeniería sino que escribió varios tratados sobre aristmetica y geometría. Entre ellos se encuentra *La métrica* (*μετρικά*), obra en la que analizó las formas de encontrar las áreas de las superficies y los volúmenes de los cuerpos. Es famoso su teorema que permite calcular el área de un triángulo conociendo sus tres lados[81]. También simplificó los métodos usados por los matemáticos babilonios para encontrar las raíces cuadradas de los números por métodos de iteración.

---

[79] Contiene la descripción de diversos dispositivos en los que una de las partes efectúa movimientos en función del agua que se vierte. Por ejemplo, un pajarito de bronce que al volcal agua a su lado se inclina como si la estuviera bebiendo.

[80] La dioptra era un aparato muy similar a los actuales teodolitos que se usó, durante siglos, para observaciones terrestres y astronómicas.

[81] En todo triángulo de lados a, b y c, y semiperímetro $(a + b + c)/2$, el área de superficie está dado por la raíz cuadrada de $s(s - a)(s - b)(s - c)$.

Uno de sus inventos, la *eolípila,* puede considerarse la primera máquina de vapor construida en el mundo. Consistía en un caldero cuya tapa estaba conectada a una esfera hueca de bronce mediante dos tubos acodados. La esfera podía girar libremente en sentido vertical alrededor de estos dos tubos que oficiaban de ejes. Al calentar agua en el caldero, el vapor pasaba a través de uno de los tubos acodados y al escapar a través de dos aberturas en la esfera provocaba la rotación de la misma.

Figura 2.27. Representación de la eolípila. Knight's American Mechanical Dictionary, 1876.

También desarrolló un sistema en el cual aprovechaba el calor generado en el altar del templo, para abrir sus puertas y otro mediante el cual al abrir las puertas del templo, sonaba una trompeta.

2 – 14.- Aglaónice de Tesalia.

Se sabe que Aglaónice o Aglaoniké (Ἀγλαονίκη) de Tesalia vivió en el siglo II antes de C. No se ha conservado ninguno de sus trabajos y las referencias que nos han llegado de ella han sido a través de un comentario sobre *La argonáutica* de Apolonio de Rodas[82] (295 a. C. – 215 a. C.) y de Plutarco (46 – 120 d.C.). Por Plutarco se sabe que fue hija de Hégetor de Tesalia, aunque otros historiadores sostienen que era hija de Hegemón. Se la considera la primera mujer astrónoma de la Antigua Grecia.

Tesalia era considerada “tierra de brujas”, sus brujas se encuentran entre las figuras más famosas del mundo oculto y subterráneo de los antiguos griegos y romanos, Se creía que una de sus habilidades mágicas más impresionantes, era su capacidad de hacer caer a la Luna de su curso en el cielo, luego de privarla de su iluminación[83].

Según Plutarco (*Obsolescencia de los oráculos,* 13) escrito a finales del siglo I d.C., Aglaonice estaba bien informada tanto en cuanto a la causa de los eclipses totales de Luna como de los tiempos de su ocurrencia: "Siempre en el momento de un eclipse de Luna fingía hechizarla y hacerla caer". En otro pasaje (*Instrucciones para parejas casadas*, 48) Plutarco señaló: "Aglaónice, la hija de Hegetor estaba bien versada en los períodos en los que la Luna llena estaría sujeta a los eclipses y, sabiendo de antemano cuando la Luna iba a ser oscurecida por la sombra de la Tierra, informaba a las audiencias de mujeres, haciéndolas creer que ella iba a atraer la Luna hacia si, haciéndola desapaerecer de la vista.

[82] No hay ninguna mención a Aglaónice en la segunda (y única disponible) edición de la *Argonáutica* de Apolonio de Rodas. Si, aparece en un comentario manuscrito (*Scholia*) del siglo XIII, de autor desconocido. Además todo indica que Aglaónice vivió en el siglo siguiente a Apolonio.

[83] Algunos personajes mitológicos que tenían esta habilidad fueron Medea y Circe.

Se debe mencionar una característica de los eclipses lunares. En la mayoría de los casos, cuyos detalles son conocidos, la Luna no se oscurece en su totalidad. Por el contrario, sigue siendo visible, pero teñida de un matiz como de color óxido más o menos visible. En los últimos siglos, sólo muy raras veces tuvo la Luna eclipses en que quedó tan oscura que — en la ignorancia de los mecanismos causales involucrados, — uno podría convencerse de que había desaparecido del cielo. Uno de los casos en que la Luna casi desapareció fue durante el eclipse del 30 de diciembre de1963. Walter H. Haas, fundador de la *Association of Lunar and Planetary Observers,* que fue testigo de su progreso en Cruces, Nuevo México, posteriormente señaló: "Ahora estoy dispuesto a creer que, a veces en un eclipse, la Luna desaparece por completo de la vista". Para encontrar ejemplos más recientes de eclipses ultra oscuros de Luna hay que retrotraerse al del 22 de marzo y al del 15 de septiembre de 1913.

Si hay algo sorprendente y extaordinario en la información obtenida de los historiadores es que Aglaonice *predijo que ella misma iba a bajar la Luna, retirándola del Cielo,* no que iba a reducir su luz o que cambiaría la tonalidad de su color. Si al producirse el eclipse que ella predijo, la Luna no hubiese quedado completamente invisible su "predicción" no se habría cumplido y la valoración que tenían sus contemporáneos sobre sus dotes de hechicera habría disminuido sustancialmente.

Lamentablemente, la poca información que tenemos sobre Aglaónice no da indicios directos en cuanto a la época en que vivió. El límite superior de su actividad sería, por supuesto, 100 d.C., cuando Plutarco estaba escribiendo, aunque por la poca información que expuso el historiador, no daría la impresión de que se estuviera refiriendo a una figura contemporánea. En cuanto al límite inferior, la actividad de Aglaónice difícilmente haya sido anterior a mediados del siglo III a. C. Fue sólo durante el período seléucida (que comenzó en el año 312 a.C. con la fundación de Seleucia) que los astrónomos de Babilonia, usando la trigonometría esférica, perfeccionaron los métodos infalibles de previsión de eclipses lunares y de estimación de cuán completo podía ser cualquier eclipse en particular. Estos conocimientos fueron conocidos en todo el mundo mediterráneo a partir de mediados del siglo II a.C.

El poeta romano Titus Lucretius Carus, partidario de las ideas de Epicuro, que vivió del 94 al año 55 a.C. escribió *De rerum natura.* Al momento de su muerte, su obra aún debía recibir su revisión final, por lo que la publicación la efectuaron sus mandatarios. Sobre la base de una Física atomista cuidadosamente articulada, Lucrecio expuso una filosofía materialista y luego pasó a tratar con el mundo macroscópico en general. En la línea 751 del quinto libro, entre cuyos temas están los fenómenos celestes, los eclipses de Luna son etiquetados, usando palabras de la literatura latina, "*Solis item quoque defectus lunaeque latebras* ...". Latebra (æ) significa escondrijo, guarida, escondite ... Por lo que la traducción de la frase sería "Del mismo modo que en el eclipse de Sol, la Luna se esconde ...". Esto es, la expresión evoca a la Luna como encaminándose hacia a algún lugar oculto.

Si bien Lucrecio usaba un lenguaje poético, tuvo que ajustarlo continuamente a una descripción de carácter científico de los fenómenos naturales, la que debía requerir un cierto grado de precisión en el lenguaje. El vocabulario usado permite inferir que Lucrecio sabía de la producción de eclipses en los que ocurre una "desaparición" completa de la Luna.

En los últimos años de su vida, el jurista y político Marcus Tulius Cicero (Cicerón, 03/03/106 – 07/12/43 a.C.) escribió varias obras que tratan sobre Filosofía y temas relacionados. En el año 44 escribió *De divinatione* donde, entre otras cuestiones vinculadas a las costumbres religiosas romanas, analizó la práctica adivinatoria y su racionalidad. En el 2.17 hace notar la habilidad de los astrónomos para calcular cuándo la sombra de la Tierra le ocultará la luz solar a la Luna. En ese momento, expresó, la Luna se volverá necesariamente invisible. Por lo que también Cicerón estaba seguro que un eclipse total de Luna implica la desaparición del disco lunar.

Si bien los eclipses de Luna no ocurren a diario, los escritores de Grecia y de Roma no se ocuparon dar descripciones detalladas de los mismos sino que apenas dieron cuenta algo más que su mera ocurrencia. Actualmente sólo se conservan, con algunos detalles, los documentos referidos a cuatro de tales eclipses, que corresponden al período comprendido entre Alejandro Magno y el primer año de gobierno del emperador romano Tiberio.

El 20 de septiembre del 331 a.C.[84], se produjo un eclipse total de Luna, poco antes de la crucial batalla de Gaugamela, en la planicie mesopotámica, donde Alejandro aniquiló al ejército de Dario. En la sección 4.10.1 de su *Historiæ Alexandri Magni Macedonis,* Quintus Curtius Rufus (siglo I, d. C.) escribió que los camaradas de Alejandro Magno contaron que durante todo el eclipse de Luna, esta tomó el color de la sangre. Esta es la clase de eclipse que se considera normal.

El 21 de junio de 168 a. C. Se produjo un eclipse de Luna, también antes de una batalla importante. Este eclipse ocurrió durante el choque de los ejércitos del Cónsul romano Lucius Æmilius Paulus y del rey macedonio Perseo. Conocido como la batalla de Pydna (Macedonia). El historiador romano Tito Livio (44 a.C. – 37d.C.) escribió que uno de los tribunos militares de Paulus, Gaius Sulpicius Gallus, que era muy entendido en Astronomía, reunió al ejército romano antes del eclipse y le informó a la tropa de su inminencia y de su causa. De esa manera se obvió que la tropa, ignorante, entrara en pánico ante un acontecimiento de esa naturaleza. Los detalles del eclipse fueron suministrados por Plutarco (*Vida de Æmilius Paulus*, 17): “Al hacerse de noche y cuando después del rancho se iban a dormir y a descansar, la Luna, que estaba llena y bien descubierta, empezó de pronto a ennegrecerse y desfalleciendo su luz, habiendo cambiado diferentes colores, desapareció”.

Esta descripción, breve como es, no es muy diferente a las descripciones de testigos oculares del eclipse lunar del 30 de diciembre de 1963. En esa ocasión, durante el eclipse se observaron tonalidades azules y rojas en diferentes regiones de la superficie lunar pero, posteriormente todas desaparecieron. En el caso del eclipse de Pydna, es altamente probable que la imagen de la Luna haya desaparecido.

Según Cicerón (en *De divinatione*, 1.18), quien el 3 de mayo del año 63 a.C. era Cónsul en Roma, pudo observar el eclipse y afirmó que la Luna se desvaneció por completo dejando sólo, como telón de fondo, un cielo estrellado.

[84] Extrapolado del calendario juliano.

Del eclipse del 14 de septiembre del año 27 d. C. se tiene como fuente al historiador romano Tácito (*Anales,* 1.28) quien tuvo a su disposición las descripciones de varios testigos oculares. Según los testimonios de los observadores de Pannonia[85], la presencia de nubes hizo prácticamente imposible la observación del eclipse desde el inicio hasta avanzado su progreso. En ningún momento la Luna se tornó invisible. Por lo que este eclipse fue normal.

Esta normalidad persistió hasta las últimas décadas del siglo I d. C. Esto se puede inferir de Plinio el Viejo (*Historia natural,* 2.42), quien escribiendo no más allá del año 79 d. C., dio por seguro la visibilidad de la Luna durante sus eclipses. Dos pasajes de *Lucius Annæus Seneca* (*Fedra,* 788, y *Cuestiones naturales*, 7.27.1), ambos libros escritos entre el 50 y el 65 d.C., se refieren al enrojecimiento de la Luna durante los eclipses. Plutarco en *De facie in orbe lunæ*, 21, refiriéndose a su época, fines del siglo I, afirmó categóricamente que la Luna no es del todo invisible durante un eclipse total, sino que atraviesa por una amplia gama de colores: *Puede ser de un tono rojo oscuro a rojo fuego o mostrar apenas enrojecimiento y, a veces, se ha observado un tinte azul o azulado.* Él asoció estas variaciones de color con el momento de la noche en que fuera observado el eclipse.

Algunos astrónomos han sugerido la posibilidad de que entre el siglo II y fines del siglo I se hayan producido varios de eclipses lunares “absolutos” por lo que el eclipse de Pydna del 168 a. C., y los que describieron Lucrecio y Cicerón no habrían sido fenómenos aislados.

En la actualidad, el resplandor rojizo de la Luna y sus cambios de tonalidad durante un eclipse total “normal”, se explica fácilmente. Cuando la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, la luz del Sol que bordea la atmósfera terrestre sufre una refracción y se desvía hacia el cono de sombra que proyecta la Tierra y sus longitudes de onda más cortas son atenuadas como resultado de la absorción debida a la dispersión de Rayleigh.

Evidentemente, en el caso de eclipses de Luna anómalos, se ponen en juego otros factores. Una de las hipótesis propuestas para explicar las características inusuales del eclipse lunar del 30 de diciembre de 1963 trata de considerar esta anomalía como el resultado de la presencia, en la alta atmósfera terrestre, de polvo volcánico expulsado durante el curso de la erupción del Monte Agung en Bali, Indonesia, el 18 de febrero de ese año[86]. Circunstancias similares parecen haberse dado previamente a otros eclipses oscuros ocurridos en tiempos relativamente recientes. Los eclipses del 22 de marzo y del 15 de septiembre de 1913 se pueden vincular con la erupción más grande del siglo XX, que terminó con la explosión del Monte Katmai en Alaska durante junio de 1912. El eclipse lunar oscuro del 04 de octubre de 1884 ocurrió luego de de la erupción del volcán Krakatoa iniciada el 26 de junio de 1883, cuya explosión voló las dos terceras partes de la isla. Durante el eclipse del 16 de junio de 1816, la Luna tomó primero un color muy oscuro y luego se tornó invisible. Ese eclipse ocurrió poco después que, durante abril de 1815, una erupción seguida de la explosión del volcán indonesio Tambora expulsó a la atmósfera 150 km^3 de cenizas volcánicas.

[85] Región de Europa central bañada por el río Danubio que hoy pertenece a Hungría.
[86] Brooks, E. M., *ibid.,* 346 (1964).

Dado que el contenido de los núcleos de hielo de Groenlandia parece incompatible con eventos volcánicos de la magnitud de Krakatoa o Tambora que se hayan producido durante el período 170 – 45 a.C.[87], no es correcto asignarle a las cenizas volcánicas la causa de la serie de eclipses anómalos de la época romana. No hay registros de una actividad volcánica a escala mundial tan intensa y tan continua como para haber causado eclipses lunares oscuros, Por lo que, forzosamente, debe buscarse una línea alternativa de explicación.

En 1920, en dos artículos,André–Louis Danjon[88] llegó a la conclusión de que el grado de brillo de la Luna eclipsada es una función de la fase de un ciclo solar de aproximadamente 11 años. Su punto de vista fue apoyado posteriormente por dos estudios de Gérard De Vaucouleurs[89] y luego, algo más tarde, por Bell y Wolbach[90] quienes sugirieron modificaciones menores. Más recientemente, la hipótesis de Danjon fue ratificada por Hughes[91]. Básicamente, la situación parece ser la siguiente. En los dos años inmediatamente después del mínimo del ciclo solar, la Luna eclipsada presenta un color muy oscuro o es invisible. Una vez que el ciclo supera el mínimo, durante un eclipse la Luna se vuelve más brillante y más rubicunda hasta que, durante el séptimo y octavo año después del mínimo, al eclipsar alcanza su máximo esplendor, mostrando un color rojo vivo, o color cobre con tonalidades anaranjadas. En los eclipses posteriores el brillo cae bruscamente hasta “apagarse” dos años después del mínimo del ciclo solar. En general, en el marco de este patrón general, los eclipses de invierno son aparentemente más brillantes que los que se evidencian en otras estaciones[92].

Algunos autores, han rechazado por completo la mera existencia de Aglaónice[93] y hasta cuestionado la existencia de eclipses donde la Luna se tornó invisible.

2 – 15.- Hipatia de Alejandría.

Hipatia vivió siempre en Alejandría. No hay pruebas de que haya salido alguna vez de la ciudad: ni siquiera por un breve periodo, por ejemplo, para estudiar en Atenas, como han sugerido algunos investigadores[94]

Vivió con su padre, Teón, (c.355 – c.405) y daba clases a sus alumnos que procedían no sólo de Alejandría sino de todo Egipto y de otras regiones como Cirenaica, en lo que hoy es Libia. En su juventud, fue una mujer hermosa pero se destacó en Alejandria por su condición de erudita. Su personalidad inspiró respeto y, en determinados círculos, provocó controversias. Hay opiniones encontradas sobre el año de su nacimiento. Muchos historiadores estimaron su nacimiento el el año 370,

---

[87] Hammer, C. U., Clausen, H. B. and Dansgaard, W., *Nature, Lond.*, **288,** 230.
[88] Danjon, A., *Compt. rend. Acad. Sci. Paris, 111,* 1127 and 1207 (1920).
[89] De Vaucouleurs, G., *ibid.*, **218,** 655 and 805 (1944).
[90] Bell, B. and Wolbach, J., *Icarus*, **4,** 409 (1965).
[91] Hughes, D. W., *Nature, Lond.*, **253,** 503 (1975).
[92] Fisher, W., *Smithson. Misc. Coll.*, **76,** no. 9 (1924).
[93] Stothers, R. B., “Dark Lunar Eclipses in Classical Antiquity” *Brit. Astron. Assoc*. J. 1986 **96** 2
[94] H. Druon, *Etudes sur la vie et les œuvres de Synésios, évêque de Ptolémais*, París 1859, pág. 10.

sobre la base de la estimación de Hesiquio de Alejandría, quien habría sido uno de sus estudiantes, que aprece publicada en el *Suda¸* enciclopedia bizantina completada a fines del siglo X. Pero Sinesio de Cirene, que estudió con Hipatia entre el 390 y el 395 y fue su discípulo preferido, nació entre el 368 y el 370, lo que hace difícil creer que haya tomado clases de filosofía con una mujer menor que él. Ateniéndonos a los comentarios de varios historiadores que afirmaron que al momento de su muerte (415), Hipatia era una mujer mayor consideramos que es muy probable que haya nacido alrededor del 355.

Teón fue un erudito extraordinariamente culto, fue matemático y astrónomo. El *Suda* dice que dirigió el Museo de Alejandría. Si bien incursionó en la Filosofía, sus trabajos versaron principalmente sobre los textos de Euclides y de Claudio Ptolomeo. Entre las obras de Teon que han sobrevivido, se encuentra una adaptación para sus alumnos de los *Elementos* de Euclides, con comentarios y notas aclaratorias, así como *Los datos*, y *La óptica*, adaptaciones conocidas y copiadas por los bizantinos, fueron utilizadas durante la Edad Media como textos explicativos de las obras de Euclides.

Teón también escribió comentarios sobre Jos trece libros del *Almagesto* (*Sintaxis matemática*) y dos comentarios sobre las *Tablas* de Tolomeo: *El gran comentario*, en cinco libros; y *El pequeño comentario*, en uno. En todos estos comentarios colaboraron algunos de sus alumnos y, principalmente, Hipatia, su colaboradora más directa.

De los estudios matemáticos de Hipatia sólo se conservan los títulos. En su época fue muy apreciada, no sólo por ser hija y colaboradora de su padre, sino que fue descripta como superior a él en talento. El historiador eclesiástico Filostorgio, (368 – 439) por ejemplo, comentó que, después de ser iniciada por Teón en los arcanos de las matemáticas, Hipatia eclipsó a su maestro no sólo en ese campo sino, sobre todo, en Astronomía.

Hipatia escribió comentarios sobre *Las secciones cónicas* de Apolonio de Pérgamo y sobre la *Aritmética* de Diofante. En la *Suda* figura que escribió un comentario sobre un libro titulado *El canon astronómico*[95]. También hay consenso entre los historiadores que buena parte de las aclaraciones, comentarios y explicaciones para estudiantes de los trece libros del *Almagesto* fueron obra de Hipatia.

Aprendió de su padre a construir el planisferio y mediante la aplicación de la geometría de Apolonio de Pérgamos, enseñó a Sinesio a construir un astrolabio, instrumento, que permite calcular las posiciones relativas de estrellas y planetas.

Mientras que Hipatia daba clases a sus estudiantes sobre cuestiones filosóficas, analizaba con ellos problemas matemáticos y ellos leían diversas obras sobre temas religiosos y realizaban experimentos astronómicos, en Alejandría comenzaron a producirse acontecimientos de gran importancia resultantes de las actividades del patriarca Teófilo. Desde el comienzo de su pontificado, en 385, Teófilo llevó a cabo en la ciudad una campaña contra el paganismo, eliminando por distintos méto-

[95] El Canon astronómico es el nombre que le dio Hesiquio de Alejandría a las Tablas de Ptolomeo.

dos los cultos religiosos todavía existentes[96]. Al producirse disturbios porque la Iglesia se había apropiado de templos paganos, Teófilo aprovechó la oportunidad para atacar el Serapeo, en otro tiempo, centro pagano del culto en Alejandría. La acción contra el santuario se produjo en el 391 ó 392. Sucedió, en cualquier caso, después del edicto de junio de 391 del emperador Teodosio I, el cual, con la prohibición de las prácticas paganas, abrió el camino para la destrucción de los lugares de culto.

El número de paganos que habitaban Alejandría era aún considerable y muchos de ellos se atrincheraron en el templo e hicieron incursiones contra los cristianos que lo sitiaban. Esto le dio el pretexto a Teófilo para dirigirse a las autoridades civiles y militares y pedirles ayuda. Al poco tiempo, el Emperador sancionó un decreto por el cual ordenó que los paganos debían abandonar el templo, proclamaba mártires a los cristianos muertos y entregaba el Serapeo a la Iglesia. Al tomar posesión, un soldado hizo añicos con un hacha la magnífica estatua del dios Serapis, obra de Briaxis.

Muchos intelectuales de Alejandría ayudaron a los paganos en su defensa de los objetos sagrados y de los símbolos del culto. Ente ellos, el filósofo neoplatónico Olimpio, quien había asumido el liderazgo de la resistencia en el Serapeo; también adhirieron a los paganos Amonio y Heladio, profesores de lengua y literatura griegas, así como el poeta Paladas y, probablemente, el poeta Claudiano.

A pesar de los graves disturbios, la actividad filosófica de Hipatia no se vio afectada. Ella, al no sentir atracción por el politeísmo griego ni por los cultos locales se mantuvo al margen del conflicto. Pero el 15 de octubre de 412 falleció el patriarca Teófilo. Por la sucesión pujaron: Timoteo, que había sido arcediano de Teófilo y Cirilo, sobrino de Teófilo. Timoteo contaba con el apoyo de Abundancio, comandante militar de Egipto. No obstante, el 17 de octubre, el elegido como obispo fue Cirilo. Con el nuevo obispo se produjo una ampliación de la autoridad episcopal en los asuntos públicos, municipales y comenzó una batalla por la pureza de la fe. Cirilo ordenó una campaña contra los grupos que sostenían creencias heterodoxas. Expulsó de la ciudad a los seguidores de Novaciano, el "antipapa", cerró sus iglesias, confiscó sus objetos litúrgicos y le canceló todos los derechos a su obispo. Luego se volvió contra los judíos. Azuzó a sus seguidores contra ellos y la violencia llegó hasta la quema de las sinagogas y la expulsión de muchos judíos de la ciudad. Ante la magnitud de los hechos, el prefecto Orestes informó al Emperador. Las relaciones entre el poder eclesiástico local y el poder secular se tensaron cuando Cirilo hizo venir 500 monjes del monasterio de Nitria, los que insultaron, atacaron e hirieron al Prefecto.

En una sociedad alejandrina dividida, Hipatia tomó partido por Orestes, quien quería ponerle límites al fanatismo religioso de Cirilo y sus seguidores. Hipatia era una personalidad muy respetada, no sólo en Alejandría, sino también en Constantinopla. Para desacreditarla, los seguidores de Cirilo comenzaron a hacer circular versiones acerca de que ella era una bruja que practicaba la magia negra, actividad castigada severamente por el sistema legal del imperio cristiano. Los rumores sobre la práctica de la magia negra provocaron suficiente miedo entre la gente ordinaria como para que, entre ellos, hubiese gente dispuesta a actuar de manera violenta y despiadada contra los brujos. Para

[96] Rougé, 1990, pág. 487, observa que Teófilo no se diferencia particularmente de sus predecesores (o sucesores) en la persecución del paganismo sino que actúa de acuerdo con las leyes vigentes, pero en forma más rigurosa.

sustentar la idea que ella era una bruja, recurrieron a los trabajos de astrología e interpretación de los sueños de Teon. Afirmaban que por un embrujo de Hipatia, Orestes se había volcado contra la Iglesia y tomado parte a favor de los judíos. En el año 414, el conflicto entre los cristianos y judíos pasó a los hechos. Los hechos de violencia entre unos se sucedían continuamente. Durante la cuaresma de marzo de 415 una horda dirigida por un monje llamado Pedro, interceptaron a Hipatia cuando ella regresaba a su casa. La plebe la sacó del carruaje y la arrastró hasta la iglesia del Cesarión, un antiguo templo del culto del emperador. Allí le arrancaron la ropa y la asesinaron con fragmentos de cerámica. Luego llevaron su cuerpo fuera de la ciudad hasta un lugar llamado Cinaron, donde lo quemaron sobre una pira.

Luego del asesinato, Orestes pidió el retiro y se fue de Alejandría. Cirilo recuperó todo su poder. A su muerte, Cirilo fue canonizado por haber destruido la idolatría en Alejandría.

Bibliografía

Abreu Mora, A., (**2012**): ¿Como midió Eratóstenes la circunferencia de la Tierra hace 2000 años? En http://todaslascosasdeanthony.com/2012/07/02/como-eratostenes-midio-la-circunferencia-de-la-tierra-hace-2-mil-anos/

Aristotle, (**1922**): *De Cœlo*, traducción al inglés de J. L. Stocks y H, H, Joachim, Oxford University Press, London.

Bicknell, P. "The Witch Aglaonice and Dark Lunar Eclipses in the Second and First Centuries BC", *J. Brit. Astron, Assoc.* 1986 **93** 4 160 – 163.

Cantor, M., (1894): *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, Band I, zweite Auflage, Teubner, Leipzig

Censorinus (1867) : *De die natali* (Edición de F. Hultsch), Teubner, Leipzig.

Copleston, F., (**1984**): *Historia de la Filosofía. Tomo I. Grecia y Roma*. Ariel Filosofía. Teruel.

Diels H., Kranz, W. (**1903**): *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Weidmann, Berlin. Abreviado como *como Vor.*

Diels, H., (**1879**): *Doxographi Grœci*, G. Reimer, Berlin. (Abreviado en el texto como *D. G.*)

Dio (**1914**): *Roman History* (*Volume* II*: Fragments of Books* XII – XXV) Translated by E. Cary, Loeb Classical Library, Harvard University Press, Cambridge.

Dzielska, M., (**1996**): *Hypatia of Alexandria*, Harvard University Press: New York.

Franck, A. "Fragments qui subsistent de Démocrite," en *Mémoires de la Société royale de Nancy,* 1836. pp. 1 – 37.

García Bacca, J. D., (**1944**): *Los Presocráticos,* Fondo de Cultura Económica, México.

Guthrie, W.K.C., (**1993**): *Historia de la filosofía griega*, vol. II, Gredos Madrid.

Heath, T., (**1913**): *Aristarchus of Samos*. *The Ancient Copernicus*, Oxford University Press, London,

Heiberg, J. L., (**1879**): *Quœstiones Archimedean*, Hauniae, Copenhagen

Heiberg, J. L., (**1880-1**): *Archimedis opera omnia cum commenlariia Eutocii.* Teubner, Leipzig.

Hiller, (**1878**): E., *Theonis Smyrnaei: expositio rerum mathematicarum ad legendum Platonem utilium,* Teubner, Leipzig.

Hultsch F., (**1895**): *Archimedes* en Pauly-Wissowa's Real-*Encycloptidie der classischen Altertumswmeiwhaften*., n. 1, pp. 507-539.

Kirk, C.S., Raven, J.E., (**1970**): *Los filósofos presocráticos*, Gredos, Madrid.

Lindberg, D., (**1992**): *The beginnings of western science: the European scientific tradition in philosophical, religious, and institutional context,* 600 *b.c. to a.d* 1450, Chicago University Press, Chicago, cap. 1 (Hay traducción española: Inicios de la ciencia occidental, Paidós)

Mondolfo, R., (**1979**): *La comprensión del sujeto humano en la cultura antigua*, Eudeba, Buenos Aires, Segunda Parte.

Mullach, F. W. A. (**1843**): *Democriti Abderitæ operum fragmenta*. Besseri, Berlin,

Mullach, F. W. A., (**1843**): *Democriti Abderitæ operum fragmenta*. Besser. Berlin,

Plutarco, (**1911**): *De facie in orbe lunæ apparet*, Traducción al inglés de A. O. Prickard, Warren & Sons Ltd., Winchester.

Plutarco: (**1991**): *Vidas paralelas, Marcelo.* Traducción de Antonio Ranz Romanillos. Editorial Planeta. Barcelona, pp. 443 – 483.

Ptolemaeus, Claudius (**1898**): *Sintaxis mathematica*, Ed. de Heiberg, Reubneri, Leipzig.

Reuvens, C.J.C.; (**2011**): Lettres a M. Letronne. Sur Les Papyrus Bilingues Et Grecs: Et Sur Quelques Autres Monuments Gréco-égyptiens Du Musée D'antiquités De L'université De Leide. Nabu Press, Paris.

Rochberg, F., "The cultures of ancient science: some historical reflections", *Isis*, **1992**, 83, pp. 547-553.

Schiaparelli G.V., (**1873**): *I precursori di Copernico nell'antichità ricerche storiche* , Ulrico Hoepli, Milano.

Shank, M.H., (**2000**): "Introduction" en: M. Shank (ed.) *The scientific enterprise in Antiquity and the Middle Ages*, Chicago University Press, Chicago.

Swerdlow, N. "Otto E. Neugebauer (26 May 1899-19 February 1990)", *Proceedings of the American Philosophical Society,* 137, nº 1 (**1993**), pp. 139 -165.

T. Livius (1946): *T. Livii Ab Urbe Condita Libri, Liber XXIV*, Commento e note di Umberto Moricca, Chantone Editore, Torino,

Tannery, P., (**1893**):*Recherches Sur L'Histoire de L'Astronomie Ancienne*, Gauthier - Villars, Paris

Tannery, P., (**1930**):*Pour l'histoire de la science hellène*, 2e Edition, Gauthier - Villars, Paris

Woodcroft, B., (**1851**): *The Pneumatics of Hero of Alecandria*, Taylor, Walton & Maberly, London.

Zeller, E., (**1955**): *Outlines of the History of Greek Philosophy*. 13ª edición. Meridian Books. New York.

Zeuthen, H. G., (**1896**): *Geschichte der Mathematik im Altertum und Mittelalter*, Teubner, Copenhagen.

III. LA CIENCIA EN LA EDAD MEDIA

3 – 1. - Introducción.

Con la caída del Imperio Romano de Occidente, la actividad científica en Europa se volvió irrelevante. En cambio, la expansión del Islam trajo aparejado, a partir del siglo VII, el surgimiento de centros culturales donde los eruditos tradujeron una gran cantidad de textos científicos del griego al árabe, al sirio y al farsi, dedicándose, además a comentarlos y a ampliarlos. Bagdad, Damasco y se convirtieron en centros culturales que no sólo atrajeron a estudiosos de Medio Oriente sino también de Europa.

3 – 2.- Mahoma.

Figura 3.1. Mahoma (570 – 632)

El profeta Mahoma (Abu l-Qasim Muhammad ibn ‘Abd Allāh al-Hashimi al-Qurashi) nació en el año 570 y quedó huérfano a una edad muy temprana. Desde muy joven trabajó como camellero de las caravanas. Pertenecía a la familia Hashim de la tribu de Kuraish y vivía en la Meca, ciudad que debía su prosperidad a que estaba en el camino de la caravanas que viniendo de Abisinia a través del Yemen se dirigían a Palestina y a Siria. Era de salud precaria pero de mente lúcida y sensitiva, y ya en la juventud dedicaba buen tiempo para la meditación sobre temas religiosos. Paulatinamente se fue convenciendo que estaba destinado a cumplir una misión divina. Se casó con Khadija, una viuda rica cuyos camellos él cuidaba y eso le permitió ahondar sus cavilaciones religiosas libre de preocupaciones económicas a la vez que disponía de tiempo para tener extensas discusiones con numerosos judíos y cristianos que vivían en La Mecca o que llegaban allí por negocios.

Figura 3.2. La Kaaba, en nuestros días

Poco a poco, Mahoma se fue desencantando con las creencias religiosas de la gente del lugar. En esa época, los árabes eran bastante fetichistas, rendían culto a ciertas piedras, árboles, estrellas y otros objetos inanimados, creían en la existencia de "genios", espíritus y demonios. El centro de las plegarias era la Kaaba, una construcción cúbica en la cual se encontraba una piedra negra, de carácter sagrado, de la que se decía que había caído del cielo en la época de Abraham. Esta reliquia — que aún se encuentra allí — atraía peregrinos de todas partes, especialmente durante la gran feria que se realizaba anualmente el La Mecca. De acuerdo con las preferencias de cada tribu, se agregaban ídolos a la Kaaba y esto incentivaba el peregrinaje hacia La Mecca con el consiguiente beneficio económico para sus habitantes.

Alrededor de los cuarenta años, Mahoma comenzó a predicar contra esta forma de politeísmo, instando a la gente a hacer penitencia y a adorar al Único Dios Verdadero — en árabe: Allah. Su sistema religioso estaba basado sobre el judaísmo y el cristianismo, pero consideraba a Jesucristo no como una divinidad sino como un profeta, tal como lo fueron Moisés o Isaías y se consideraba a sí mismo como el último y el más grande de los profetas. El nombre con que se designa su religión, el Islam, significa "sumisión a la voluntad de Dios". Su prédica no fue del agrado de las personas que se enriquecían con el peregrinaje idólatra y Mahoma comenzó a ser presionado para abandonar su prédica. La situación se tornó tan enojosa que Mahoma decidió abandonar La Mecca. Con algunos de sus seguidores se dirigió hacia el Norte, hacia la ciudad de Yathrib, que después se conocería como Medina, o, en forma más completa, Medinath al Nabi, "La ciudad del Profeta".

Figura 3.3. El Corán.

En Medina se convirtió en líder de una entusiasta comunidad religiosa. Se considera que la religión musulmana se inicia a partir de esta migración (*hijra o héjira*) y ya en el año 630 Mahoma regresa triunfal a La Mecca y ordena la destrucción de todos los ídolos bajo el lema. "No hay otro dios que Allah y Mahoma es su profeta". A este monoteísmo estricto, Mahoma adicionó los principios de creer en la piedad de Dios, la necesidad de arrepentimiento en los pecadores, la obligación de rezos y ayunos regulares, la obligación de dar limosna, y la de peregrinar a La Mecca, al menos una vez en la vida.

Figura 3.5. Omar I.

Si bien, Mahoma no llegó a extender su dominio sobre toda la península arábiga, logró encolumnar a varias tribus, amalgamando el concepto de religión con el de Estado.

La expansión del Islam ha sido imaginada como una *jijad* o guerra santa con los musulmanes avanzando con espadas en una mano y el Corán en la otra. Pero esto es una deformación de la realidad. El tiempo estaba maduro para la conquista, con una nación impaciente para abandonar su tierra inhóspita tentada por las tierras fértiles de sus vecinos. La población árabe había crecido en un medio de recursos escasos y entonces la apropiación por la fuerza se tornaba inevitable.

Mahoma falleció en el año 632, pero aún antes de su muerte, los árabes habían hecho incursiones esporádicas sobre las fronteras del Imperio Bizantino. En el año 635 capturaron Damasco. En esas operaciones intervinieron relativamente pocos musulmanes, el grueso de la tropa asaltante estaba formada por beduinos más ansiosos por el pillaje que por propagar el Islam, religión de la que tenían ideas apenas someras. Pero esa fe fue ganando nuevos adherentes.

Figura 3.6. “La mezquita de Omar”, en Jerusalem.

En el año 636, los árabes, comandados por Omar, quien luego seria conocido como Omar I, tomaron Jerusalem haciéndose cargo de los lugares sagrados.

Mahoma murió sin designar quien lo reemplazase en la dirección de la fe y sus seguidores eligieron por aclamación como Califa (sucesor) a Abu Bakr, padre de Aisha, la esposa favorita de Mahoma, con quien se había casado cuando ella tenía seis años[1]. Abu Bakr fue sucedido por Omar I, quien fue el primer califa en asumir el título de *Amir-al-Mu’minim* (Príncipe o comandante de los creyentes). Bajo el califato de Omar ,y de los que lo sucedieron, la expansión árabe a través de la guerra fue extendiendo un imperio que abarcó Egipto, Palestina, Siria, buena parte de Asia Menor, Creta, Sicilia, Rodas y vastas zonas del Norte de África. En esta zona, los musulmanes encontraron una férrea resistencia de los berberes, pero a principios del siglo VIII lograron tomar Septem (hoy Ceuta) y en el año 711 cruzaron a España, comenzando la invasión a Europa. La conquista estuvo encabezada por Jabal Tarik. En su honor, el nombre árabe de Gibraltar es *gibr al tarik* (la montaña de Tarik).

Figura 3.7. Billete de 5 libras emitido por el Gobierno de Gibraltar en homenaje a Tariq.

La invasión a España se completó rápidamente y los conquistadores pasaron a Francia donde en el 732 fueron detenidos en Poitiers por las tropas de Charles Martel (Carlos el Martillo) monarca carolingio del reino franco de Austrasia quien les infligió una dura derrota.

De esta manera, apenas un siglo después de la muerte de Mahoma, el Islam se convirtió en un vasto Imperio que se extendía desde los Pirineos hasta la India. Algunos de los pueblos conquistados siguieron conservando su lenguaje, pero el árabe fue la lengua oficial, religiosa y literaria en todo el Imperio y, en algunos casos, fue obligatorio su uso en público. Por ello, muchos textos alquímicos de esa época están escritos en árabe aunque sus autores eran de otras nacionalidades.

---

[1] Sí, seis años.

Cuando las condiciones políticas se volvieron más apropiadas, los musulmanes manifestaron un gran interés en el desarrollo del conocimiento sobrepasando no sólo a Alejandría sino a otros centros de la cultura griega en la dedicación a la cultura.

En el año 762, el califa Al-Mansour (*el victorioso*) fundó Baghdad cerca de las ruinas de la antigua Babilonia y la convirtió en la capital del Islam, estableciendo allí la sede del Califato Abassida. En esta ciudad Al-Mansour fundó una academia que adquirió gran celebridad. Estableció allí un Colegio Médico, entre cuyas atribuciones se encontraba la de evaluar y dar licencia de médicos a todos aquellos que querían practicar medicina en el Califato. La Academia de Bagdad adquirió tal prestigio que a ella llegaron profesores y estudiantes de diversas partes del mundo antiguo cuyo número llegó a superar los seis mil. El Califa fundó hospitales públicos en donde los estudiantes podían estudiar las enfermedades y en cuyos laboratorios aprendían a preparar medicamentos. En estos hospitales, comenzó a desarrollarse la llamada "Química islámica".

Bajo la administración de Harun al Raschid (764- 809) y Al Ma'mun (786 – 833) se establecieron otros centros académicos y observatorios astronómicos y se tradujeron al árabe una gran cantidad de textos griegos sobre filosofía, astronomía matemáticas, medicina y otras ciencias. Además, a partir del siglo VIII, el Islam fue produciendo sus propios tratadistas.

3 – 3.- La expansión árabe y la espada de Damasco

Los historiadores coinciden en mencionar dos factores importantes en la conquista árabe de los pueblos vecinos y su expansión hacia el Norte de África y el Sur de Europa: el caballo árabe y la espada de Damasco[2].

Sabido es que Ricardo I de Inglaterra, apodado "Corazón de León" por su larga melena rubia, partió a la tercera Cruzada en 1191. Ante la imposibilidad de derrotar a los árabes, el 2 de septiembre de 1192 se reunió con el Sultán Salah-al- Dyn-Yusuf (conocido en Occidente como Saladino) para tratar de acordar el libre acceso de los cristianos a Jerusalem. De esa reunión, se cuenta que los dos enemigos se jactaban del poder de sus respectivas espadas. Ricardo tomó su enorme espada, la levantó con sus dos manos y la dejó caer con toda su fuerza sobre un trozo de roca. El impacto de la espada hizo saltar a la roca en pedazos. Saladino fue más sutil. Deslizó suavemente el filo de su espada, una típica cimitarra del llamado "acero de Damasco", sobre un mullido cojín de plumas. Sin ningún esfuerzo ni resistencia la espada se hundió en el cojín hasta cortarlo completamente como si fuera manteca. Ricardo y sus acompañantes se miraron unos a otros con incredulidad. Las dudas se disiparon cuando Saladino arrojó un velo hacia arriba y, cuando flotaba en el aire, lo cortó suavemente con su espada.

Al regreso de Ricardo a Inglaterra, la historia del encuentro se fue propagando y las espadas de Damasco se convirtieron en legendarias. No sólo podían cortar un velo de seda en el aire sino que

[2] El nombre *espadas de Damasco* proviene no de su lugar de origen sino del lugar donde los europeos las descubrieron durante las Cruzadas.

también podían partir una espada europea sin perder el filo. Durante varios siglos fueron la fascinación y la frustración de los herreros de toda la Europa occidental que trataron en vano de reproducirlas para alcanzar su fuerza y su belleza.

La manera de templar el acero de Damasco fue siempre un secreto profesional de los herreros y llegó a convertirse en un rito macabro. Cuentan las leyendas de Asia Menor que para obtener el mejor acero, este debía calentarse hasta alcanzar el color del Sol naciente en el desierto, luego debía dejarse enfriar hasta el purpúreo real, y para finalmente hundirlo en el cuerpo de un esclavo musculoso. Entonces la fuerza de la sangre del esclavo se transfería a la espada. La interpretación de estas instrucciones es que el metal debía calentarse hasta una temperatura muy alta, seguramente a más de 1000 ºC — cuando adquiere el color del Sol poniéndose en el desierto — luego enfriarse al aire hasta adquirir el color del púrpura real (unos 800 ºC) para finalmente templarse en un medio salado y tibio (la sangre del esclavo, es decir, unos 37 ºC)

En cambio, los herreros europeos forjaban el acero a más de 1200 ºC y rápidamente lo sumergían en aceite para templarlo. Este proceso le restaba plasticidad al metal y ante un golpe muy fuerte solía partirse.

A partir del siglo XV, el empleo de armas de fuego, fue relegando la importancia de la espada en los combates. Los árabes comenzaron a ser expulsados de Europa y la técnica de los forjadores de medio Oriente se fue perdiendo con el tiempo.

En noviembre de 2006, un grupo de científicos del *Institut für Strukturphysic*, *Triebenberg Laboratory* de la Universidad Tecnológica de Dresden dirigido por el Dr. Peter Paufler, limpió con ácido fluorhídrico una pequeña porción de una espada de Damasco auténtica fabricada a fines de la Edad Media. Al analizar la porción atacada con un microscopio de barrido electrónico de alta resolución, detectaron nanotubos de carbono en el acero con el que se había forjado, lo que parece explicar la fortaleza y el afilado borde que hicieron legendarias a esas armas en tiempo de los cruzados.

Dentro de la estructura tubular de los nanotubos encontraron unidades de *cementita* (Fe_3C) encapsuladas. Mientras los nanotubos le confieren plasticidad al acero, la cementita es la responsable de su dureza.

El análisis cristalográfico permitió explicar la extrema flexibilidad de la hoja a la vez que su elevada dureza.

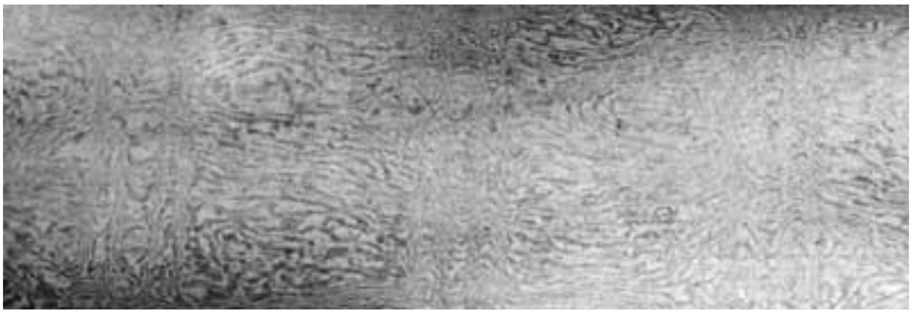


Figura 3.8. Una cimitarra de Damasco. Las zonas más claras que se aprecian en el acercamiento están formadas por cementita y las más oscuras por hierro con un contenido de carbono mucho menor Obsérvese las marcas onduladas, características del acero de Damasco, en la superficie producida por lo nanotubos de carbono.

Según los investigadores, esos nanotubos se originaron a partir de la adición de materiales orgánicos tales como la madera del árbol *Cassia auriculata* y las hojas de *Coltropis gigantean* al proceso de elaboración del arrabio que usaban los forjadores para hacer las espadas.

De esta manera, los artesanos de Oriente Medio habrían estado utilizando, sin saberlo, nanotubos de carbono muchos siglos antes de su descubrimiento.

3 – 4.- Jabir ibn Hayyan (Geber).

Jabir nació en la ciudad de Kufa, en la Mesopotamia, en el año 721 ó 722 y era miembro de la tribu Azd, de allí que se lo nombre como Jabir al Kufi o Jabir al Azdi. En otros textos se lo nombra como Jabir al Sufi indicando que era miembro de una comunidad que cultivaba una especie de misticismo llamado "sufismo". Este misticismo islámico ascético, se llamó así porque sus miembros vestían ropas de lana (*suf*: lana, en árabe). Vivían bajo normas estrictas de austeridad y debían cumplir un cierto número de ejercicios espirituales y religiosos. Muchos de sus principios eran similares a los del neoplatonismo.

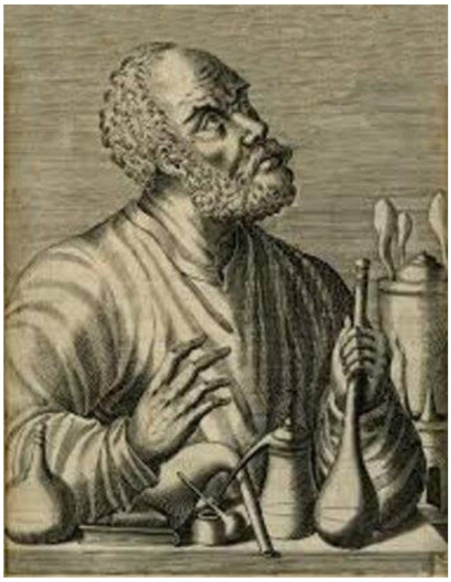


Figura 3.9. Jabir

Huérfano desde niño, fue enviado a Arabia a vivir con unos parientes de la tribu Azd para que lo cuiden hasta que pudiera valerse por sí mismo. En uno de sus libros, Jabir cuenta que estando en Arabia estudió el Corán, Matemática, Astronomía y otros temas, bajo la supervisión de un erudito llamado Harbi al Himyari. Ya adulto regresó a Kufa donde estudió alquimia y donde vivió durante muchos años. Sus conocimientos hicieron que fuera llamado a la corte del Califa Harun al Raschid, en Bagdad. En la corte, trabó amistad con el Imán Shiita Ja'far al Sadiq, hombre de una gran cultura y erudición, quien fue su maestro y su guía. También trabó amistad con los Barmecidas, ministros poderosos del califato, de cuyas historias se cuentan en "Las mil noches y una noche", y uno de esos visires, también llamado Ja'far, lo presentó ante el Califa, el que se mostró interesado en los conocimientos de Jabir y lo contrató como erudito de la Corte.

Durante su estancia en la corte, Jabir escribió varios libros[3] sobre temas tan diversos como un comentarios sobre la geometría de Euclides, tablas astronómicas, un comentario sobre el Almagesto de Ptolomeo, un libro sobre talismanes según la opinión de Apolonio de Tyana, lógica, filosofía, alquimia, medicina, cuadrados mágicos y espejos.

En el año 803, Harun echó a los Barmecidas de la Corte, por lo que Jabir consideró prudente regresar a Kufa. Allí se dedicó a escribir sobre temas tan diversos como Astronomía, Matemática y Alquimia, hasta su muerte (probablemente en el año 815).

La producción escrita de Jabir es tan grande que existe una sospecha fundada de que buena parte de la misma fue obra de escritores posteriores, particularmente ismaelitas del siglo X – XI.

Los grupos de tratados más importantes en el *corpus* de Jabir son (en orden cronológico)

"Los ciento doce libros"

"Los setenta libros"

"Los diez libros de rectificaciones"

"Los libros de los balances"

Estos "libros" tratan sobre una enorme variedad de temas vinculados con sus estudios sobre diversos aspectos de la Naturaleza. En su Comentario sobre los 9 libros del Almagesto, Jabir hizo tantas correcciones que Copérnico lo bautizó "El Calumniador de Ptolomeo". Sin embargo, las Tablas Astronómicas de Jabir se usaron durante buena parte de la Edad Media.

Además de sus estudios teóricos, desarrolló una gran actividad práctica, especialmente en el mejoramiento de la calidad de los aceros, la impermeabilización de telas y en la fabricación de vidrios. A él se debe el agregado de dióxido de manganeso[4] a la composición del vidrio para quitarle su coloración verdosa debido a la presencia de sales de hierro en la materia prima.

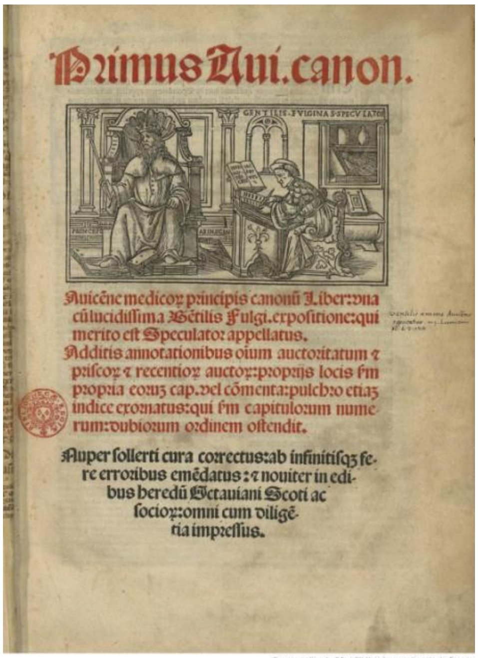
[3] Por la brevedad de esos textos, hoy los catalogaríamos como "artículos".
[4] Llamado hasta en la actualidad "jabón de vidriero".

3 – 5.- Abu Alí ibn Sina (Avicena).

Figura 3.15. Avicena

Abu Alí ibn Sina ha sido descripto como "el Aristóteles de los árabes" y es considerado uno de los más prestigiosos hombres de ciencia que tuvo el Imperio árabe a pesar de ser de de origen persa. Nació en Afshana, cerca de Bukhara en el año 980. Siendo niño, su familia se trasladó a Bukhara donde Abu Alí estudió el Corán y poesía árabe. Su capacidad era tal que al poco tiempo hubo que contratarle tutores que le enseñasen, matemáticas, geometría, lógica y leyes. Siendo adolescente, su afán de conocimientos lo llevó a estudiar Medicina por su cuenta e hizo tales progresos que a los dieciséis años, varios médicos venían a su casa a aprender métodos de tratamiento. A los diecisiete años, fue nombrado médico de uno de los príncipes y con el tiempo fue ocupando cargos destacados llegando a ser "gran visir" (primer ministro) de Shams al Daula, en Hamadhan, donde falleció en 1036 ó 1037.

Avicena produjo una asombrosa cantidad de trabajos científicos, filosóficos, literarios y médicos y su fama trascendió las fronteras del mundo árabe para se reconocido en la Europa Occidental. En conjunto escribió más de 100 libros y, si bien algunos son muy breves, su célebre "Canon de Medicina" contiene alrededor de un millón de palabras. En esa obra, mostró ideas originales sobre psiquiatría, afecciones nerviosas, tratamiento de diversas enfermedades, mostrando, por ejemplo, que la tisis es contagiosa, y que ciertas enfermedades pueden transmitirse por el suelo o por el agua. En la sección farmacológica del Canon, menciona unas 760 drogas, incluyendo narcóticos como la mandrágora, el opio, la cicuta y el cannabis. Durante varios siglos, el Canon fue un texto de lectura obligatoria para la formación de médicos, tanto en Oriente como en Europa.


Primus Aui. canon.

GENTILIS FVLGINAS SPECVLATOR

Auicēne medicoꝝ principis canonū Liber: vna cū lucidissima Gētilis Fulgi. expositione: qui merito est Speculator appellatus.
Additis annotationibus oīum auctoritatum ꝛ priscoꝝ ꝛ recentioꝝ auctoꝝ: proprijs locis ſm propria eoꝝ cap. vel cōmenta: pulchro etiā indice exornatus: qui ſm capitulorum numerum: dubiorum ordinem ostendit.

Nuper sollerti cura correctus: ab infinitisq; fere erroribus emēdatus: ꝛ nouiter in edibus heredū Octauiani Scoti ac socioꝝ: omni cum diligētia impressus.

Figura 3.16. El Canon de Avicena.

Avicena estaba interesado en la música y sus estudios sobre teoría musical estuvieron muy por delante de los que, en esa época, eran corrientes en Europa. En temas de Física, se interesó sobre la transmisión del calor, la energía, la gravedad, el movimiento y sugirió que la luz se desplaza a una velocidad finita. Escribió sobre la filosofía de la Matemática e hizo observaciones astronómicas. Entre sus inventos, merece destacarse una especie de vernier para mediciones muy precisas de longitudes.

3 – 6.- Al Biruni.

Abu Arrayhan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni nació el 15 de septiembre de 973 en Kath[5], Khwarazm (actualmente Kara-Kalpakskaya, Uzbekistan). Desde muy joven estudió con el astrónomo y matemático Abu Nasr Mansur y en el año 990, contando sólo 17 años, produjo su primer trabajo científico al establecer la latitud de su ciudad natal a partir de la determinación del día más corto y más largo del año. A los 22 años, ya había hecho una media docena de trabajos sobre Astronomía y Geografía, uno de los cuales, su *Cartografía*, se conserva actualmente. En este trabajo se presentan varias zonas geográficas sobre una superficie esférica proyectadas sobre superficies planas.


Figura 3.17. al-Biruni

A fines del siglo X y principios del siglo XI, se produjeron muchos disturbios en el mundo islámico y en la región en la que vivía Biruni estalló una guerra civil. En esa época Khwarazm era parte del Imperio Samánida, cuya capital era Bujara. Otros reinos vecinos eran Tabaristán, cuya capital era Gurgan, a orillas del Mar Caspio y más al Oeste se encontraba la Confederación Búyida. En el este de lo que hoy es Irán, se creó el Imperio Ghaznávida, cuya capital era Ghazna, en lo que actualmente es Afghanistán. En la zona donde vivía Biruni, reinaba la familia Banu Iraq y Mansur, su instructor era un príncipe de esa familia. En el año 995 se produjo un golpe de Estado que derivó en una guerra civil y la familia Banu Irak fue derrocada. Al inicio de la guerra civil, Biruni huyó a Ray, una ciudad cerca de la actual Teherán, donde vivió durante algunos años en extrema pobreza.

En Ray, Biruni conoció al astrónomo Abu Mahmud Hamid ibn al-Khidr Al-Khujandi, que estaba trabajando con un instrumento muy grande que había instalado en la montaña vecina, tratando de determinar la inclinación de la eclíptica y la latitud a la que se encuentra la ciudad de Ray. Determinó que el solsticio de verano ocurrió el 16 y 17 de junio de 994 y que el solsticio de invierno ocurrió entre el 14 y el 17 de diciembre de ese año. Pero sus resultados sobre la eclíptica y la latitud no fueron muy precisos. Al-Khujandi discutió con al-Biruni los resultados de estas observaciones. Años más tarde, en su obra *Tahdid*, Al-Biruni explicó que la causa de los errores en las observaciones de al-Khujandi se debieron al excesivo peso del sextante usado, que había producido una modificación inadvertida en su abertura. En esos años, estuvo también en Gilan, una región sobre el Mar Caspio quedando como testimonio un trabajo dedicado a ibn Rustam, el rey de Gilan.

Algunos sucesos de la vida de al-Biruni se conocen con certeza debido a que la descripción de eventos astronómicos en sus obras permite determinar fechas y lugares exactos. La descripción del eclipse de Luna del 24 de mayo 997 que él observó en Kath, permite inferir que para esa fecha había regresado a su ciudad natal. El eclipse fue un evento también visible en Bagdad. al-Biruni había arreglado con Abu'l-Wafa que observara allí la hora de su ocurrencia. La comparación de las horas en las dos ciudades les permitió calcular la diferencia de longitud entre ellas. Alrededor del año

[5] Hoy la ciudad se llama Biruni, en honor a él.

1000 él estaba en la ciudad de Gurgan haciendo observaciones astronómicas que eran solventadas por Qabus ibn Wushmagir, el gobernante de Tabaristán. A él le dedicó su *Cronología de las antiguas naciones*[6] y todavía estaba en la ciudad de Gurgan el 19 de febrero 1003 y 14 de agosto 1003 cuando desde allí observó los eclipses de luna. Debemos notar que La *Cronología* de al-Biruni, son siete obras que escribió entre 1000 y 1004: uno sobre las relaciones entre el sistema decimal y el sexagesimal, uno sobre el astrolabio, uno sobre las observaciones astronómicas realizadas, tres sobre astrología, y una sobre historia desde el siglo IV a.C. hasta el año 1000.

El 4 de junio, al-Biruni estuvo en su ciudad natal ya que desde allí registró el eclipse lunar que ocurrió ese día. Ese año, Alí ibn Ma'mun, que gobernaba Khwarazm, abdicó a favor de su hermano Abu'l Abbas ibn Ma'mun. Ambos hermanos se casaron con dos hermanas del Emperador de Ghazna, quien más tarde incluiría a Khwarazm en su Imperio. Los hermanos ibn Ma'mun no sólo dieron un generoso apoyo económico a al-Biruni sino que coordinaron que trabaje con su antiguo maestro Nasr Mansur. Con ese apoyo, los astrónomos construyeron, en la ciudad de Jurjaniyya, un observatorio y el instrumento para hacer observaciones, aparentemente un gran anillo fijado al plano meridiano, donde hizo 15 observaciones del tránsito solar por el meridiano local desde el solsticio de verano del 7 de junio de 1016 hasta el 7 de diciembre del mismo año. Se dice, que también construyó un hemisferio de 6,85 *m* de diámetro provisto de un conjunto de longitudes y latitudes que él mismo desarrolló.

En 1016, al-Biruni, medió entre Abu'l Abbas ibn Ma'mun y Mahmud el Emperador de Ghazna que quería anexar Khwarazm. Las negociaciones duraron 3 años, pero en 1019 los militares de Khwarazm se sublevaron y asesinaron al Rey. Mahmud inmediatamente invadió Khwarazm, recuperó a su hermana, viuda de Abu'l Abbas, y ejecutó cruelmente a los insurgentes. También se llevó a al-Biruni como prisionero, tanto para tenerlo en su Corte como para sacar de la escena a todos los participantes activos. Al-Biruni estuvo detenido durante unas semanas en el fuerte de Nandana, en el Punjab occidental, pero luego se le permitió vivir en Ghazna, donde residiría hasta su muerte, el 13 de diciembre de 1048.

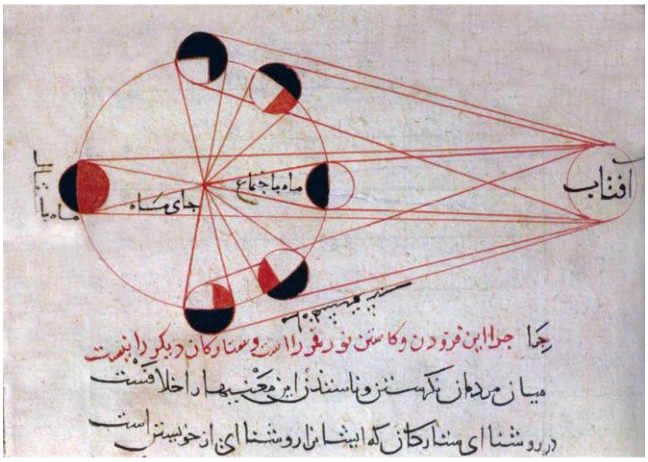


Figura 3.18. Ilustración de al-Biruni sobre las distintas fases de la Luna

En Ghazna construyó un observatorio y estuvo extremadamente ansioso por recuperar sus libros, sus instrumentos y su hemisferio para continuar sus estudios. Su capacidad intelectual era de tal magnitud que Mahmud lo nombró Astrónomo y Astrólogo de la Corte. Mahmud fue conquistando todos los pequeños reinos sobre la antigua Persia y en varias de sus campañas invadió partes de la India. En un par de estas campañas, al-Biruni acompañó a Mahmud y tuvo oportunidad de estudiar las diversas ma-

[6] En 1878 y 1879 fue traducida al inglés por el Dr. Edward Sachau. con el título *The Chronology of Ancient Nations* sobre la base de una copia del siglo XIII. En esa copia faltaban algunos capítulos.

nifestaciones del hinduismo así como la ciencia y la cultura India. Mientras Mahmud saqueaba las riquezas de los templos de Mathura, Kanauj y Somnath, al-Biruni en esas ciudades estudiaba intensamente sánscrito con expertos hinduistas. Aprendió sánscrito cuando tenía cuarenta y cinco años pero fue tan amplio su conocimiento del idioma que los expertos lo llamaron Vidya Sagar, que significa "océano de sabiduría". Al-Biruni consideraba que los centros culturales de la India eran Benarés y Cachemira, pero como estaban lejos de las zonas dominadas por los musulmanes, restringió sus viajes a lugares que estaban bajo el dominio de Mahmud, tales como Punjab y Sind. De sus contactos con la población local hizo un cuidadoso estudio de la cultura clásica de ese país que volcó en su libro *India.*

Durante una visita al Fuerte Nandana, usó una de las montañas vecinas para probar su método trigonométrico para calcular el diámetro de la Tierra. En Ghazna hizo múltiples observaciones, estudió los solsticios y equinoccios y en 1021 completó su tratado *Las sombras.* En esta obra da explicaciones sobre la luz y la oscuridad, sobre la luminosidad y las sombras, el uso del gnomon, sobre las funciones trigonométricas, tangente y cotangente y cómo determinarlas en mediciones astronómicas, cómo usar el astrolabio, explicó como establecer la hora del día en función de las sombras, cómo determinar los equinoccios para cualquier localidad, cómo determinar o corregir la línea del meridiano, sobre el azimut y sus ascensiones y muchas otras aplicaciones astronómicas. Además de las aplicaciones astronómicas, el libro tiene muchos aportes matemáticos, aritmética teórica y práctica, suma de series, análisis combinatorio, estudio sobre los números irracionales, definiciones algebraicas, métodos para resolver sistemas de ecuaciones, geometría, teoremas de Arquímedes, secciones cónicas, proyecciones estéreográficas y resolución de triángulos esféricos.

A Mahmud lo sucedió su hijo mayor, Mas'ud, que era un amante de las ciencias y tuvo gran estima por al-Biruni. Este le dedicó su obra magna *Qanun al-Mas'udi* (el Canon de Mas'ud) una enciclopedia de todos los conocimientos astronómicos desde la época del Almagesto.

Al-Biruni fue un escritor muy prolífico. A los sesenta y tres años, preparó una bibliografía sobre los trabajos del famoso médico al-Razi en su libro *Kutub Muhammad ibn Zakaryya al-Razi*. En este trabajo agregó como apéndice una lista de sus propios libros, que componían 113 títulos, más otros 215 títulos escritos por Abu Nast al-Mansur, Abu Sahl al-Masihi y Abu Alí al-Hassan pero que él los indicó como propios. La lista está parcialmente ordenada de acuerdo con el tema que trata y, ocasionalmente, cada libro tiene una breve indicación de su contenido.

Esta lista es obviamente incompleta ya que al-Biruni vivió catorce años más después de su publicación. También tradujo varios textos del sánscrito al árabe, entre ellos los *Yoga Sutras de Patanjali, Sankyya*, *Varatha Mihira* y el *karana tilak.* Por otra parte, para los hinduistas, tradujo al sánscrito algunos trabajos como los *Elementos* de Euclides, el *Almagesto* de Ptolomeo y su propio tratado *Sobre la construcción del Astrolabio.* Según el historiador Asger Aaboe, al-Biruni cumplió su actividad como traductor y comentarista con gran profesionalismo y sofisticación.

Edward Stuart Kennedy, al explicar el voluminoso trabajo de Biruni, escribió:

Hay un amplio rango de tamaño entre sus trabajos: algunos sólo tienen 10 folios cada uno, mientras que en el otro extremo tres trabajos astronómicos tienen 360, 500 y 600 folios. El trabajo más extenso, *La India*, tiene 700 folios. En otra parte de su libro, Kennedy escribe que "*muchos de los tratados de al-Biruni son el resultado de cálculos extensos y sofisticados y todos exhiben estupenda erudición, originalidad y cáustico humor*[7].

Contando sus obras en árabe y farsi y las que se le adjudican, la cantidad total se eleva a 180. Pero sólo se dispone un sexto de esa cantidad. Las demás han desaparecido o sólo se conoce su título. De las que sobrevivieron, menos de la mitad ha sido publicada. Hasta el presente, buena parte de su obra es un tesoro escondido que no ha sido suficientemente analizado y explicado.

En su honor, la NASA bautizó con su nombre un cráter en la cara oculta de la Luna.

3 – 7. - Alhazen.

Abu 'Ali al-Hasan bin al-Hasan bin al-Haytham, conocido en el mundo occidental como Alhazen, nació en Basra, parte de lo que actualmente es Iraq, en el año 965 de nuestra era; recibió educación en Basra y en Bagdad y, tras una vida fructífera y de enormes aportaciones científicas, murió en El Cairo, Egipto el 6 de marzo de 1040. A veces fue llamado al-Basri, lo que significa proveniente de la ciudad de Basra, en Iraq, y en otras ocasiones llamado al-Misri, que significa proveniente de Egipto.

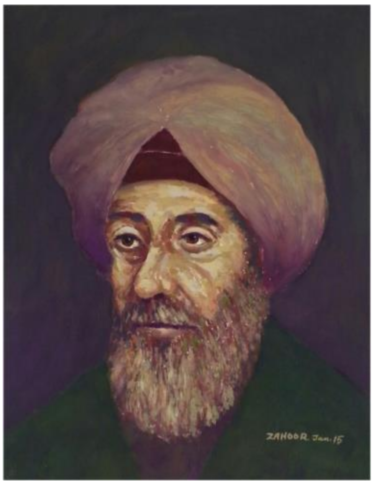
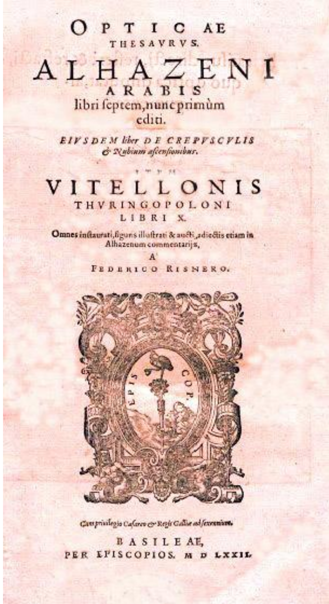


Figura 3.19. Alhazen

Fue un matemático, físico y astrónomo musulmán. A diferencia de muchos eruditos árabes de esos tiempos, su vida y obra están bastante documentadas. Incluso, en el año 1027, escribió una autobiografía.

Por sus trabajos y experimentos con lentes, espejos, reflexión y refracción, se lo considera "el padre de la Óptica" Legó a la humanidad un interesante y amplio tratado sobre lentes y describió la imagen formada en la retina debido al cristalino. Su contribución a la Ciencia, va más allá de los resultados de sus experimentos y de los tratados que escribió. Está dada por el método científico que aplicó en todos sus estudios, la forma de proyectar los experimentos, el ordenamiento de sus observaciones, la forma de delimitar las conclusiones a los resultados experimentales, que abrieron el camino al trabajos de otros eruditos como, por ejemplo, Roger Bacon quien propuso un método empírico basado sobre las experiencias de Alhazen.

[7] **Kennedy, E. S., (1975**): "The Exact Science", en R. N. Frye, Ed., *The Cambridge History of Iran*, Vol. 4, Cambrdige University Press, Cambridge, p. 395.



OPTICAE THESAVRVS.
ALHAZENI ARABIS
libri ſeptem, nunc primùm editi.
EIVSDEM liber DE CREPVSCVLIS & Nubium aſcenſionibus.
VITELLONIS THVRINGOPOLONI LIBRI X.
Omnes instaurati, figuris illustrati & aucti, adiectis etiam in Alhazenum commentarijs,
A FEDERICO RISNERO.
Cum privilegio Caesareo & Regis Galliae ad sexennium.
BASILEAE,
PER EPISCOPIOS. M D LXXII.

Figura 3.20 . Opticæ Thesaurus Alhazeni

De espíritu inquieto fue, en muchos sentidos, un adelantado a su época. Desde muy temprana edad se sintió atraído por los estudios científicos y dedicó su tiempo al estudio de las matemáticas y la física.

Durante su estancia en Egipto vivió cerca de la mezquita de Azhar, en el Cairo, donde hacía sus investigaciones científicas y realizaba labores de profesor. Su producción científica es muy extensa, se calcula en 92 obras, de las cuales se conservan actualmente 55. Fue el primero es establecer una teoría sobre la naturaleza de la luz, totalmente opuesta a las de Euclides y Claudio Ptolomeo, vigentes en su época, según la cual, la luz era una emanación que surgía de los ojos. No sólo propuso que la luz es emitida por el Sol y los objetos incandescentes sino que, también, propuso una teoría sobre la visión.

En lo que hace a la Óptica, escribió un conjunto de siete volúmenes llamado Kitab - al Manazir que es una de las contribuciones más grandes a la Ciencia efectuada en el siglo XI. En el año 1572 fue publicada su traducción al latín bajo el nombre *Opticæ Thesaurus Alhazeni*. En la introducción el autor expresó que estaba iniciando una investigación de principios y premisas para los cuales iba a incluir fundamentos críticos y que expresaría sus conclusiones con cautela. Afirmó que trataría emplear la justicia, que no se dejaría llevar por prejuicios y que procuraría buscar la verdad sin dejarse arrastrar por opiniones. En el primer volumen dejó establecido que su investigación acerca de la luz se basaba sobre evidencias experimentales más que sobre teorías abstractas. Afirmó que la luz es la misma, independientemente de la fuente de donde proceda, y puso como ejemplos la luz del Sol, la luz emitida por el fuego y la que es reflejada por un espejo; todas —afirmó — son de la misma naturaleza.

Fue el primer hombre de ciencia en dar una explicación correcta del mecanismo de la visión, demostrando que la luz es reflejada desde los objetos hacia el ojo. Describió la estructura del ojo, y aunque lo hizo de manera errónea, debido a que no concibió la existencia de una lente en la estructura ocular, estableció criterios que servirían de base a futuros estudiosos del tema.

Alhazen experimentó con la cámara oscura, utilizando la luz de cinco farolas suspendidas para iluminar, a través de un pequeño agujero, la pared de una habitación. De esta manera se formó una imagen invertida de las farolas en la pared opuesta al orificio.

En otra de sus obras hizo un análisis de la percepción visual, de las condiciones necesarias para lograr una buena visión y las condiciones que provocan los problemas visuales. Abordó también, la teoría de la reflexión de la luz y mediante un cuidadoso estudio del pasaje de la luz a través de varios medios transparentes, pudo calcular los ángulos de refracción en función de los ángulos de incidencia, siendo esto el primer antecedente de la ley de Snell. También efectuó experimentos para demostrar que la luz visible está formada por varios colores.

En sus obras, analizó varios fenómenos físicos como las sombras, los eclipses, el arco iris y especuló acerca de la naturaleza física de la luz. También dio una explicación correcta sobre el aparente aumento de tamaño del Sol y de la Luna cuando se acercan al horizonte. En el libro V de Kitab - al Manazir plantea un problema que ha concitado la atención de muchos estudiosos a lo largo del tiempo: "Dada una fuente de luz y un espejo esférico, encuentra el punto en el espejo de donde se reflejará la luz hacia el ojo de un observador" y, a continuación ofreció la solución geométrica.[8]

Alhazen fue el primero en proponer que la densidad de la atmósfera terrestre decrece con la altura y que a partir de cierta altura ya no hay atmósfera[9]. Basó su hipótesis en las mediciones de la puesta del Sol, estimando que el crepúsculo cesa por completo cuando el Sol ya se encuentra 19º por debajo de la línea del horizonte.

Sin duda, Alhazen fue la más grande autoridad de la Física y la Astronomía de la Edad Media. Entre los investigadores que posteriormente fueron influenciados por sus trabajos se incluye a Witelo, Roger Bacon, Johannes Kepler e Isaac Newton.

3 – 8.- al-Bïtrujï .

Abu Ishâk Nur ad-Din al-Bïtrujï **(**latinizado Alpetragius) nació probablemente a mediados del siglo XI en España, vivió en una región llamada Los pedroches, en las proximidades de Córdoba y falleció en el año 1204. Fue un astrónomo y *quadi*[10] islámico. Propuso una Astronomía no ptolemaica, en la cual los movimientos celesten obedecían a causas físicas. Tomó la idea de Abu Bakr de la inexistencia de epiciclos y agregó que tampoco existen las excéntricas. Escribió Kitāb fī l-hay'a (*El libro de Astronomía*) que, en 1217, Michael Scot tradujo al latín bajo el título *De motibus celorum circularibus* y, en 1259, Moses ibn Tibbon tradujo al hebreo.

Al-Bitrūjī consideró que el sistema de Ptolomeo era un dispositivo matemático, con una meritoria exactitud y precisión para los cálculos astronómicos, pero no era un modelo físico asimilable al comportamiento que deberían seguir los cuerpos celestes según los principios de la Física. La exactitud de los cálculos matemáticos del *Almagesto* hizo que al-Bïtrujï adoptara los parámetros ptolemaicos. Pero el principal defecto que le encontró al sistema de Ptolomeo era la incompatibilidad de los principios fundamentales del *Almagesto* con los principios y conceptos de la Física de Aristóteles. Si la fuente de todos los movimientos que se producen en el Universo es el *Primer Movimiento* impulsado desde la novena esfera planetaria, sería absurdo suponer que ese *Primer Movimiento* transmite movimientos en direcciones opuestas a las diferentes esferas — por ejemplo que los movimientos diurnos se dirigen de Este a Oeste, mientras que la Luna se mueve de Oeste a Este. Sostuvo que se debería aceptar que el movimiento de la novena esfera, el más rápido, más fuerte y más simple, se transmite a las esferas inferiores y, a medida que esto ocurre, en movimiento de la esfera

[8] Leonardo da Vinci intentó resolver el problema desde el punto de vista matemático y, al no poder lograrlo, lo enfocó desde el punto de vista mecánico para lo cual inventó un dispositivo que es el primer antecedente del pantógrafo.

[9] Alhazen calculó la altura de la atmósfera terrestre en unos 15 *km* que es, la altura de la troposfera.

[10] Juez que se ocupa de verificar el cumplimiento de la *Sharia*, la ley musulmana.

siguiente se hace tanto más lento cuanto mayor es la distancia a la novena esfera. De este modo, Saturno tendría el movimiento más rápido y la Luna el movimiento más lento.

Estas ideas no fueron originales de al- Bïtrujï. Tito Lucretius Caro (*De rerum natura* V, 621) se las atribuyó a Demócrito de Abdera y Alejandro de Afrodisias se las adjudicó a los pitagóricos. Teon de Alejandría, las incorporó en los *Comentarios al Almagesto* hechos en colaboración con su hija Hipatia.

Al- Bitrūjī propuso que el movimiento transmitido desde la novena esfera choca con el mundo sublunar produciendo las estrellas fugaces que son el elemento fuego, ese movimiento es transmitido a los elementos aire y agua produciendo los vientos, las mareas y las olas.

En sus trabajos, al-Bitrūjī introdujo la teoría de los ímpetus de Aristóteles. Esta fue una teoría auxiliar para explicar el movimiento de un proyectil contra la gravedad. Si el destino natural de los cuerpos graves es el reposo ¿Por qué si se arroja un proyectil hacia arriba no cae inmediamente de haberlo soltado? Para congeniar esto, Aristóteles propuso que el proyectil tenia una tendencia intrínseca a continuar con el movimiento, al que llamó *ímpetu*[11].

3 – 9.- Roger Bacon.

Roger Bacon nació, probablemente, en 1214 en Ilchester, una villa del Condado de Somerset. Inglaterra. Parece haber pertenecido a una familia rica, que, posteriormente, en la lucha entre Henry III y los barones (1258 – 1265), sacrificó su fortuna por la causa del rey. Siendo muy joven, estudió en la Universidad de Oxford, bajo la influencia del filósofo y erudito inglés Robert Grosseteste, obispo de Lincoln y con Adam Marsh, un franciscano inglés, erudito y teólogo, quien lo guió en Matemáticas y Teología. Se grtaduó de Master of Arts, pero no obtuvo el grado de *Doctor of Divinity* (Doctor en Teología). Sin embargo, se lo llamó *Doctor Mirabilis*. Posteriormente, quizás alrededor del año 1236, estudió y dictó clases en la Universidad de París. Se afirma que más tarde viajó a Italia donde le dedicó un libro al Papa Inocencio IV. Regresó a París donde fue docente y conferencista en la Universidad de París. Estando en Francia, conoció a "uno de los hombre más modestos y más sabios de la época", que se había dedicado al estudio de la química, las matemáticas, la astronomía y, sobre todo, a aquellas aplicaciones prácticas de la ciencia experimental que llevaron a Bacon a llamarlo "el amo de experimentos". Ese hombre fue Pierre Pêlerin de Maricourt, (en latín, Petrus Peregrinus de Maharncuria). Entre los interesantes experimentos que realizaba Maricourt se destacan los de magnetismo y, en 1269, publicó el primer tratado existente sobre las propiedades de los imanes que incluye la primera discusión detallada de las características de una brújula.

[11] En el siglo VI Philiponus aceptó, parcialmente, la teoría aristótelica de la continuación del movimiento debido a una fuérza intrínseca del cuerpo y la modificó parcialmente para incluir su idea de que un cuerpo arrojado adquiere una tendencia, originada por la fuerza que lo arrojó, a continuar en movimiento. Que esta fuerza impresa es temporaria y declinante, por lo que al cesar, el cuerpo tiende al reposo. En el siglo XII, Hibat Allah Abu'l-Barakat al-Baghdaadi propuso una modificación a esa teoría del movimiento de los proyectilies sosteniendo que el impulsor le imparte al proyectil una violenta tendencia a continuar el movimiento, la que disminuye en razón inversa a la distancia que el proyectil se aleja del impulsor.

Quizás influenciado por Marsh y por Maricourt, entre 1251 y 1257 Bacon ingresó a la Orden de los Franciscanos. Aparentemente, al poco tiempo tuvo dificultades con sus superiores. Poco después de que, en 1254, Gerardo de Borgo San Donnino publicara el *Liber introductorius ad Evangelium æternum*,[12] la Orden Franciscana nombró un censor de las publicaciones de los miembros de su propia congregación. El carácter díscolo y contestatario de Bacon parece haber influido bastante en las discusiones con sus superiores. Además, tuvo discusiones teóricas con dos dominicos famosos, Alberto Magno y Tomas de Aquino.

En 1266, el Papa Clemente IV (Guy de Foulques) quien había tenido, desde Francia e Inglaterra, buenas referencias de Bacon, le ordenó que le envíe secretamente y tan pronto como fuera posible, copias de sus trabajos. Esto fue una gran oportunidad que Bacon aprovechó, pero parece que el pedido papal que eludió la censura de la Orden franciscana, irritó a los superiores provocando que estos lo detestaran aún más. En 1268 le envió cuatro copias de sus libros al Papa, pero desgraciadamente, el Pontífice falleció poco tiempo después de recibirlos.

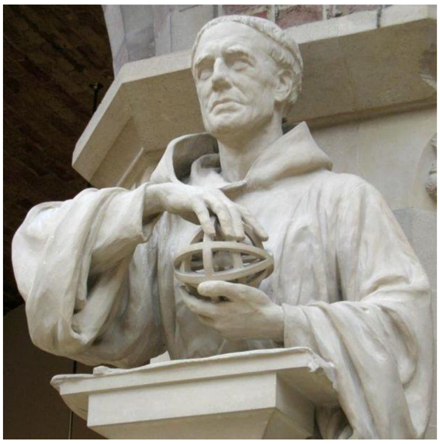


Figura 3.21. Roger Bacon

En 1277, Stephen Tempier, Obispo de Paris, publicó sus 219 tesis filosóficas y teológicas condenando, entre otras posturas al Averroísmo; a partir de entonces la censura de la Orden franciscana se tornó más severa. La crítica de Bacon a la autoridad, su independencia de pensamiento, y su tendencia a discutir lo llevaron nuevamente a conflictos con sus superiores en la Orden, y ese año fue condenado por Girolamo Masci, el Ministro General de la Orden, a confinamiento de por vida por “enseñar novedades sospechosas”.

En 1288, Masci fue electo Papa y tomó el nombre de Nicolás IV pero falleció el 4 de abril de 1292. El 25 de mayo de ese año, al morir el archienemigo de Bacon, el Ministro General de la Orden, Raymond de Gaufredi, lo puso en libertad, lo que permitió que poco tiempo después, Bacon regresara a Oxford.

En 1485, el historiador John Rous, (1420 – 1492) escribió "el noble doctor Roger Bacon fue enterrado en la iglesia Grey Friars de los franciscanos, en Oxford, en el año 1292 AD, en la fiesta de San Bernabé Apóstol (11 de junio)". Esta afirmación fue puesta en duda, ya que en 1292, Bacon escribió *Compendium studii theologiae*. Otros historiadores se inclinaron a sostener que falleció en 1294. Una torre, conocida tradicionalmente como "Estudio de Fray Bacon" se mantuvo hasta 1779 en el Folly Bridge, en el lado sur de Oxford.

Bacon fue esencialmente un enciclopedista. Su obsesión fue la idea de la unidad del conocimiento, pero del conocimiento tangible. A lo largo de su vida dedicó todos sus esfuerzos para captar y explicar esa unidad que según él se podía corroborar mediante experimentos.

[12] Por ese libro, El Papa Alejandro IV, condenó a Gerardo de Borgo a prisión perpetua.

A través de sus escritos, Bacon denunció crudamente los males de la escolástica, de hecho con demasiada virulencia, lo que en vez de generar resultados prácticos le granjeó la antipatía y hasta el odio de muchas de las personalidades relevantes de la ciencia y la teología de su época, entre ellos Alberto Magno y Tomás de Aquino. Tomó conciencia de la necesidad de que los filósofos y teólogos ampliaran sus bases de conocimientos; comprobó que no estaban familiarizados con los datos científicos disponibles y que tenían deficiencias en sus conocimientos de matemática y de lingüística. Su mayor mérito intelectual fue su vindicación del espíritu experimental. Él no fue un gran experimentador ni un gran matemático pero, en su época, vio mejor que nadie que sin experimentación y sin matemáticas, la filosofía natural quedaba reducida a puro palabrerío. También hizo hincapié en la *utilidad de los conocimientos*, algo tan importante como la unidad del conocimiento. Tanto en su *Opus Majus* como en su *Opus Tertium* insistió repetidamente sobre la utilidad del conocimiento empírico. Estas dos percepciones *unidad* (que debe ser descubierta experimentalmente y probada con la ayuda de la Matemática) y *utilidad*, lo llevaron a concepciones enteramente novedosas del conocimiento, del aprendizaje y de la educación.

Al igual que los demás pensadores cristianos de su época, Bacon creía que la Biblia contenía — ya sea explícita o implícitamente — todo el ámbito del conocimiento. Por otra parte, para entender la Biblia a fondo, se requerían todas las artes y las ciencias, ya que la creencia generalizada era que los patriarcas y profetas tuvieron pleno conocimiento de todas las ciencias, incluyendo a la magia y a la Astrología. Por lo tanto, en su esquema, la reina de las ciencias era la Teología y todas las demás ramas del saber eras sus auxiliares. Todo el sistema baconiano de investigación y búsqueda del conocimiento deriva de estas dos ideas rectoras: la Biblia con su lenguaje difuso y sus alegorías contiene todo el conocimiento que debe ser extraído mediante la experimentación y la clave para interpretar ese conocimiento se obtiene mediante la Teología. No se puede entender su actitud hacia la filosofía natural si no se toman en cuenta sus dos premisas principales.

Refiriéndose a la *scientia experimentalis*, Bacon sostuvo que “todas las ciencias, excepto esta, para probar sus conclusiones emplean meramente argumentos como las ciencias puramente especulativas, o recurren a experiencias universales e imperfectas” mientras que “ella sola, tiene verdaderamente los medios para descubrir la perfección de lo que puede hacer la naturaleza, lo que se puede obtener mediante la laboriosidad del arte o del fraude” ya que ella sola puede distinguir lo que es verdadero de lo que es falso por “encantamientos, conjuros, invocaciones, rechazos y sacrificios” [Bridges, II, p. 172]

Su concepción del método experimental no tenía como fin la búsqueda de la verdad objetiva sino corroborar experimentalmente los conocimientos científicos expresados en las Escrituras. Bacon debe ser juzgado por haberse enfrentado a las posturas intelectuales de su época pero no se le debe acreditar livianamente una perspectiva empirista que, en realidad, sólo surgió siglos más tarde con Francis Bacon, John Locke y David Hume. Por otra parte, para Bacon “experiencia” implicaba algo más que la observación y la experimentación. Para él incluía la iluminación de la fe, la intuición espiritual, la inspiración divina y esta experiencia esotérica era “mucho mejor” que la experiencia de la filosofía de la ciencia.

Las ideas de Bacon no tuvieron gran aceptación en su época. Su temperamento confrontativo lo predispuso mal ante sus contemporáneos. Su criticismo inmoderado hacia otros pensadores destacados lo llevaron a posiciones antagónicas antes que conciliadoras. Bacon detestaba a los dominicos Alberto Magno y Santo Tomás, no sólo porque estaba celoso de sus tremendos éxitos sino también porque sabía que sus síntesis, si bien eran presentadas como completas — y fueron aceptadas como tales, — eran incompletas en muchos aspectos esenciales. Al igual que la mayoría de los monjes franciscanos, él era agustiniano (es decir, platonista) mientras que ellos eran aristotelianos. Quizás Bacon no fue tan buen filósofo como Santo Tomás, quien convirtió a Aristóteles al cristianismo ungiéndolo "filósofo oficial de la Iglesia"[13] Si bien los conceptos filosóficos de Bacon eran coherentes, él no tuvo la habilidad para construir una estructura filosófica sintética y sólida. Tampoco fue tan buen naturalista como Alberto Magno, pero fue lejos mejor científico que ambos, tanto en el campo de la matemática como en filosofía natural además de ser un enciclopedista mucho más completo y profundo.

A diferencia de los sistemas dogmáticos, como el tomismo, los pensamientos de Bacon parecían estar — y de hecho lo estaban — desconectados entre sí. Su filosofía era más un método, o un punto de vista, que un sistema. De allí que no sorprende la escasa repercusión que tuvo en su época. Tan es así que gran parte de su obra permaneció durante siglos sin ser publicada. Recién en 1541 y 1542 se publicaron algunos de sus escritos y sus libros más importantes fueron editados recién en 1733.

Santo Tomás fundó una escuela casi comparable con la Academia de Platón o con el Liceo de Aristóteles. Bacon no fundó nada, no tuvo seguidores ni continuadores. No obstante, con el auge del empirismo y las concepciones modernas de ciencia, los científicos fueron redescubriendo su obra y en el séptimo centenario de su nacimiento encararon la tarea de completar su publicación.

La revalorización de la obra de Bacon no se debe a su estructura sistemática sino a su originalidad que excedió largamente a la de sus contemporáneos. Así, mientras que Santo Tomás se convirtió en un símbolo del medievalismo, la obra de Bacon se considera precursora de la ciencia moderna.

Oponiéndose a los escolásticos de su época, que interpretaban las Sagradas escrituras y los libros clásicos a partir de traducciones al latín, muchas veces incompletas, erróneas o interpoladas por los copistas, Bacon sostuvo que la mejor manera de conocerlas era recurriendo a las fuentes. Por eso se abocó al estudio del griego, — idioma del cual escribió la primera gramática. También estudió árabe, hebreo y caldeo. Esto le permitió discutir con más profundidad y con mayor rigor científico la Astronomía de al-Bitrüjï, la Óptica de al-Haytham y recomendar cambios en la traducción de la Biblia al latín.

Ya hemos dicho que Bacon fue un enciclopedista y como tal se ocupó de una gran variedad de temas pero lo hizo en forma bastante desordenada. Acostumbraba a reescribir algunos de sus temas muchas veces y de utilizar el mismo material una y otra vez en diferentes formas. Este es el motivo

---

[13] Santo Tomás adaptó la definición aristotélica de hombre como animal racional que busca la felicidad a través de la virtud, pero en vez de referirla a la virtud griega, como la plena correspondencia entre lo que un objeto — humano o no — cumple y el fin para lo que fue creado, por la virtud teologal. Esa definición de Aristóteles es la que sostiene el cristianismo hasta el presente.

principal que dificulta la tarea de ordenar su bibliografía. Una manera de hacerlo es utilizar la secuencia cronológica de su obra.

c. 1243. *Epistola de accidentibus senectutis*. Probablemente comenzada antes de 1236; dedicada a Inocencio IV (1243 – 1254). Veinte años después de la muerte de Bacon, Arnoldo de Villanova le dedicó al Rey de Nápoles un libro titulado *De Conservatione juventutis et Retardatione senectutis* donde hay párrafos enteros copiados del capítulo *De juvene a senectute tardando, et sene ad juventutem reducendo Liber*, de Bacon.

c. 1236 – 1251 (probablemente entre 1245 y1247). *Quæstiones in Aristotelis metaphysica* y una discusión sobre un texto pseudo aristotélico *Quæstiones super librum de plantis*.

c. 1256 – 1266. *De speculis comburentibus*, que trata sobre los espejos cóncavos y su capacidad de producir ignición. También en esa época escribió un tratado sobre el arte y la naturaleza: *De mirabili potestate artis et naturæ* (capítulos 1 a 6).

1263 – 1265. *Compotus naturalium*, Un tratado sobre el calendario, en tres partes.

Antes de 1266. Comenzó la compilación de su *Compendium philosophiæ* (o *Scriptum principale*). Un fragmento de la parte metafísica, *Metaphysica de viciis contractis in studio theologiæ* fue, ciertamente, escrita en 1266 o antes. El *Compendium philosophiæ* iba a consistir en cuatro volúmenes con el tratamiento de seis ciencias (de ahí, otro nombre original que propuso para esa obra fue *Liber sex scientiarum*); a saber, vol. 1, la Gramática y la Lógica; vol. 2, Matemáticas; vol. 3, Física; vol. 4, la Metafísica y la Moral. Probablemente, cuando recibió la orden de Clemente IV (mandato papal del 22 de junio de 1266 [14]) Bacon ya se había dado cuenta que su plan era demasiado ambicioso y había utilizado parte del material para comenzar a escribir la *Opus majus*, un tratado enciclopédico de varias ciencias pero de desarrollo más acotado.

1266 – 1267. *Opus majus*. *Tractatus de multiplicatione specierum* (posiblemente un poco antes). *Opus minus*. *Opus tertium*.

Opus Majus estaba dividida en siete partes: (1) Causas de error; (2) Filosofía vs. teología; (3) El estudio de las lenguas; (4) Matemáticas (incluyendo astronomía, música, geografía, etc.); (5) Óptica o perspectiva; (6) La ciencia experimental; (7) La moral.

El *Tractatus de multiplicatione specierum* es un tratado de Física que trata sobre la propagación de la fuerza y la acción a distancia. Fue escrito, probablemente, antes de 1266 y, posiblemente era una parte del *Compendium philosophiæ*. Una copia del *Tractatus* fue enviada al Papa junto con la *Opus majus*.

Opus minus fue a la vez una introducción y un complemento a la *Opus majus*. Sólo se conocen fragmentos de esta obra. Contiene notas adicionales sobre Astrología (*De notitia caelestium*) y so-

[14] Algunos historiadores sostienen que este mandato fue el segundo mandato que emitió el Papa. El primero habría sido secreto y en él Clemente IV le había pedido que escriba una enciclopedia abarcativa de todas las ciencias.

bre los principales puntos de la *Opus majus*. Se ocupa de algunos temas de la alquimia: *In enigmatibus* que es un tratado de Alquimia práctica; *De rerum generatione de Elementis,* que es una exposición de lo que él llamó "Alquimia especulativa" y de Medicina (*Remedia studii*).

Opus tertium era una obra de la misma naturaleza que la anterior, es decir, una especie de suplemento al *Opus majus*. Se ocupa de las relaciones de las diferentes ciencias entre sí, con la física (el vacío, el movimiento y el espacio), las matemáticas, la alquimia, la astronomía, etc.

1271. *Compendium studii philosophiæ.* Esta fue su última obra.

En lo atinente a la Astronomía, estaba muy al tanto de las concepciones griega y árabe. Pero nunca pudo decidirse entre el modelo de Ptolomeo y el de Abü Ishaq Nür al-Dïn al-Bitrüjï. Si bien consideraba que el sistema de Ptolomeo se adaptaba mejor a las observaciones, el de al-Bitrüjï era más consistente con los principios de la filosofía natural.

Bacon, creía en la Astrología y fue un estudioso de la misma. Sostuvo que había que distinguir entre una Astrología legítima y una prohibida a la que consideraba mera superstición. Sobre Astrología escribió *Tesaurus spirituum,* cuatro tratados sobre las distintas influencias de los planetas.

En lo que respecta a la Mecánica, conoció algunos de los escritos de Jordanus Nemorarius (*De ponderibus*; *Elementa ponderis super demonstrationem*) e investigó temas tales como la fuerza y su expresión matemática y la imposibilidad de la existencia del vacío. Siguiendo a Adelard de Bath, explicó la imposibilidad de vacío mediante una teoría de la continuidad universal. Por otro lado lo usó como argumento en contra de la pluralidad de los mundos. Le dio considerable importancia a los problemas relativos a la llamada "acción a distancia" y trató de interpretar el fenómeno no sólo para acciones mecánicas sino también la manera en que se transmite la luz y, especialmente en Astrología, para tratar de dar una explicación del cómo se transmiten las influencias de los cuerpos celestes sobre el ser humano.

También escribió varios tratados sobre Óptica. Sus concepciones estaban basadas, esencialmente, sobre las de Alhazen. A las ideas de al-Haytham les agregó pequeñas adiciones y aplicaciones prácticas. Hizo experimentos con espejos y lentes, principalmente lentes para hacer igniciones y previó — vagamente — la posibilidad de construir tanto el microscopio compuesto como el telescopio. Sus ideas influyeron sobre Leonard Digges, (1515 – 1559) el inventor del teodolito. Tuvo una cierta comprensión de la aberración de esfericidad y de que se podía corregir mediante el uso de superficies transparentes paraboloides e hiperbólicas. A diferencia de Grosseteste sostuvo que el pasaje de la luz a través de un medio no puede ser instantáneo. La luz no es una emanación de partículas sino la transmisión de un movimiento (*Opus majus*, Bridges, Vol.2, 72) Sin embargo, esto está expresado de manera poco precisa como para ser considerado una anticipación de la teoría ondulatoria de la luz. La Óptica lo apasionaba y gastó una considerable cantidad de dinero en esos experimentos ópticos. Le envió una carta al Papa para inducirlo a que él mismo experimentase (*Opus tertium*, Brewer, 111)

Su interés por la alquimia está suficientemente demostrado por el hecho de que uno de los cuatro libros de su *Compendium philosophiæ* está completamente dedicado a la misma, por la cantidad de espacio que se le da a la alquimia en la *Opus minus* y la *Opus tertium*, y por el *Tractatus expositorius enigmatum Alchemiæ* que le envió a Clemente IV.

Bacon escribió varios tratados médicos que derivan esencialmente de escritos árabes y que muestra poca originalidad (excepto uno de ellos). Como creía en la Astrología, insistió sobre los aspectos astrológicos de la medicina.

El más extenso y el más conocido de estos escritos, el *Liber de retardationes accidentium Senectutis*, también fue el más pobre. Fue escrito relativamente temprano (y probablemente fue su primera publicación) cuando sus ideas no se habían organizado por completo. Ya mencionamos que, a pesar de su mediocridad, fue plagiado, c 1309 – 1311, por Arnaldo de Villanova.

La filosofía de Bacon está plasmada en sus comentarios aristotélicos, en la *Metaphysica de vielis contractis in studio theologiæ* (c. 1266) de la cual sólo ha quedado un fragmento en *Opus majus* y, finalmente, en su último trabajo *Compendium studii theologiæ* (1292). Para apreciarla correctamente, se debe tener en cuenta que Bacon, más que se estrictamente un filósofo, fue un enciclopedista que, a partir del conocimiento presente intentó avizorar la evolución futura de la Humanidad. Esa complejidad resultante de tratar de prever el futuro a partir del conocimiento presente, hizo que sus disquisiciones filosóficas aparecieran muchas contradicciones, algunas aparentes y otras reales. Sus conocimientos de idiomas, le permitieron estudiar (y criticar) a fondo a filósofos, teólogos u eruditos como Aristóteles, San Agustín, Ishaq al-lsra'ill, Ibn Gabirol, Ibn Sina, Ibn Rushd, Pedro Alfonso, Grosseteste y otros franciscanos ingleses. Se lo puede encuadrar como agustiniano (es decir, platonista), un realista audaz y pluralista, antagónico del tomismo. No obstante, admiraba profundamente a Aristóteles. En una época en la que los estudiosos de Aristóteles recurrían a las traducciones al latín, el excelente dominio de la gramática griega le permitió a Bacon tener un conocimiento más preciso de la obra del filósofo de Estagira.

Los experimentos hechos o sugeridos por Bacon, sus predicciones acerca de la factibilidad de producir inventos revolucionarios, no fueron apreciados en su época. Luego de su muerte, su obra se fue eclipsando y no pudo ser apreciada por un tiempo considerable. Pero desde fines del siglo XIV y principios del siglo XV sus obras fueron investigadas por distintos estudiosos y fueron mal interpretadas. Donde Bacon afirmaba que tal o cual experimento podía conducir a un determinado invento práctico, se interpretaba que él realmente lo había logrado. Con el tiempo surgió, poco a poco, la leyenda de que Fray Bacon era un taumaturgo y se le fueron atribuyendo todo tipo de poderes mágicos. Esta leyenda se remonta al siglo XIV y alrededor de 1385 en un país tan lejano como Dalmacia ya se hablaba de los poderes mágicos de Bacon[15]. Se decía de él que podía "convertir a los demonios en mujeres y hacer malabarismos con gatos entre los vendedores ambulantes". La leyenda creció rápidamente en los siglos XV y XVI, y fue rápidamente popularizada por una obra de Robert Greene (1560 -1592?): "*The Honorable Historie of Frier Bacon and Frier Bongay*" que fue publicada en 1594 y reeditada en 1630 y por un "libro de bolsillo" impreso en Londres a princpios del siglo XVII, bajo el título "*The Famous Historie of Fryer Bacon Containing the wonderfull*

[15] Ese año, un tal Petrus de Trau escribió que Bacon era tan versado en filosofía natural que había hecho un puente condensando el aire entre Inglaterra y el continente y luego de cruzarlo, lo destruyó volatilizando el aire.

things that he did in his Life: Also the manner of his Death; With the Lives and Deaths of the two Coniurers, Bungye and Vandermast". (Reimpreso en 1627 y 1630).

En el libro de Greene, Bacon y su asistente y camarada Bongay construyen una cabeza de bronce y, con la ayuda del Diablo, se proponen dotarlo de habla. Preparan todo de manera que la cabeza debe comenzar a hablar al mes, pero el Diablo impone la condición de que todo el trabajo se perdería si no lo oyen antes de que termine de hablar.

Bacon estuvo observando a la cabeza día y noche durante tres semanas, pero estaba tan cansado y al sentir que la somnolencia lo abatía, le encargó a sus sirviente Miles que lo despertara cuando la cabeza comenzara a hablar. Poco tiempo después, la cabeza dijo: "Es el tiempo". Pero Miles temió despertar a su amo por tan poco y dejó que siguiera durmiendo. Al cabo de un tiempo, la cabeza dijo "El tiempo fue" y volvió a quedar en silencio. Finalmente exclamó "El tiempo ha pasado" e inmediatamente se rompió en pedazos. El ruido despertó a Bacon quien al ver los restos de la cabeza maldijo duramente a su sirviente.

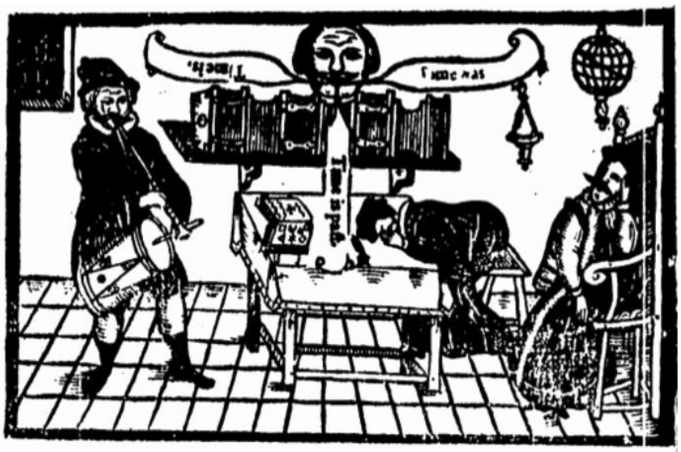


Imagen en la edición de 1630 del libro de Greene. Bacon y Bongay duermen mientras la cabeza de bronce dice "Time is"y "Time was".

Estas historias actuaron como bolas de nieve y con el tiempo le fueron adjudicando a Bacon otros hechos inverosímiles.

Sus conocimientos de las propiedades ópticas, mecánicas y magnéticas de las sustancias, lo llevaron a aventurar la creación de futuros inventos que aprovecharían esas propiedades. Previendo diversas formas en las que, mediante el conocimiento científico, se podría ejercer un dominio sobre la Naturaleza, en su visión de futuro pronosticó:

"Voy a hablar solamente de cosas realizadas por el arte y la Naturaleza, en las que no seré nada mágico y, en primer término, por la figuración del arte, se podrán hacer instrumentos de navegación sin hombres que remen, como grandes barcos que viajen a través de los ríos o los mares, que sean movidos por un solo hombre, y que navegarán más rápidamente que si estuvieran llenos de hombres. También carros que se moverán con una fuerza inenarrable sin que ninguna criatura viviente los conduzca. Del mismo modo, se podrá hacer un instrumento con el que se pueda volar, si uno se sienta en el medio del instrumento y enciende un motor mediante el cual las alas compuestas artificialmente, pueden batir el aire a la manera de un pájaro que vuela.[16]

[16] De la traducción al inglés del Capítulo IV *De mirabili potestate artis et naturae*, p. 533 *Opera Inedita*, edición de Brewer.

"Pero con las formas físicas sucederán cosas más extrañas, ya que mediante lentes ópticas y espejos enmarcados, una cosa parecerá ser muchas; como un solo hombre parecerá ser todo un ejército y un sol o una luna parecerán ser diversos. También se podrán articular lentes ópticas para que las cosas alejadas parezcan más cercanas a nosotros, como lo hiciera Julius Cæsar quien en las costas de Francia observó y marcó donde estaban situados los castillos en Inglaterra."[17]

"En lo relacionado con un mayor tamaño de las formas, se deberán traer los haces de luz y acumularlos mediante diversas flexiones y reflexiones a cualquier distancia que queramos, para quemar todo lo que se oponga a ellos, como lo atestiguan los lentes ópticas que queman por delante y por detrás; pero lo más grande y principal de todas las cosas que imaginé, es describir los cuerpos celestes en forma corporal, de acuerdo con su longitud y anchura, y que puedan verse esos cuerpos en sus movimientos diarios. Para un hombre sabio, estas cosas son dignas de un reino."[18]

"…Y carros armados con guadañas[19], plenos de una maravillosa habilidad para funcionar sin el beneficio del animal y para encontrar todos los obstáculos y romperlos[20] como los que, en la antigüedad usaron los persas para combatir".

"Es posible inventar un dispositivo, de pequeño tamaño pero de gran eficacia, tanto para bajar como para elevar los pesos más grandes, lo que podría tener aplicaciones en muchos accidentes. Por este medio, un hombre podría levantarla o bajarla para liberarse a si mismo o a sus camaradas del peligro de quedar aprisionado por un peso muy grande; y ese dispositivo sólo tendría tres dedos de alto y cuatro de ancho"[21].

"Un hombre podrá hacer un instrumento por el cual, sin peligro corporal puede caminar en el fondo del mar u otras aguas. Eso fue, según lo aseguró el Astrónomo pagano[22], lo que usó Alejandro Magno para descubrir los secretos de las profundidades."[23]

Este aspecto de la leyenda de Bacon ha sido reforzada por "el descubrimiento en un antiguo castillo en el sur de Europa" de un antiguo manuscrito escrito en clave y atribuido a Bacon. Si es auténtico, Bacon debe ser acreditado con la invención y el uso real del telescopio y del microscopio compuesto, y con el descubrimiento de los tubos seminíferos, los núcleos de las células, los esper-

---

[17] *Ibid.* Capítulo V. p. 534.

[18] *Ibid.* Capítulo V. p. 535.

[19] *Curribus falcatis.* Estos carros de guerra provistos de guadañas laterales de un metro que al girar con las ruedas cortaban todo lo que estuviera en la dirección de su movimiento, fueron usados por los persas en las llamadas guerras médicas contra los macedonios (490 – 478 a. C.). Leonardo da Vinci diseñó algunos de esos carros.

[20] A. G. Little. *Part of the Opus Tertium of Roger Bacon, Including a Fragment now Printed for the First Time.* Aberdeen, The University Press, 1912, p. 18.

[21] Friar Bacon, his Discovery of the Miracles of Art, Nature and Magick, traducción al ingles de Epistola de secretis operibus naturæ et de nullitate magiæ, por el Dr. John Dee, Simon Millar, London, 1659, p.18.

[22] Se refiere a Claudio Ptolomeo.

[23] *Friar Bacon, his Discovery of the Miracles …*p. 18.

matozoides, etc. Tales invenciones y descubrimientos en ese momento habrían sido realmente mágicos.[24].

El valor de la obra de Bacon no se debe a su estructura sistemática sino a su originalidad, — que excedió largamente a la de sus contemporáneos — y a su visión de que su método allanaría el camino para la ciencia futura. Así, mientras que Santo Tomás se convirtió en un símbolo de la cultura medieval, la obra de Bacon se considera precursora de la ciencia moderna.

Bibliografía

Belle Burke, R., traductor, (1962): *The Opus Majus of Roger Bacon*. Volumen II, Russell & Russell Inc., New York.

Boboyan Gafurov: EL BIRUNI, *Correo de la Unesco*, Junio 1974, Año XXVI, pp. 4 -10.

Brewer, J. S., editor, (**1859**): *Fr. Rogeri Bacon, Opera quædam hactenus inedita*, Volumen I: I. *Opus Tertium*, II. *Opus minus*, III: *Compendium Philosophiæ*, Longman, Green, Longman and Roberts, London.

Bridges, J. H., editor, (**1897**): *The "Opus majus"of Roger Bacon*, 2 Vols. Oxford, Clarendon Press.

Dee, J., (**1659**): *Friar Bacon, his Discovery of the Miracles of Art, Nature and Magick*, traducción al ingles de *Epistola de secretis operibus naturæ et de nullitate magiæ*, Simon Millar, London, 1659.

Goldstein, B., (**1972**): "Theory and Observation in Medieval Astronomy", *Isis* **63** (1), p. 39-47 [41].

Kennedy, E. S., (**1976**): *The Exhaustive Treatise on Shadows*, by *Abu al Rayhan Muhammad ibn Ahmad al Bïrūnï*, 2. Vols. Institute for the History of Arabic Science, Aleppo.

Pederson, Olaf. (**1978**): *Science in the Middle Ages*. ed. by David Lindberg, Chicago University Press, Chicago.

Sarton, G., (**1931**):*Introduction to the History of Science*, Vol. II, The Williams & Wilkins Co, Baltimore.

[24] William Romaine Newbold, *The Chipher of Roger Bacon* Isis, 11, 141-145.

Sarton, G., (**1948**):*Introduction to the History of Science*, Vol. III, The Williams & Wilkins Co, Baltimore.

IV. LA CIENCIA EN EL RENACIMIENTO.

4 – 1.- Alberto de Sajonia.

Figura 4.1. Alberto de Sajonia (1316 - 1390.

Alberto de Sajonia fue un filósofo alemán, comentador de Aristóteles, expositor de la lógica de Occam y estudioso de la Mecánica. También se lo llamó Albertus de Helmstede y Alberto de Riemenstorp, por su lugar de nacimiento, en 1316, en la Baja Sajonia. Cursó estudios en la recién creada Universidad de Praga y luego, en 1351, obtuvo su Master en la Universidad de París, bajo la tutoría de Alberto de Bohemia. En esa Universidad ocupó varios cargos llegando a ser Rector. En 1364/65 intervino en la creación de la Universidad de Viena donde en 1366 fue su primer Rector.

Algunos estudiosos afirmaron que fue un clérigo franciscano, otros que fue dominico y hasta llegaron a decir que fue un ermitaño agustiniano. Pero él fue un miembro secular de la Iglesia, aunque en 1366 fue nombrado Obispo de Halbertstadt, (una localidad de Sajonia, a 29 *km* de Magdeburgo) Se mantuvo en ese cargo hasta el final de sus días. Falleció el 8 de julio de 1390, "in bona senectude" y fue enterrado en la Catedral de Halberstadt.

Escribió varios tratados de Lógica: *Logica Albertutii* (1522), *Sophismata Alberti de Saxonia* (1489), *Commentarius in Posteriora Aristotelis* (1497), *Quaestiones in Occami logicam* (1496), *Tractatus obligationum* (1490), *Insolubilia* (1490). Las fechas entre paréntesis corresponden a las primeras ediciones.

Además del comentario sobre Aristóteles de 1497, escribió otros sobre la obra del estagireta: *Quaestiones super octo libros Physicorum* (1500?), *Quaestiones in libros de Coelo et mundo* (1481), *Quæstiones de Generatione et corruptione* (1504) y otros tres comentarios que no se publicaron. En estos comentarios expresó sus opiniones sobre la Mecánica y la Física en general. A diferencia de Aristóteles, él rechazó el concepto de la imposibilidad del vacío.

Sus ideas sobre la Mecánica atrajeron la atención de sus contemporáneos, particularmente la de su contemporáneo Jean Buridan fundador de la llamada escuela francesa de Filosofía natural y de Nicole Oresme (c.1320 – 1382).

Alberto, sostuvo que en todo cuerpo grave, hay un punto perfectamente determinado, su centro de gravedad, que tiende a estar lo más cerca posible del centro del Universo, el centro común de todos los cuerpos graves. Esto puede considerarse como un bosquejo del principio de equilibrio estático de Torricelli: un sistema de cuerpos graves se encuentra en equilibrio estático cuando su centro de gravedad no puede descender más.[1]

Bajo la influencia de Thomas Bradwardine (c. 1290 – 1349) y de Buridan, Alberto trató de precisar la noción de aceleración. En particular, de la aceleración constante (*uniformiter difformis*). Sostuvo que la aceleración de un cuerpo que cae se debe a la acumulación de *ímpetus*[2] Dijo que la aceleración de un cuerpo que cae es proporcional al tiempo pero luego pensó que podía ser proporcional a la distancia recorrida, sin poder elegir entre esas dos hipótesis contradictorias. Finalmente optó por la segunda. El mismo error cometería siglos más tarde Galileo en su juventud, aunque en la madurez probó que la correcta era la primer hipótesis. Más tarde, Alberto de Sajonia rechazó ambas hipótesis sobre la base de según cualquiera de ellas, un cuerpo incrementaría su velocidad sin límites con la longitud de la caída. Por eso, introdujo la noción de *resistencia*, no sólo la resistencia del medio en el cual el cuerpo cae, sino una suerte de resistencia interna (*resistentia intrínseca*) por lo que propuso una tercera hipótesis que implicaba una velocidad de caída límite causada por una resistencia creciente.

Alberto asimiló los *ímpetus* a una *gravitas accidentalis*, algo que aumenta en proporción al mismo movimiento. Al igual que Buridan, supuso la existencia de ímpetu tanto en los cuerpos celestes como en los cuerpos sublunares. Pero no pudo explicar la naturaleza de esos *ímpetus* o *gravitas*. Ni siquiera en su propio lenguaje escolástico pudo dar cuenta cabal si se trataba de una sustancia o un accidente, una cualidad o una cantidad.

La Astronomía de Alberto de Sajonia era más ptolemaica que Alpetragiana, si bien el usó la idea de Alpetragius acerca de la existencia de diez esferas concéntricas. Una de ellas era necesaria para la trepidación de los equinoccios[3].

Entre sus escritos matemáticos se encuentra: el "*Tractatus de proportionum*", obra dividida en dos partes. En la primera trata las proporciones consideradas aritméticamente y geométricamente mientras que la segunda se ocupa de problemas vinculados a la Mecánica y una obra dedicada a analizar la cuadratura del círculo, *Demonstrationes de quadratura circuli*.

---

[1] Evangelista Torricelli, *De motu gravium naturaliter descendentium*, en su *Opera geometrica*, Firenze, 1644.

[2] Buridan había postulado la noción de fuerza motora a la que denominó *ímpetu*, término tomado de Aristóteles y luego modificado por Philoponus y Hibat Allah Abu'l-Barakat al-Baghdaadi. Cuando un impulsor arroja un cuerpo poniéndolo en movimiento, le imprime un cierto *ímpetu*, es decir, una cierta fuerza que le permite al cuerpo continuar en movimiento en la dirección que fue arrojado después que cesa el impulso. El ímpetu incorporado al cuerpo aumenta en proporción a su velocidad pero debido a la resistencia del aire y al peso del cuerpo que actúan en sentido contrario a la dirección del movimiento impulsado por el ímpetu la velocidad va decreciendo y cuando el ímpetu es completamente anulado el cuerpo cae hacia su destino natural: el reposo.

[3] Teoría propuesta por Teón de Alejandría, según la cual, la precesión de los equinoccios — el lento movimiento del polo celeste a través de las estrellas completando una circunferencia al cabo de 26.000 años. Se pensaba que la precesión era una especie de oscilación o trepidación respecto de un valor medio. Newton después aportó la explicación correcta, que es una consecuencia de la atracción gravitacional de la Luna sobre la protuberancia ecuatorial de la Tierra.

Figura 4.2.– Imagen de Nicole Oresme (c.1323 – 1382)

4 – 2.- Nicole Oresme.

Nicole Oresme fue uno de los más grandes hombres de ciencia del Siglo XIV. Descolló por sus conocimientos sobre Matemática, Mecánica y Economía y contribuyó significativamente al desarrollo del lenguaje científico francés y a la prosa francesa en general. Desarrolló una filosofía científica que fue admirada por su moderación, humildad, y racionalismo. Sus traducciones de varios libros de Aristóteles y sus comentarios sobre estas obras, le dieron a la gente que no dominaba el latín o el griego. la posibilidad de conocer los fundamentos filosóficos de las concepciones científicas de la época.

Oresme nació alrededor de 1323 en un pueblo que en esa época pertenecía a Alemania y hoy se llama Fleury-sur-Orne y que se encuentra cerca de Caen, en Normandía. Probablemente, su familia era de escasos recursos ya que, en 1348, siendo *Magister Artium*, fue becado para estudiar en el Collége de Navarra[4] en París donde se doctoró en Teología. En el año 1356 fue nombrado Principal de ese Collége con el título de Grand Maître. Se mantuvo en ese cargo hasta 1361 y en esos años la institución que dirigía era considerada el mejor Collège de Francia. En 1362 fue nombrado Canónigo de la Catedral de Rouen. En 1363 fue canónigo en la Sainte-Chapelle en Paris y al año siguiente fue elegido Dean en la Catedral de Rouan, cargo que ocupó hasta 1377 en que el Papa Gregorio XI lo nombró Obispo de Lisieux, Normandía. Falleció el 11 de julio de 1382.

Desde 1360, fue tutor y amigo del Delfín Charles quien, entre 1364 y 1380 reinó en Francia como Charles V "le sage"[5]. Durante su reinado, Oresme fue su asesor espiritual y uno de los eruditos contratados por el Rey para la traducción al francés de textos clásicos en griego y en latín.

Entre los principales escritos matemáticos de Oresme, se encuentran: el *Tractatus de latitudinibus formarum* (impreso por primera vez en 1482); el *Tractatus de uniformitate et difformitate intensionum*, escrito antes de 1371 e impreso parcialmente por primera vez en 1914[6]; el *Tractatus proportionum* (impreso en 1505) y el *Algorismus proportionum*, escrito antes de 1359 e impreso en 1868.[7] Los primeros dos trabajos tratan de la teoría medieval de las latitudes y longitudes y la aplicación de esas ideas geográficas al estudio de las funciones matemáticas y sus representaciones gráficas[8]. Oresme llamaba latitudes y longitudes a las abcisas y ordenadas. A diferencia de los esporá-

[4] Para ingresar al Collège eran requisitos ser francés y pobre.

[5] El sabio.

[6] Ver H. Wieleitner: "Ueber den funktionsbegriff und die graphische Darstellung bei Oresme", *Bibliotheca Mathematica*, (3), v. XIV, (1914), pp. 193 – 243.

[7] Las fechas en que escribió estos tratados son inciertas.

[8] La idea de representar gráficamente las funciones matemáticas es bastante antigua y uno de los testimonios de ello es el Manuscrito de Macrobius del siglo X.

dicos usos de representaciones gráficas que hicieron Arquímedes y Apolonio de Perga, Oresme hizo un uso sistemático de los sistemas de coordenadas especialmente para representar el crecimiento de una función así como para determinar los máximos y mínimos de las mismas. También intuyó que los intervalos más pequeños de cambio ocurren en las proximidades de los máximos y mínimos.

El *Tractatus de uniformitate et difformitate intensionum* contiene la más antigua referencia medieval[9] a sistemas de cuatro dimensiones. Este tratado muestra que Oresme tenía conocimientos de cálculo combinatorio.

El *Algorismus proportionum*, contiene el antecedente al uso de exponentes fraccionarios y las reglas que gobiernan su uso pero con una notación bastante confusa aunque usaba letras para generalizar sobre números.

Las concepciones de Oresme sobre la Mecánica no están expresadas en conjunto sino que se deducen de sus tratados matemáticos. Para él, el movimiento absoluto sólo podría definirse en un espacio infinito e inmóvil, ubicado más allá de las estrellas fijas[10]. La gravidez (el peso) de un cuerpo conjuntamente con su *forma substancialis* son la *causa efficiens* de su movimiento local. Un movimiento puede ser natural o violento (*contre nature*), puede ser simple (circular o infinito o rectilíneo y finito) o complejo. Los movimientos terrestres dependen siempre de los movimientos celestes. Esta teoría de los movimientos de Oresme es aristotélica, con la única diferencia que el movimiento puede ser concebido con una forma fluida (*fluxus formæ*)

Oresme aceptó las concepciones de Buridam y de Alberto de Sajonia sobre el ímpetu, según la cual el ímpetu es una cualidad de los cuerpos en movimiento.

En el Tractatus *de latitudinibus formarum* (parte 3, cap. 7) anticipó la relación que debería existir entre la distancia recorrida y el tiempo empleado cuando un cuerpo se mueve [en forma rectilínea] con aceleración constante. Estimó que, en esas condiciones, la longitud de su trayectoria sería igual a la que cubriría en el mismo tiempo si su velocidad fuera constante e igual a la mitad de la velocidad en el movimiento acelerado (*Omnis qualitas, si fuerit uniformiter difformis, secundum gradum puncti medii ipsa est tanta quanta qualitas eiusdem subiecti*). En cierto modo, se anticipó a Galileo. En cambio, reintrodujo un error aristotélico que Buridan y Alberto de Sajonia tuvieron la perspicacia de abandonar, supuso que la velocidad de un proyectil continúa aumentando durante un breve lapso después de su partida. Este error influyó en las ideas de Leonardo da Vinci, Cardano y otros eruditos.

Según la teoría de la gravitación de Oresme, probablemente tomada del Timeo, no se necesitaba postular la existencia de un centro fijo de atracción en el centro del Universo. Este es un antecedente de la teoría copernicana y tal vez más importante que la rotación diurna de la Tierra. Pero su actitud mental, demasiado abstracta y su concepción religiosa le habrán impedido anticiparse a Copérnico o, al menos en este tema, a Galileo.

---

[9] Hay una referencia a sistemas de cuatro dimensiones en el Comentario al tratado De Coelo de Aristóteles hecho por Simplicio de Cilicia.

[10] Identificado con la infinitud de Dios.

La obra más notable de Oresme sobre Astronomía es *De commensurabilitate* (*sive proportionalitate, sive incommensurabilitate*) *motuum eœlestium*, donde argumenta que si el movimiento celeste es inconmensurable, la existencia de ciclos, tales como el Gran Año, es inconcebible, por lo que sería imposible hacer predicciones astronómicas y astrológicas. El argumento es algo engañoso en tanto siempre se pueden hacer proyecciones aproximadas. Pero se inserta en las convicciones de Oresme firmemente opuestas a la Astrología. Este argumento sirvió de fondo a la polémica entre Laplace y Lagrange referida a las grandes desigualdades de Júpiter y Saturno[11].

En su traducción al francés de *De Cœlo et mundo* Oresme incluyó un comentario incluyendo un argumento muy claro a favor de la rotación diurna de la Tierra (una idea que surgió reiteradamente en los tiempos antiguos y medievales). Pero más que nada por sus convicciones religiosas permaneció afecto al sistema ptolemaico. No es correcto considerarlo un antecesor de Copérnico sino que preparó el camino para la revolución copernicana.

Oresme escribió en francés un tratado sobre la esfera, *Traité de la sphère*. Esta es una obra original no una traducción del tratado del mismo nombre escrito por Sacrobosco, aunque no difiere esencialmente de sus concepciones. Fue escrito después de 1361 y antes de 1377. Está dividido en 50 capítulos y trata con los elementos de cosmografía y geografía matemática. Entre los temas que trata se encuentran: *Des sphères célestes, du mouvement des planètes, du zodiaque, de l'inégalité des jours naturels, de la mesure de la terre, de la division de l'habitation de la terre selon aucuns, des causes pourquoi un lieu est habitable ou non, du croissement et apetissement de la lune, des causes des éclipses en général* y otros.

En las conclusiones de su Tratado de la esfera, vuelve a atacar a la Astrología y a los astrólogos, afirmando que la Astrología es vacía y perversa. También escribió contra la Astrología en un pequeño tratado *Tractatus contra astrologos* (que comienza: *Multi principes et magnates noxia curiositate solliciti vanis nituntur artibus occulta perquirere et investigare futura* . . .[12]) en cuyos siete capítulos revisa todos los pros y las contras concluyendo que pesan más estas últimas que las primeras. También escribió contra la Astrología en su tratado *Des divinations* (diciembre de 1361) — que luego fue traducida al latín como *Tractatus contra iudiciarios astronomos et principes se in talibus occupantes* — y en 1370 escribió *Questio contra divinatores horoscopios*, una muy elaborada discusión sobre el tema donde cita las opiniones de Aristóteles, Cicerón, Séneca, San Agustín, Avicena, y otros eruditos.

Con similar intensidad a la Astrología, Oresme criticó a la magia y a la adivinación, muy de moda en su época.

---

[11] Las observaciones astronómicas mostraban que Júpiter se estaba acelerando mientras que Saturno se iba frenando poco a poco. Lagrange elaboró la hipótesis de que de seguir así, Saturno caería sobre el Sol y Júpiter escaparía del sistema solar. Laplace, en su *Exposition du système du monde* publicada en 1796. demostró que las aceleraciones de ambos planetas eran periódicas con períodos estables y autorregulados de alrededor de mil años, que se debían a las posiciones relativas de Júpiter y Saturno.

[12] Indudablemente se refiere a Charles V, de quien había sido tutor y era asesor, en cuya biblioteca había una cantidad impresionante de libros de Astrología).

Oresme también escribió varias obras sobre Filosofía Natural, Teología y, por encargo de Charles V, tradujo al francés varias obras de Aristóteles, entre ellas *La Política, La Ética,* y *La Física.*

Otra de las obras de Oresme fue dedicada al estudio de la teoría del dinero. Fue escrita en 1355 bajo el título *De origine, natura, jure et mutationibus monetarum,* en 23 capítulos. Posteriormente, en 1357/58, la rescribió en 26 capítulos.

4 – 3.- Nicolás Copérnico.

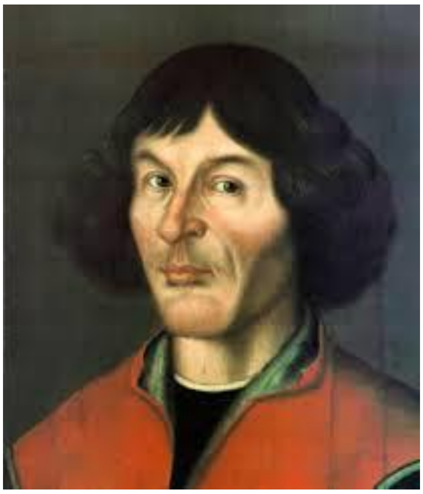


Figura 4.3. Nicolás Copérnico

Mikolaj Kopernik nació el 19 de febrero de 1473 en Frombork, ciudad de la provincia de Torun, Prusia, perteneciente al Estado polaco desde 1453. Entre 1491 y 1494, estudió en la Universidad de Cracovia, se estima que allí incorporó sus primeros conocimientos de Astronomía bajo la tutoría del matemático Wojciech Brudzewski. En 1496 se inscribió en la Universidad de Bolonia, donde estudió griego, Filosofía, Derecho y Medicina y Astronomía con Doménico María Novara de Ferrara de quien luego fue asistente. A principios de 1501, visitó Roma donde realizó prácticas de Derecho Eclesiástico en la Curia Romana, prácticas que eran preceptivas para los canónigos, e hizo observaciones astronómicas. Luego abandonó Italia para regresar a Polonia donde fue nombrado canónigo de pleno derecho de la catedral de Frombork. Luego de asumir como canónigo, solicitó permiso a la Iglesia para estudiar Medicina. El permiso le fue concedido y en el año 1501 Copérnico comenzó los estudios de Medicina en la universidad de Padua, profesión que ejerció durante toda su vida.

Curiosamente, en el año 1503 Copérnico se doctoró en Derecho Canónico en la Universidad de Ferrara, donde nunca había estudiado, episodio que ha llamado la atención de sus biógrafos, los cuales han buscado, como es lógico, razones que lo justifiquen.

En 1523 se reinstalado definitivamente en Prusia y se dedicó a la administración de la diócesis de Warmia, ejerció la Medicina, ocupó ciertos cargos administrativos y llevó a cabo su inmenso y primordial trabajo en el campo de la Astronomía.

Falleció el 24 de mayo de 1543 en Frombork, Prusia. En 2005 un equipo de arqueólogos polacos afirmó haber hallado sus restos en la catedral de Frombork. A partir del cráneo un equipo forense pudo reconstruir su rostro, que mostró buena coincidencia con su retrato. El 22 de mayo de 2010 fue oficiado un segundo funeral y una misa dirigida por Józef Kowalczyk, recién nombrado Cardenal Primado de Polonia. Sus restos fueron enterrados nuevamente en la Catedral de Frombork. Una lápida de granito negro lo recuerda como fundador de la teoría heliocéntrica en la que está grabado, un sol dorado rodeado por los planetas.

La obra cumbre de Copérnico quedó plasmada en su libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*) es considerada como el punto de partida de la Astronomía moderna. A Copérnico le llevó mucho tiempo desarrollas su modelo heliocéntrico[13] y, además, él demoró mucho tiempo en hacerla publicar dada la repercusión que podía tener en la comunidad científicia y, más aún, en la Iglesia.

En 1533, Johann Albrecht Widmannstetter, Secretario del Papa Clemente VII, dio varias conferencias en presencia del Papa y varios Cardenales exponiendo la teoría heliocéntrica de Copérnico. Esto despertó tanto interés, que varios miembros prominentes de la Iglesia, le pidieron a Widmannstetter, que le escriba a Copernico que él mismo suministre información sobre el tema. En 1536, el Cardenal Nikolaus von Schönberg, Arzobispo de Capua, también le escribió a Copernico incitándolo a publicar su trabajo. No obstante estos requerimientos, Copernico se mostró reacio a hacerlo. Quizás debido a la repercusión o el rechazo que podría tener entre sus colegas, que en abrumadora mayoría eran partidarios del geocentrismo, como la repercusión que podría tener en la Iglesia de la cual él era miembro.

El libro

Las ideas principales del modelo heliocéntrico copernicano fueron las siguientes:

1. Los movimientos de los cuerpos celestes son uniformes, eternos, y circulares o resultantes de la composición de diversos ciclos (epiciclos).
2. El centro del universo se encuentra cerca del Sol...
3. Los planetas orbitan alrededor del Sol, en forma ordenada. El más próximo es Mercurio y a distancias mayores orbitan Venus, la Tierra y la Luna, Marte, Júpiter y Saturno; en ese orden. Aún no se conocían Urano y Neptuno.
4. Las estrellas son cuerpos distantes que permanecen en posiciones fijas y no orbitan alrededor del Sol.
5. La Tierra tiene tres movimientos: la rotación diaria, la revolución anual, y la inclinación anual de su eje.
6. El movimiento retrógrado de los planetas, como el de Marte, es explicado por las distintas velocidades de rotación de esos planetas respecto de la rotación de la Tierra alrededor del Sol...
7. La distancia de la Tierra al Sol es muy pequeña comparada con la distancia a las estrellas.

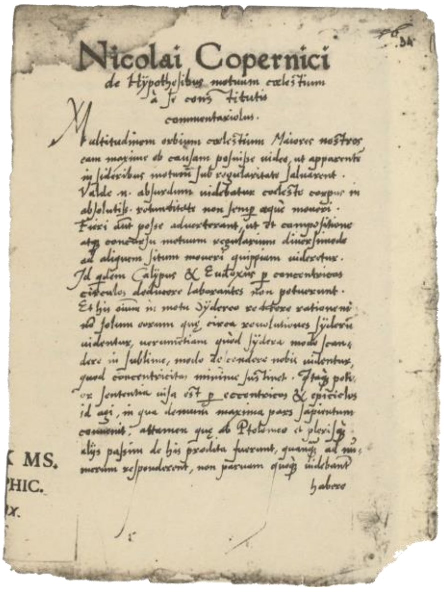

Nicolai Copernici

Figura 4.4. "*De hypothesibus motuum coelestium...*"

Las ideas básicas y de las observaciones que contiene *De revolutionibus* circularon a través de un opúsculo titulado *De hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*. Este

[13] Algunos autores estiman que le llevó unos 25 años.

opúsculo recién fue impreso en 1878. A pesar de su brevedad, son notables su precisión y su claridad.

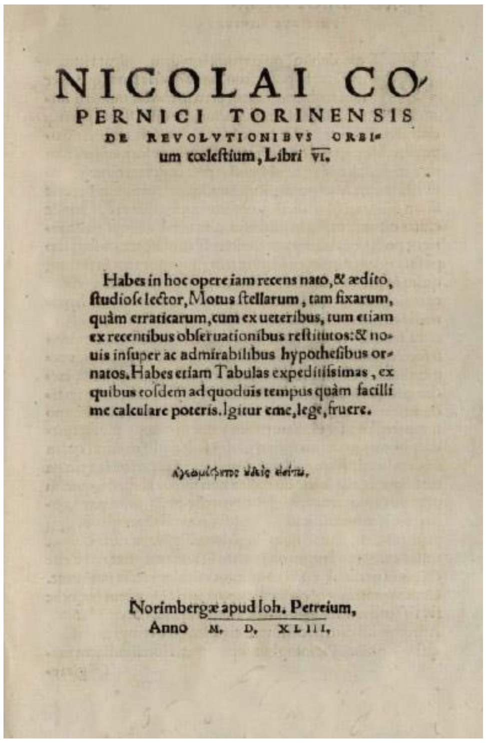
Copérnico estudió los escritos de los filósofos griegos buscando referencias al problema del movimiento terrestre, especialmente los trabajos de Filolao de Crotona y de Heráclides Pontico, quienes sostuvieron que la Tierra giraba sobre su eje. La teoría heliocéntrica había sido propuesta por Aristarco de Samos (c310 – c230 a. C.), a quien curiosamente Copérnico no nombra en su obra.

La primera edición de "*De revolutionibus...*" se publicó a fines de 1543, unos meses después de la muerte de Copernico. El editor de la obra fue un teólogo protestante que se tomó el atrevimiento de agregarle un prólogo sin el conocimiento del autor. El prólogo carecía de firma y de esta manera, el libro circuló por las Universidades dando la impresión que el trabajo de Copérnico era un mero desarrollo de una hipótesis geométrica que explicaba mejor el comportamiento de los cuerpos celestes que el modelo de Ptolomeo, pero que en modo alguno quería significar que la Tierra giraba, realmente, alrededor del Sol.

Para tener una idea de cómo, mediante ese prólogo — anónimo pero que daba la idea de haber sido escrito por el autor — Osiander intentó desvirtuar la concepción heliocéntrica de Copérnico haciendo creer al lector que era un mero artificio matemático, aqui va la traducción.

Al lector, sobre las hipótesis de esta obra:

Divulgada ya la fama de la novedad de las hipótesis de esta obra, que considera que la Tierra se mueve y que el Sol está inmóvil en el centro del Universo, no me extraña que algunos eruditos se hayan ofendido vehementemente y consideren que no se deben modificar las disciplinas liberales constituidas correctamente hace ya mucho tiempo. Pero si quieren ponderar la cuestión con exactitud, encontrarán que el autor de esta obra no ha cometido nada por lo que merezca ser reprendido. Pues es propio del astrónomo calcular la historia de los movimientos celestes con una labor diligente y diestra. Y además concebir y configurar las causas de estos movimientos, o sus hipótesis, cuando por medio de ningún proceso racional puede averiguar las verdaderas causas de ellos. Y con tales supuestos pueden calcularse correctamente dichos movimientos a partir de los principios de la geometría, tanto mirando hacia el futuro como hacia el pasado. Ambas cosas ha establecido el autor de modo muy notable.


NICOLAI CO-
PERNICI TORINENSIS
DE REVOLVTIONIBVS ORBI-
um cœlestium, Libri VI.

Habes in hoc opere iam recens nato, & ædito, studiose lector, Motus stellarum, tam fixarum, quàm erraticarum, cum ex ueteribus, tum etiam ex recentibus obseruationibus restitutos: & nouis insuper ac admirabilibus hypothesibus ornatos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex quibus eosdem ad quoduis tempus quàm facillime calculare poteris. Igitur eme, lege, fruere.

Norimbergæ apud Ioh. Petreium,
Anno M. D. XLIII.

Figura 4.5. "*De revolutionibus…*"

Y no es necesario que estas hipótesis sean verdaderas, ni siquiera que sean verosímiles, sino que basta con que muestren un cálculo coincidente con las observaciones, a no ser que alguien sea tan ignorante de la geometría o de la óptica que tenga por verosímil el epiciclo de Venus, o crea que esa es la causa por la que precede unas veces al Sol y otras le sigue en cuarenta grados o más. ¿Quién no advierte, supuesto esto, que necesariamente se sigue que el diámetro de la estrella en el perigeo es más de cuatro veces mayor, y su cuerpo más de dieciséis veces mayor de lo que aparece en el apogeo, a lo que, sin embargo se opone la experiencia de cualquier época?. También en esta disciplina hay cosas no menos absurdas o que en este momento no es necesario examinar. Está suficientemente claro que este arte no conoce completa y absolutamente las causas de los movimientos aparentes desiguales. Y si al suponer algunas, y ciertamente pensar muchísimas, en modo alguno trata de persuadir a alguien [de que son verdad], sino tan sólo establecer correctamente el cálculo. Pero ofreciéndose varias hipótesis sobre uno sólo y el mismo movimiento (como la excentricidad y el epiciclo en el caso del movimiento del Sol) el astrónomo tomará aquella mucho más fácil de comprender.

Quizá el filósofo busque más la verosimilitud: pero ninguno de los dos comprenderá o transmitirá nada cierto, a no ser que le haya sido revelado por la divinidad. Por lo tanto, permitamos que también estas nuevas hipótesis se den a conocer entre las antiguas, no como más verosímiles, sino porque son al mismo tiempo admirables y fáciles y porque aportan un gran tesoro de sapientísimas observaciones. Y no espere nadie, en lo que respecta a las hipótesis, algo cierto de la astronomía, pues no puede proporcionarlo; para que no salga de esta disciplina más tonto de lo que entró, si toma como verdad lo imaginado para otro uso. Vale.

Posteriormente fue otro astrónomo, Johanes Kepler (1571 – 1630), quien demostró que el prólogo hasta entonces anónimo había sido agregado intencionalmente por el editor luterano.

Antes de editar el texto, Osiander le había escrito una carta a Copérnico, recomendándole apelar a la distinción entre Astronomía y Cosmología. En esa época, la Astronomía era una disciplina cuyo objeto era calcular la posición futura de los cuerpos celestes sobre la base de hipótesis de movimientos geométricos de los cuerpos celestes. Si una predicción fallaba, se proponían nuevos movimientos geométricos para adecuar los cálculos a los valores observados, pero no se asumía ningún compromiso con el comportamiento real. Su objeto era sólo establecer los procedimientos geométricos y matemáticos propicios para realizar buenas anticipaciones. En cambio, la Cosmología intentaba explicar el mundo tal como es.

Es claro que Osiander quiso suavizar las inevitables controversias que provocaría sacar a la Tierra del centro del Universo, que es equivalente sacar al hombre del centro del Universo. Esto hizo que la obra de Copérnico iniciara una verdadera revolución ya que al modificar la concepción de hombre provocó cambios en el concepto de sociedad y de todas las disciplinas humanas.

Dedicada al Papa Pablo III, está dividida en seis volúmenes:

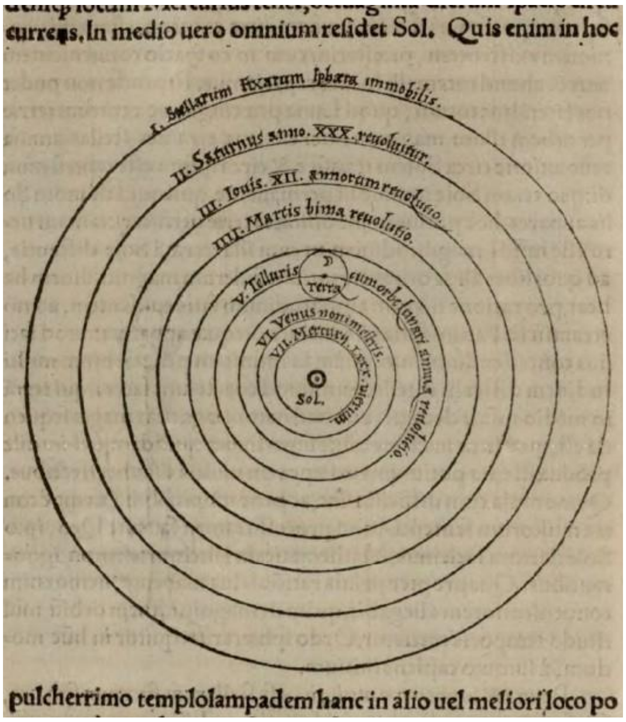


Figura 4.6. Representación helicéntrica del Universo.

El primer volumen está dividido en 14 capítulos, se inicia con el título *Quòd mundus sit sphæricus* y contiene una visión general de la teoría heliocéntrica y una breve explicación de las ideas de Copérnico sobre el universo.

El segundo volumen tiene 14 capítulos y se inicia con *De circulis & eorum nominubus*. Contiene una descripción de la geometría esférica y su aplicación a la Astronomía esférica. También contiene una lista de estrellas, que utiliza para fundamentar los argumentos que se desarrollan en los siguientes volúmenes.

El tercer volumen tiene 26 capítulos y se inicia con *De æquinoctiorum solstitiorumque anticipatione*, está dedicado a los movimientos del Sol y la manera de predecirlos.

El cuarto volumen contiene 32 capítulos y se inicia con *Hypotheses circulorum lunarum opinione priscorum*. Contiene descripciones similares de los movimientos de la Luna y explicaciones sobre sus distintas fases.

El quinto volumen contiene 36 capítulos y se inicia con *De revolutionibus eorum & mediis motibus*. Está dedicado a la descripción de los movimientos de los planetas y a las posiciones de las estrellas.


Figura 4.7. Tycho Brahe

El sexto volumen contiene nueve capítulos y se inicia con *De in latitudinem digressu quinque errantium expositio generalis* Contiene esposiciones sobre las latitudes de lo planetas y las inclinaciones de sus órbitas.

En 1584, la Iglesia incluyó a "*De revolutionibus·* en el *Index librorum prohibitorum¸* levantando esa prohibición, recién en 1835.

4 – 4.- Tycho Brahe.

Tyge Ottesen Brahe, conocido como Tycho Brahe fue un astrónomo danés considerado como el mejor observador del cielo en el período anterior a la invención del telescopio. Nació el 14 de diciembre de 1546 en el Castillo de Knudstrup, Escania, entonces perteneciente a Dinamarca. Fue el hijo mayor de Otto Brahe y Beatte Bille, ambos miembros de la nobleza de Dinamarca. Cuando tenía sólo un año, con anuencia del padre, su tío se encargó de la crianza y educación. En 1559 fue enviado a Copenhagen para estudiar Filosofía y Retórica y, entre 1562 y 1565, estudió Derecho en la Universidad de Leipzig, Matemáticas y Química en las universidades de Wittenberg, Rostock y Basel. En 1560, al observar un eclipse de Sol, quedó fascinado por el fenómeno y decidió estudiar Astronomía por su cuenta.

De carácter irascible, el 29 de diciembre de 1566, Brahe se batió a duelo con Manderup Parsberg, un caballero danés con quien había tenido una discusión acalorada[14] dos semanas antes. En el duelo, Parsberg le seccionó la nariz de una estocada. Brahe se hizo fabricar una nariz de oro y plata que se adehería al rostro con un pegamento. En sus retratos, hizo que los pintores la disimulasen. Por la oposición de sus padres, nunca se casó con Kirsten Jörgensdatter que fue la madre de sus ocho hijos. El mismo Parsberg intercedió ante el Rey, quien le concedió una pensión y el uso por vida de la isla de Hveen, en el Sund, donde Brahe edificó el castillo de Uraniborg, dotado de un observatorio. Concluida su construcción en 1580 (aunque nunca lo consideró acabado a su entera satisfacción), lo equipó con todo tipo de instrumentos, algunos de colosales proporciones, como un enorme cuadrante mural cuya invención se le atribuyó erróneamente.

A la muerte de Federico II y durante la minoría de edad de su sucesor, Brahe perdió su pensión y los derechos sobre la isla; en 1597 abandonó Dinamarca y, tras una estancia en Hamburgo, en 1599 llegó a Praga y se instaló en el cercano castillo de Benatky gracias a la acogida que le dispensó Rodolfo II. Falleció en Praga el 24 de octubre de 1601.

El primer trabajo astronómico de Brahe estuvo dedicado a la aparición, en noviembre de 1573, de una nova en la constelación de Casiopea, obervación que fue publicada en 1573. En ella encontró que no había paralaje ni movimiento retrógrado, por lo que llegó a la conclusión de que la estrella no era un fenómeno sublunar, y que tampoco estaba situada en ninguna de las esferas planetarias. El resultado contradecía la tesis aristotélica de la inmutabilidad de la esfera de las estrellas fijas.

La precisión que Brahe alcanzó en Uraniborg con sus observaciones fue notable En algunos casos, los errores eran menores al medio minuto de arco. Esta precisión le permitió corregir la mayoría de los parámetros astronómicos conocidos y determinar casi todas las perturbaciones del movimiento lunar. Los instrumentos por él diseñados le permitieron medir las posiciones de las estrellas y los planetas con una precisión muy superior a la de la época.

En 1599, Johannes Kepler aceptó una invitación que le hizo Brahe para trabajar juntos en Praga. Tycho sostenía que el progreso astronómico no podía conseguirse mediante observaciones ocasionales e investigaciones puntuales sino que se necesitaban medidas sistemáticas, noche tras noche, utilizando los instrumentos más precisos posibles.

Tras la muerte de Brahe Kepler "heredó" las medidas sobre la posición de los planetas, y utilizó las medidas del movimiento de Marte, en particular de su movimiento retrógrado, para formular las

[14] Pierre Gassendi, describió erróneamente que la causa del duelo fue una discusión sobre Matemáticas y así ha sido transmitida a lo largo del tiempo.

tres leyes que rigen el movimiento de los planetas. Posteriormente, estas leyes sirvieron de base a la ley de la gravitación universal de Newton.

Tycho Brahe se opuso totalmente a la concepción copernicana de que la Tierra giraba alrededor del Sol. Sostuvo que al girar la Tierra, entre los dos equinoccios el planeta tendría que formar un ángulo de paralaje con las estrellas fijas susceptible de ser detectado. Pero con el instrumental que disponía, — el más avanzado y preciso de la época, — no pudo detectar ese ángulo[15]. A medida que se fue perfeccionando el instrumental astronómico, Kepler, Huygens, Hooke, Flamsteed, Bradley, Herschel, Piazzi, Iganzio Calandrelli entre otros intentaron medir el paralaje estelar. Recién en 1838, Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) pudo establecer el paralaje de la estrella 61 Cygni en la constelación de Cygnus, encontrando un valor 0,314.

La convicción de Brahe de la inexistencia de ángulo de paralaje, lo llevó a proponer un sistema intermedio entre el copernicano y el ptolemaico. Sobre la base de sus observaciones, entre 1587 y 1588 pubicó *Astronomiae instauratae progymnasmata* (*Introducción a la nueva astronomía*) en que consideraba a la Tierra en posición fija y al Sol girando alrededor de la Tierra pero con los demás planetas rotando alrededor de él.

Bibliografía

de Regules, S., (**1999**): *Nicolás Copérnico, el renovador involuntario*, Editorial Andrés Bello, Santiago de Chile.

Duhem, P., Ariew, R., (**1985**) :*Medieval Cosmology*, The University of Chicago Press, Chicago.

Gribbin, J., (**2006**): *Historia de la ciencia,* 1543–2001 (2ª edición). Barcelona: Crítica. ISBN 84-8432-607-1.

Hansen, B., (**1985**): "Nicole Oresme and The marvels of nature: a study of his De causis mirabilium with critical edition, translation, and commentary", en *Mediaeval Studies. Studies and texts*, Vol 68, pp. 1 – 478.

Koestler, A., (**1963**): *Los sonámbulos* (*Una historia de la cambiante cosmovisión del hombre*), Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA), Buenos Aires.

[15] Esto se debió a que las llamadas "estrellas fijas" están a una distancia extremadamente grande.

McCluskey, S. C., (**1974**): *Nicole Oresme on Light, Color, and the Rainbow,* University of Wisconsin—Madison.

Menut, A. D., Denomy, A. J., (**1941**) : Le livre du ciel et du monde, University of Wisconsin Press, Madison.

Oresme, N., (**1961**): *Quæstiones super geometriam Euclidis,* E. J. Brill, Leiden.

Thoren, V. E., (**1990**): *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9780521351584.

V. LA CIENCIA EN EL SIGLO XVII. Primera parte.

5 – 1.- Johannes Kepler.

Johannes Kepler fue un astrónomo y matemático alemán que trasciende en la historia de la Ciencia por sus leyes sobre el movimiento de los planetas al orbitar alrededor del Sol. Fue colaborador de Tycho Brahe, a quien sustituyó como matemático imperial del Rey de Hungría Rodolfo II de Habsburgo.

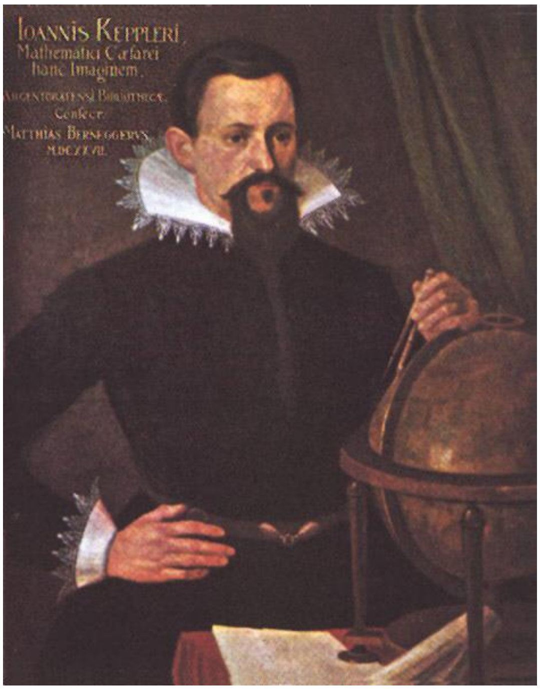


Figura 5.1.. Johannes Kepler

Kepler nació el 27 de diciembre de 1571 en Weil der Stadt, Alemania en un hogar luterano de clase media baja. De salud endeble y con problemas visuales, desde la infancia demostró una gran habilidad para resolver problemas matemáticos. En 1577, la familia se trasladó a Leonberg donde Kepler ingresó a una escuela latina. Ese mismo año quedó impresionado por su visión del Gran Cometa que pàsó próximo a la Tierra. El 31 de enero de 1580 al producirse un eclipse de Luna, su padre le explicó el fenómeno y los detalles de su ocurrencia, Kepler los volcó al escribir su Óptica. Terminó su instrucción primaria en 1583 y al año siguiente ingresó al seminario protestante de Adelberg y dos años más tarde ingresó al Seminario superior de Maulbronn. Al finalizar sus estudios, en 1589, se matriculó en la Universität Tübingen, donde estudió diversas disciplinas, ética, griego, retórica, hebreo, Física, Astronomía, Teología y otras, obteniendo su mastría en 1591. En las clases de Astronomía se enseñaba el sistema de Ptolomeo, pero el astrónomo Michael Mastlin, que dictaba Matemáticas, apreciando la capacidad intelectual de Kepler, le enseño el sistema copernicano. Urgido por sus necesidades económica, el 1594, Kepler no vaciló en aceptar el puesto de Profesor de Matemáticas en la ciudad austríaca de Graz. Allí, en su tiempo libre se dedicó al estudio de la Astrología y a hacer predicciones astrológicas. En 1597, se casó con Barbara Müller con quien tuvo cinco hijos y que falleció en 1611.

En el año 1600, el archiduque Fernando II promulgó un decreto obligando a la recatolización de los protestantes que vivían en Graz, por lo que Kepler se vio obligado a abandonar Austria. En octubre se fue a Praga, donde fue invitado por Tycho Brahe a trabajar con él. Al año siguiente, Brahe falleció y Kepler fue nombrado para el cargo de matemático imperial de Rodolfo II con el encargo de completar las tablas astronómicas iniciadas por Brahe. Kepler fue también consejero astrológico de Rodolfo II. Cuando falleció este monarca, Kepler se traslado a Linz donde trabajó como profesor de Matemáticas y allí completó las "*Tablas rudolfinas*" iniciadas por Brahe.

En 1613, Kepler se casó con Susanne Reuttinger con quien tuvo siete hijos. Dos años más tarde, una mujer llamada Ursula Reinbold, denunció ante Lutherus Einhorn, Vogt[1] de Leonberg, que Katharina, la madre de Kepler, le había dado una poción que la enfermó, con lo que Einhorn, ordenó el inicio de un juicio por brujería[2]. Durante el juicio estuvo encerrada durante 14 meses y amenazada con todo tipo de tormentos, pero ella no confesó. Johann Kepler se encargó de la defensa con el asesoramiento de la Universidad de Tübingen y especialmente de uno de sus estudiantes, Christopher Besoldus, que era experto de leyes. Finalmente, el octubre de 1621, consiguió la absolución, aunque la madre falleció a los pocos meses.

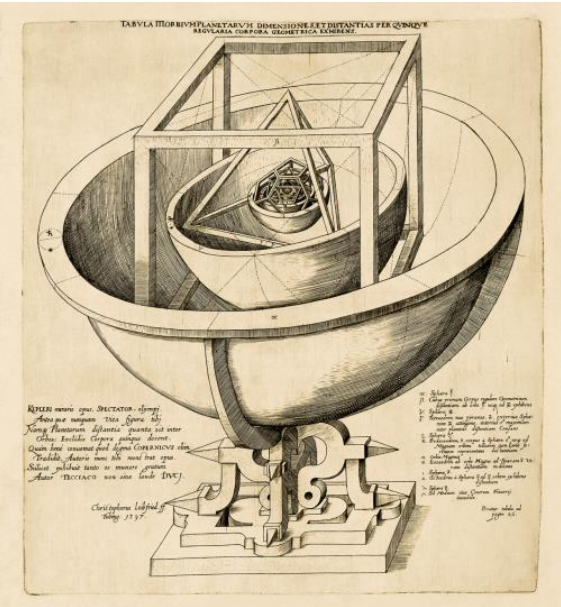


Figura 5.2. Modelo platónico de Kepler

En 1628 Kepler fue contratado por el Duque Albrecht von Wallenstein para trabajar como astrónomo y astrólogo, para quier elaboró el famoso horóscopo cuyos vaticinios hasta 1634 se cumplieron cabalmente.[3]

Cansado de esperar que Wallenstein lo resarciera de la deuda que había contraído con la Corona a raíz del juicio de la madre, en septiembre de 1630, Kepler abandonó Silesia para ir a Ratisbona, donde falleció el 15 de noviembre de ese año.

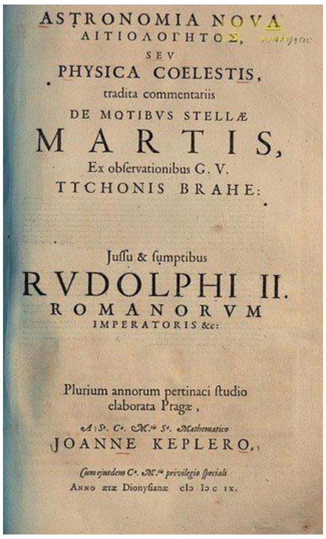
Mientras estudiaba Astronomía con Michael Mastlin elaboró la hipótesis de que los planetas debían cumplir un movimiento de acuerdo con las relaciones pitagóricas de la armonía. Luego, adhiriendo al modelo copernicano, intentó demostrar que las distancias de los planetas al Sol venían dadas por esferas en el interior de poliedros perfectos, encajadas sucesivamente unas en el interior de otras. En la esfera interior estaba Mercurio mientras que los otros cinco planetas (Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) estarían situados en el interior de los cinco sólidos platónicos[4] correspondientes también a los cinco elementos clásicos. Esta imagen del cosmos la empleó en su obra *Misterium Cosmographicum* (1596). En este trabajo,

[1] Vogt era un título nobiliario que se le asignaba a un señor feudal que ejercía la tutela y la protección militar, así como la justicia secular, en un territorio determinado.

[2] Entre 1613 y 1629, Lutherus Einhorn acusó a 15 mujeres de brujería e hizo ejecutar a 8 de ellas.

[3] Kepler se negó rotundamente a extender el horóscopo a partir de 1634. El 25 de febrero de ese año, Wallenstein fue asesinado.

[4] Son poliedros convexos en los que todas las caras son polígonos regulares: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro.



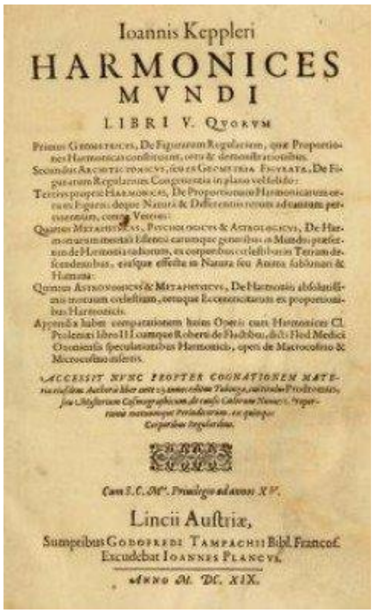
ASTRONOMIA NOVA
ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΤΟΣ,
SEV
PHYSICA COELESTIS,
tradita commentariis
DE MOTIBVS STELLÆ
MARTIS,
Ex obſervationibus G. V.
TYCHONIS BRAHE:
Juſſu & ſumptibus
RVDOLPHI II.
ROMANORVM
IMPERATORIS &c:
Plurium annorum pertinaci ſtudio
elaborata Pragæ,
JOANNE KEPLERO,

Figura 5.3. *Astronomía nova* de Kepler.

Kepler muestra que su imagen del Universo está fuertemente influida por su religiosidad. En esa época escribió: "*yo deseaba ser teólogo; pero ahora me doy cuenta gracias a mi esfuerzo de que Dios puede ser celebrado también por la astronomía*".

Cuando en 1602, Kepler tuvo pleno acceso a las mediciones de Brahe, que eran mucho más precisas que las de Copérnico, se dio cuenta que el movimiento relativo de Marte y su retroceso, no podía explicarse mediante su modelo platónico. Al fallar su modelo de poliedros perfectos y armonía de esferas, su fe religiosa lo llevó a pensar que Dios sólo podía haber creado un Universo en el que los movimientos de los planetas tuviesen trayectorias geométricas perfectas. Dado que los datos de Brahe demostraban que las órbitas planetarias no eran circulares, probó la hipótesis de que las trayectorias eran combinaciones de círculos. Pero esta hipótesis tampoco llevaba a un ajuste con los datos empíricos. Cuando se convenció de la imposibilidad de lograrlo con círculos, usó óvalos. Al fracasar también con ellos, dijo "*sólo me quedó una carreta de estiércol*" y empleó elipses.

En 1609, publicó *Astronomía nova*, la culminación de sus cuidadosos esfuerzos para calcular la órbita de Marte. Este tratado contiene la exposición de dos de las llamadas *leyes de Kepler* sobre el movimiento planetario. Según la primera ley, los planetas giran en órbitas elípticas, con el Sol en uno de los focos. La segunda, o regla del área, afirma que una línea imaginaria desde el Sol a un planeta recorre áreas iguales de una elipse durante intervalos iguales de tiempo. En otras palabras, un planeta girará con mayor velocidad cuanto más cerca se encuentre del Sol.



Ioannis Keppleri
HARMONICES
MVNDI
LIBRI V.
Lincii Auſtriæ,

Figura 5.4. *Harmonices mundi* de Kepler.

Mientras vivía en Linz, publicó su *Harmonices mundi Libri* (1619), cuya sección final contiene otro descubrimiento sobre el movimiento planetario, su *tercera ley*: la relación entre el cubo de la distancia media (o promedio) de un planeta al Sol y el cuadrado del periodo de revolución del planeta es una constante y es la misma para todos los planetas.

El 17 de octubre de 1604 Kepler observó una supernova en la Vía Láctea, a la que más tarde se le llamaría la estrella de Kepler. Kepler hizo un estudio detallado de su aparición. Su obra *De Stella nova in pede Serpentarii* suministró evidencias de que el Universo no era estático y sí sometido a importantes cambios. La estrella pudo ser observada a simple vista durante 18 meses después de su aparición. La supernova se encuentra a tan solo 13 000 años luz de la Tierra. Desde entonces, no se ha observado otra supernova en nuestra galaxia.

En 1627 publicó las *Tabulæ Rudolphine*, a las que dedicó años de trabajo y que durante más de un siglo se usaron en todo el mundo para calcular las posiciones de los planetas y las estrellas. Utilizando las leyes del movimiento planetario fue capaz de predecir satisfactoriamente el tránsito de Venus[5] del 7 de diciembre de 1631 con lo que su teoría quedó confirmada.

Además de los textos comentados, Kepler escribió diversos trabajos sobre Astronomía y Matemáticas. Entre ellos, *Astronomiæ pars optica. Ad Vitellionem Paralipomena* (1604) que trata de los aspectos ópticos de la Astronomía. *Kleinere Schriften. Dioptrice,* (1602 – 1611) escritos breves sobre Astronomía y óptica. *Epitome Astronomiæ Copernicanæ* (1617) *Ephemerides novae motuum cœlestium* (1617); *Calendaria et Prognostica. Astronomica minora. Somnium seu Astronomia lunaris*, (1630).

Durante la Guerra de los 30 años, se perdió buena parte de los trabajos de Kepler. Estos fueron recuperados durante el reinado de Catalina II de Rusia y, actualmente, se encuentran en el Observatorio de Pulkovo, en San Petesburgo, Rusia.

5 – 2.- Galileo Galilei.

Galileo Galilei fue un astrónomo, filósofo, ingeniero, matemático y físico italiano, que quedó indisolublemente ligado a la revolución científica producida en el siglo XVII y al uso del método experimental para la investigación en las ciencias naturales.

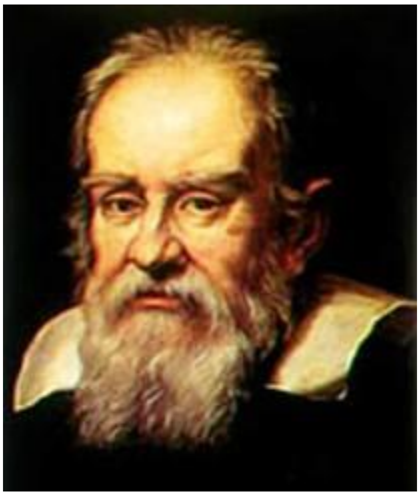


Figura 5.5. Galileo Galilei

Galileo nació en la Ciudad de Pisa, el 15 de febrero de 1564. Su padre era un apreciado músico, descendiente de una familia florentina empobrecida que debió luchar mucho para darle una educación a sus seis hijos. En 1575, la familia regresó a Florencia y Galileo ingresó a la escuela del monasterio de Vallombrosa. Su capacidad intelectual atrajo la atención de los frailes que intentaron hacerlo ingresar a esa Orden, pero su padre quería que estudie Medicina y lo envió a la Universidad de Pisa donde, en 1581, comenzó sus estudios. Al iniciar los estudios en la Universidad, Galileo fue tomando conciencia de que la Medicina no le interesaba y mucho menos las lecciones de filosofía escolástica – aristotélica que allí se impartían. Su interés se orientaba hacia el estudio de las matemáticas y hacia la lectura de las doctrinas pitagóricas o los trabajos de Arquímedes. En 1583, al observar las oscilaciones de una lámpara en la Catedral de Pisa, le llamó la atención la regularidad de las oscilaciones. Careciendo de reloj se ayudó con su pulso para calcular los períodos de oscilación y descubrió sorprendido la ley de la isocronía, lo que le hizo concebir la idea de que el péndulo podría servir para construir un reloj de alta precisión. En 1585, abandonó sus estudios en la Univer-

[5] Es un evento astronómico que ocurre cuando Venus pasa directamente entre el Sol y la Tierra; análogo a los eclipses solares provocados por la Luna, pero dada la distancia entre la Tierra y Venus, este planeta no oculta al Sol sino que se detecta como un pequeño punto oscuro.

sidad y nunca más volvió a cursar estudios universitarios. Para ganarse la vida, se dedicó a dar esporádicas clases particulares de Matemática en Florencia y en Siena. Con buenos conocimientos sobre la Geometría de Euclides, se dedicó a estudiar la Geometría de Arquímedes y el 17 de diciembre de 1585 construyó una balanza hidrostática con la que pudo determinar con buena precisión los porcentajes de dos metales en una aleación. Los detalles los describió en *La bilancetta,* que recién se publicó en 1644. Para la época de sus investigaciones sobre hidrostática se interesó también en otro concepto arquimedeano y, sobre ese tema, escribió un trabajo en latín *Theoremata circa centrum gravitis solidum* (que se publicó recién en 1638 como un apéndice de *Las dos ciencias ...*). En 1587 viajó a Roma donde conoció al Padre Christopher Clavius (1538 – 1612) un conocido astrónomo alemán, quien era profesor de Matemáticas en el Collegio Romano de los jesuitas. Clavius fue llamado "el Euclides del siglo XVI" y con él Galileo profundizó muchos conocimientos de Matemática, aunque no coincidía en su concepción astronómica ya que Clavius se oponía al heliocentrismo copernicano.

En 1589, con tan solo 25 años y a pesar de no haberse recibido, Fernando de Médici lo nombró Profesor de Matemáticas en la Universidad de Pisa, muy probablemente por recomendación de Guidobaldo, el marqués del Monte. En esta cátedra, Galileo combinó la enseñanza con la investigación. Así, por ejemplo, descubrió la cicloide[6] y propuso que el área bajo la curva es tres veces la del círculo que la generó, aunque la demostración matemática la hizo Gilles Personne de Roberval en 1634. Poco tiempo después en Pisa se construyo el puente sobre el Arno, llamado Ponte di Mezzo, cuyo arco es una cicloide.

Galileo también dedicó alguno de sus cursos a la Física aristotélica[7] que había sido analizada ampliamente por Francesco Buonamico, su Profesor de Filosofía Natural en Pisa. Contrastando las opiniones de Bonamico, Galileo adoptó una actitud muy crítica respecto de las concepciones de Aristóteles. Sostuvo que siempre se debe tratar de efectuar una corroboración empírica de las conclusiones obtenidas a través del puro razonamiento. Vincenzo Viviani, su antiguo alumno y biógrafo, escribió que Galileo demostró el error de Aristóteles — que afirmaba que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional a su peso, la causa de su movimiento natural — dejando caer desde el Campanile, la torre inclinada de Pisa, dos bolas similares de masa diferentes, pero no hay nungún registro escrito de ese experimento.

En 1591 falleció el padre, lo que acarreó serios problemas económicos a la familia, los que recayeron principalmente sobre Galileo. El sueldo de la Universidad era muy bajo, y aunado al ambiente poco agradable que le habían generado sus ideas, lo llevaron a abandonarla y regresar a Florencia. Algunos autores señalan que posiblemente no le renovaron su contrato por oponerse a la filosofía aristotélica, otros que, al no poder cumplir con un encargo de Giovanni de Medici, se sintió frustrado y decidió renunciar.

En septiembre de 1592 fue admitido en la cátedra de matemáticas de la Universidad de Padua, donde compartió el libre pensamiento con Girolamo Fabrizi d'Acquapendente (1537 – 1617) a car-

[6] Una cicloide es el lugar geométrico originado por un punto de una circunferencia (generatriz) al rodar sobre una línea recta (directriz), sin deslizarse.

[7] En esa época, Física y Astronomía se dictaban en el curso de Filosofía Natural, no en el de Matemáticas.

go de la cátedra de Cirugía y Cesare Cremonini (1550 – 1631) que dictaba Filosofía. Los años en Padua, resultaron los más productivos en el desarrollo de su conocimiento sobre los fenómenos físicos.

Durante su estancia en Padua, su esposa, Marina Gamba, tuvo tres hijos: Virginia (nacida en 1600), Livia (nacida en 1601) y Vincenzo (nacido en 1606). Vivían en una casa grande en la Via Vignali, actualmente denominada Via Galileo, donde llegó a albergar hasta 20 estudiantes. Aunque sus éxitos en investigación sobre fenómenos físicos fueron numerosos en este período, se le recuerda más por sus descubrimientos astronómicos, que originaron grandes controversias. Galileo mantenía correspondencia con varios astrónomos extranjeros, a los que demostraba que aceptaba más las hipótesis de Copérnico que las de Ptolomeo o las de Tycho Brahe. En 1604, al formarse una Nova, tuvo la oportunidad de estudiarla con cierto detalle. Sobre ese fenómeno dio tres conferencias en el Aula Magna de la Universidad, con un lleno total.

A principios del siglo XVII, Galileo se enteró que un óptico holandés llamado Johannes Lippershey, utilizando dos lentes de espéculos, había fabricado un instrumento que permitía aumentar considerablemente el tamaño de los objetos situados a gran distancia. Razonó que con una lente cóncava para magnificar la imagen y una plano convexa para mejorar su nitidez podría hacer observaciones detalladas de objetos a distancia. En 1609, construyó su primer *lente espía*.[8]

Con el tiempo fue perfeccionando sus telescopios, con los que pudo estudiar desde las montañas y valles de la Luna con lo que refutó la opinión de que la Luna era un esfera perfecta, —, las Lunas de Júpiter, —comprobando que giraban alrededor del planeta,— las manchas solares y un particular ensanchamiento de Saturno, — que no eran otra cosa que los anillos de Saturno,— entre otros. Sobre estas observaciones, en marzo de 1610, publicó *Sidereus Nuncius*[9] que dedicó a Cosimo II de Medici quien acababa de asumir como IV Gran Duque de Toscana.

Galileo no se sentía cómodo en Venecia y, a través de Belisario Vinta —, entonces Secretario de Estado del Ducado de Toscana, — logró que Cósimo II lo nombrase su matemático y filósofo personal y le diese un cargo en la Universidad de Pisa aunque sin obligación de dar clases. El cambio, si bien lo favoreció en términos económicos y en otros aspectos personales, implicaba cierta autorrestricción a su libertad de expresión. Venecia era un Estado liberal que, cuando el Vaticano quiso imponerle la interdicción, expulsó a los jesuitas, capuchinos y teatinos. En cambio, el Gobierno de Toscana era más sumiso a la voluntad de Roma.

[8] El nombre de *telescopio* fue propuesto por el matemático griego Giovanni Demisiani, el 14 de abril de 1611, durante una cena en Roma, en honor a Galileo.

[9] Noticiero sideral.

Figura 5.6. Telescopio original de Galileo.- Museo de la Historia de la Ciencia de Florencia.

En Florencia, Galileo continuó con sus investigaciones astronómicas y en diciembre de 1610 al comprobar que Venus giraba alrededor de la Tierra, le envió una carta a Kepler en la que le explicaba que Venus presentaba una fase creciente como la de la Luna, pero esa información la redactó en clave: *Cynthiæ figuras æmulatur mater amorum*[10].

En la primavera del año siguiente, logró que el Gran Duque lo enviara a Roma en un viaje de "buena voluntad" para informar a la cúpula de la Iglesia acerca de sus descubrimientos astronómicos. Llevaba una carta de Michelangelo Bunarroti, el Joven (sobrino nieto del escultor) para el Cardenal Mafeo Barberini. En Roma presentó sus descubrimientos, pero no su interpretación, ante una Comisión especial comvocada por el Cardenal Roberto Bellarmino y que incluia a Christopher Clavius y a su sucesor en el Collegio Romano, el Padre Christopher Grienberger. Después tuvo una larga audiencia con el papa Paolo V y fue elegido para la Accademia dei Lincei.

Poco a poco, Galileo se fue convirtiendo en una figura pública. Su manera de denostar las opiniones contrarias le fue ganando enemigos que, al no poder rebatir sus argumentos con razonamientos científicos, comenzaron a criticarlo desde el punto de vista teológico. Poco a poco, se fue ampliando el grupo de enemigos, fundamentalmente entre jesuitas y dominicos apoyados por docentes universitarios partidarios de las doctrinas aristotélicas. En 1613, en una cena en Pisa ofrecida por el Gran Duque de Toscana, el Padre Benedetto Castelli, que era Profesor en la Universidad de Pisa y había sido estudiante de Galileo, defendió los descubrimientos de su maestro y Cósimo Boscaglia, también profesor en Pisa, le respondió, insidiosamente, que cualquier movimiento de la Tierra sería una herejía por ser contraria a las eneseñanzas de la Biblia. Enterado Galileo de esa réplica escribió una carta en la que enfatizó que el objeto de la Biblia no es enseñar Astronomía y que el conocimiento de los fenómenos naturales debe resultar de la experiencia. En diciembre de 1614 el fraile dominico Tomasso Caccini, predicó públicamente contra las ideas copernicanas de Galileo, afirmando que eran antibíblicas y, por lo tanto, heréticas. A principios de 1615, Fray Niccolò Lorini, Profesor en el convento dominicano de San Marco, denunció a Galileo ante la Sacra Congregación del Santo Oficio (la Inquisición). En febrero, Galieo le envió una carta a la Gran Duquesa Cristina explicándole que más allá de su probada adhesión a la iglesia católica sus afirmaciones era nada más que resultados experimentales. Galileo pensó en viajar a Roma para explicarle sus ideas a la cúpula de la Iglesia, pero los Calificadores de la Inquisición se pronunciaron sosteniendo que la afirmación de que el Sol es el centro del Universo y permanece inmóvil en su lugar es falsa, filosóficamente absurda y formalmente hereje y que la afirmación de que la Tierra no es el centro del Universo y no permanece inmóvil, sino que se

[10] Las figuras (fases) de Cynthia (Venus) emulan a las de la Madre Amores (Luna).

mueve diariamente es censurable filosófica y teológicamente y errónea en la fe. El informe de los Calificadores fue enviado al Cardenal Bellarmino, para que le de instrucciones a Galileo de abandonar sus afirmaciones y prohibirle enseñarlas, publicarlas, defenderlas e incluso discutirlas.

A principios de 1616, los libros de Copérnico fueron censurados por un edicto. Galileo guardó silencio sobre el tema durante algunos años y se dedicó a investigar un método para determinar las coordenadas de cualquier punto en el mar, basándose en la posiciones de los satélites de Júpiter, que quiso negociar con el gobierno español sin mucho éxito.

En 1621 falleció su protector, Cósimo II, pero pronto encontró un apoyo eclesiástico cuando Maffeo Barberini, fue elegido Papa Urbano VIII en 1623. Barberini, había elogiado la obra de Galileo y hasta escribió un poema en su honor en 1620. Galileo le dedicó al nuevo Papa la publicación de *Il Saggiatore*, auspiciada por la Accademia del Lincei, donde expuso su punto de vista sobre el razonamiento científico, enfatizando la necesidad de una experimentación de primera mano antes que recurrir a la autoridad de los antecesores. En esta obra establece una distinción neta entre *cualidades primarias* (objetivas, como el peso) y *secundarias* (como la calidez, el gusto, etc.) que, en los siglos siguientes, serían fuentes de controversia entre los filósofos de la ciencia.

En la primavera de 1624, Galileo hizo su cuarto viaje a Roma, para presentarle sus respetos — y sus opiniones — a Urbano VIII. Tuvieron seis encuentros en los que Galileo expuso sus argumentos copernicanos, pero no logró cambiar las concepciones del pontífice. No obstante, el Papa le envió una carta a Ferdinando II, en la que exaltó la "virtud y devoción" de Galileo.

En 1624 Galileo se propuso completar las concepciones cosmológicas delineadas en *Sidereus Nuncius* en un libro que quiso titular *Sul flusso e riflusso del mare*, en el que abordaba las hipótesis de Claudio Ptolomeo y de Copérnico sobre la influencia de los cuerpos celestes sobre las mareas, pero Urbano VIII le indicó que le debía cambiar el título y que sólo debía tener en cuenta estas ideas como hipótesis de trabajo e investigación, sin tomar literalmente la concepción copernicana como una cosmología y sin tratar de compararla con lo escrito en la Biblia y haciendo hincapié que cualquier fenómeno físico solo podía ser una muestra de la omnipotencia de Dios. Entonces, Galileo postergó el desarrollo escrito de su cosmovisión y a partir de 1626, se ocupó de investigaciones sobre el Magnetismo. Su obra principal recién la completaría en 1630 bajo el título *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Al terminarla, Galileo hizo su quinta visita a Roma, fundamentalmente para pedir, personalmente, la licencia para imprimir el libro. Llevó la recomendación del Embajador del Gran Ducado de Toscana y de Monseñor Giovanni Ciampoli, Secretario privado del Papa. La autorización para publicarla se demoró bastante, pero le fue concedida por el Padre Niccolò Riccardi, Maestro del Sacro Palazzo, previo pequeñas correcciones y la redacción de un prólogo en el que Galileo debía enfatizar el carácter hipotético de la tesis copernicana y subrayar el argumento incontrastable del Papa. El libro fue impreso en la imprenta de Landini, en Florencia y fue publicado el 21 de febrero de 1632, con una dedicatoria a Ferdinando II.

Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, es también una obra maestra desde el punto de vista literario. Presenta un diálogo entre tres personas que se encuentran en una plaza de Venecia:

Sagredo[11], un ciudadano patricio de Venecia, supuesto neutral, que escucha los argumentos de de dos eruditos con concepciones cosmológicas opuestas: Simplicio un filósofo aristotélico genial[12] y Salviati de Florencia, un astuto y entusiasta partidario de Copérnico (representado por el mismo Galileo). El título "dos máximos sistemas del mundo", exclye deliberadamente toda discusión sobre el modelo de Tycho Brahe.

El libro está escrito en un lenguaje popular completamente accesible al lector lego pero con cierta cultura. En muchas de sus partes, emplea un humor muy fino, con disgreciones típicas de la literatura renacentista. Obviamente, la idea de Galileo era la de presentar ideas novedosas al público general, por lo que el libro es más filosófico y pedagógico que científico.

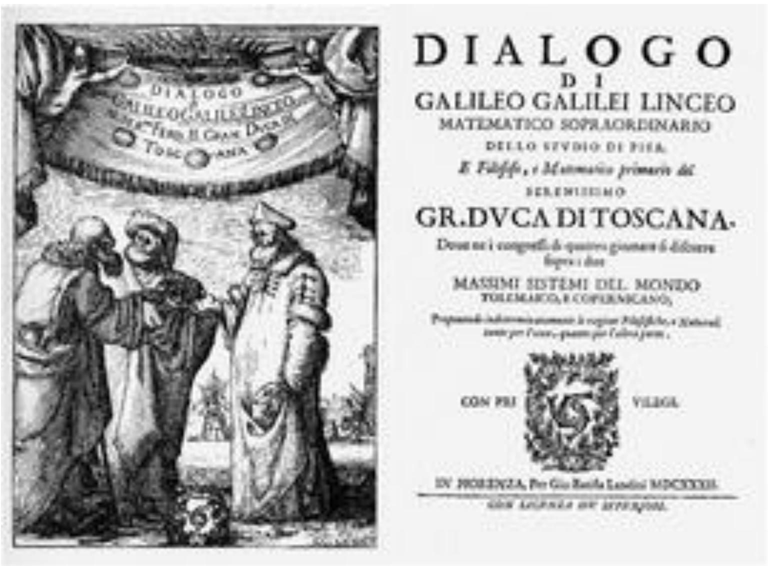


Figura 5.7. Primera edición de "*Dialogo…*"

El primer día contrasta la noción aristotélica de perfección celestial con las imperfecciones reales, como las manchas solares que Galileo había detectado mediante uno de sus telescopios. También se exponen las semejanzas entre la Tierra, la Luna y los planetas. Así, por ejemplo, expone la similitud del brillo de la Luna, el brillo diurno de la Tierra, la similitud de las fases de la Luna y las fases de Venus, la forma esférica de todos los cuerpos celestes y Salviati argumenta que la explicación estaría dada por el movimiento de todos esos cuerpos alrededor del Sol. Salviati cita a las lunas de Júpiter como una evidencia de un sistema no geocéntrico[13].

Las discusiones del segundo día estuvieron centradas en el movimiento diario de la Tierra o su inmovilidad. El esperado retraso hacia la popa de una piedra arrojada desde el mástil de un barco en movimiento. Salviati afirmó enfáticamente que la piedra caería sobre la base del mástil tal como si el barco no estuviera en movimiento[14], lo que más tarde constituiría la esencia de la Teoría de la relatividad de Galileo.

[11] Galileo caracterizó así a su amigo, Giovanni Francesco Sagrado (1571 – 1620) quien fuera matemático y diplomático.

[12] Galileo tomó ese nombre de un comentador aristotélico del sigloVI.

[13] Tycho Brahe consideró que la similitud de las fases de las lunas de Júpiter y las de Venus, justificaban el modelo de una Tierra fija con el Sol girando alrededor de ella y los demás cuerpos celestes girando alrededor del Sol.

[14] La comprobación empírica de la afirmación de Galileo la hizo Pierre Gassendi y volcó su resultado en sus cartas impresas en 1642 bajo el título *De motu impresso a motore translato.*

El tercer día, la discusión se centró en la rotación anual, en el paralaje estelar y la imposibilidad de su detección. Salviati argumentó que esa imposibilidad no se debía a la inmovilidad de la Tierra sino a la enorme distancia entre la Tierra y las estrellas fijas[15].

En el cuarto día, Galileo trata de afirmar la concepción copernicana con una equivocada hipótesis acerca de las causas de las mareas.

Curiosamente, Galileo no incluyó en el libro un argumento cuantitativo y contundente: las leyes que Kepler había publicado en 1609 en su *Astronomía Nova.*

Lamentablemente, el autor pareció olvidar las recomendaciones que le hicieron el Cardenal Bellarmino y del Padre Riccardi de mantener la moderación y tratar al heliocentrismo como mera hipótesis. En su afán de que Salviati impusiera sus concepciones, empleó la ironía y el sarcasmo y le puso tal énfasis a la retórica del personaje que ponía en evidencia el involucramiento del autor con el modelo copernicano.

Una presentación ante el Santo Oficio hizo que se formase una Comisión Papal para examinar el libro[16]. El dictamen estableció que la exposición de las dos teorías difícilmente podía juzgarse como hipotética. Por el contrario, Las mareas fueron propuestas como evidencia física del movimiento de la Tierra. Pero la Comisión encontró algo peor: Galileo había desobedecido la prohibición impuesta en 1616 de publicar sus ideas sobre la constitución y propiedades del Universo[17]. A los pocos meses fue prohibida la venta del libro. Es opinión de los estudiosos de que la mayor severidad en el juicio a Galileo se debió a que Urbano VIII habría sido persuadido de que su “argumento incontrastable” había sido puesto en boca de un “hombre simple” a quien Galileo había refutado en forma irónica y sarcástica[18].

El Tribunal de la Suprema Inquisición que juzgó a Galileo Galilei, dictó sentencia el 22 de junio de 1633. Su texto establece:

"Dado que vos, Galileo, hijo de Vincenzo Galilei, florentino, de 70 años, fue denunciado ante este Santo Oficio en 1615:

"Que ha sostenido como cierta la falsa doctrina de que el Sol es el centro del universo y está inmóvil, y que la Tierra se mueve, con un movimiento diario. Que sobre estas ideas has mantenido correspondencia con matemáticos alemanes…

---

[15] Con el perfeccionamiento de los telescopios, el paralaje estelar recién lo pudo determinar Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) al establecer el ángulo de paralaje respecto de la estrella 61 Cygni, de la constelación de Cygnus.

[16] En esa Comisión, no había ninguna persona reconocida como científica.

[17] Los estudiosos tienen dudas acerca de en qué casos comenzaría a regir la prohibición. El hecho de que fuera la misma Iglesia la que dio la autorización para publicar los Diálogos, parece indicar que la prohibición sólo entraría en vigencia si Galileo rehusase públicamente a dejar de promocionar la teoría copernicana.

[18] En una carta al Gran Duque de Toscana, el Embajador Niccolini le escribe que el Papa, refiriéndose a Galileo, dijo “Es uno que no tuvo miedo de jugar conmigo”.

"Que el Sol sea el centro del universo y se mantenga inmóvil en su lugar es una proposición absurda, y filosóficamente falsa, y además herética; Que es expresamente contraria a las Sagradas Escrituras: que la Tierra no es el centro del universo ni inmóvil, sino que se mueve, con un movimiento diario, es igualmente una proposición absurda y falsa, y considerada por la Teología un error en la fe…

"Invocando entonces el Santísimo Nombre de Nuestro Señor Jesucristo, y de su Gloriosísima Madre María, siempre Virgen, como nuestra sentencia definitiva, establecida en los tribunales por consejo y opinión de los Maestros Reverendos en Teología y doctores de ambas leyes, nuestros Consejeros, presentamos estas escrituras, en la causa ante Nosotros, entre el grandioso Carlo Sinceri, doctor de ambas leyes, Procurador General de este Santo Oficio por una parte, y en la otra parte vos, Galileo Galilei, culpable, aquí presente, confeso y juzgado:

"Nosotros pronunciamos, declaramos, sentenciamos, que vos Galileo, por lo expresado durante este juicio, y por vos confesado de ser sospechoso de herejía por este Santo Oficio, de haber creído y sostenido una doctrina falsa, y contraria a las Sagradas Escrituras, por las cuales: el Sol es el centro del Universo e inmóvil, y que no se mueve de este a oeste, y que la Tierra se mueve y no es el centro de Universo, y que esta opinión haya sido defendida como probable después de haber sido declarada y definida como contraria a las Sagradas Escrituras. En consecuencia, hace merecedoras todas las censuras y penalidades de los Cánones Sagrados y otros Decretos, generales y particulares, impuestos y promulgados contra tales ofensores. De los cuales Nosotros establecemos que su persona no deberá ser absuelta si, antes que todo, de corazón sincero y con sincera fe, no abjura, condena y reprueba los antes mencionados errores y herejías, y cualquier otro error o herejía contrario a la Iglesia Católica Apostólica y Romana, de la forma en que lo requerimos.

"Y, para que al final, su grave error y trasgresión, no quede enteramente impune y sea mas prudente en el futuro, y sirva como un ejemplo para otros de abstenerse y evitar ofensas similares,

"Ordenamos que por edicto público el libro de Diálogos de Galileo Galilei sea prohibido, y condenamos a su persona a prisión de este Santo Oficio mientras sea Nuestra voluntad; y como penitencia deberá recitar por espacio de tres años, una vez a la semana, los Siete Salmos Penitenciales, reservándonos la facultad de cambiar, moderar, o eliminar cualquiera de las antes mencionadas penas y penalidades.

"Pronunciamos, declaramos, ordenamos, condenamos y reservamos por derecho esta u otras medidas".

A continuación van las firmas de los siete cardenales que integraron el Tribunal del Santo Oficio.

El texto de la abjuración de Galileo es el siguiente:

Yo, Galileo Galilei, hijo de Vincenzo Galilei de Florencia, con 70 años de edad, llamado ante este Tribunal, y arrodillado ante Uds., Eminentes Reverendos Cardenales, Inquisidores de la Republica Cristiana ante la depravación de la herejía, ante mis ojos lo más Santos Magistrados, y tendiendo a ellos mis manos; juro que siempre he creído, y sigo creyendo, y con ayuda de Dios seguiré creyendo en el futuro todo lo que la Santa Iglesia Católica y Apostólica sostiene, predica y enseña. Y dado que, después de haber sido llamado por este Santo Oficio a abandonar enteramente la falsa opinión de que el Sol es el centro del Universo y que está inmóvil, y que la Tierra no es el centro del mismo y se mueve, así como tampoco a sostener, defender ni enseñar de manera alguna, ni oralmente ni por escrito, la mencionada falsa doctrina; y después de haber recibido una notificación de que dicha doctrina es contraria a las Sagradas Escrituras, yo escribí e hice imprimir un libro en el cual hice mención de la ya condenada doctrina, y argumenté a su favor, sin llegar a solución alguna por la que he sido juzgado sospechoso grave de herejía, esto es, de haber mantenido y creído que el Sol es el centro del Universo e inmóvil, y que la Tierra no es el centro del mismo, y sí se mueve.

Deseando remover de las mentes de sus Eminencias y de todos los Cristianos creyentes esta vehemente sospecha razonablemente concebida contra mi, yo abjuro con sincera fe de corazón, repruebo y detesto dichos errores y herejías, y en general cualquier error o acto contrario a la Santa Iglesia Católica. Y juro que en el futuro no diré o sugeriré ni oralmente ni por escrito alguno cosas tales que hagan caer sobre mi sospecha similar; y si llego a conocer algún hereje o sospechoso de herejía lo denunciaré a este Santo Oficio, o al Inquisidor del lugar en el que me encuentre.

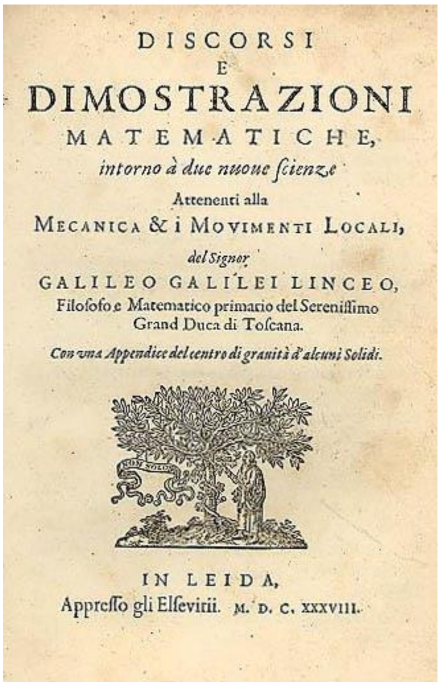

DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuoue ſcienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filoſofo e Matematico primario del Sereniſſimo
Grand Duca di Toſcana.
Con una Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.
IN LEIDA,
Appreſſo gli Elſevirii. M. D. C. XXXVIII.

Figura 5.8. Primera edición de "*Discorsi*…"

También juro y prometo adoptar y observar las penas que me han sido impuestas o lo sean en el futuro. Y si contrariase cualquiera de estas dichas promesas, o palabras dadas, (¡que Dios me perdone!) me entrego a las penas y penalidades que por los Sagrados Cánones y otros Decretos son impuestos y promulgados contra los ofensores. Ayúdenme Dios y los Santos Magistrados, que ahora toco las Santas Escrituras con mis propias manos.

Yo, Galileo Galilei, he abjurado, jurado y prometido, y apegándome a lo dicho, y tomándolo como verdad, con mi propia mano entrego el presente sumario de mi abjuración, que he recitado palabra por palabra.

En Roma, en el Convento Santa María sopra Minerva, el décimo segundo día de junio, 1633. Yo, Galileo Galilei, abjuro, de mi propia mano.

El libro fue incluido en el *Index Expurgatorius*. En 1820, el Santo Oficio decidió no oponerse más a la concepción copernicana y la interdicción fue levantada en 1835.

Quizás por presión del propio Papa Urbano VIII, el Tribunal Inquisidor le dictó prisión de por vida, una sanción que no era esperada. No obstante, y debido a la edad y la salud de Galileo, le fue otorgada la prisión domiciliaria en Siena, bajo la tutela del Arzobispo Ascania Piccolomini (que había sido alumno suyo). Le fueron autorizadas visitas y con el estímulo de sus amistados, comenzó a escribir *Discorsi a dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze Attenenti alla meccanica e movimenti locali* que completaría recién en 1636 y que contiene un novedoso enfoque a la resis-

Figura 5.9. Termoscopio florentino

tencias de los materiales, al peso del aire, la existencias del vacío, cinemática y dinámica de los móviles, acústica, velocidad de la luz, gravedad u otros temas de la Mecánica enfocados a la manera de cuatro diálogos entre los mismos personajes, Salviati, Simplicio y Sagredo, que recién pudo publicar Elzevier en 1638. Los primeros dos días incluyen diálogos que involucran muchos experimentos, mientras que los dos últimos días se ocupan de aspectos formales de la Ciencia, deducciones matemáticas, teoremas sobre el movimiento, que supuestamente son leídos de un manuscrito de académico amigo (Galileo). En el siglo XVIII, Lagrange afirmó que este libro establece los fundamentos de la Dinámica como ciencia.

En diciembre de 1633, Galileo fue autorizado a retornar a su casa con prisión domiciliaria pero sin recibir visitas. En 1637 comenzó a perder la visión debido a un glaucoma y recién en marzo de 1638 recibió autorización del Papa para recibir atención médica y en la casa de su hijo. En el verano de 1639, vino a vivir con él, Vincenzio Viviani, (1622 – 1703) su “último discípulo”. Dos años más tarde Galileo, completamente ciego, seguía trabajando afanosamente en el desarrollo de un péndulo para regular el movimiento de los relojes ordinarios. En octubre de 1641 vino a quedarse con él, Evangelista Torriccelli, quien ocuparía el puesto de Galileo en la Corte del Gran Duque de Toscana). En noviembre de ese año, enfermó gravemente y falleció el 8 de enero de 1642. Fue enterrado en la Cappella del Campanile del Noviziato in Santa Croce, pero la Iglesia prohibió la realización de un funeral público en su honor, pedido por el Duque de Toscana.

Recién en 1979 el Papa Juan Pablo II abrió una investigación sobre la condena eclesiástica de Galileo para su posible revisión. En octubre de 1992, una comisión papal reconoció finalmente el error del Vaticano.

La producción científica de Galileo abarca una diversidad de temas: matemática, cálculo, hidrostática, movimiento de los cuerpos, astronomía, magnetismo, etc. y de sus estudios surgieron teorías, leyes y numerosos instrumentos de aplicaciones diversas. Además de la ya comentada ley de la isocronía, la balanza hidrostática y la cicloide, construyó un instrumento que muestra tanto de su competencia en el cálculo matemático como su gran habilidad como mecánico: el compás geométrico y militar hoy conocido como "sector". Este dispositivo, descripto en *Le Operazioni del Compasso Geometrico et Militare* (1606), permitía resolver una gran cantidad de problemas geométricos y matemáticos, incluyendo la extracción de raíces cuadradas y cúbicas.

En 1603, inventó el termómetro (del griego *thermes*: calor y *metron*: medir). Para ello, utilizó un tubo de vidrio de unos 55 *cm* en el que uno de sus extremos remataba en un bulbo del tamaño de un huevo de gallina. Calentando el aire del interior del tubo lo invirtió en una vasija con agua. Al alcanzar la temperatura ambiente, el aire en el interior se contraía permitiendo la ascensión del agua. Cuando la temperatura ambiente aumentaba, el aire encerrado se expandía provocando el descenso de la columna de agua.

El termómetro de Galileo tenía el inconveniente de estar al aire libre y al influjo de las variaciones de la presión atmosférica las que, a temperatura constante, producían alteraciones en la altura de la columna de agua. No obstante ello, una ligera modificación del mismo, el *termoscopio,* que tenía grabada una escala en la columna y en el que el agua era reemplazada por vino fue ampliamente usado durante el siglo XVII.

Los imanes despertaron un gran interés en Galileo; en particular los estudios de William Gilbert (1540 – 1603) publicados en su libro *De magnete* (1600) le generaron una gran admiración. Uno de los descubrimientos de este último fue que un imán con una fina capa de hierro podía sostener un peso mayor que si no la tuviera. Galileo mejoró esta coraza o armadura hasta lograr que un imán de seis onzas sostuviera un peso de 160 onzas.

Dedicó mucho tiempo y esfuerzo a mejorar sus telescopios. El primero que construyó tenía una magnificación de 3*x*, luego fue mejorando el diseño y llegó a construir uno de magnificación 33*x*.

Más allá de sus inventos y descubrimientos, la obra de Galileo merece el reconocimiento por su aporte a una metodología de la investigación científica que estableció las bases operativas de lo que en el siglo XVII se llamó el empirismo científico.


Figura 5.10. Evangelista Torricelli.

5 – 3.- Evangelista Torricelli.

Las investigaciones de Galileo necesitaron su tiempo para ser aceptadas por los científicos europeos del siglo XVII, pero la idea conductora del método galileano suscitó la adhesión en un tiempo sorprendentemente muy breve. Prueba de ello, son las ideas rectoras que sostienen a las dos grandes instituciones científicas creadas a pocos años de la muerte de Galileo: la Accademia del Cimento, fundada en 1657, que establece como lema "*Probando e reprobando*"[19] y la Royal Society, creada en 1662 que adopta el principio "*Nullius in verba*"[20]. A estas instituciones, pronto se sumó la Académie des Sciences, en Paris (1666) y en 1672, la mia Leopoldina, en Alemania. La característica de todas estas instituciones científicas fue que los trabajos que se le les enviaban debían ser trabajos experimentales. Se privilegió al descubrimiento empírico sobre la discusión de teorías clásicas.

Uno de los tantos jóvenes interesados en la ciencia experimental fue Evangelista Torricelli. Nació en Faenza el 15 de octubre de 1608. Integrante de una familia de bajos recursos, recibió la primera instrucción de un tío paterno Jacopo Torricelli, un monje camaldolense. Cerca de sus veinte años, viajó a Roma y comenzó a estudiar bajo la tutela del Padre Benedetto Castelli, quien había si-

[19] Experimentando y rechazando.
[20] Nada de palabras.

do discípulo de Galileo. Cuando, en 1638, Elzevier publicó *Discorsi a dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Torricelli incorporó las concepciones del libro y escribió un texto sobre Cinemática y Dinámica que tituló *Trattato del Moto* para promover y ampliar las ideas de Galileo sobre la Mecánica. El Padre Castelli, había proyectado viajar en 1641 a Venecia para intervenir el en Capítulo General de su congregación y decidió que al regresar pasaría por Florencia para saludar a su viejo maestro. Se propuso llevar el *Trattato del Moto* para que Galileo pudiese apreciarlo. Al leerle los aspectos centrales, Galileo quedó muy impresionado por las cualidades de Torricelli y Castelli le propuso que el joven viajase a Florencia para colaborar con el maestro, que estaba ciego y enfermo, y adaptar los contenidos del *Trattato* para completar la quinta y la sexta "Jornadas" del *Discorsi*. Galileo aceptó encantado y en octubre Torricelli se instaló en su casa y, con la ayuda de Vincenzio Viviani, comenzaron a trabajar en el proyecto. Galileo estaba tan entusiasmado con su ayudante que escribió una carta de recomendación al Duque de Toscana y Ferdinando II, nombró a Torricelli matemático del Gran Ducado.

Lamentablemente, Galileo falleció el 8 de enero y Torricelli continuó su trabajo, pero ya no como una extensión del *Discorsi* sino como un trabajo independiente. En 1644, completó su obra que se publicó bajo el título *Opera Geometrica*. En ella desarrolló muchas ideas de Arquímedes expresadas en sus trabajos sobre el cilindro y la esfera, la cuadratura de la parábola, de los sólidos de revolución, amén de las ideas de Galileo y las suyas propias. El libro está dividido en cuatro secciones: *De Solidis Sphæralibus*, *De Motu, De Dimensione Parabolaæ*, *De solido Hiperbólico*, con un Apéndice sobre la cicloide y la coclea.

En esa obra pudo también completar el estudio del comportamiento de los cuerpos en un plano inclinado que había desarrollado Galileo, demostrando el teorema: "Dos graves, ligados entre si, no se pueden mover por si mismos, a menos que su centro de gravedad común descienda". En su trabajo sobre la dimensión de la parábola, escribió que "la naturaleza del centro de gravedad es tal que un cuerpo libremente suspendido por cualquiera de sus puntos no puede permanecer en reposo en tanto que su centro de gravedad no se encuentre en el punto más bajo de la esfera en la que se lo hace girar" y también dedujo que el centro de gravedad se encuentra sobre la vertical del punto de suspensión y por debajo del mismo. También estableció las condiciones de equilibrio para la palanca y una gran variedad de casos de equilibrios estático.

Galileo había comprobado que el aire tiene masa. Además sabía que en los tubos de aspiración de las bombas, el agua seguía al pistón sólo hasta una cierta altura, algo más de 10 metros. Pero no relacionó esta característica con la presión atmosférica, sino que elaboró como explicación que cuando la columna de agua alcanza una determinada altura, se quiebra bajo su propio peso. Torricelli reemplazó la columna de agua, cuya altura era un serio inconveniente para obtener resultados experimentales, por una columna de mercurio, cuya densidad es algo más de trece veces y media la del agua. Razonó que para equilibrar el "peso del aire" necesitaría una columna de mercurio mucho más corta. Llenó con mercurio un tubo de vidrio de pequeña sección y de 1,20 metros de largo y lo invirtió en una cubeta que contenía mercurio. Observó que la columna de mercurio descendió hasta unos 76 centímetros por encima del nivel de mercurio en la cubeta. Dedujo que el peso de la columna mercurial equilibraba el "peso" del aire[21], También comprobó que la altura de la columna mercurial variaba ligeramente no sólo al llevar el dispositivo de un lugar a otro, sino también a lo largo del tiempo, aún cuando el dispositivo permaneciese en el mismo lugar. Mediante estos experimentos, Torricelli demostró que podía crearse el vacío, refutando la afirmación aristotélica, "la Naturaleza le tiene horror al vacío". También sentó las bases para la construcción del barómetro. Con la colaboración de los académicos del Cimento construyó el primero a fines de 1644. En el siglo siguiente, Jean Hyacinthe de Magellan (1722 – 1790) y Jean Nicolas Fortín (1750 – 1831) desarrollaron, en forma independiente, barómetros con notables mejoras respecto del aparato de Torricelli, los que, a su vez, fueron reemplazados en el siglo XIX por los más sensibles barómetros aneroides. El descubrimiento de Torricelli fue pronto conocido fuera de Italia, gracias al Padre Mersenne quien mantenía fluida correspondencia con científicos de toda Europa. No obstante, los resultados de Torricelli fueron criticados por pensadores como René Des Cartes que convencido del plenismo de la naturaleza, negaba la existencia del vacío y de los átomos.

Torricelli también hizo contribuciones a la hidrodinámica. Demostró que el chorro de agua que sale a través de una abertura lateral de un recipiente lleno de agua, tiene el mismo comportamiento que el de la caída libre de un sólido. Según él, la velocidad del agua que sale por la abertura es la misma que si cayera desde una altura igual a la columna de agua que va desde la abertura al fondo del recipiente y que es proporcional a la raíz cuadrada de esa altura. También estimó que el volumen de líquido es proporcional al producto de de la velocidad por el tamaño de la abertura y que la trayectoria del líquido describiría un movimiento parabólico.

En octubre de 1647, contrajo fiebre tifoidea y falleció el 25 de ese mes. Fue enterrado en la Basílica de San Lorenzo.

5 – 4.- René des Cartes.

René Descartes nació en La Haye, en Touraine[22], el 31 de marzo de 1596, en el seno de una familia acomodada de la alta burguesía. Fue hijo de Joachim Descartes, — consejero en el Parlamento de Bretaña — y de Jeanne Brochard, que falleció en mayo del año siguiente.

Su formación tuvo lugar en una escuela jesuita, el Colegio Real de La Flèche, por entonces uno de los más prestigiosos de Europa, donde gozó de un cierto trato de favor en atención a su delicada salud. Según Geneviève Rodis-Lewis[23] estudió allí entre 1607 y 1615[24]. En La Flèche, Des Cartes adquirió un profundo conocimiento de la cultura clásica, que incluia el perfecto dominio del idioma latín, griego e italiano, que se nutría con una afición voraz por la lectura.

---

[21] En rigor, la presión atmosférica.

[22] Localidad que hoy se llama Descartes, en su honor.

[23] **Rodis-Lewis, G**., (**1995**): *Descartes.Biographie,* Calmann - Levy, Paris.

[24] Según Adrien Baillet (1649 – 1706) considerado uno de los primeros biógrafos de Des Cartes, este ingresó a la escuela en 1604 y estudió allí hasta 1612. Investigaciones posteriores demostraron que fue imposible que ingresara ese año.

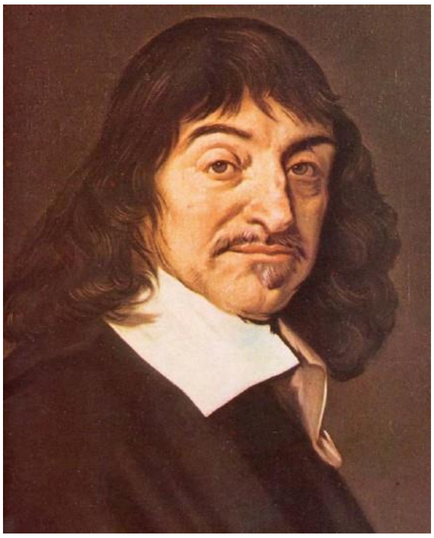


Figura 5.11. René Des Cartes

Si bien estudió Filosofía, esa disciplina no le produjo un gran impacto, lo que si ocurrió con el estudio de la Matemática. Años más tarde escribió: "*Mientras que las Matemáticas me han hecho disfrutar he visto la Filosofía como un medio para hablar de manera superficialmente convincente de cualquier cosa y ganar la admiración de los menos cultos*."

Tampoco lo entusiasmaba la Lógica: "*La Lógica, sus silogismos y la mayor parte de sus otras reglas sirven más bien para explicar a otro lo que uno sabe, más que para aprenderlo*."

La enseñanza que impartían los Jesuitas de temas de Matemática tenía una orientación eminentemente práctica. Además del *Cuadrivium* pitagórico añadía nociones de Mecánica, Óptica, Acústica, Topografía, Perspectiva, Hidráulica y Balística, según el cuadro general de la Matemática práctica renacentista, y con una orientación hacia la ingeniería civil y militar, que era de interés para los jóvenes nobles que ocuparían cargos en la administración y en el ejército. Por eso *Discurso del Método*, al referirse a sus años de formación escribió:

"Las Matemáticas tienen invenciones muy sutiles y pueden utilizarse tanto para contentar a los curiosos como para facilitar todas las Artes y disminuir el trabajo de los hombres."

Su formación matemática estuvo influenciada por la obra del jesuita alemán Christophorus Clavius (1538 – 1612), especialmente por sus obras *Euclidis elementorum*, (Roma,1589), *Geometria practica* (Roma, 1604) y la *Opera mathematica* (5 volúmenes, Roma, 1611)

Des Cartes desarrolló una sólida formación en las disciplinas humanísticas de la época, lo que aunado a sus conocimientos de latín y griego lo llevaron a destacarse en sus relaciones sociales.

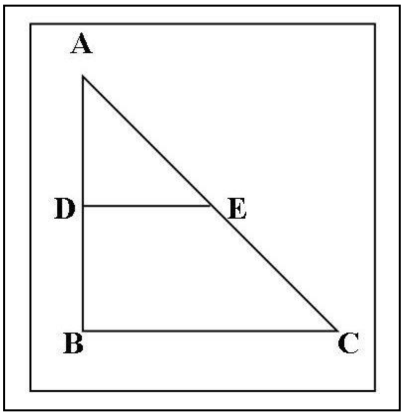
De La Flèche egresó satisfecho por lo que, en su *Discourse*, escribió: "*Debo confesar, en honor de mis maestros, que no hay lugar en el mundo en donde se enseñe mejor que en la Flèche*". No obstante, la formación filosófica impartida en esa escuela era sumamente rígida y articulada en todos los detalles por la Compañía de Jesús, por lo que resultó natural que Des Cartes anhelase regirse por sus propias convicciones. De allí que años más tarde escribiría: " ... *y no me precio tampoco de ser el primer inventor de mis opiniones, sino solamente de no haberlas admitido ni porque las dijeran otros ni porque no las dijeran, sino sólo porque la razón me convenció de su verdad*...". Ese análisis, lo llevó a ser muy crítico de la filosofía escolástica. Consideraba que tenía el mérito de aguzar el ingenio y proporcionar agilidad al intelecto; pero , en cambio, le negó toda eficacia científica: ya no no enseñaba a descubrir la verdad, sino solamente a defender verosímilmente todas las proposiciones aceptadas.

Después de pasar unos años en París, tuvo el impulso de recorrer el mundo y ver de cerca las comedias que se representaban el distintos lugares. Entró al servicio del príncipe Guillermo de Nassau y comenzó lo que se conoce como sus años de peregrinación. Participó en combates en Alemania y Holanda; sirvió bajo el duque de Baviera; recorrió los Países Bajos, Suecia, Dinamarca.

El 10 de noviembre de 1618 ocurrió un evento de trascendental importancia en la vida de Des Cartes, el encuentro con Isaac Beeckman, (1588 – 1637). Paseando por Breda, encontró a un grupo de personas que discutía frente a un cartel que portaba un matemático, quien retaba a los presentes a resolver un problema, algo que era frecuente en aquella época. En esa época Des Cartes no dominaba el holandés, por lo que pidió si alguno de los presentes podía traducirlo al latín o al francés. Fue el propio Beeckman quien hablándole en latín le explicó la esencia del problema. En sus *Cogitationes privatæ* Des Cartes escribió: "Hace unos días trabé, casualmente, amistad con un hombre muy ingenioso quien me planteó la siguiente pregunta:

"Una piedra desciende desde A hasta B en una hora, es perpetuamente atraida por la Tierra con la misma fuerza, y no pierde nada de la velocidad que le ha sido impresa por la atracción precedente. Ahora bien, lo que se mueve en el vacío, se mueve, *según él*, eternamente. Se pregunta en cuánto tiempo atravesará un espacio dado."[25]

Beeckman le dio su tarjeta personal y, al día siguiente, Des Cartes no le llevó una respuesta, sino dos:



Resolví el problema. En el triángulo isósceles rectángulo, ABC representa el espacio (el movimiento); la desigualdad del espacion del punto A a la base BC, representa la desigualdad del movimiento. Por consiguiente AD será atravesado en el tiempo representado por DEBC. donde hay que señalar que el espacio menor representa el movimiento más lento. Pero ADE es la tercera parte de DEBC: por consiguiente AD será atravesado tres veces más lentamente que DB"

"Pero se podría también plantear este problema de otra forma, a saber: [admitiendo] que la fuerza atractiva de la Tierra sea igual a la que fue en el primer momento, y que se produzca una nueva, mientras dura la precedente. En este caso, el problema se resolvería por la pirámide."

Este añadido muestra que Des Cartes no analizó el problema desde el punto de vista físico ¿Cómo podría aumentarse la fuerza atractiva? ¿Si la fuerza atractiva aumentase a cada instante, en el segundo instante, el cuerpo sería atraído con una fuerza doble, al tercer instante, por una fuerza triple y el cuerpo iría cayendo mucho más rápidamente. ¿Cómo podría incrementarse esa fuerza atrac-

[25] Dado que en muchos textos figura:" "¿A que *distancia* caerá un piedra en una hora si se sabe a que *distancia* cae en dos?" y Des Cartes hablaba de *tiempos*, damos el texto de Des Cartes en latín:"Contigit mihi ante paucos dies familiaritate uti ingeniosissimi viri, qui talem mihi quæstionem proposuit: *Lapis aiebat, descendit ab A ad B una hora; attrahitur autem a terra perpetuo eadem vit, nec quid deperdit ab illa celeritate quœ illi impresa est priori attractione. Quod enim in vacuo movetur semper moveri eesistimabat. Queritur quo tempore tale spatium percurrat*". (*Œuvres de Descartes, Cogitationes privatæ,* Adam et Tannery, Vol. X. pp. 219 ss)

tiva? Des Cartes no se formuló esa pregunta. Obviamente vio el problema como un geómetra puro y no como un físico y llegaría a la conclusión que la velocidad de la caída es proporcional a la fuerza (por lo que un cuerpo sometido a una fuerza constante mantendría un movimiento con velocidad constante).

Gracias a ese problema, en noviembre de 1618, se inició una fructífera amistad que se mantuvo durante doce años, —fundamentalmente en forma epistolar,— plena de gratitud recíproca. En las cartas de Des Cartes a Beeckman abundan las palabras de agradecimiento considerándolo el ordenador de sus reflexiones matemáticas y geométricas.

Por sugerencia de Beeckman, Des Cartes inició una serie de estudios matemáticos relacionados con las ecuaciones cúbicas y desarrolló el simbolismo algebraico que luego sería ampliamente difundido[26].

Justo un año después de su encuentro con Beeckman, en la madrugada del 11 de noviembre, Des Cartes descansando con fiebre en los cuarteles de los ejércitos de Maximiliano de Baviera, sufrió tres alucinaciones. En un manuscrito de 1620, las relató con todos los detalles. En la primera sintió angustias, en la segunda se sintió iluminado y en la tercera sintió que un espíritu de la verdad quería abrirle los tesoros de todas las ciencias. Más tarde escribió: "X *Novembris* 1619, *cum plenus forem Enthousiasmo et mirabilis scientiae fundamenta reperirem* ..."[27]. En el segundo aniversario de su encuentro con Beeckman, tuvo otro sueño en el que le aparece una visión que le trasmitió un mensaje. Al respecto escribió: "X *Novembris* 1620. *Coepi intelligere fundamentum inventi mirabilis*".[28]

Se cree que a través de esas alucinaciones, Des Cartes concibió la idea de unir el Álgebra con la Geometría en un sólo cuerpo: la Geometría Analítica y la Física con la Matemática en una nueva Filosofía natural que rechazaría la mayoría de los postulados de la Escolástica sobre ese tema.

En las turbulencias religiosas de la década de 1620, Des Cartes solía refugiarse en la República de las Siete Provincias Unidas de los Países Bajos[29], —más conocida como Provincias Unidas,— donde había más tolerancia intelectual y tolerancia religiosa entre católicos y protestantes.

En París Des Cartes conoció al padre Marin Mersenne, el sacerdote mínimo[30] que manejaría la correspondencia de Descartes cuando el filósofo viviera en las Provincias Unidas. Los mínimos

[26] La amistad con Beeckman terminaría abruptamente en 1630. En una visita del Padre Mersenne a Beeckman, este le mostró un pequeño tratado sobre música que había escrito Des Cartes en sus momentos de ocio en la guarnición de Breda, pero omitió decirle quien era el autor. Mersenne que era un entendido en música, alabó ese tratado y en la conversación, Beeckman le contó todo lo que él había hecho para que Des Cartes mejorara su formación. Mersenne le escribió a Des Cartes contándole los detalles del encuentro y alabando el tratado de música de Beeckman, por lo que Des Cartes llegó a la conclusión que Beeckman lo había plagiado. Le escribió a Beeckman pidiéndole la devolución del tratado y su enojo fue tal que en otra carta a Mersenne afirmó que no había aprendido nada de Beeckman.

[27] "X de noviembre de 1619, cuando, lleno de entusiasmo, descubrí los fundamentos de una ciencia admirable..."

[28] "10 Noviembre 1620. He empezado a entender el fundamento de un admirable descubrimiento".

[29] Un Estado formado por las siete provincias del norte de los Países Bajos (Frisia, Groninga, Güeldres, Holanda, Overijssel, Utrecht y Zelanda)

30 San Francisco de Paula, que fundó la orden de los mínimos en 1435, los llamó así para que fueran aún más humildes que los franciscanos, que se denominaban “menores".

eran vegetarianos. No consumían ningún producto animal, sólo frutas y verduras y tenían que mostrar que llevaban una vida humilde. Sin embargo, el Padre Mersenne — que fue una especie de *Intranet* de esa época informando por correo a un gran número de científicos y personalidades de las novedades que le escribían otros — debe haber gastado una fortuna en mantener su correspondencia.

Las opiniones contra las ideas de Aristóteles y contra la escolástica que la Iglesia imponía en todas las instituciones educativas hacían que Des Cartes fuese considerado como ateo por católicos radicalizados. Esto se volvió particularmente peligroso en París a partir del año 1624. El 23 de agosto de ese año, tres intelectuales, Antoine de Villon, Jean Bitaud y Étienne de Clave, pegaron carteles en las calles de París anunciando que los días 24 y 25 se llevarían a cabo dos días de debates sobre 14 tesis dirigidas contra las ideas de Aristóteles, de Paracelso y de los cabalistas[31] oposición a las doctrinas de Aristóteles. A la reunión asistieron casi mil personas entre adherentes y detractores de esas ideas. Hubo escenas de violencia y el Parlamento de París prohibió la reunión y ordenó a la policía a dispersarla. El 4 de septiembre, el Parlamento condenó al exilio a los tres promotores de la reunión y emitió un decreto condenando a muerte a todo aquel que denostare públicamente las doctrinas de Aristóteles.[32]

La religiosidad de Des Cartes siempre fue puesta en duda por sus oponentes quienes esgrimían como argumento sus ideas contra la Escolástica. Des Cartes trataba de demostrar su fe, concurriendo a misa en iglesias católicas y presentando "pruebas" metafísicas de la existencia de Dios. Por otras parte, tenía cierta vinculación con algunos auténticos escépticos como el príncipe Mauricio de Nassau y Théophile de Viau. Uno de sus mejores amigos fue Claude Picot a quien apodaban "el cura ateo".

Si bien Descartes ofreció pruebas de la existencia de Dios, también le comentó a Mersenne que su Metafísica, donde aparecían estas evidencias, era, fundamentamentalmente, conclusiones que extraía de la Física, por lo que un Dios creíble debía mantener constantes las leyes de la naturaleza. Descartes también estaba convencido de que el alma humana era una sustancia inmaterial de existencia independiente capaz de sobrevivir a la muerte y al deterioro del cuerpo, lo cual constituía un argumento a favor de la inmortalidad el alma, aunque, desde luego, Dios tenía el poder para extinguirla cuando lo desease.

A fines de la década de 1620, decidió dedicarse por completo al estudio y a la meditación y se recluyó en Holanda donde vivió por veinte años, cambiando a menudo de residencia para eludir la ociosa curiosidad de amigos, conocidos o personas inoportunas. Durante estos veinte años escribió y publicó sus principales obras: El Discurso del Método, con la Dióptrica, los Meteoros y la Geometría, en 1637; las Meditaciones metafísicas, en 1641 (en 1647 se publicó la traducción francesa

31 Grupo que sostenía que el mundo tenía un alma, identificada con el fuego y que existía un espíritu universal, que era el principio de todas las acciones.

32 Pierre Gassendi había publicado en 1623 su Syntagma Philosophiae *Epicuri*, donde lanzó un desvastador ataque contra el aristotelismo y el Padre Mersenne era mecanicista y antiaristotélico. Pero eran sacerdotes que fueron protegidos por sus respectivas órdenes.

del duque de Luynes, revisada por Descartes); los Principios de la filosofía, en 1644 (en latín primero, y luego, en 1647, en francés); el Tratado de las pasiones humanas, en 1650.

En 1630 conoció a quien llegó a ser su mejor amigo en las Provincias Unidas, Constantjin Huygens, (1596 – 1687), primer secretario y asesor de dos sucesivos staadhouders (comandantes en jefe). Huygens tenía la misma edad que Des Cartes, y se convirtió en el mayor promotor y protector de Descartes en las Provincias Unidas. Fue, el padre del que luego sería uno de los más destacados científicos neerlandeses, Christiaan Huygens. Constantijn comprendía y defendía la filosofía de Descartes. Con amigos como Huygens, Des Cartes no necesitaba preocuparse demasiado por sus enemigos. Mientras tanto, en la Cámara de Comercio de La Haye, un grupo importante de personalidades habían formado una especie de "club de admiradores" de Des Cartes y se dedicaban a propagar sus ideas y sus escritos. Los apoyos que iba recibiendo el Provincias Unidas, lo alentaron a hacer pública su filosofía antiaristotélica, a pesar del rechazo que provocaría en los sectores más conservadores de la Iglesia Católica.

Su filosofía dejaba de lado las cualidades como impulsoras de los cambios para centrar el motivo de los cambios en procesos mecánicos que obedecían a las leyes de la Física. Sólo el alma era incorpórea, inmortal y separable del cuerpo. Todos los demás procesos en la materia inanimada y la viviente eran procesos mecánicos. Pero al igual que Aristóteles negaba la existencia de los átomos y la existencia del vacío. Para justificar el movimiento de la materia en un mundo pleno, recurrió al siguiente ejemplo: si se invierte un barril totalmente lleno de agua, el agua no cae, pero si se realiza una pequeñísma perforación en su fondo, al invertirlo el agua cae. Y lo hace impulsada por el aire que atraviesa la pequeña perforación, que empuja el agua hacia abajo.

La metafísica cartesiana tenía cierta coherencia lógica ya que estaba cimentada sobre la Física. Una vez que se demostraba la existencia de Dios, mostraba que el mundo sólo consiste en materia en movimiento que obedece a las leyes naturales diseñadas por Dios. Todo lo que Dios necesitó para poner el mundo en movimiento fue darle un empujón.

Su metafísica fue criticada por sectores de la Iglesia que argumentaban que contradecía a las Sagradas Escrituras. Para evitar la confrontación, Des Cartes calificó a su modelo como una fábula, pero añadiendo que, aún como fábula era muy útil, porque se sabe que la materia se mueve siguiendo leyes de la naturaleza que son eternas en tanto Dios no cambie de opinión.

En 1633 se enteró de que en Roma la Corte del papa Urbano VIII había condenado el ensayo de Galileo, "*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicia*no", de 1632, en el que desarrollaba la tesis heliocentrista. Des Cartes, que estaba preparando distintos temas que compendiaran su vision sobre el mundo, fue presa del pánico y, en la desesperación, le escribió al Padre Mersenne, diciéndole que se había dado cuenta que los fundamentos de su filosofía eran falsos y rogándole que no publicase nada que pudiera ser reprobado por la Iglesia. Nunca publicó su visión sobre el Mundo y en los temas sobre los distintos aspectos de la Naturaleza se cuidó muy bien de incluir alguna afirmación que pudiese irritar a la Jerarquía Católica.

Los contenidos de su frustrado tratado sobre el Mundo, fueron meticulosamente limpiados de toda afirmación que pudiera considerarse atea y dieron lugar a distintos ensayos parciales, como la

Dióptrica, Los Meteoros. Lo que había esbozado sobre las reglas para la dirección de la mente lo incorporó al "Discurso del método", así como una condensación de su trabajo sobre Metafísica.

En 1637 publicó su *Discours de la Méthode pour bien conduire sa raison & chercher la verité dans les sciences*, que incluyó tres ensayos, *La Dioptrique, Les Météores* y *La Géometrie*, que fue traducida al latín debido a su buena crítica. Dado el éxito obtenido, comenzó a preparar sus *Meditations metaphysiques*.

A principios de octubre de 1642, un amigo de Des Cartes, Alphonse de Pollot, le escribió contándole que la princesa Élisabeth de Bohemia, entonces de 23 años, quería conocerlo. La princesa había leído el Discurso, los Ensayos y las Meditaciones y quería conocerlo para que le aclarase algunas dudas. Ella hablaba inglés, alemán, francés, holandés e italiano, y se manejaba bien en latín. Era muy buena en matemáticas y sus críticas a la metafísica son perspicaces. Descartes, aunque evadía los ecuentros con sus críticos, aceptó conocerla.

Para Des Cartes, en el mundo sólo había dos especies, completamente diferenciadas. cuerpos y almas. La esencia de los cuerpos era su extensión, irreflexiva y pasiva. Cada especie podía existir independientemente de la otra. Así el alma era inmortal aunque por un tiempo estuviese vinculada a un cuerpo. Los movimientos de los cuerpos obedecían a las leyes de la Mecánica y, por lo tanto, eran similares entre un cuerpo "viviente" y uno inanimado. La pregunta de Élisabeth fue: ¿Cómo interactúan el cuerpo y el alma? Descartes no supo resolver la cuestión y le contestó que la experiencia demostraba esa interacción ya que los seres humanos así lo experimentaban y Dios lo hacía posible; respuesta que, obviamente, no satisfizo a la princesa. Pese a no poder darle respuesta cabal a las preguntas y objeciones de la Princesa, la agudeza de los cuestionamientos de Élisabeth, lejos de ofuscarlo, generó en Des Cartes una simpatía al punto que le dedicó sus "*Principes de la Philosophie*" con una epístola de dos páginas que comenzaba con "*A la Sérénissime Princesse Élisabeth Première fille de Frédéric, roi de Bohème, comte Palatin et prince-électeur de l'Empire*." Esta dedicatoria fue considerada por sus detractores como una bofetada a los católicos, ya ella era germana, protestante y *mujer*. Des Cartes reconoció que las dudas, sugerencias o observaciones de la Princesa, lo ayudaron a pulir sus conceptos.

En septiembre de 1649, la reina Cristina de Suecia lo llamó a su Corte, pero no para integrar la colección de científicos que le daban jerarquía a su reinado sino como su profesor particular de Filosofía, algo que para Des Cartes fue un reconocimiento a sus ideas. En Estocolmo falleció de neumonía el 11 de febrero de 1650, a los 53 años.

Des Cartes, nunca se casó, pero convivió con Helena Jans, su ama de llaves, entre 1634 y 1640. Tuvieron una hija, Francine, que falleció en 1640 de escarlatina al igual que su madre, unos días después.

Dado que el interés principal de estas notas en la contribución de Des Cartes a la Física, daremos algunas reseñas de su obra que involucran esos temas y no en orden cronológico.

5 – 4.1.- La dióptrica.

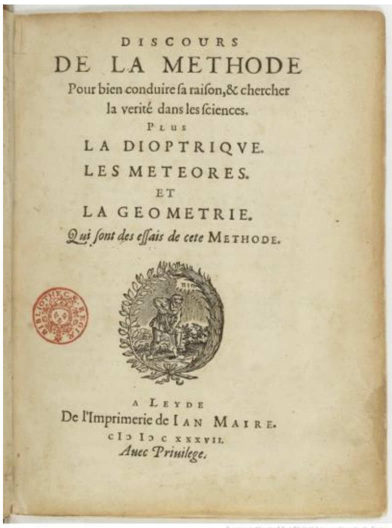


Figura 5.12. Discurs de la Méthode

La dióptrica es uno de los ensayos que incluyó Des Cartes en la edición de 1637 del *Discours de la Méthode.* En este ensayo escribió que iba a empezar *por dar una explicación acerca de la luz y sus rayos* pero aclaró que no era necesario expresar cuál es su verdadera naturaleza. Para justificarlo recurrió al caso de los astrónomos "*que a pesar de que sus supuestos son casi todos falsos o inciertos, como se refieren a diversas observaciones hechas, permiten algunas consecuencias muy reales y muy seguras*". Simplemente describió a la luz como *un cierto movimiento o una acción muy rápida y muy viva que pasa ante nuestros ojos a través del aire y otros cuerpos transparentes.*

Sostuvo que no un lugar vacío en la Naturaleza, pero como en todos los cuerpos hay poros, esos poros están llenos de un material muy sutil y muy fluido que se extiende de forma continua desde las estrellas hasta la Tierra. La luz se mueve en esa materia sutil en forma de una infinidad de rayos que van desde todos los puntos de los cuerpos luminosos hacia los puntos de los cuerpos que iluminan siguiendo líneas rectas. Pero cuando esos rayos encuentran algunos cuerpos, están sujetos a ser desviados por ellos o a atenuarse. Indicó que los cuerpos negros absorben los rayos luminosos y que los espejos, planos o curvos, los reflejan. También explicó que los rayos que inciden sobre cuerpos coloreados y no pulidos se reflejan usualmente hacia todos lados y que el proceso en que los rayos cambian su trayectoria al atravesar un cuerpo se llama refracción.

Usando un ejemplo incorrecto, el de una bola que efectúa un choque perfectamente elástico sobre la tierra perfectamente plana, — como si no hubiera interacción gravitatoria — trató de demostrar que el ángulo de un rayo incidente es igual al ángulo de reflexión.

En lo que respecta a la refracción usó también el ejemplo de una pelota atravesando el agua. Sobre este tema escribió:"*toda la acción de la luz sigue las mismas leyes del movimiento de la pelota, quiere decir que cuando sus rayos pasan oblicuamente de un cuerpo transparente a otro, que la recibe más o menos fácilmente que el primero, se desvían de tal manera que están aún menos inclinados sobre la superficie del cuerpo, del lado del que recibe la luz más fácilmente que del lado donde la recibe el otro*: *y que, precisamente es la misma facilidad relativa de esa recepción*". Al ángulo que forma el rayo desviado con la normal lo llamó ángulo de refracción.

También explicó que, cuando llegan al lugar donde se produce la refracción, los rayos de luz se inclinan más en el aire que en el agua y más en el agua que en el agua, *todo lo contrario de una bola que se inclina más en el agua que en el aire y no puede, en absoluto, entrar en el vidrio* (con lo cual invalida en ejemplo de la pelota atravesando el agua)

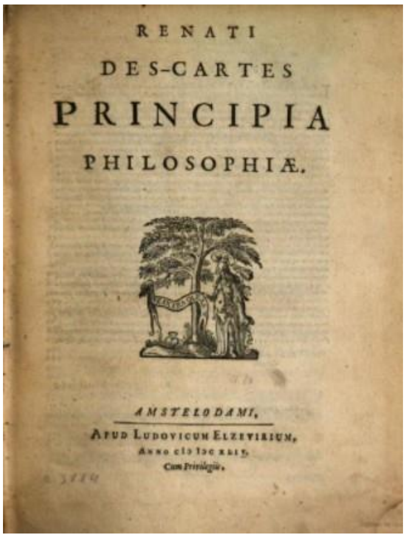


Figura 5.13. Los principios de la filosofía

5 – 4.2.- Los principios de la filosofía.

En 1644, Des Cartes publicó *Principia Philosophiæ*, un detallado estudio de sus ideas filosóficas maduras. El libro está dividido en cuatro partes.

La primera parte lleva por título: "Los principios del conocimiento humano". En ella, Des Cartes enuncia un conjunto de "principios"[33] que, más que estar vinculados a la Filosofía, semejan un texto de Teología. Esos "principios" son.

1. Que para examinar la verdad, una vez en la vida, es necesario poner en duda todas las cosas que se puedan.

2. Que es útil considerar como falsas a todas las cosas de las que podamos dudar.

3. Que no debemos en absoluto usar de estas dudas para conducir nuestras acciones.

4. Por qué se puede dudar de la verdad de las cosas sensibles.

5. Porque también se puede dudar de las demostraciones matemáticas.

6. Que tenemos un libre albedrío que hace que podamos abstenernos de creer en las cosas dudosas y así impedir que seamos engañados.

7. Que no sabríamos dudar sin ser, y que este es el primer conocimiento cierto que podemos adquirir.

8. Que luego también conocemos la distinción entre el alma y el cuerpo.

9. Eso que es pensar.

10. Que hay unas nociones tan claras en sí mismas pero que las oscurecemos queriéndolas definir como en la Escuela, y que ellas no se adquieren en absoluto por el estudio, sino que nacen con nosotros.

11. Cómo podemos conocer más claramente nuestra alma que nuestro cuerpo.

12. ¿Cómo es que todo el mundo la desconoce de esta manera?

[33] En toda disciplina, los principios son enunciados indemostrables que se aceptan como verdaderos sin necesidad de demostración y que se corroboran por las consecuencias lógicas que de ellos se derivan.

13. En qué sentido podemos decir que si ignoramos al Dios, no podemos tener conocimiento cierto de ninguna otra cosa.

14. Que se puede demostrar que hay un Dios sólo de que la necesidad de ser o existir está comprendida en la noción que tenemos de él.

15. Que la necesidad de ser no está comprendida del mismo modo en la noción que tenemos de otras cosas, sino solamente el poder ser.

Los principios 16 al 31 están completamente dedicados a Dios, a sus atributos y a los que el hombre tiene gracias a Dios.

32. Que sólo hay en nosotros dos modos de pensar, a saber, la percepción del entendimiento y la acción de la voluntad.

33. Sólo nos equivocamos cuando juzgamos acerca de algo que no ha sido suficientemente conocido.

34. Para juzgar es necesario no sólo el entendimiento, sino también la voluntad.

35- El alcance de nuestra voluntad es superior al del entendimiento y de ello provienen nuestros errores.

36. Nuestros errores no pueden ser imputados a Dios.

37. La principal perfección del hombre consiste en tener libre albedrío, siendo esto lo que le hace merecedor de la alabanza o de la censura.

38. Nuestros errores son defectos de nuestra forma de obrar y no de nuestra naturaleza; asimismo, frecuentemente las falta de los sujetos suelen ser atribuidos a otras personas, pero no pueden ser atribuidos a Dios.

39. La libertad de nuestra voluntad se conoce sin necesidad de prueba, basta con la experiencia que de ella tenemos.

40. Sabemos que Dios ha preordenado todas las cosas.

41. De cómo se puede conciliar nuestro libre albedrío con la preordenación divina.

42. De cómo erramos, aún cuando nunca deseamos equivocarnos, porque erramos a causa de nuestra voluntad.

43. No podríamos errar si solamente juzgáramos acerca de lo que percibimos clara y distintamente.

44. No podríamos sino juzgar inadecuadamente de lo que no nos apercibimos claramente. Aún cuando nuestro juicio pueda ser verdadero, es nuestra memoria la que, frecuentemente, nos induce a error.

45. Acerca de qué es una percepción clara y distinta.

46. Una percepción puede ser clara y distinta, pero no puede darse lo contrario.

47. Si deseamos desterrar los prejuicios adquiridos a partir de nuestra infancia, es preciso considerar lo que es de claro en cada una de nuestras primeras nociones.

48. Todo aquello de lo que tenemos alguna noción es considerado como una cosa o bien como una verdad, y la enumeración de las cosas.[34]

49. Las verdades no pueden ser enumeradas de esta forma, es más, no hay necesidad de hacerlo.

50. Todas estas verdades pueden ser claramente conocidas pero no pueden serlo por todos los hombres a causa de sus prejuicios.

51. Sobre lo que es la sustancia y que este nombre no puede atribuirse a Dios y a las criaturas en un mismo sentido.

52. Este término podemos atribuirlo en el mismo sentido tanto al alma como a al cuerpo; y de cómo se conoce la sustancia.

53. Cada sustancia tiene un atributo principal, siendo el atributo del alma el pensamiento y el del cuerpo: la extensión.

54. Cómo podemos tener pensamientos distintos de la sustancia que piensa, de la sustancia corporal y de Dios.

Cómo podemos tener nociones claras y distintas de la duración del orden y del número.

56. Sobre las cualidades, atributos y formas o modos.

57. hay atributos que son propios de las cosas a las que son atribuidas u otros atributos que dependen de nuestro pensamiento.

58. Que los números y los universales dependen de nuestro pensamiento.

59. De cuáles son los universales.

---

[34] Que tout ces que nous avons quelque notion, est consideré comme une chose, ou comme une verité: et le dénombrement des choses.

60. Sobre las distinciones y, en primer lugar, sobre la que es real.

61. Sobre la distinción modal.

62. Sobre la distinción que se hace por el pensamiento.

63. Cómo se pueden tener nociones distintas de la extensión y del pensamiento, en tanto que la primera constituye la naturaleza del cuerpo y la otra constituye la del alma.

64. Cómo también la extensión o el pensamiento se pueden concebir distintamente, tomándolos por modos o atributos de esas sustancias.

65. Cómo se conciben también sus diversas propiedades o atributos.

66. También tenemos nociones distintas de nuestras sensaciones, de nuestras afecciones y apetitos, aunque frecuentemente nos equivoquemos al formular juicios sobre ellos.

67. Frecuentemente llegamos a equivocarnos al juzgar que sentimos dolor en alguna parte de nuestro cuerpo.

68. Cómo, en estas cuestiones, es preciso distinguir aquello en lo que podemos equivocarnos de aquello que se concibe claramente.

69. Conocemos las figuras, dimensiones, etc. de modo totalmente distinto a como conocemos los colores, dolores, etc.

70. Podemos juzgar las dos formas acerca de las cosas sensibles, de acuerdo con una de ellas, incurrimos en error y, de acuerdo con la otra, lo evitamos.

71. La primera y principal causa de nuestros errores reside en los prejuicios adquiridos durante nuestra infancia.

72. La segunda causa de los errores reside en que no podemos olvidar estos prejuicios.

73. La tercera causa de nuestros errores reside en la fatiga del espíritu cuando presta atención a todas las cosas acerca de las cuales juzgamos.

74. la cuarta razón de nuestros errores reside en que vinculamos nuestros pensamientos a palabras que no corresponden adecuadamente a las cosas.

75. Resumen de todo lo que se debe observan para filosofar correctamente.

Por todo ello, si deseamos entregarnos con seriedad al estudio de la filosofía y a la investigación de todas las verdades que somos capaces de conocer, debemos liberarnos, en primer lugar, de nuestros prejuicios y debemos rechazar todas las opiniones que hemos recibido a lo largo de otra época de nuestra vida en nuestra creencia hasta que las hayamos examinado de nuevo. A continuación, realizaremos una revisión de todas las nociones que poseemos y sólo recibiremos como verdaderas aquellas que se presenten clara y distintamente a nuestro entendimiento. De esta forma y en primer lugar, conoceremos que somos, en tanto que nuestra naturaleza consiste en pensar; que existe un Dios del que nosotros dependemos y, después de haber considerado sus atributos, podremos indagar la verdad de todas las otras causas puesto que es causa de ellas. Además de las nociones que tenemos de Dios y de nuestro pensamiento, también hallaremos en nosotros el conocimiento de muchas proposiciones que son perpetuamente verdaderas como, por ejemplo, que la nada no puede ser el autor de algo. También hallaremos la idea de una naturaleza extensa o corporal que puede ser movida, dividida, etc., así como las sensaciones que causan en nosotros ciertas disposiciones, como el dolor, los colores, etc. Y comparando lo que acabamos de aprender al examinar estas cosas por orden con aquello que pensábamos en ellas antes de haberlas examinado de esta forma nos acostumbraremos a formar concepciones claras y distintas sobre lo que nosotros somos capaces de conocer. Pienso que estos pocos preceptos, comprenden todos los principios más generales y más generales del conocimiento humano.

La segunda parte de esta obra está mucho más dedicada a la Física que a la Teología. En ella analiza aspectos del ser humano y de la Naturaleza aunque sin despojarse de sus creencias religiosas, a pesar de afirmar:

> *Por todo ello, si deseamos entregarnos con seriedad al estudio de la filosofía y a la investigación de todas las verdades que somos capaces de conocer, debemos liberarnos, en primer lugar, de nuestros prejuicios y debemos rechazar todas las opiniones que hemos recibido a lo largo de otra época de nuestra vida en nuestra creencia hasta que las hayamos examinado de nuevo. A continuación, realizaremos una revisión de todas las nociones que poseemos y sólo recibiremos como verdaderas aquellas que se presenten clara y distintamente a nuestro entendimiento.* [35]

Des Cartes, partió de la afirmación de la existencia de una *sustancia* extensa en longitud, latitud y profundidad, que existe *en el presente en el mundo* con todas las propiedades que manifiestamente conocemos que le pertenecen. Esta *sustancia* extensa es lo que él denomina *cuerpo o la sustancia de las cosas materiales*.[36] Además, sostuvo que

> *Ni el peso, ni la dureza ni el color, etc., constituyen la naturaleza del cuerpo, sino sólo la extensión*.[37]

Esta afirmación lo llevó a tener que explicar en qué consisten la vaporización y la condensación, — que modifican la extensión — y por qué estos procesos no cambian la naturaleza de un cuerpo.

Para Des Cartes, "lugar" y "espacio" no difieren en nada del cuerpo del que se dice que está en un lugar que designa únicamente su magnitud, su forma y cómo está situado respecto de otros cuerpos; ya que una misma cosa puede cambiar o no de lugar según el lugar de referencia que se tome. Para él, lugar y espacio difieren solamente en que la palabra lugar señala con más énfasis la

[35] **Des-Cartes, R.**, (**1644**): *Principia Philosophiæ*, Ludovicum Elzevirium, Amsterdam, p. 35.
[36] *Idem,* p. 34.
[37] *Ibid.*, p. 35.

situación, mientras que espacio hace más referencia a la magnitud o a la forma. Para él, decir que una cosa está en tal lugar sólo expresa que está situada de manera determinada respecto de algunas otras cosas, pero al decir que una cosa pasa a ocupar tal espacio implica, además que tal cosa tiene tal dimensión y tal forma que pueden llenar el lugar con precisión.

Con un lenguaje propio de su época, hace una distinción entre el lugar que ocupa un cuerpo y el espacio del cual está separado por su superficie externa.[38]

Des Cartes adoptó una concepción plenista, rechazando absolutamente la idea de la existencia del vacío. Al respecto escribió:

> *En relación con el vacío, en el sentido en el que los filósofos toman esta palabra, a saber, entendiendo por tal un espacio en el que no hay sustancia, es evidente que no puede darse* ***en el Universo****, ya que la extensión del espacio o del lugar interior no difiere de la extensión del cuerpo. Y como, a partir de que un cuerpo es extenso en longitud, anchura y profundidad, tenemos razón para concluir que es sustancia, ya que concebimos que no es posible que lo que no es tenga extensión, debemos concluir lo mismo del espacio que se supone vacío: a saber, que dado que en él hay extensión, necesariamente hay en él sustancia.*[39]

Para Des Cartes, si espacio y cuerpo son indistinguibles, no existe vacío en el Universo, y justifica la referencia ordinaria a un *lugar vacío*, no en el sentido que no haya nada en ese lugar sino solamente que no hay nada de lo que se estima que debería haber. Así, si un recipiente está hecho para contener agua, se dice que está vacío cuando sólo contiene aire. Al respecto, se pregunta qué sucedería en el caso que Dios retirase todo del cuerpo que contiene un vaso, sin permitir que penetre otro y se responde, que los lados de ese vaso comenzarían a aproximarse hasta contactarse. Esto lo justifica:

> *Pues es preciso que dos cuerpos contacten cuando entre ellos dos no se contiene nada, porque existiría contradicción en que estos dos cuerpos estuvieran alejados, es decir, que hubiese una distancia del uno al otro, y que, sin embargo, esta distancia no fuese nada. Es así, pues la distancia es* ***una propiedad*** *de la extensión y, por lo tanto, no podría subsistir sin una cosa extensa.*[40]

Si bien Des Cartes publicó su obra en 1644, parece que no tuvo conocimiento que el año anterior, Evangelista Torricelli había publicado su clásico experimento de invertir un tubo lleno de mercurio en una cuba conteniendo dicho metal, provocando lo que, en su época, se consideró el vacío.

Des Cartes también negó la posibilidad de existencia de los átomos:

---

[38] Es lo que modernamente distingue a un sistema físico y a su medio exterior y que le servirá para diferenciar los cambios que puede experimentar interiormente un cuerpo de las variaciones de su posición, respecto a otros cuerpos considerados inmóviles.

[39] " Principia ...", p. 42.

[40] Idem, p. 43.

También es muy fácilmente cognoscible que no existen átomos o partes de los cuerpos que sean indivisibles, ***tal y como algunos filósofos han imaginado****. Por muy pequeñas que supongamos que son tales partes, sin embargo, puesto que deben de ser extensas, concebimos que no debe existir entre ellas alguna que aún no pueda ser dividida dos o más número de veces en otras más pequeñas, de donde se sigue que es divisible Pues, a partir de que nosotros concebimos* ***clara y distintamente*** *que una cosa puede ser dividida, debemos* ***juzgar que*** *es divisible, puesto que, si juzgáramos acerca de ello de otra forma el juicio que de esta cosa haríamos, sería contrario al conocimiento que de ella tenemos. Y aunque supiéramos que Dios hubiera reducido una parte de la materia a una dimensión tan extrema que ya no pudiera ser dividida en otras partes más pequeñas, no podríamos concluir por ello que sería indivisible puesto que, aunque Dios hubiera reducido esta parte a una dimensión tal que ninguna criatura pudiera dividirla, no ha podido privarse a sí mismo de subdividirla, puesto que no le es posible reducir su omnipotencia, como va hemos hecho notar. Por ello diremos que la parte extensa más pequeña que pudiera ser en el mundo siempre puede ser dividida porque tal es en razón de su naturaleza*.[41]

Sus convicciones religiosas parecen haberlo llevado a adaptar sus razonamientos a la doctrina de la Iglesia, que negaba el atomismo. Las teorías atomistas afirmaban la existencia de átomos eternos e indivisibles y del vacío, con ello negaban la Creación, la ocurrencia del Juicio Final y la naturaleza inmaterial del alma.

Esa identidad entre materia y extensión, lo llevó a concluir que el mundo no tiene límites:

También sabemos que este mundo, es decir, la materia extensa que compone el universo, no tiene límites, puesto que, cualquiera que fuera la parte en la que deseemos fingir estos límites, aún podemos imaginar un más allá de los espacios indefinidamente extensos, que nosotros no sólo imaginamos, sino que concebimos ser en efecto tales como los imaginamos; de suerte que contienen ***un cuerpo*** *indefinidamente extenso, porque la idea de la extensión que nosotros concebimos en un espacio, cualquiera que sea, es la verdadera idea que debemos tener del* ***cuerpo***.[42]

Sobre la base de la misma concepción, la Tierra y los cielos están hechos de una misma materia y no pueden existir varios mundos:

"*...no es difícil inferir de todo esto que la Tierra y los cielos están formados de una misma materia y que, aunque existiera una infinidad de mundos, estarían hechos de esta misma materia. De ello se sigue que no pueden existir varios mundos, a causa de que concebimos manifiestamente que la materia, cuya naturaleza consiste sólo en que es una cosa extensa, ocupa ahora todos los espacios imaginables en que esos mundos podrían existir y , por otra parte, no podríamos descubrir en nosotros idea de alguna otra materia*.[43]

[41] " Principia ...", p. 44.
[42] "*Idem*", p. 44.
[43] "*Idem*", p. 45.

La idea de identificar materia con extensión, llevó a Des Cartes a suponer que hay un solo tipo de materia en el Universo y que las diferencias en las propiedades que percibimos se deben a las extensiones en que se presentan y a su estado de movimiento.

Des Cartes se ocupó también del movimiento de la materia. Partió de la idea común de que es "*la acción por la cual un cuerpo pasa de un lugar a otro lugar*", hizo hincapié en su carácter relativo, dando como ejemplo de una misma cosa en un mismo tiempo se mueve y no se mueve, a la persona que está sentada en la popa de un barco al que el viento impulsa y que cree moverse cuando solamente presta atención a la ribera de la que ha partido y pero que se considera inmóvil cuando considera su posición respecto del barco. Luego refina el concepto de *traslación* de una parte de la materia o de un cuerpo de la vecindad de los que contactan inmediatamente con él, y que se consideran en reposo, a la vecindad de otros. Para ello define *cuerpo* o *parte de la materia*, todo lo que es transportado a la vez, "aunque esté compuesto de partes diversas que *emplean su agitación para producir otros movimientos*"[44]. Aquí hizo una cuidadosa distinción entre la *traslación* y la acción o la fuerza que transporta para mostrar que el movimiento siempre está en el móvil y no en aquel que lo mueve. También puntualiza que la traslación en una *propiedad* del móvil y no de una sustancia, así como el reposo en una propiedad del objeto que está en reposo y no de nada que esté en su entorno que lo obligue a estar en reposo.

Des Cartes puntualizó que se requiere la misma acción para mover un cuerpo que para llevarlo al reposo, aunque fundamentó su aserción diciendo que el movimiento y el reposo sólo son dos modos diversos de un cuerpo[45]. También insistió que la causa de todo movimiento es Dios.

Luego, afirmó que todo movimiento es relativo, que la traslación no se produce desde la vecindad de cualquier clase de cuerpos, sino solamente desde la vecindad de aquellos cuerpos que se consideran en reposo y que eso se evidencia en el caso en el que dos cuerpos chocan y, como consecuencia del choque cada uno sufre un retroceso en su trayectoria. También explicitó que un mismo cuerpo puede sufrir varios tipos de movimiento, por ejemplo, translación y rotación simultáneas.

La sección 37 de la segunda parte, lleva por título: "*Primera ley de la naturaleza: que cada cosa persevera siempre en el estado de movimiento en que se encuentra mientras que nada modifique ese estado*."[46] De acuerdo con esta ley, "cada cosa en particular se mantiene en el mismo estado y sólo modifica ese estado por la acción de otras causas exteriores. Si está en reposo, no comenzará a moverse a menos que sea impelida por alguna causa. Y si se mueve, no hay mayor razón para pensar que en algún momento deje de moverse por sí sola y sin que nada la detenga. Por ello, se debe concluir que lo que se mueve, en cuanto a de sí depende, siempre se moverá"[47].

---

[44] " *Principia* ...", p. 46.

[45] "... quam duo diversi modi. " Principia ...", p. 47.

[46] Prima lex natura: quod unaqua que res quamtum in se est, semper in eodem statu perseveret; sicque quod semel movetur, semper moveri pergat. Idem, p. 54.

[47] Si quiescat non credimus illam unquam incepturam moveri, nisi ab aliqua causâ ad id impellatur; Nec ulla major ratio est si moveatur, cur putemus ipsam unquam suâ sponte, & à nullo alio impeditam, motum illum suum esse intermissuram. Atque idwò concludendum est id quod movetur, quantum in se est semper moveri. Idem., p. 54.

Aquí Des Cartes, hizo notar que al habitar en la Tierra, cuya constitución es tal que todos los movimientos que se producen cesan al poco tiempo, eso llevaría a pensar que todos los otros movimientos que se producen en el Universo tienden al reposo. Dado que los cuerpos celestes, al no detenerse nunca, cumplen con esa ley, la detención del movimiento sobre la Tierra se debe a causas que están ocultas al conocimiento humano. Como prueba de que el movimiento continúa luego que cesa la causa que lo produce, recurrió al ejemplo de arrojar una piedra con la mano, explicando que no existe otra razón para que la piedra continúe moviéndose luego de abandonar la mano que el cumplimiento de esa ley de la Naturaleza y que el movimiento continua hasta que es detenido por algún otro cuerpo. Así, la piedra propulsada con la mano va disminuyendo poco a poco su velocidad al encontrarse con la resistencia del aire.

En la Sección 39 de la Segunda parte, Des Cartes, expuso la Segunda ley de la Naturaleza según la cual todo cuerpo que se mueve tiende a continuar su movimiento en línea recta. Esta ley enunció como: "*cada parte de la materia, considerada separadamente, no tiende a continuar su movimiento trazando líneas curvas, sino según el modo de líneas rectas, aunque varias de sus partes sean frecuentemente obligadas a desviarse, porque encuentran otras en su camino y, como antes se ha dicho, en cualquier movimiento que efectúe círculos junto con la materia que es movida*"[48]. Así, por ejemplo, si un cuerpo atado a un cordel es obligado a efectuar un movimiento circular, al cesar la causa que le provoca tal movimiento se mueve en línea recta y que sólo se desvía cuando encuentra otros cuerpos en su camino.

Des Cartes, enunció también una tercera ley del movimiento, aplicable al choque elástico entre dos cuerpos en movimiento: "*Si un cuerpo que se mueve y que alcanza a otro cuerpo, tiene menos fuerza para continuar moviéndose en línea recta de la que este otro cuerpo tiene para resistir al primero, pierde la determinación de su movimiento sin perder nada de su movimiento; pero si tiene más fuerza, mueve a este otro cuerpo y pierde tanto movimiento como transmite al otro*"[49].

El ejemplo que da, es el de un cuerpo rígido lanzado sobre otro en reposo y “tan duro" que no le puede imprimir movimiento, por lo que rebota y retorna al punto de donde partió sin perder nada de su movimiento. En cambio, si el cuerpo con el que choca "es blando", entonces se detiene porque le transfiere todo su movimiento. Cuando Des Cartes escribió "pierde la determinación de su movimiento" se refería a perder la dirección del movimiento.

También estableció las reglas que rigen para los diversos tipos de choque elástico. La primera de esas reglas establece que si dos cuerpos son exactamente iguales y se mueven con igual velocidad pero en sentido contrario. Al producirse el choque (elástico) cada cuerpo retorna hacia el lado de donde hubiera procedido sin perder nada de su velocidad.

---

[48] namquamque partem materiæ seorsim spectatam, non tendere unquam, ut secundùm ullas lineas obliquas pergat moveri, sed tantum modo secundùm rectas; etsi multæ sæpe cogantur deflectere propter occursum aliarum, atque, u paulò antè dictum est. in quolibet motu fiat qudam modo circulus, ex omni materia simul motâ. Idem., p. 55.

[49] Ubi corpus quod movetur alteri occurrit, si minorem habeat vim ad pergendum secundúm lineam rectam, quàm hoc alterum ad ei resistendum, tunc deflectitur in aliam partem, & motum suum retinendo solam motûs. determinationem amittut, si verò habeat majorem, tunc alterum corpus secum movet, ac quantum ei dat de suo motu, tantundem perdit. Idem., p. 57.

La segunda regla que propuso afirma que, en el supuesto en que se produjera un choque elástico entre dos cuerpos B y C, que se mueven en sentido opuesto, siendo B más grande que C, al encontrarse con la misma velocidad, C retrocedería hacia en sentido opuesto al que traía.

La tercera regla dice que si esos dos cuerpos fueran de la misma "dimensión" pero B se desplazara a mayor velocidad que C, este último retrocedería y ambos se desplazarían hacia el nuevo sentido que este adquiere y B le transferiría la mitad del exceso de su velocidad respecto de C.

La cuarta regla contempla el caso en que C tenga una "dimensión" mayor que B, esté en reposo y no encuentre resistencia en el medio que lo rodea. En ese caso, cualquiera sea la velocidad con la que B choque con C, no lo pondría en movimiento y B se movería en sentido opuesto al que traía antes del choque.

La quinta regla dice que, en las mismas condiciones que en el caso anterior, pero si C tiene una "dimensión" menor que B, C iniciaría su movimiento en la misma dirección y sentido que B al tiempo que B reduciría su velocidad en la misma proporción a la que adquiere C. Así, ejemplifica que " *si las dimensiones de B doblaran a las de C, no le transferiría más que un tercio de su movimiento, pues tal tercio produciría un movimiento tan rápido en C como el que producirían los otros dos tercios en B*"[50].

La sexta regla establece que, en las mismas condiciones que en el caso anterior, pero si C tiene una "dimensión" igual a la de B, será impulsado por B, a la vez que B retrocedería. Si, por ejemplo B al chocar con C tuviese cuatro "grados de velocidad", le transferiría uno y retrocedería con tres "grados de velocidad”.

La redacción de la séptima regla es un poco confusa: " *si B y C se desplazan en una misma dirección y C precede a B, pero C se desplaza más lenta mente que B, de modo que finalmente sea alcanzado por B, puede suceder que B transfiera una parte de su velocidad a C, para impulsar lo delante de sí; y puede suceder también que B no le transfiera cantidad alguna de movimiento a C, sino que retome hacia el punto de donde procede con todo su movimiento. A saber, no sólo cuando C es más pequeño que B, uno también cuando es de mayores dimensiones con tal de que en lo que las dimensiones de C sobrepasen a las de B, sea menor que aquello en lo que la velocidad de B sobrepase a la de C, nunca B debe rebotar hacia el lado de donde procede, sino impulsar a C transfiriendo una parte de su velocidad. Y por el contrario, cuando aquello en lo que C sobrepasa la dimensión de B, es mayor que aquello en lo que la velocidad de B sobrepasa a la de C, es preciso que B retorne sin comunicar nada de su movimiento a C; finalmente, cuando el exceso de dimensión que hay en C es equivalente al exceso de velocidad que hay en B, éste debe transferir una parte de su movimiento al otro y rebotar con el resto.*"

En el texto, el mismo Des Cartes reconoce que la aplicación de estas reglas es bastante difícil ya que los cuerpos B y C, deben ser perfectamente "duros" (elásticos) y no interactuar con ninguno de los cuerpos que los rodean.

[50] " ... nempe si B essèt duplo majus quàm C, transferret ipsi tertiam partem sui motus, quia una illa tertia pars tam celeriter moveret corpus C."; "*Principia* ...", p. 60.

En sus *Principia* Des Cartes, distinguió entre "cuerpos duros", los que llamamos "sólidos rígidos" y líquidos, e hizo diversas especulaciones acerca de las partículas que los forman y del comportamiento de los "cuerpos duros" en el seno de un fluido.

Debe notarse que para la explicación de la Mecánica de los cuerpos, Des Cartes recurre a las variables *volumen* y *velocidad*. Medio siglo después Newton emplearía las variables *masa* y *fuerza*.

La Tercera Parte de "Los principios de la Filosofía" lleva por título "Sobre el mundo visible" y está dedicada a la descripción de algunos fenómenos de la Naturaleza donde trata de dar ciertas explicaciones a los mismos.

Luego de afirmar que Dios ha creado todo en beneficio del hombre y la función que cumplen los fenómenos en el desarrollo de la Filosofía, trató de establecer una relación entre las dimensiones de la Tierra, las del Sol, la Luna y las estrellas. Afirmó que "*mediante infalibles razonamientos, conoceremos, en primer lugar, que la distancia a la que la Luna se encuentra de la Tierra es equivalente a unos treinta diámetros de la Tierra y que el Sol se encuentra a una distancia equivalente a seiscientos o setecientos diámetros; asimismo, comparando estas distancias con el aparente diámetro del Sol y de la Luna, hallaremos que la Luna es más pequeña que la Tierra y que el Sol es mucho más grande que la Tierra*"[51]

Luego se ocupa de las distancias de los demás planetas al Sol, que están bastante en línea con los propuestos por Copérnico un siglo antes y las distancias a las estrellas fijas, a las que consideró tan alejadas que es indiferentes si su distancia a la Tierra es mayor o menor que su distancia a Saturno.

Afirmó que la Luna carece de luz propia sino que refleja la que recibe del Sol y, en lo que a la luz se refiere, la Tierra es parecida a los demás planetas del sistema solar. Explicitó que no todos los movimientos planetarios pueden ser explicados mediante la hipótesis de Ptolomeo y remarcó que las hipótesis de Copérnico y de Tycho no difieren en cuanto a sus hipótesis y, aunque no observó, grandes diferencias entre ellas, aceptó que la de Copérnico era más simple.

La materia del Sol, al igual que la materia de la llama, es muy móvil, pero no se desplaza de un lugar a otro. Pero, a diferencia de la llama, el Sol no tiene necesidad alguna de alimento.

Des Cartes también supuso que las estrellas no están ubicadas sobre una misma esfera y que las estrellas fijas están muy separadas entre sí. Creía que el cielo está formado por una materia líquida, "*pues de otro modo no cabría explicar los fenómenos relacionados con los planetas*"[52]. La Tierra y los planetas están flotando en ese cielo líquido y son arrastrados por él alrededor del Sol. La materia del cielo, en la que están ubicados los planetas, gira sin cesar trazando un círculo, tal como lo haría un torbellino (*vórtice*) que tuviera al Sol como su centro. Las partes de ese torbellino que están más próximas al Sol se mueven con mayor rapidez que las que están más alejadas. La Tierra y los demás

[51] Si bien, para la época, la estimación de la distancia entre la Tierra y la Luna puede considerarse correcta, la distancia entre la Tierra y el Sol es de unos 11740 diámetros terrestres.

[52] "*Principia*", p. 79.

planetas, "*permanecen siempre suspendidos entre las mismas partes de esta materia del cielo*"[53]. Pero más adelante escribió, "*...no debemos pensar que los centros de los planetas están todos exactamente en un mismo plano, ni que los círculos que describen son perfectamente redondos, sino que siempre falta algo para que sean exactos y que el tiempo aporta sin cesar cambios, tal y como apreciamos que se produce en todos los otros fenómenos de lo naturaleza*."[54] y "*Los planetas no se mantienen siempre a igual distancia de un mismo centro*"[55]

De la observación de las formas de los cuerpos celestes y de sus movimientos de rotación, Des Cartes sostuvo que, con el tiempo, todos los cuerpos del Universo fueron adquiriendo la forma esférica. Pero eso estaba en contradicción con su idea de la imposibilidad de la existencia del vacío, ya que por más compactadas que se encuentren las partículas esféricas en un sólido siempre habrá intersticios entre ellas. Por lo que recurrió al siguiente argumento: "*... las partes que se desprenden de los relieves de la materia, a medida que esta va adquiriendo forma esférica al rozar las unas contra las otras, son tan finas y adquieren una velocidad de dimensión tal que la impetuosidad de su movimiento puede dividirlas en partes innumerables que, **no teniendo grosor ni finura alguna determinada**, llenen fácilmente todos los pequeños ángulos y espacios a través de los cuales las otras partes de materia pudieran fluir.*"[56]

Para Des Cartes, la materia se presenta a la vista de tres maneras distintas: "*El mundo visible se presenta en tres formas distintas. La primera es la de esta raspadura que se ha separado de las otras partes de la materia cuando están en proceso de adquirir forma redonda, y que es movida con tanta velocidad que la fuerza de su agitación es suficiente para hacer que, al chocar con otros cuerpos, llenen siempre y con acoplamiento perfecto cuantos espacios se dan en torno de estos cuerpos. La otra forma es la que posee el resto de la materia, cuyas partes son muy redondas y muy pequeñas si las comparamos con los cuerpos que vemos sobre la Tierra, pero, sin embargo, estas partes poseen una determinada cantidad,* [*volumen*] *de modo que pueden subdividirse en otras mucho más pequeñas. Aun identificaremos una tercera forma en algunas partes de la materia: a saber, aquellas que a causa de su grosor y de sus figuras no pueden ser movidas con tanta facilidad como las precedentes. Intentaré mostrar que todos los cuerpos que conforman el mundo visible están impuestos de estas tres formas que se dan en la materia, tal y como si se tratara de tres elementos, a saber, el Sol y las Estrellas fijas poseen la forma propia del primero de estos elementos, los Cielos, la forma del segundo; la Tierra junto con los Planetas y los Cometas poseen la forma del tercero. Viendo que el Sol y las Estrellas fijas emiten luz, que los Cielos permiten su paso, que la Tierra, así como los Planetas y los cometas la rechazan y la reflejan, me parece que poseo alguna razón para servirme de estas tres diferencias: ser luminoso, ser transparente y ser opaco u oscuro; éstas son las principales diferencias que pueden referirse al sentido de la vista, con el fin de distinguir los tres elementos que integran este mundo visible.*"[57]

---

[53] "*Principia* ..." p. 79. Desde la época de Pitágoras se conocía que las posiciones relativas del los planetas son cambiantes.

[54] *Idem.*, p. 84.

[55] *Idem.*, p. 85.

[56] *Idem,*, p. 93.

[57] *Idem.*, p.94.

Distinguió tres cielos en el Universo (ver figura) El primero de estos cielos incluye toda la materia comprendida en el espacio AEI, que da lugar a un vórtice alrededor del Sol (S). Un segundo cielo formado por otros vórtices alrededor de los centros F y similares que rodean al Sol y un tercer cielo formado por toda la materia que está más allá de los dos primeros.

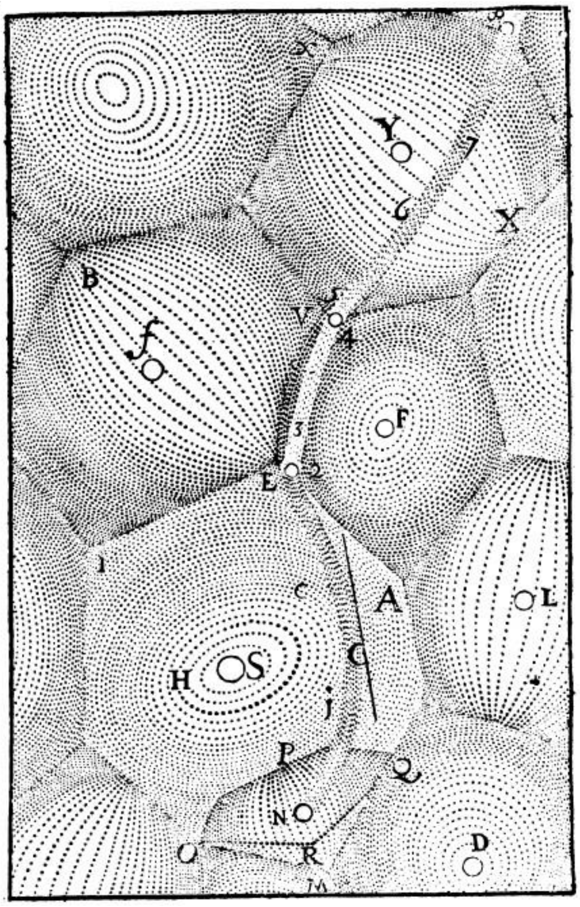


Figura 5.14. Los cielos de Des Cartes.

El tercer cielo es inmenso respecto al segundo y este es inmenso respecto del primero.

Des Cartes, también propuso una teoría acerca de que el Sol y las estrellas fijas se formaron mediante las partículas desprendidas en los múltiples rozamientos de la materia sólida en su proceso de rotación y adquisición de la forma esférica. El exceso de materia necesario para rellenar sus huecos comenzó a desplazarse hacia el centro S y los centros como el F o como los del tipo *f*, formando allí cuerpos "*muy sutiles y muy líquidos*" como el Sol en el centro S, las estrellas en los centros F y las estrellas fijas en los centros *f*. En su rotación alrededor de su centro, S fue expulsando partículas de materia "*puesto que las leyes de la Naturaleza son tales que todos los cuerpos que se mueven en círculo hacen continuamente presión para alejarse de los centros en torno a los cuales se mueven*"[58]

Al tratar el tema de los vórtices, Des Cartes entra en algunas contradicciones. Así, por ejemplo, en la Sección 65 afirma: "*Los Cielos están divididos en distintos vórtices y los polos de algunos de*

[58] "*Principia...*", p. 97.

estos vórtices tocan las partes más alejadas de los polos de los otros vórtices",[59] pero en la Sección 67 dice "*Los polos de dos vórtices no se pueden tocar*"[60]; y lo justifica diciendo que si se supone que existan dos vórtices que se tocan por sus polos, o bien girarían los dos hacia el mismo lado, o bien uno tomará su curso hacia un lado y el otro hacia el otro, lo cual impediría sus movimientos en forma extrema.

Si se tomara solamente en cuenta el vórtice alrededor del Sol, resultaría que los planetas deberían alejarse continuamente del centro de ese vórtice, por lo que Des Cartes hace jugar la influencia de los vórtices vecinos para contrarrestar la supuesta tendencia de los planetas a alejarse del centro de giro. Pero esto está en contradicción con la afirmación de que los vórtices no se contactan para no interferir en sus movimientos.

En las secciones siguientes de la tercera parte, Des Cartes teoriza sobre las irregularidades en el movimiento de Sol, la manera en que el Sol emite luz hacia los extremos de su vórtice, el porqué de las manchas solares, explicaciones del porqué, a veces el Sol parece más oscuro.

Des Cartes también se ocupa de las estrellas fijas, por qué, a veces, "desaparecen" y luego vuelven a aparecer, de cómo aparecen súbitamente nuevas estrellas en el cielo, cómo una estrella puede desaparecer poco a poco, cómo puede ser destruido un mismo vórtice, cómo una estrella fija puede devenir en planeta o cometa, como evoluciona una estrella fija al transformarse en una estrella común, como comienza a moverse un cometa y cómo continua su movimiento, qué fenómenos produce y cuáles son sus causas.

Des Cartes, también trató de explicar el porqué del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, su mayor velocidad de giro y porqué presenta siempre la misma cara, por qué la Tierra gira alrededor de su centro

La Parte Cuarta de los *Principia* está dedicada a las características del planeta Tierra

Aunque supone que la Tierra puede haber sido creada de una forma a la que él presenta, sostiene que todas las cosas que contiene son de la misma naturaleza que hubiesen sido generadas de acuerdo con su hipótesis. En su versión propone que la Tierra podría haber sido en otros tiempos un *astro* formado por materia totalmente pura del primer elemento y que *ocupaba el centro de uno de los catorce torbellinos que estaban contenidos en el espacio* y que él llamaba Cielo; que sólo difería del Sol en que era de menores dimensiones; que las partes menos sutiles de su materia , se fueron adhiriendo entre sí, reuniéndose sobre su superficie para dar lugar a la formación de nubes y *de otros cuerpos más oscuros y espesos* semejantes a las manchas que comúnmente se producen y se disipan sobre la superficie del Sol y que las partes resultantes de esa disipación tienen la forma del tercer

[59] *Cujusque vorticis cœlorum polos, tangere partes aliorun vorticum ab eorum polis remotas*. "*Principia* ...", p. 105.
[60] *Duorum vorticum polos se mutuò tangere non posse*. *idem.* p.108.

elemento resultando en una materia similar al aire actual. Ese aire se fue condensando en materia oscura que se fue depositando sobre la superficie terrestre hasta cubrirla totalmente.

La parte interior de la Tierra parece contener materia del primer elemento[61] que se va uniendo entre sí para formar el tercer elemento. Luego hay una capa que envuelve a ese núcleo, que está llena de un cuerpo opaco u oscuro, muy compacto y que son de la misma naturaleza que las manchas del Sol, aunque son mucho más tenues y están menos compactadas, aunque también impiden el paso de la luz.

Rodeando a las dos capas mencionadas, se encuentra la tercera región formada por partes grandes del tercer elemento, aunque no son tan sólidas como las del segundo. Posteriormente, sobre la capa superior se formaron cuerpos diversos. En la formación de esos cuerpos influyen, el estado de transparencia, el peso, — que hace tender a los cuerpos hacia el centro de la Tierra —, la luz, el calor — que penetra aún en los cuerpos que no son transparentes —, la dilatación y la condensación.

Su descripción acerca de cómo se han formado los cuerpos dista enormemente de tener algún fundamento científico. En cambio, su descripción acerca de las mareas provocadas por el movimiento lunar no está muy alejada de la realidad.

En la sección 133, explica que, además de los cuatro elementos aristotélicos, hay un quinto elemento: el imán. El imán es el elemento más abundante sobre la Tierra ya que toda su masa es un imán.

Las descripciones que hace Des Cartes de los fenómenos, son generalmente correctas, pero las interpretaciones suelen ser muy particulares. Así por ejemplo, la sección 171 se titula *Por qué el imán atrae al hierro*:

"La propiedad del imán más común y que ha sido destacada entre todas es la de atraer el hierro, o más bien, que el hierro y el imán naturalmente se aproximan el uno al otro cuando nada lo dificulta. Pues, hablando con propiedad no hay atracción alguna, sino que, tan pronto como el hierro se encuentra dentro de la esfera de acción del imán esta virtud le es comunicada y las partículas estriadas que circulan desde el imán hasta ese hierro, expulsan el aire que está entre los dos dando lugar por este medio a que se aproximen, tal como ha sido expuesto entre dos imanes en el art. 153. Incluso el hierro tiene más facilidad para desplazarse hacia el imán de la que tiene el imán para desplazarse hacia el hierro, a causa de que toda la materia del hierro tiene poros propios para recibir las partículas estriadas, mientras que el imán es más pesado a causa de la materia pétrea que posee en gran cantidad."

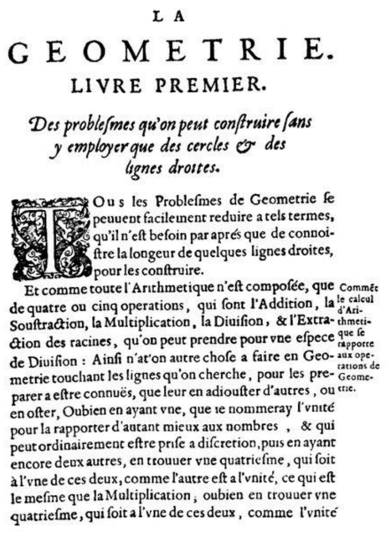
En la sección 200, hace suyas las ideas de Aristóteles acerca de la materia, diciendo: "Pero deseo también hacer constar que, aunque haya intentado dar razón de todas las cosas materiales, sin

[61] Más adelante, escribió que los tres elementos que considera los constituyentes de toda la materia y que están asociados al aire, al fuego y al agua, también están relacionados con la *tria prima*, sal azufre y mercurio, considerados por los alquimistas como constituyentes de todos los *metales* y por Paracelso y su seguidores, como constituyentes de toda la materia.

embargo no me he servido de principio alguno que no haya sido aceptado y *aprobado* por Aristóteles y por cuantos filósofos han existido"

En la sección 202 se manifiesta contrario al atomismo de Demócrito al escribir:

"También podría suceder que alguien afirmara que Demócrito ya había imaginado la existencia de pequeños cuerpos que poseían figuras diferentes, al igual que diferentes tamaños y movimientos, así como que todos los cuerpos están formados en virtud de su diferente combinación; asimismo, cabría recordar que su filosofía es rechazada. A ello respondo que nunca ha sido rechazada por persona alguna por que considerara cuerpos más pequeños que aquellos que son percibidos por los sentidos y a los que es preciso atribuir diversas figuras, tamaños y movimientos. No hay persona que pueda dudar de que en verdad existan tales cuerpos, tal como ya ha sido probado. Pero esa teoría ha sido rechazada, en primer lugar, a causa de que suponía que estos pequeños cuerpos eran indivisibles; esto también lo rechazo totalmente. Además, ha sido rechazada a causa de que defendía la existencia de vacío entre dos cuerpos y he demostrado que es imposible que exista vacío; además, a causa de que les atribuía peso, cuando nuestra teoría niega su existencia si se considera un cuerpo aislado, puesto que el peso es una cualidad que depende de la mutua relación que diversos cuerpos guardan entre sí. Finalmente, se tiene motivo para rechazar la doctrina de Demócrito a causa de que no explicaba cómo todas las cosas habían sido formadas en virtud del choque entre estos pequeños cuerpos, o bien, si explicaba el origen de algunos, las razones que ofrecía no dependían de un modo que hiciera ver que toda la naturaleza podía ser explicada en forma igual, esto cabe, al menos, afirmarlo de acuerdo con el conocimiento que tenemos a partir de la conservación de sus doctrinas que nos ha llegado."


LA

GEOMETRIE.

LIVRE PREMIER.

Des problesmes qu'on peut construire sans y employer que des cercles & des lignes droites.

TOus les Problesmes de Geometrie se peuuent facilement reduire a tels termes, qu'il n'est besoin par aprés que de connoistre la longeur de quelques lignes droites, pour les construire.

Et comme toute l'Arithmetique n'est composée, que de quatre ou cinq operations, qui sont l'Addition, la Soustraction, la Multiplication, la Diuision, & l'Extraction des racines, qu'on peut prendre pour vne espece de Diuision : Ainsi n'at'on autre chose a faire en Geometrie touchant les lignes qu'on cherche, pour les preparer a estre connuës, que leur en adiouster d'autres, ou en oster, Oubien en ayant vne, que ie nommeray l'vnité pour la rapporter d'autant mieux aux nombres, & qui peut ordinairement estre prise a discretion, puis en ayant encore deux autres, en trouuer vne quatriesme, qui soit à l'vne de ces deux, comme l'autre est a l'vnité, ce qui est le mesme que la Multiplication; oubien en trouuer vne quatriesme, qui soit a l'vne de ces deux, comme l'vnité

Commēt le calcul d'Arithmetique se rapporte aux operations de Geometrie.

Figura 5.15. *La géometrie.*

5 – 4.3.- La geometría.

Des Cartes se propuso resolver los problemas de la Geometría utilizando las herramientas del Álgebra. Él y Fermat, fueron los desarrollaron esta disciplina. Fermat mediante la carta dirigida al Padre Mersenne en 1629 y publicada en 1636 con el título *Ad locos planos et solidos isagoge* (sobre los lugares planos y sólidos) y Des Cartes, en 1637, con el título *La géometrie*, como apéndice del Discourse de la Méthode, conjuntamente con *La Dioptrique* y Les Météores.

La esencia de la Geometría plana es el establecimiento de una correspondencia entre los puntos de un plano y pares ordenados de números reales. En tal sistema, llamado *sistema de coordenadas* se puede establecer una asociación entre ecuaciones matemáticas de dos variables y curvas en el plano. De manera que cada curva del plano tiene asociada una ecuación $f(x,y) = 0$ y, recíprocamente, para cada ecuación matemática de dos variables queda definida una curva que determina un conjunto de puntos de ese plano. Así, para el conjunto de ecuaciones del tipo $ax + by + c = 0$, donde a, b y c son constantes, se establece una correspondencia para el conjunto de rectas en el plano.

Se puede interpretar que la Geometría analítica es una suerte de *diccionario* entre el Álgebra y la Geometría que asocia pares de números a puntos de un plano y ecuaciones matemáticas a curvas en un plano. Esta asociación va más allá de lo gramatical al vincular también la sintaxis del Álgebra con las de la Geometría. Esto permite resolver o probar un teorema de la geometría mediante las reglas del Álgebra.

Los geómetras griegos empleaban solamente líneas para establecer longitudes, ángulos y curvaturas de figuras geométricas estableciendo así un Álgebra geométrica para resolver sus problemas. François Viète (1540 – 1603), desarrolló su idea de usar el álgebra para la resolución de algunos problemas geométricos, que los publicó a partir de 1591. Bautizó a su método como *logística especiosa* que se desenvuelve en varias etapas. Primero anotando las magnitudes presentes y sus relaciones mediante símbolos (las conocidas mediante consonantes y las desconocidas mediante vocales). En una segunda etapa, trataba de vincular una magnitud desconocida mediante una ecuación que contuviese magnitudes conocidas, proceso al que llamó *porisma*. Finamente, empleando los resultados algebraicos obtenidos trataba de obtener las ecuaciones para otras magnitudes desconocidas. Así, una vez que encontró la resolución completa de las ecuaciones de segundo grado, resolvió la ecuación de tercer grado $x^3 + ax = b$, con a y b positivos, haciendo un cambio de variables[62] que la convirtieran en una ecuación de segundo grado.

Des Cartes, adoptó el método algebraico de Viète y lo complementó con el uso de coordenadas espaciales y con métodos algebraicos para resolver problemas geométricos. Su notación algebraica la desarrolló primero en las *Regulae ad directionem ingenii*, —tratado inconcluso que escribió alrededor de 1628,— y la amplió en *La géometrie*.

Descartes propuso que un segmento de recta podía considerarse tanto como una magnitud geométrica continua como una medida numérica, pero estableció que la potencia de un segmento seguía siendo un segmento, por lo que el cuadrado o el cubo de un segmento de recta no pasaban a ser magnitudes planas o espaciales sino el cuadrado o el cubo de un número. Por eso, las operaciones aritméticas con magnitudes geométricas quedaban incluidas en el campo estrictamente algebraico. Su trabajo consistió en aplicar una metodología de análisis y de síntesis para resolver los problemas que plantea la Geometría plana que partía de la suposición de que el problema tenía solución, nombrar a todos los segmentos que consideraba necesarios para representar los datos del problema, tanto los conocidos como los desconocidos, establecer que ecuación puede vincular a esos datos, resolverla algebraicamente y construir geométricamente la solución.

La géometrie está compuesta de tres libros que si bien están diferenciados están estrechamente vinculados. En la edición original su desarrollo ocupaba 120 páginas en las que había 48 figuras.

[62] $x=a/3X - X$; $Y = X^3$

El Libro Primero lleva por título: *Des problèmes qu'on peut construire sans y employer que des cercles et des lignes droites*.[63] En él se fija la metodología de trabajo, que está basada sobre el *Discourse de la Méthode* y comienza con la proposición: "Todos los problemas de Geometría pueden reducirse fácilmente a términos tales, que no es necesario conocer de antemano más que la longitud de algunas líneas rectas para construirlos. Y como toda la Aritmética está constituida por cuatro o cinco operaciones que son la adición, la sustracción, la multiplicación, la división y la extracción de raíces, que puede tomarse como una división, así no hay otra cosa que hacer en Geometría, en lo que respecta a las líneas, que tratar de prepararlas para ser conocidas, para añadirlas a otras, o para quitarlas; o bien, para tener una, que llamaré unidad, para expresarlas mejor como números la que, ordinariamente, se puede elegir a discreción y luego tomar dos líneas más, para encontrar una cuarta que sea a una de estas dos como la otra es a la unidad; lo que es lo mismo que la multiplicación; o para encontrar una cuarta línea que sea a una de estas dos como la unidad es a la otra, que es lo mismo que la división; o, finalmente, encontrar una o dos o varias que sean proporcionales entre la unidad y alguna otra línea, que es lo mismo que extraer la raíz cuadrada o cúbica, etc. Y no tendré miedo de introducir estos términos de aritmética en la geometría, para hacerla más inteligible".

Des Cartes propuso que las operaciones aritméticas elementales entre segmentos, como la multiplicación, producen siempre un nuevo segmento y no una superficie y expuso los procedimientos para construir geométricamente las operaciones de la Aritmética: omitió las construcciones de la suma y diferencia de segmentos y construyó la multiplicación, la división y la extracción de raíces cuadradas, sobre la base de introducir el concepto de segmento unidad. Mediante esta interpretación geométrico-algebraica de las operaciones aritméticas evadió la limitación pitagórica de la inconmensurabilidad regía en la Geometría griega, por la que era imposible asignar números a las figuras geométricas ante la posibilidad de obtener resultados inconmensurables. Además, solucionaba el problema de la homogeneidad dimensional, que desde Geometría griega, hacía que el producto de dos segmentos fuese un rectángulo, el producto de tres segmentos fuese un paralelepípedo y, por lo tanto, el producto de más de tres segmentos carecía de sentido.

Luego de desarrollar la construcción geométrica de las operaciones, el Libro Primero trata de "*Cómo se llega a las ecuaciones que permiten resolver los problemas*" y "*Cómo se resuelven*", analiza el problema de las tres o cuatro líneas de Apolonio de Pérgamo y soluciona el Problema de Pappus de Alejandría, mediante un tratamiento más general.

El Libro Segundo de La Geometría lleva por título "*De la naturaleza de las líneas curvas*" y se divide en cuatro partes:

* *La naturaleza geométrica de las líneas curvas*, vinculada sobre todo a dos cuestiones íntimamente ligadas: los compases cartesianos y la teoría de la proporción continua. Aquí el autor mantiene la división clásica griega de los problemas geométricos en planos, sólidos y lineales (que se resuelven con ecuaciones de segundo, tercer y cuarto o mayor grado, respectivamente) y demuestra que los problemas planos se pueden resolver mediante la construcción de rectas y circunferencia,

[63] De los problemas que se pueden construir sin emplear más que círculos y líneas rectas.

los problemas geométricos de los sólidos mediante el uso de secciones cónicas y el resto se resuelve mediante los que los griegos llamaban *curvas mecánicas*.

En esta parte, Descartes se propuso ordenar el estudio de las curvas analizadas por los geómetras griegos — que él consideraba que era un completo caos, — establece qué curvas son las que pueden admitirse en Geometría.

* *El Problema general de Pappus*, donde analiza las diversas formas en que se ha planteado dicho problema y la manera de encontrar una solución mediante la aplicación del método cartesiano.

* *La construcción y las propiedades de las tangentes y las normales a una curva geométrica*. Luego de definir claramente la naturaleza geométricas de las curvas, el libro muestra uno de los principios fundamentales del método cartesiano: "*para encontrar todas las propiedades de las líneas curvas basta con saber la relación que tienen todos sus puntos con los de las líneas rectas*", y muestra cómo se pueden utilizar las ecuaciones matemáticas de las curvas para expresar sus elementos geométricos más notables (centros, diámetros, ejes, etc.) y, especialmente las líneas normales a las curvas en distintos puntos, herramienta de gran importancia para la resolución de problemas de Óptica, especialmente, en lo referente a la reflexión de la luz sobre superficies curvas.

* *Los óvalos*, un conjunto de curvas especiales que responden a condiciones determinadas por las rectas tangentes o normales. Aquí se introducen cuatro familias de curvas, de las que las cónicas son casos particulares.

El Libro Tercero de La Geometría lleva por título "*De la construcción de los problemas que son sólidos o más que sólidos*". En este libro, se presenta un método de resolución general para ecuaciones algebraicas, aunque sólo se llega a la resolución geométrica de un determinado tipo de ecuaciones de quinto y sexto grado. Se demuestra que una ecuación puede tener tantas raíces como dimensiones tiene el grado, se expresa la *regla de los signos*, teorema que determina el número de raíces positivas y raíces negativas de un polinomio y adelanta el Teorema de Ruffini: si $x = a$ es una raíz de un polinomio $P(x)$, entonces $x - a$ es un factor. Se explica cómo manejar las variables para hacer una transformación afín que, a partir de un punto fijo, multiplique todas las distancias por un mismo factor, lo que permite hacer transformaciones en las ecuaciones que eliminen un determinado término o racionalizarlas.

En este libro, se introduce el criterio de divisibilidad sobre el término independiente de una ecuación polinómica para obtener raíces enteras, lo que permite reducir el grado de la ecuación.

Finalmente, Des Cartes planteó la cuestión de que en el caso de ecuaciones cuadráticas, las soluciones quedaban dadas por segmentos que se podían construir con regla y compás si el caso se podía extender a ecuaciones cúbicas y cuárticas. El problema lo resolvió mediante la intersección de una circunferencia y una parábola, elegidas convenientemente de acuerdo con la ecuación que se trata de resolver.

En nuestra opinión, Des Cartes fue un brillante geómetra cuyos méritos principales fueron el desarrollo de la Geometría Analítica y la enunciación del "principio de inercia" que, en términos modernos podría expresarse "Todo cuerpo permanece en su estado de reposo o movimiento rectilíneo y uniforme a menos que alguna fuerza modifique su estado", principio que muchos autores le adjudican a Isaac Newton y que éste físico lo adjudicó, erróneamente, a Galileo.

La filosofía de Des Cartes es esencialmente mecanicista según la cual todo aquello que no es alma o mente si experimenta algún tipo de cambio, ese cambio se puede expresar en términos de las leyes de la Mecánica, leyes que son inmutables en tanto que Dios, su creador, no las cambie.

Si bien sus convicciones lo llevaron a denostar muchas de las ideas de Aristóteles y las concepciones y métodos de la Escolástica, sus creencias religiosas lo llevaron a negar la existencia del vacío y la indivisibilidad de los átomos,[64] llegando a explicar el movimiento en un espacio lleno de materia como el resultado del empuje de una materia sobre otra (por supuesto, sin explicar cómo se originaba el movimiento inicial de la cadena de movimientos). Entendemos que el temor a una sanción de la Iglesia — la muerte de Giordano Bruno y las sanciones a Galileo estaban siempre presentes en sus pensamientos — lo llevaron a tratar muchos temas en los que sus opiniones pudieran contradecir a las Sagradas Escrituras como fábulas. A pesar de lo cuidados que fue, varios de sus escritos fueron incluidos en el *Index librorum prohibitorum*, entre ellos *Les passions de l'âme* publicado en 1644 y dedicado también a la Princesa Élisabeth de Bohemia, *Renati DesCartes Opera philosophica*, publicada por Elzevir en 1650, *Renati DesCartes Notœ in programma quoddam sub finem anni* 1647 *in Belgio editum cum hoc titulo: Explicatio mentis humanœ sive animœ rationalis*, publicado por Elzevir en 1648; *Epistola ad celeberrimum virum Gisbertum Voetium, in qua examinantur duo libri nuper pro Voetio Ultraiecti simul editi*, publicado por Elzevir en 1650; *Meditationes de prima philosophia, in quibus Dei existentia et animae humanae a corpore distinctio demonstratur*, publicado por Johannem Janssonium, el Joven, en 1658, *Epistola ad patrem Dinet societatis Iesu praepositum provincialem per Franciam*, escrita por Des Cartes en 1642; *Meditationes de prima philosophia, in quibus adiectae sunt in hac ultima editione utilissimae quaedam animadversiones ex variis doctissimisque authoribus collectae, cum authoris vita breviter ac concinne conscripta*, publicada por Michel Soly en 1641.

Figura 5.16. Blaise Pascal

5 – 5.- Blaise Pascal.

Pascal fue un matemático y físico que con el tiempo se fue dedicando a la Filosofía y a la Teología. En el campo de la Matemática hizo contribuciones importantes como el llamado *triángulo de Pascal* y al cálculo de probabilidades. En la Física, son de gran mérito sus trabajos sobre la presión atmosférica.

Nació el 19 de junio de 1623 y fue el segundo hijo de una familia noble en Clermont – Ferrand en la zona del Macizo Central francés. Su padre, Étienne Pascal, era un funcionario de alto rango en

[64] Si sólo hay átomos y vacío ¿cuál es la naturaleza del alma?.

oficina de recaudación de impuestos de la zona. Cuando tenía tres años, falleció su madre y a los ocho años, la familia se trasladó a París, donde el niño demostró una gran capacidad para el aprendizaje.

En 1640, Étienne Pascal fue nombrado Comisario Real y jefe de la recaudación de impuestos para Normandía, por lo que la familia se trasladó a Ruan. Dos años más tarde, Pascal inventó para su padre la *roue pascaline,*[65], considerada como una de las calculadoras más antiguas. Inicialmente solo permitía realizar adiciones, pero en el curso de los años siguientes le fue añadiendo mejoras, por lo que fue capaz de hacer restas.

En 1646, su padre tuvo un accidente y durante la convalecencia comenzó a adherir al jansenismo[66]. Sus hijos también adhirieron a esa doctrina religiosa y se convirtieron en fervientes creyentes de la misma. Pero la religión no fue un obstáculo para las investigaciones que Blaise haría en ciencias naturales. Al igual que la Iglesia, él adhería al concepto aristotélico de la inexistencia del vacío. El clásico experimento de Evangelista Torricelli de 1643, al demostrar la existencia del vacío, le provocó a Pascal un conflicto religioso. Su creencia en el *Horror vacui* se tuvo que enfrentar con la refutación empírica, por lo que repitió varias veces el experimento de Torricelli hasta convencerse de su validez. No conforme con ello, con la ayuda de su cuñado determinó la presión en la base del volcán Puy de Dôme cuya altura es de 974 metros. Luego su cuñado ascendió hasta la cima, y al repetir el experimento comprobó que la columna mercurial era 9,5 centímetros menor que en la base de la montaña que en su cima. Repitió el experimento en París, en la torre de Saint-Jacques. Los resultados no sólo confirmaron la hipótesis de que la presión atmosférica disminuye con la altura sino que el barómetro podía ser útil para estimar alturas. Sus experimentos sobre el vacío y los cambios en los fluidos por efectos de reducción de la presión fueron publicados en 1647 con el título *Traité sur le vide* (*Tratado sobre el vacío*). A partir de los resultados empíricos, comenzó la búsqueda de una relación matemática que permitiese estimar la dependencia cuantitativa entre la presión atmosférica y la altura de un lugar geográfico. El astrónomo inglés Edmund Halley encontró una primera aproximación. Afirmó que las presiones disminuyen en proporción geométrica respecto de la altura.

Figura 5. 17. Roue pascaline de 1652.

Los experimentos y las conclusiones de Pascal, le permitieron a Simon Stevin descubrir la *paradoja hidrostática*. Stevin encontró que la presión de los líquidos sobre el fondo de un recipiente en el que está contenido es independiente de la forma del mismo y crece en razón directa con la profundidad y que el peso de una columna líquida apoyada sobre el fondo del recipiente mide la presión. Pascal profundizó esta idea proponiendo que la transmisión de la presión en los líquidos en equilibrio podría utilizarse para multiplicar la intensidad de una fuerza. Al respecto escribió: "*Si un recipiente lleno de agua y ce-*

[65] "Rueda de Pascal" también conocida como "Pascalina".

[66] Una corriente del catolicismo promovida por el Obispo de Ypres, Cornelio Jansen (1585 – 1638) que sostenía una noción de gracia divina basada en San Agustín, similar a las ideas de Calvino.

rrado por completo tiene dos aberturas, en las que el tamaño de una es cien veces mayor que el de la otra, al colocar en cada una un émbolo bien ajustado, un hombre que hunda este émbolo igualaría la fuerza de cien hombres que empujaran al que es cien veces mayor y vencería a noventa y nueve" Sobre la base de estos conceptos, en 1795, el ingeniero inglés Joseph Bramah patentó la primera prensa hidráulica.

Antoine Gombaud, caballero de Méré, un filósofo y literato que jugaba compulsivamente, le pidió a su amigo Pascal que le resolviese el problema del reparto de las apuestas en el juego de los dados. Pascal le escribió a su amigo, el matemático Pierre de Fermat y ambos resolvieron el problema correctamente aunque por métodos diferentes. El acierto de ambos consistió en darse cuenta de que el reparto de las apuestas debe hacerse en función de la probabilidad de ganar que tuviese cada jugador en el momento en que el juego se interrumpe. Pascal continuó investigando el tema del cálculo de probabilidades y eso lo llevó a publicar en 1654 su *Traité du triangle arithmétique avec quelques autres petits traités sur la même matière*, una de las contribuciones más importantes a la teoría del cálculo combinatorio, donde desarrolla también el método para calcular los coeficientes del desarrollo del binomio $(a + b)^n$, cuya fórmula es conocida como *triángulo de Pascal*[67].

En 1659 publicó su *Traité des sinus des quarts de cercle*, obra que según Leibniz, al leerla le dio la idea de desarrollar el cálculo infinitesimal.

La vida de Pascal estuvo signada por conflictos religiosos, depresiones y problemas de salud. Falleció tempranamente en París, el 19 de agosto de 1662.


Figura 5.18. Robert Boyle

5 – 5.- Robert Boyle.

Robert Boyle fue uno de los principales exponentes de la filosofía experimental en los primeros años de la Royal Society. Mediante un conjunto ordenado y sistemático de datos experimentales, buscó reivindicar una visión mecanicista de la Naturaleza a expensas de teorías rivales, en particular la cosmovisión escolástica asociada con las ideas de Aristóteles. Boyle fue también uno de los principales apologistas de la nueva ciencia, exponiendo su racionalidad, desarrollando su justificación, puliendo sus implicaciones filosóficas y reflexionando en profundidad sobre las relaciones recíprocas entre ciencia y religión.

Boyle nació en el castillo de Lismore el 25 de enero de 1627. Fue el hijo menor de Richard Boyle, primer conde de Cork, — un "aventurero" que hizo su fortuna en Irlanda y que se convirtió en uno de los hombres más ricos y más influyentes del Reino Unido.

[67] Ese triángulo fue presentado por el matemático chino Chu Shih-Chieh en 1275, en un libro titulado "El precioso espejo de los cuatro elementos".

Boyle se crio en un ambiente aristocrático, fue educado en parte en el hogar y en parte en el Colegio Eton. Para completar su educación viajó a Francia, Italia y Suiza, donde recibió instrucción en distintas especialidades. En uno de los viajes al Continente sobrevino una tormenta impresionante que casi hace naufragar al barco, a raíz de la cual experimentó una conversión religiosa que guiaría su comportamiento personal y sus opiniones científicas. El profundo teísmo de Boyle no sólo influyó en su concepción de la filosofía natural, sino también en su vida personal, y los imperativos religiosos que dominaron su vida permiten entender las contradicciones entre sus concepciones teóricas y el resultado de muchos de sus experimentos.

Boyle regresó a Inglaterra en 1644, estableciéndose en una finca que le dejó su padre en Stalbridge, Dorset, donde pasó la mayor parte de la siguiente década.

Al contrario de lo que se podría esperar de sus publicaciones posteriores, sus esfuerzos no fueron inicialmente dedicados a la ciencia. Su primer proyecto (1645 – 6) fue su *Aretology*[68], un tratado un poco rebuscado sobre "elementos éticos" donde pretendió fijar los rudimentos de la moralidad como base para la búsqueda de la virtud. Posteriormente experimentó con otros géneros literarios, incluyendo reflexiones piadosos, vida imaginaria, discursos y cartas de presentación de recetas moralistas a destinatarios ficticios, entre las que se puede mencionar "*Some Motives and Incentives to the Love of God*" (1659) quizás, la exposición más precisa de los escritos moralistas y religiosos de Boyle.

En 1649, instaló un laboratorio en su castillo de Stalbridge y los experimentos que comenzó a realizar lo fascinaron de tal manera, que transformaron su carrera. Estos experimentos eran mayoritariamente químicos (y alquímicos), aunque también realizó una gran cantidad de observaciones biológicas utilizando un microscopio.

En esta época, sus ideas estaban influenciadas por autores del siglo XVI y principios del siglo XVII como Paracelso, Bernardino Telesio, Francis Bacon, Tommaso Campanella y Johann Baptiste van Helmont. En los escritos de esa época, Boyle expresó una cierta solidaridad con los "chymists" y expuso sus primeras ideas sobre el atomismo en su *Of the Atomicall Philosophy* (1652 – 54)[69]. En este trabajo tomó en gran parte las ideas atomistas de Daniel Sennert (1572 – 1637).

También escribió un breve ensayo referido a la Química, el que se considera el antecedente de su "Sceptical Chymist". En él se propuso educar a los "chymists" en la necesidad de un enfoque más filosófico para el estudio de la naturaleza.

[68] La Aretología es la parte de la filosofía moral que analiza la virtud (*areté*), su naturaleza y los medios para alcanzarla.

[69] En el manuscrito de este texto, Boyle agregó: "These Papers are without fayle to be burn't" *Works*, vol.13, pp. 225-35. Se supone que, por escribir ese trabajo, Boyle fue criticado como "ateista".

En esta etapa de su carrera, Boyle adhirió en buena parte a las ideas del reformador social Samuel Hartlib (1600 – 1662), quien influenciado por Francis Bacon y por Comenius[70] sostenía que la reforma educativa y la filosofía podrían conducir a mejorar la paz universal.

A fines de 1655, Boyle se trasladó a Oxford donde su actividad experimental se intensificó, y su perspectiva filosófica se fue actualizando al unirse al animado grupo de filósofos allí establecidos bajo los auspicios de John Wilkins (1614 – 1672) y que se conoce como *Invisible College*. Este grupo se considera como los precursores de la Royal Society[71], que sería fundada en 1660. La relación con estos filósofos causó un gran impacto en Boyle. Fue en este contexto que adhirió firmemente a la llamada "Nueva filosofía" o "filosofía experimental" y enfrentó seriamente los escritos de los grandes exponentes de la filosofía natural del Continente europeo, en particular, a Gassendi y Descartes, refinando y modernizando sus ideas al influjo de sus colegas del Invisible College. En el caso de Descartes, si bien Boyle conocía sus primeros escritos, afirmó que la persona que "le hizo comprender la filosofía de Des Cartes" fue Hooke. Robert Hooke (1635 – 1703) había comenzado a trabajar como empleado de Boyle en 1659 y lo ayudó en algunas de sus cruciales experimentos. Con la asistencia de Hooke ideó el dispositivo más famoso de sus aparatos del laboratorio, su "bomba de aire", una modificación de la bomba de vacío de Otto von Guericke, en la que reemplazó la palanca que accionaba el pistón por una cremallera movida por una rueda dentada. Con este aparato y un barómetro, Boyle fue capaz de llevar a cabo una serie de ensayos destinados a dilucidar el comportamiento del aire ante los cambios de presión. Descubrió que las atracciones eléctricas y magnéticas siguen ejerciéndose aun cuando la presión se reduce a valores mínimos, que a baja presión se puede hacer hervir el agua tibia o vaporizar el hielo sin que funda.

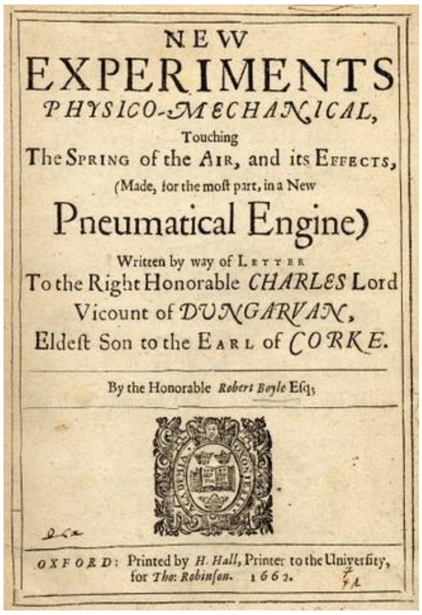

NEW
EXPERIMENTS
PHYSICO-MECHANICAL,
Touching
The SPRING of the AIR, and its EFFECTS,
(Made, for the most part, in a New
Pneumatical Engine)
Written by way of LETTER
To the Right Honorable CHARLES Lord
Vicount of DUNGARVAN,
Eldest Son to the EARL of CORKE.
By the Honorable Robert Boyle Esq;
OXFORD: Printed by H. Hall, Printer to the University,
for Tho: Robinson. 1660.

Figura 5.19. "*New Experiments...*"

Durante los años que pasó en Oxford, antes de mudarse a Londres, Boyle desarrolló innumerables experimentos sobre diversos aspectos de la Naturaleza, los que dieron lugar a muchas publicaciones. Entre ellas, cabe mencionar:

New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of Air and its Effects (1660), *Certain Physiological Essays* (1661), *The Sceptical Chymist* (1661), *Some Considerations touching the Usefulness of Experimental Natural Philosophy* (1663, 1671), *Experiments and Considerations touching Colours* (1664), *New Experiments and Observations touching Cold* (1665), *Hydrostatical Paradoxes* (1666) *y The Origin of Forms and Qualities* (1666).

[70] Jan Amos Komensky, (1592 – 1670) pensador checo quien propuso los fundamentos de un sistema de educación para todos los hombres y para todos los pueblos. Es considerado el "padre de la Pedagogía".
[71] De hecho, John Wilkins fue su primer Secretario.

A partir de 1664, muchos de sus trabajos fueron publicados en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society.

Inspirado en las ideas que Francis Bacon había expuesto en su *Novum Organum*, Boyle desarrolló un método empírico que fue tomado como modelo recomendado por la Royal Society para todos sus miembros. Boyle se encargó de hacer los arreglos y correcciones para que sus obras fuesen publicadas en latín, por lo que fueron conocidas, y algunas criticadas, en todos los centros científicos de Europa.

Incansable, Boyle desarrolló un extenso trabajo experimental hasta, prácticamente, el final de sus días. Quizás el más notable se publicó como *Experiments, Notes, &, about the Mechanical Origin or Production of Divers Particular Qualities* (1675) del cual extrajo conclusiones que volcó en *A Continuation of New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring and Weight of the Air, and their Effects*. *The Second Part* (1680), *en Experiments and Considerations about the Porosity of Bodies* (1684) y en *Experimenta & Observationes Physicæ* (1691).

Boyle también realizó experimentos vinculados con la Medicina y que fueron publicados como *Memoirs for the Natural History of Human Blood* (1684), *Of the Reconcileableness of Specifick Medicines to the Corpuscular Philosophy* (1685) y *Medicina Hydrostatica* (1690).

Entre los múltiples experimentos que realizó, encontró que los objetos negros expuestos a los rayos solares se calientan más rápidamente que los blancos y que con un espejo cóncavo se inflama más rápidamente un papel negro que uno blanco. Pero el experimento más famoso es el que le permitió descubrir la ley que lleva su nombre. Hizo fabricar un tubo de vidrio en forma de U de sección uniforme en que una rama era cerrada y más corta que la otra que era abierta. Al verter mercurio por esta rama, el líquido encerraba una masa de aire en la rama cerrada. Cuando el mercurio alcanzó el mismo nivel en ambas ramas, la presión del aire encerrado era igual a la presión atmosférica. Fue agregando pequeñas porciones de mercurio, lo que producía desniveles en ambas ramas. A partir de las diferencia de nivel, pudo estimar las presiones que iba adquiriendo el aire encerrado y a partir de las alturas de la columna de aire calculó los volúmenes que ese aire iba tomando. Dentro de los márgenes del error experimental encontró que había una proporcionalidad inversa entre la presión que soportaba el aire[72] y el volumen que ocupaba, lo que en términos matemáticos expresó $p.V = constante$. En la década de 1660 el único termómetro rudimentario era el termoscopio florentino inventado por Galileo[73], por lo que no tomó en cuenta la necesidad de que la temperatura permaneciera constante, algo que sí tomaría en cuenta Edmé Mariotte en sus experimentos de 1676 – 1679. Por esto, cronológicamente corresponde llamar a la generalización: Ley de Boyle, pero por el establecimiento de la condición isotérmica, se la debe llamar Ley de Boyle-Mariotte.

En los últimos 20 años de su vida, publicó varios ensayos filosóficos y teológicos. Entre ellos pueden mencionarse, *Excellency of Theology, Compar'd with Natural Philosophy* (1674), al cual le agregó un pequeño ensayo sobre el mecanicismo "*Considerations About the Excellency and*

[72] En sus experimentos, las presiones que soportaba el aire eran lo suficientemente moderadas como para que no pudiese detectarse empíricamente el leve apartamiento de lo que hoy llamamos *comportamiento ideal*.

[73] El termómetro de mercurio fue inventado por Gabriel Fahrenheit recién en 1714.

Grounds of the Mechanical Hypothesis"; "*Free Enquiry into the Vulgarly Receiv'd Notion of Nature*" (1686). En esta obra expresa sus reflexiones maduras sobre temas teológicos y filosóficos. En su testamento dejó un legado para que se pronuncien conferencias pías contra el ateísmo y para propagar el cristianismo. La primera serie de ellas fue desarrollada por el obispo Richard Bentley en 1692.

Boyle fue un extraordinario experimentador. Imbuido en las ideas de Francis Bacon, expuso sus ideas de cómo desarrollar el método inductivo. En su "*Certain Physiological Essays*" (1661) incluyó varios ensayos en los que presentó su opinión sobre el trabajo experimental resaltando la importancia que debe tener para el experimentador los resultados no exitosos de su tarea. También ilustró la manera en que los resultados de tales ensayos pueden utilizarse para proveer un fundamento científico de su versión de la filosofía mecánica, a la cual bautizó "*corpuscularismo*". Pero ese corpuscularismo no implicaba de manera alguna su aceptación de la existencia de los átomos.

Bibliografía

Adam, Ch., Tannery, P., (Editores), (**1908**): *Œuvres de Descartes,* Léopold Cerf, Imprimeur-Éditour, Paris.

Boido, G., (**1998**): *Noticias del planeta tierra : Galileo Galilei y la revolución científica*, Editorial A-Z, Buenos Aires.

Fermi, L., Bernardini, G., (**1961**): *Galileo and the Scientific Revolution*, Basic books, New York.

Figuier, L., (**1869**): *Vies des savants illustres du dix-septième siècle*, Lacroix, Verboeckhoven & Co. Éditeurs, Paris.

Galilei, G., (**1945**): *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Editorial Losada, Madrid.

Galilei, G., (**2010**): *Diálogos sobre los sistemas del Mundo,* Editorial Maxtor, Valladolid.

Hunter, M., (**2015**): *Boyle Studies. Aspects of the Life and Thought of Robert Boyle,* Ashgate Pub. Co. Surrey.

Koyré, A., (**1980**): *Estudios galileanos*, Siglo XXI Editores, Madrid.

Pascal, B., (**2012**). Alicia Villar, editora: *Obra completa*, Editorial Gredos, Madrid

Pascal, B., (**2014**): *Œuvres Complètes, - annotée et en français moderne* , Arvensa Editions, Saint Julien en Genevois.

Rivington, F, y otros. (**1772**): *The Works of the Honourable Robert Boyle in Six Volumes.* London.

Seeger, R. J., (**1966**): *Galileo Galilei, His Life and his Works*, Pergamon Press Ltd., Oxford.

Torricelli, E., (1919): *Opere di Evangelista Torricelli*, University of Michigan Library, Ann Arbor.

VI. LA CIENCIA EN EL SIGLO XVII. Segunda parte.

6 – 1.- Christiaan Huygens.

Figura 6.1. Christiaaan Huygens

Nació el 14 de abril de 1629 en el seno de una familia acomodada. Su padre Constantyn, era diplomático y pagó los mejores instructores privados en Filosofía natural y Matemática para darle la mejor educación. En 1645 inició sus estudios en la Universidad de Leyden y en 1647 ingresó al Colegio de Orange de Breda donde completó una excelente formación en Matemáticas. Completados sus estudios universitarios, siguió los pasos de su padre iniciando la carrera diplomático, lo que lo llevó a viajar a Dinamarca, Francia e Italia.

En su juventud, sus ideas estuvieron muy influenciadas por las de René Des Cartes, quien era amigo del padre de Christiaan.

Desde muy joven comenzó a experimentar con distintos tipos de lentes y a construir sus propios telescopios.

En 1656, sobre la base de los experimentos de Galileo, diseñó su primer reloj de péndulo cuya oscilación describiera una cicloide y encargó su construcción a Salomon Coster[1] alcanzando una precisión de 10 segundos por día.

En 1660, se instaló en Paris, donde se relacionó con varios científicos, entre ellos Blaise Pascal. Su estancia en París duro apenas un año porque enterado de los progresos científicos que se estaban produciendo en Inglaterra viajó a Londres y en 1662, al crearse la Royal Society presentó ante ella sus innovaciones y mejoras en los telescopios, a la vez que trabó amistad con Robert Boyle, el primer Secretario de esa sociedad científica y con Robert Hooke, que fue nombrado Curador de la misma. Por la jerarquía de sus trabajos sobre Óptica y por las innovaciones que introdujo en la construcción del telescopio, en 1663 fue propuesto y electo *Fellow* de la Royal Society.

A través del intercambio epistolar con el Padre Mersenne, su obra se fue conociendo en Europa y en 1666 Jean – Baptiste Colbert, Ministro de Finanzas de Luis XIV lo invitó a ser miembro fun-

---

[1] Salomon Coster (1622 – 1659), natural de Haarlem, se estableció en Hague dedicándose a la relojería. Huygens le dio la patente de su reloj por 21 años. Los que fabricó llevaban grabado “Samuel Coster Haghe privilegio 1657”.

dador de la Académie des Sciences. Huygens aceptó y se radicó en París. Allí se vinculó con los principales referentes de la ciencia de esa época y tuvo como discípulo a Leibniz. En 1681 abandonó Paris para viajar a Leyden donde desarrolló una intensa actividad científica y docente. En 1689 se radicó en Londres donde conoció a Newton y con quien mantuvo varias discusiones científicas, entre ellas la vinculada a la naturaleza de la luz, que él consideraba ondulatoria mientras que Newton sostenía que era de naturaleza corpuscular.

Consciente del agravamiento de su salud, decidió regresar a Holanda, donde falleció el 8 de julio de 1696

Huygens hizo aportes significativos al desarrollo de la Matemática y de la Mecánica. Ya a los 16 años, redactó unos 15 trabajos sobre Álgebra y Geometría, entre los que se destacan *Regulae pro Æquationibus quadratis*. *In dato triangulo Circulum inscribere*. *In dato triangulo inscribere triangulum aequilaterum ut unum latus parallelum fit uni lateri trianguli dati*.

A esa edad, también escribió sobre Mecánica, en particular amplió algunos conceptos sobre las ideas de Torricelli sobre centro de gravedad de cuerpos suspendidos y palancas

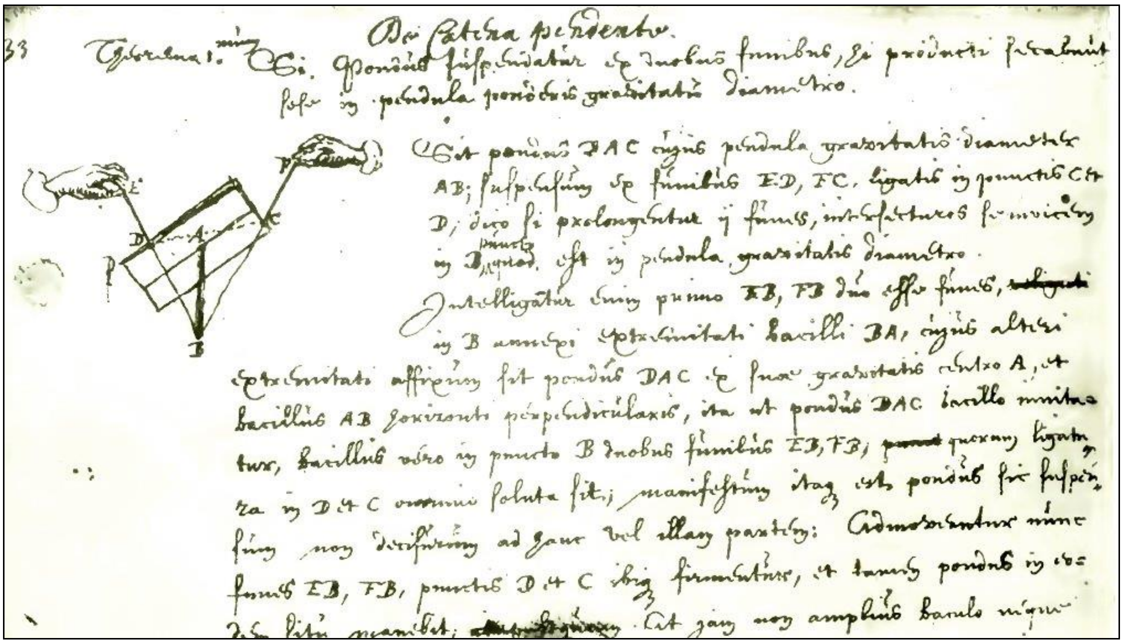


Figura 6.2. Manuscrito de Huygens sobre el teorema *De catena pendente.* (1646)

En 1650, escribió “*De iis quœ liquido supernatant*” donde presentó diversos teoremas para hallar los centros de gravedad de cuerpos flotantes de diversas formas.

En enero de 1652, comenzó a ocuparse de los problemas de los sólidos cuyas resoluciones requerían ecuaciones de tercer y cuarto grado. En punto de partida de estos problemas, como de tantos otros, se originó en Arquímedes, como cortar una esfera con un plano en una proporción dada. En su obra “sobre la esfera y el cilindro”, Arquímedes no había encontrado la solución general, solamente había reducido el problema al caso más simple. Eudocio, en su *Comentarios sobre Arquímedes*, dijo que existían tres soluciones diferentes, pero ellas exigían la determinación de la intersección de una hipérbola con una elipse o con una parábola. Des Cartes, en su “*Géométrie*” había mostrado que se podía reducir el problema del sólido a encontrar la intersección de una parábola con un círculo. Eso fue lo que Huygens resolvió. Ese mismo mes, encontró una segunda solución que fue la que publicó dos años más tarde en "*lllustrium quorundam problematum constructiones*". También desarrolló las ecuaciones de cuarto grado para encontrar los puntos de intersección de una recta con una concoide.

En 1652, desarrolló su "*Theoremata de Quadratura hyperboles, ellipsis et circuli ex dato portionum gravitatis ccntro*" donde estableció las formas de encontrar el centro de gravedad de diversas figuras geométricas y de sólidos de revolución.

Influenciado por su gran admiración a Des Cartes, publicó "*De Motu Corpore ex Percusione*" (1656) donde tomó como "primera hipótesis" el Principio de inercia de Des Cartes,[2] y, como segunda, la existencia de sólidos perfectamente rígidos. A partir de estas hipótesis analizó toda la mecánica de movimientos en los choques elásticos.

Huygens fue uno de los pioneros en el estudio de la Probabilidad, tema sobre el que, en 1657, publicó el libro *De ratiociniis in ludo aleœ* (Sobre los Cálculos en los Juegos de Azar). En él introdujo algunos conceptos importantes en este campo, como la esperanza matemática, y resolvió algunos de los problemas propuestos por Pascal, Fermat y De Méré.

También hizo una gran contribución a la Óptica. Su interés por este tema comenzó cuando era estudiante en la Universidad de Leiden y la construcción de sus telescopios lo llevó a elaborar su concepción sobre la naturaleza de la luz y los fenómenos de refracción y reflexión. Sus investigaciones lo llevaron a completar, en diciembre de 1653, el primer manuscrito de lo que sería su "*Tractatus de refractione et telescopiis*", dividido en tres libros: "*De refractione planarum et sphœricarum et lentium*", "*De apparenti augmento vel decremento eorum, quœ per rcfractionem conspiciuntur*" y "*De telescopiis*". Los contenidos de este tratado los fue modificando en muchísimas oportunidades hasta 1691.

En 1677, encontró la explicación a la doble refracción del espato de Islandia que fue una confirmación de su teoría acerca de la naturaleza de la luz, por lo que se decidió a publicar un tratado que contuviera la teoría ondulatoria de la luz con sus aplicaciones principales pero sin entrar en detalles de la construcción de instrumentos de Óptica. Este fue el origen de su "*Traité de la lumière*" de 1690, que recoge varios trabajos sobre el tema presentados ante la *Académie des Sciences* a partir de 1678.

En el *Traité de la lumière*, propuso que la luz es producida por un cierto movimiento y que al ser captada por el ser humano no pasa sustancia alguna del objeto luminoso a los ojos. Su concepción sobre la naturaleza ondulatoria era que la luz se propaga mediante ondas esféricas "tal como lo hace el sonido" Esa propagación no es instantánea sino que lleva un cierto tiempo, es más rápida que la del sonido y depende de la naturaleza del medio que atraviesa.

[2] Lo expresa: "Un cuerpo cualquiera, una vez en movimiento, si nada se le opone continua en movimiento perpetuo con la misma velocidad y en línea recta"

Para Huygens, la propagación de la luz en un medio dado ocurre siguiendo una trayectoria rectilínea y que los rayos que se mueven en diferentes direcciones pueden cruzarse sin interferir entre ellos. Demostró que al reflejarse sobre una superficie, los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales y que el rayo incidente y el reflejado están sobre un mismo plano sin que, necesariamente, la superficie sobre la cual incide la luz sea perfectamente plana.

Quizás como un resabio de la concepción aristotélica, Huygens creía que el Universo estaba impregnado de un material etéreo[3] que sirve de soporte para la propagación de la luz. Por eso, al ocuparse de la refracción, consideró que la transparencia de un objeto es independiente del hecho que la luz incida sobre él o no, sino que se debe a que, aún en muchos sólidos, entre sus partículas hay intersticios ocupados con material etéreo que es el que actúa como soporte para el pasaje de la luz. Para explicar la opacidad, supuso que las partículas de esos materiales están compuestos de partículas más pequeñas que interactúan con las del material etéreo las que le imprimen movimiento, formándose así una especie de niebla que desvía de tal manera los rayos de luz que no pueden atravesar el cuerpo. Cuando se pule la superficie de algún cuerpo opaco, como los de un metal, la dispersión de las partículas etéreas entre las del cuerpo opaco, hacen que la superficie se vuelva completamente reflectante.

El Capítulo V de su libro está exclusivamente dedicado a "*La extraña refracción del espato de Islandia*". Allí supuso que las partículas del cristal son pequeñas y de tal naturaleza que pueden interactuar con los rayos de luz provocando que algunos rayos de desvíen alterando la dirección de su movimiento mientras que los rayos que no interactúan se mueven soportados por en material etéreo intersticial, de lo que resulta la birrefringencia. También describió la birrefringencia en otros cristales, en superficies curvas y el fenómeno del ángulo límite.

El Capítulo VI del tratado versa sobre las formas de los cuerpos transparentes que sirven para la refracción y la reflexión. Allí describió los trabajos de Des Cartes sobre la refracción de la luz al incidir sobre distintas superficies.

En 1673, publicó su libro *Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricæ* — más conocida como "*Horologium oscillatorium*" —, obra dividida en cinco partes, en la que la primera está dedicada a analizar los diseños de los relojes de péndulo y las restantes están dedicadas al análisis de los distintos movimientos que pueden efectuar los cuerpos, pendulares o siguiendo otras curvas. Sostuvo que los movimientos de los cuerpos obedecen al principio de inercia — en lo esencial, a lo que estableció Des Cartes — y el principio de la composición de los movimientos. En ese libro mostró la expresión correcta de la fuerza centrífuga

[3] En su *Tratado sobre la luz*, afirma: Cuando la luz pasa a través de una esfera de vidrio vacía, cerrada por todos lados, es cierto que está llena de materia etérea, tanto como los espacios fuera de la esfera. Y esta materia etérea, como se ha mostrado anteriormente, consiste en partículas que se tocan unas a otras. Si estuvieran encerradas en una esfera de tal modo que no pudiesen salir a través de los poros del vidrio, estarán obligadas a seguir el movimiento de la esfera cuando uno la cambia de lugar y, cuando se mueve en un plano horizontal, requerirían casi la misma fuerza para imprimirle la velocidad a la esfera que si esta estuviera llena de agua, o quizás de mercurio debido a que cada cuerpo resiste a la velocidad que uno le quiere imponer en proporción a la cantidad de materia que contiene que la obliga a seguir ese movimiento (p. 30).

en un movimiento circular, la teoría del centro de oscilación, el principio de la conservación de las fuerzas vivas, que puede considerarse un antecedente del principio de la conservación de la energía. En ese libro analiza la teoría de las colisiones elásticas entre partículas, corrigiendo algunas ideas erróneas de Descartes, y el funcionamiento del péndulo simple y del péndulo cónico.

Entre 1655 y 1690, Huygens realizó un gran número de observaciones astronómicas, gran parte de las cuales fueron recopiladas en el Tomo XV de sus *Œuvres Complétes* (Swets & Zeitlinger N.V., 1967, Amsterdam).

6 – 2.- Robert Hooke.

Figura 6.3. Imagen de Robert Hooke, creada por Rita Geer (2004) sobre la base de la información bibliogáfica.

Según el calendario juliano, Robert Hooke nació el 18 de julio de 1635, en Freshwater, Isla de Wight donde su padre, John Hooke, era coadjutor de la iglesia All Saints y su madre se llamó Cecyl Gyles.

Los pocos detalles de su infancia que se conocen, son los que él mismo mencionó siendo adulto. Por él sabemos que su niñez se caracterizó por una salud muy debilitada, al punto que sus padres no creían que iba a vivir mucho y sólo se ocuparon de darle una instrucción elemental.

Robert fue desarrollando una observación crítica de la realidad, detectando los caracteres distintivos de los objetos de la naturaleza presentes en su isla natal, las plantas, los animales, las rocas, las playas, acantilados, etc., a la vez que fue adquiriendo una notable habilidad manual mediante la cual pudo construirse un reloj que funcionaba perfectamente o hacer reproducciones en madera de diversos objetos incluyendo una reproducción a escala de un barco de guerra con todos sus detalles y armamento. Cuando tenía diez años, su padre enfermó gravemente y eso contribuyó a que Robert tuviese que educarse completamente solo. Él descubrió que tenía una gran habilidad para el dibujo y comenzó a frecuentar a un pintor, John Hoskyns, que vivía de pintar retratos que le encargaban personas de la isla. De Hoskyns aprendió la técnica del retrato y comenzó a ganarse la vida haciendo reproducciones de los cuadros del pintor. En 1648, falleció su padre y la madre decidió que el dibujo y la pintura podría ser una ocupación que le permitiría ganarse la vida y con la herencia del padre, 40 libras, podía pagarse el aprendizaje de esa actividad. De modo que viajó a Londres a ingresar como aprendiz en el estudio de Peter Lely, un pintor retratista. Lely se había instalado en Londres en 1643, luego de haber aprendido dibujo, pintura y escultura en Haarlem (Holanda) y poco a poco fue ganando fama como pintor al haber hecho retratos del Rey, Charles I y de James el Duque de York. Lely seguía las técnicas de Anton van Dyck, un pintor retratista flamenco considerado uno de los mejores de su época y Robert Hooke, aprendió bastante de ese oficio. Sin embargo, pronto tomó conciencia que él necesitaba una educación general, por lo que decidió abandonar el aprendizaje y usar algo del dinero de su herencia para ingresar al Westminster School, una de las tradicionales escuelas londinenses. Allí su educación estuvo a cargo de Richard Busby, un excelente docente que pronto se dio cuenta de las habilidades prácticas e intelectuales de su alumno cuando este, en una semana, había aprendido los primeros seis libros de los *Elementos* de Euclides. Con muy buen criterio, Busby decidió que en vez de cursar con los otros alumnos, Hooke estudiase solo, en la biblioteca.

En el Westminster School, Hooke estudió latín y griego, idiomas que llegó a dominar bien. Se interesó mucho en Geometría pero pronto descubrió que su máximo interés radicaba en la Mecánica, al punto que intentó emplear lo que aprendía de esta ciencia para diseñar máquinas capaces de volar. También se interesó en la música y aprendió a tocar el órgano.

En 1653, consideró que ya había asimilado el máximo del conocimiento que el Westminster School podía darle, por lo que fue a Oxford ingresando al Christ College. Su estancia en Oxford, coincidió con el período donde Thomas Willis, Seth Ward, Robert Boyle, Christopher Wren, John Wallis, John Wilkins y William Petty se encontraban regularmente como la "rama Oxford" del "Invisible College" — un grupo de científicos antiaristotélicos y partidarios de las ciencias experimentales — que establecieron las bases de lo que en la década siguiente sería la Royal Society of London.

En Oxford tomó un curso de Astronomía con Seth Ward y uno de Mecánica con John Wilkins, quien quedó tan impresionado con los conocimientos que Hooke tenía sobre ese tema, que le regaló su libro *Mathematical Magick, or the wonders that may be performed by mechanical geometry* que había publicado en 1648. Su lectura entusiasmó a Hooke al punto que comenzó a experimentar con poleas en los sótanos del Wadham College y siguió diseñando máquinas voladoras. De cuando en cuando, oficiaba de ayudante de Wilkins en sus clases.

Robert Hooke no completó su Bachelor en la Universidad de Oxford. Robert Boyle estaba buscando un ayudante para el laboratorio de su castillo de Stalbridge y Wilkins le recomendó a Hooke. Éste comenzó a trabajar como asistente de Boyle en 1655. Su primer proyecto fue una bomba de vació que mejorase la fabricada por Ralph Greatorex para Otto von Guericke en 1650. Sumando intuición y conocimientos mecánicos, Hooke pudo diseñar y producir una bomba de vació superior a la de von Guericke y sus ideas constituyen la base de las bombas de vacío modernas. Con esa bomba, Boyle, asistido por Hooke pudo hacer un conjunto de 43 experimentos que volcó en el libro *New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of the Air and its Effects*, publicado en 1660, el que contiene su famosa ley de la compresibilidad.

Al mismo tiempo en que estaba construyendo la bomba de vacío, Hooke estaba analizando la construcción de un reloj que pudiese ser utilizado en una nave. Los relojes de péndulo que había en esa época no eran muy útiles al ser embarcado debido a los movimientos de vaivén que experimentaba la nave sobre la cual estaban colocados. Así se le ocurrió reemplazar la oscilación gravitatoria del péndulo por muelles. En 1658, empezó a llevar a la práctica su idea. De esta manera, construyó un reloj con un muelle en espiral que impulsaba las manecillas y un sistema de escape del tipo áncora. Esta idea fue la base del funcionamiento de los relojes de bolsillo que comenzaron a fabricarse en la década de 1670[4]. Al mismo tiempo que perfeccionaba su reloj, elaboró la idea de que en un movimiento oscilatorio armónico debe haber una fuerza "recuperadora " que tiende a llevar esa fuerza a un estado de equilibrio y que esa fuerza debe ser proporcional a la elongación. Sin embargo, recién dio a conocer el trabajo "*On Spring*", que contiene su famosa ley, en 1678.

Una parte del Invisible College se reunía en Oxford y otra parte en el Gresham College de Londres. En 1658, falleció el Lord Protector Oliver Cromwell y le sucedió su hijo Richard, quien no contaba con mucho apoyo del Parlamento. Richard fue derrocado por un golpe militar que restauró la monarquía. El nuevo monarca, Charles II se mostró más abierto al diálogo y a la tolerancia civil y religiosa y eso contribuyó a que los integrantes del Invisible College que hasta entonces se encontraban de manera informal se reunieran en el Gresham College y el 28 de noviembre de 1660 constituyeran la *Society foro the Prometan of Physical-Mathematical Experimental Liaoning* dedicada a promover las ciencias experimentales.

El 10 de abril de 1661, Hooke leyó ante la Society un trabajo sobre la acción capilar, en donde mostraba que cuanto más estrecho es un tubo sumergido en una masa de agua, tanto más alto es el nivel del agua en su interior respecto del nivel en el agua que rodea al tubo.

La Society le había pedido a Charles II, reconocimiento y apoyo y el 15 de julio de 1662 un Decreto Real la transformó en la *Royal Society of London for Improving Natural Knowledge*. La Royal Society tiene como lema "*Nullius in verba*" una manera de remarcar su espíritu empirista y su oposición a la escolástica. Como tal, estaba en su estatuto la creación de un puesto de *Curator of Experiments*, que sería el encargado de comprobar que los experimentos detallados en las memorias que enviasen los *fellows* fueran reales. La Society nombró a Robert Hooke para ese cargo, algo que, si bien, era un gran honor, implicaba tener que reproducir tres o cuatro experimentos para cada sesión y, además, sin percibir emolumentos hasta que el Rey asignase una partida de dinero para ello. No obstante, en noviembre de 1662, Hooke se hizo cargo del puesto y ya el 3 de diciembre de 1662 leyó ante la Royal Society su primer trabajo: *Experiment on weighin Air*. En los siguientes 15 años realizó una tarea experimental extraordinaria, tanto en la evaluación de los experimentos enviados — para los que, muchas veces, sugería mejoras — como presentando centenares de trabajos propios. El 3 de junio de 1663, fue elegido *Fellow* de la Society, pero como todavía no recibía ningún pago como Curator, la Society lo exceptuó de pagar las cuotas anuales como Fellow.

En 1665, Hooke fue nombrado Profesor de Geometría en el Gresham College. La posición le permitía alojarse en el College y le requería, al menos, una *lecture*, por semana durante el período de clases. La misma debería ser dictada en latín con una traducción posterior al inglés. Entre otros requisitos, se le exigió permanecer soltero, aunque podía tener un ama de llaves.

[4] Christopher Wren, Robert Moray y William Brouncker lo apoyaron para que él patentase el invento de un reloj a resorte, con lo que podría haber amasado una fortuna. Sin embargo, cuando se enteró que cualquiera podía modificar su invento y mejorarlo, decidió no patentarlo.

A partir de 1665, Hooke adquirió fama en toda Europa debido a la publicación de su *Micrographia: Or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations And Inquiries Thereupon.* Esta obra no sólo contiene hermosas imágenes de los objetos que Hooke estudió bajo el microscopio que él mismo se construyó sino, además, muchísimas conclusiones de sus observaciones y descubrimientos biológicos.

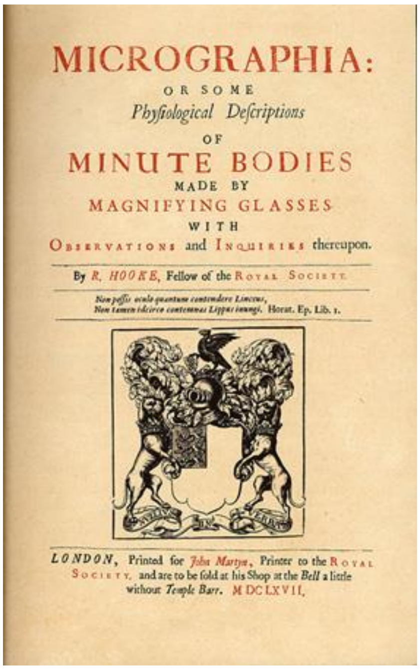


Figura 6.4. Micrograhia

En esta obra, Hooke da once argumentos para llegar a la conclusión de que el fuego, no es un elemento, tal como sostuvieron muchos filósofos desde Empédocles de Agrigento. Al respecto afirmó:

“Therefore twelfthly, it seems reasonable to think that there is no such thing as an Element of Fire that should attract or draw up the flame, or towards which the flame should endeavour to ascend out of a desire or appetite of uniting with that as its *Homogeneal* primitive and generating Element; but that that shining transient body which we call *Flame*, is nothing else but a mixture of Air, and volatil sulphureous parts of dissoluble or combustible bodies, which are acting upon each other whilst they ascend, that is, flame seems to be a mixture of Air, and the combustible volatil parts of any body, which parts the encompassing Air does dissolve or work upon, which action, as it does intend the heat of the *aerial* parts of the dissolvent, so does it thereby further rarifie those parts that are acting, or that are very neer them, whereby they growing much lighter then the heavie parts of that *menstruum* that are more remote, are thereby protruded and driven upward; and this may be easily observ’d also in dissolution made by any other *menstruum*, especially such as either create heat or bubbles. Now, this action of the *menstruum*, or *Air*, on the dissoluble parts, is made with such violence, or is such, that it imparts such a motion or pulse to the *diaphanous* parts of the Air, as I have elsewhere shewn is requisite to produce light.”[5] (página 123).

[5] Por lo tanto, duodécimo: parece razonable pensar que no hay una cosa tal como el elemento fuego, que deba atraer o formar la llama, o hacia cuál la llama debe intentar ascender en un deseo o apetito de unión con eso que se llama su *Homogéneo primitivo* para generar el elemento; sino que ese cuerpo transitorio brillante que llamamos *Llama*, es nada más que una mezcla de aire, y partes sulfurosas del material volátil de los cuerpos disolubles o combustibles, que actúan entre sí mientras ascienden, es decir, la llama parece ser una mezcla de aire y las partes volátiles combustibles de cualquier cuerpo, donde parte del aire las disuelve o trabaja sobre ellas, en una acción que intenta calentar las partes *aéreas* [volátiles] del disolvente, de modo de rarificar las partes sobre las que actúan, o a las que están muy próximas a ellas, por lo que ellas crecen mucho más ligeras que las partes pesadas de esa mezcla que se encuentran más alejadas, de tal modo que son proyectadas y empujadas hacia arriba; y esto también puede ser fácilmente observado disolviendo [el combustible] en cualquier otro disolvente especialmente, por ejemplo, que genere calor o que forme burbujas. Ahora, esta acción sobre las partes solubles de la *solución*, — o del *Aire*, — sobre las partes solubles, se hace con tal violencia, que le imparte tal movimiento o pulso a las *diáfanas* partes del aire que son indispensables para producir la luz. como mostrado en otra parte.

En su *Micrographia* publicó sus concepciones sobre la naturaleza de la luz y su propagación. Afirmó que todos los cuerpos luminosos tienen sus partes en movimiento y que debido a ese movimiento se produce la emisión luminosa. Como ejemplo escribió que un diamante, frotado, golpeado o calentado, emite luz, la que se puede observar en la oscuridad y que la emisión dura en tanto sus partes estén en movimiento por esas causas. De manera análoga, un trozo de vidrio, golpeado, frotado o calentado de cierto modo, produce un sonido en tanto haya movimiento vibratorio. Expresó su acuerdo con la teoría de los colores de Boyle y que la luz es una vibración de longitud de onda extremadamente corta. Sostuvo que para que la luz atraviese un cuerpo, este debe ser transparente y que la transmisión se hace a gran velocidad, pero que no conocía ningún experimento que pruebe que es instantánea y que, por el contrario, se podría comprobar que la velocidad de la luz es finita, a partir de los eclipses. Que en un medio homogéneo la luz se propaga como rayos desde el centro de una esfera. Si, además de transparente, el medio es homogéneo, esos rayos se desplazan en línea recta y con velocidad uniforme. Al pasar de un medio transparente a otro un rayo luminoso se refracta con un ángulo que depende de las "densidades" de esos medios, entendidas no como magnitudes gravitatorias sino como la proximidad y disposición de sus partículas, las que hacen más fácil o más difícil la propagación de la luz. Además, puntualizó que entre dos medios transparentes dados, la refracción ocurre siempre de la misma manera.

Analizó la difracción de la luz solar al pasar desde una rendija a través de un tubo conteniendo agua e incidiendo sobre una hoja de papel y la comparó con la que se efectúa a través de un prisma, encontrando los mismos colores en la misma distribución. Eso le hizo descartar la hipótesis de Descartes y proponer que un haz de luz solar (o de una vela) al atravesar un medio transparente se desdobla en múltiples rayos y que, según el grado de oposición al movimiento que encuentra cada uno de ellos se refracta con distinto ángulo dando lugar a un espectro con los colores del arcoiris. También realizó múltiples experimentos para producir luces de distintos colores así como los pintores mezclan materias coloreadas para obtener el color deseado.

En 1663, el astrónomo escocés James Gregory publicó *Óptica promota* en el que había diseñado un telescopio de reflexión. Sin embargo, su falta de habilidad práctica o la carencia de un técnico que lo auxiliase, impidieron su construcción. Robert Hooke logró construir uno que fue el primer telescopio reflector gregoriano. Con este instrumento, Hooke observó los movimientos de las manchas de Júpiter lo que demostró que ese planeta gira alrededor de su eje[6]. Luego, utilizando un helioscopio[7] pudo calcular la velocidad de rotación del Sol a partir del movimiento aparente de las manchas solares[8]. También calculó la velocidad de rotación de Marte sobre su eje[9].

---

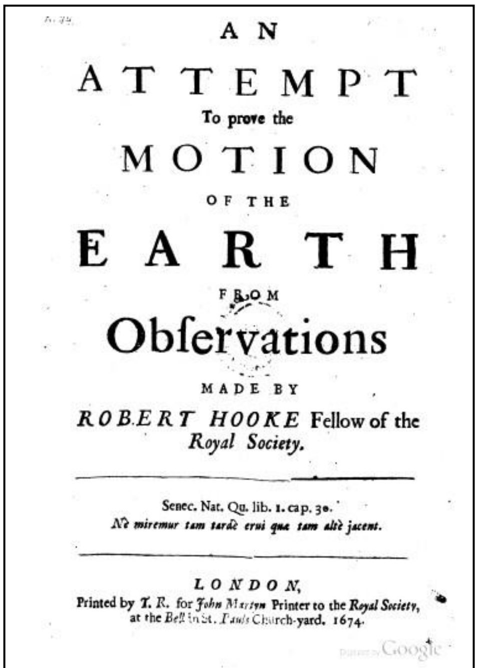
[6] "A Spot in one the Belts of Jupiter.", *Phil. Trans.* Vol. 1. (1665), p. 3. "A More Particular Account of Those Observations about Jupiter, That Were Mentioned in Numb. 8.", Vol. 1. (1665), pp. 171 – 173. "Some Observations Lately Made at London Concerning the Planet Jupiter.", Phil. Trans., 1665 1 245 – 247.

[7] Instrumento utilizado para estudiar al sol y a las manchas solares. Ideado por Christoph Scheiner en 1630 y refinado por Galileo, proyecta una imagen del Sol tomada por un telescopio sobre una hoja de papel blanco suspendida en una habitación a oscuras.

[8] "Observations, made by Mr. Hooke. Of some Spots in the Sun, which reutured after they had passed over the Upper Hemisphere of the Sun which is hid from us, according as was predicted.", *Phil. Trans.*Vol. 1. (1671), p. 648.

[9] "The Particulars. Of Those Observations of the Planet Mars, Formerly Intimated to Have Been Made at London in the Months of February and March A. 1665. ", *Phil. Trans.*Vol. 1. (1665), pp. 239 – 242. Observations Made in Italy,

Hooke, postuló que el cometa aparecido en 1664 era el mismo que había sido visto en 1618 y se formuló preguntas muy interesantes sobre su naturaleza, por ejemplo, por qué la cola del cometa apunta siempre en dirección opuesta al Sol, o por qué el cometa arde continuamente si se mueve en un espacio carente de aire.



AN
ATTEMPT
To prove the
MOTION
OF THE
EARTH
FROM
Obſervations
MADE BY
ROBERT HOOKE Fellow of the *Royal Society.*

Senec. Nat. Qu. lib. 1. cap. 30.
Ne miremur tam tarde erui quæ tam alte jacent.

LONDON,
Printed by *T. R.* for *John Martyn* Printer to the *Royal Society*, at the *Bell* in *St. Pauls* Church-yard. 1674.

Figura 6.5. “An Atempt to Prove the Motion of the Earth”

En noviembre de 1664, el empresario Sir John Cutler estableció un estipendio vitalicio de 50 libras anuales para que Hooke dictase conferencias sobre Mecánica. (las *Cutlerian Lectures*).

En 1666 estableció el método para medir la aceleración de la gravedad mediante las oscilaciones de un péndulo. Posteriormente, inventó el péndulo cónico.

En septiembre de 1666, un incendio destruyó una parte importante de la ciudad de Londres. Con Chistopher Wren presentaron un proyecto arquitectónico para la reconstrucción de la ciudad, modificando el trazado de las calles y reservando espacios para plazas, A raíz de esa presentación, Hooke fue nombrado City Surveyor, quedando a cargo de la supervisión de los trabajos de la obra pública.

Cuando en 1672. Newton dio a conocer su teoría de la luz y de los colores, Hooke, que como curador de la Royal Society tuvo que brindar un informe sobre esa teoría, lo hizo en forma tan lapidaria que su resumen puede interpretarse que lo que había de correcto en la teoría, Newton lo había robado de las ideas que estaban expresadas en 1665 en su *Micrographia* y lo que le era original, estaba equivocado. Esto marcó el inicio de disputas muy severas entre ambos.

En 1672, Hooke intentó probar que la Tierra describe un movimiento elíptico alrededor del Sol y, más tarde, propuso la ley del cuadrado inverso para explicar el movimiento planetario. Sus ideas fueron publicadas en 1674 bajo el título "*An attempt to prove de motion of the Earth from Observations*".

Ya el 23 de mayo de 1666 Hooke había presentado un trabajo en la Royal Society donde proponía que el movimiento curvilíneo es el resultado de la composición de dos movimientos, uno tangencial resultante del movimiento inercial de un cuerpo y otro atractivo entre el cuerpo en movimiento y otro cuerpo que provoca la atracción. Más tarde postuló que esa fuerza atractiva depende en forma inversa al cuadrado de la distancia que separa a ambos cuerpos. Esto daría lugar a otra controversia con Newton, cuando este publicó sus *Principia*.

Confirming the Former, and Withall Fixing the Period of the Revolution of Mars.”, *Phil. Trans.*Vol. 1. (1665), pp. 242 – 245. New Observations on the Planet Mars.”, *Phil. Trans.*Vol. 11. (1671), p. 198.

Hooke falleció el 3 de marzo de 1703, dejando una obra tan extensa cuyo detalle excede a las síntesis que se proponen en este trabajo, pero que se pueden consultar en *The Posthumous Works of Dr. Robert Hooke*, escrito por Richard Waller y publicado por la Royal Society en 1705;

6. – 2.1. Robert Hooke y la gravitación universal.

E 23 de mayo de 1666, Hooke presentó ante la Royal Society un artículo sobre "la inflexión, por un principio atractivo y superviviente, de un movimiento directo en una curva", en el que, curiosamente, propuso y rechazó una posible explicación de la atracción gravitacional efectuada por la presión del éter, explicación bastante parecida a la que Newton formularía cincuenta años más tarde en la segunda edición de su Opticks de 1717.

En ese artículo comentaba:

"A menudo me he preguntado por qué los planetas deben moverse alrededor del Sol de acuerdo con la suposición de Copérnico, no estando incluidos en órbitas sólidas (que posiblemente por esta razón los antiguos habrían abrazado) ni atados al centro de ello, por alguna cadena visible y nunca se alejan de él más allá de un cierto grado, ni se mueven en línea recta, como lo hacen todos los cuerpos, que tienen un único impulso:

Para un cuerpo sólido, movido en un fluido, hacia cualquier parte (a menos que sea proyectado por algún impulso cercano, o que su movimiento sea impedido por algún otro cuerpo, o que el medio, a través del cual se mueve, se suponga que no es igualmente penetrable en todos los sentidos) debe conservar su movimiento en línea recta, y no desviarse de esta manera ni el medio desviarse del cuerpo. Pero todos los cuerpos celestes, siendo cuerpos sólidos regulares que se mueven en un fluido, y se mueven en trayectorias circulares o elípticas, pero no rectas, deben tener alguna otra causa, además del primer impulso impreso, que debe torcer su movimiento hacia una trayectoria curva. Para la realización de este efecto no puedo imaginar otra causa probable aparte de estas dos: La primera puede ser que haya una densidad desigual del medio a través del cual el cuerpo planetario debe moverse; es decir, si suponemos que parte del medio, que está más lejos del centro o sea del Sol, es más densa hacia el exterior que el medio que está más cerca, el cuerpo seguirá un movimiento que será siempre desviado hacia el centro por una mayor flexibilidad de la parte interior y la mayor resistencia de la parte externa de ese medio. Esto tiene algunas probabilidades de ocurrir; Como que si el éter tiene algo de la naturaleza del aire, es racional que la parte que está más cerca del Sol, que es la fuente del calor, sea más rarificada; y por consiguiente, que las zonas más remotas sean las más densas. Entiendo que hay otras improbabilidades, que asisten a esta suposición, pero que no siendo nada relevantes para mi propósito actual las omitiré. Pero la segunda causa que provoca la desviación de un movimiento recto hacia uno curvo, puede deberse a una propiedad atractiva del cuerpo colocado en el centro, el que se ocupa continuamente en atraer y mover hacia sí. Si se supone que la causa obedece a tal principio, todos los fenómenos de los planetas parecen posibles de ser explicados por el principio común de los movimientos mecánicos y, posiblemente, siguiendo con esta especulación, pueden dar lugar a una verdadera hipótesis acerca de su movimiento y a partir de unas pocas observaciones su movimiento puede ser conocido con tal certeza, que podamos ser capaces de calcularlo con la mayor exactitud y certidumbre que deseemos”[10]

Hooke trató de “explicar” esta inflexión tomando como ejemplo el péndulo cónico, Sin embargo, afirmó que en este caso “la tendencia del *conatus* a regresar al centro ... es cada vez mayor cuanto más se aleja del centro, lo que de otra manera parece ser la atracción del Sol.” A pesar de esta diferencia tan importante entre la ley de la atracción gravitacional y la del péndulo cónico, ésta presenta, en efecto, una muy buena analogía con los movimientos planetarios que describen círculos o elipses dirigidos hacia el Sol con diversas intensidades, según la fuerza del “ímpetu” conferido a cada uno de los planetas.

El texto contenido en ese artículo contiene una introducción a un Experimento destinado a demostrar que el Movimiento Circular, está compuesto de un movimiento que persiste en ir en línea recta por la tangente, y de otro que se esfuerza en ir hacia el centro de giro. Para ese experimento, Hooke usó un péndulo sujeto al techo de la sala del Laboratorio con una gran bola de madera de Lignum Vitae[11] atado al otro extremo. Hooke encontró que si el “ímpetu”[12] inicial del movimiento en el sentido de la tangente, es más fuerte que el generado hacia el centro, se producía un movimiento elíptico, cuyo diámetro mayor es paralelo a la dirección inicial dada por el impulso tangencial, pero si ese impulso fuese más débil que aquel dirigido al centro de giro, se genera un movimiento elíptico, cuyo diámetro menor es paralelo al impulso inicial en la dirección tangencial. Si ambos “ímpetus” eran iguales, se producía un movimiento circular perfecto.

Hooke realizó también otro experimento, en el cual ató otro péndulo con un cordón corto a la parte inferior de la cuerda del primer péndulo. En el otro extremo del cordón corto ató una bola de menor peso de modo que el segundo péndulo pudiera girar libremente de manera circular o elíptica alrededor de la bola del primer péndulo.

La intención de Hooke fue la de explicar la manera en que la Luna gira alrededor de la Tierra, resultando evidente que ni la bola más grande, que representaba a la Tierra, ni la más pequeña, que representaba a la Luna, se movían en círculos o elipses perfectos, como lo habrían hecho si cualquiera de los dos se hubiera suspendido y movido por separado.

Pero que un cierto punto que parecía ser el centro de gravedad de los dos cuerpos (cualquiera que fuesen sus posiciones relativas, se los podía considerar como si fueran uno) ese sistema de dos bolas parecía moverse regularmente, tanto circularmente como elípticamente. Otros movimientos peculiares que registró Hooke fueron pequeños epiciclos de la bola más chica alrededor del centro de gravedad de ambas bolas.

A partir de los resultados experimentales, Hooke concluyó:

---

[10] Ver Richard Waller, “The Life of Dr. Robert Hooke,” in *The Posthumous Works of Robert Hooke* (London, 1705), p, xii ; Thomas Birch, *History of the Royal Society* (London, 1757), 1, 90 sq. ; E. Gunther, *Early Science in Oxford* (Oxford, 1930), VI, 265 sq.

[11] *Guaiacum sanctum,* guayacán.

[12] En rigor, el impulso.

"by this hypothesis the phenomena of the comets, as well as of the planets, may be solved; and the motions of the secondary as well as of the primary planets. The motions also of the progression of the apsides are very evident, but as for the motion of libration or latitude that cannot be so well made out by this way of pendulum; but by the motion of a wheel upon a point is most easy."[13]

Posteriormente, en 1670, al dar unas conferencias para la Royal Society en el Gresham House, Hooke escribió:

"A continuación voy a explicar un sistema del mundo que difiere en muchos detalles de lo que hasta ahora se conoce, pero que responde en todos sus aspectos a las reglas comunes de los movimientos mecánicos. Este sistema depende de tres suposiciones: Primero, Que todos los cuerpos celestes tienen una atracción o un poder gravitatorio hacia sus propios centros, con lo cual atraen no sólo sus propias partes, y les impiden separarse de ellos, como podemos observar que la Tierra lo hace, Pero que también atraen a todos los demás cuerpos celestes que están dentro de sus esferas de actividad y, por consiguiente, no sólo el Sol y la Luna influyen en el cuerpo y el movimiento de la Tierra y la Tierra no sólo sobre ellos, sino que Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y también Saturno, por sus poderes atractivos, ejercen una considerable influencia en el movimiento de la Tierra, como de la misma manera el poder atractivo correspondiente de la Tierra tiene también una influencia considerable sobre cada uno de los movimientos de los demás planetas.

La segunda suposición es la siguiente: que todos los cuerpos que se ponen en movimiento mediante un impulso directo y simple, seguirán avanzando en línea recta hasta que sean desviados por otros poderes efectivos y llevados a efectuar un movimiento que describa un círculo, una elipse, o alguna otra línea curva más compuesta.

La tercera suposición es que estos poderes atractivos son tanto más poderosos cuanto más cerca está el cuerpo de los propios centros de los cuerpos que generan la atracción.

Ahora, ¿Cuáles son los diversos grados de atracción? Todavía no lo he verificado experimentalmente, pero es una tarea que si es encarada por completo, como debería ser, ayudará poderosamente a los astrónomos a reducir todos los movimientos de los cuerpos celestes a una regla, movimientos que dudo que se puedan conocer sin esa regla. Aquel que entiende el comportamiento del péndulo circular y del movimiento circular, comprenderá fácilmente todo este principio y sabrá dónde encontrar las direcciones en la naturaleza para un verdadero conocimiento de ella. Esto sólo lo sugiero para aquellos que tienen la capacidad y la oportunidad de continuar esta investigación y no carecen de la laboriosidad para observar y calcular, deseando de corazón que lo puedan obtener, ya que yo tengo muchas otras cosas para completar primero, por lo que no podría atender esa tarea tan bien.

---

[13] Mediante esta hipótesis, los fenómenos de los cometas, al igual que los planetas se pueden resolver; y los movimientos de los planetas secundarios tan bien como los de los primarios. También son muy evidentes los movimientos de progresión de los ápsides, pero en cuanto al movimiento de libración, o de latitud, no puede ser determinado tan bien mediante el uso de un péndulo, pero por el movimiento de una rueda alrededor de un punto, sería más fácil.

Pero esto me atrevo a prometer al que tome esa empresa, que encontrará que todos los grandes movimientos del mundo son influenciados por este principio, y que su cabal comprensión será la verdadera perfección de la Astronomía."[14]

Hooke tenía razón al afirmar que el "verdadero entendimiento" del principio de la atracción universal llevaría a "la verdadera perfección de la Astronomía". Sin embargo, su explicación, de que no continuó con la investigación debido al exceso de trabajo suena poco convincente, especialmente si el éxito en encontrar la expresión matemática de la ley de gravitación universal sería "el mayor descubrimiento en la naturaleza que alguna vez se hizo desde la creación del mundo"

Algunos estudiosos, opinaron que Hooke no continuó con su investigación sobre la ley de la gravitación universal porque no conocía la matemática del péndulo cónico. Pero en 1673, Christiaan Huygens publicó su investigación *Horologium oscillatorium* donde explicó, por primera vez la naturaleza del péndulo circular y del movimiento circular y las ecuaciones que describen sus propiedades. En 1679, Hooke publicó, en *Lectiones Cutlerianæ*, sus trabajos de 1670 sin agregar una coma, lo cual parece corroborar que su trabajo como curador de la Royal Society, le absorbía todo el tiempo. Parecería, que recién a fines de 1679, se pudo ocupar de la gravitación universal ya que el 6 de enero de 1680 le envió una carta a Newton donde le menciona haber encontrado la ley del cuadrado inverso para explicar la atracción gravitatoria. Ya para esa época, la ley del cuadrado inverso había sido encontrada también por Edmond Halley y por Christopher Wren.

Es interesante notar que, en 1680, Hooke desarrolló una teoría acerca de la atracción gravitatoria que según su explicación se debía a las vibraciones rápidas del éter sobre los cuerpos inmersos en él. Una especie de ondas gravitacionales que se propagaban a través del éter desde los cuerpos celestes hacia el Sol y viceversa.[15]

El 17 de enero de 1680, Hooke, en una carta a Newton, escribió:

". . . it now remains to know the proprieties of a curve Line (*not Circular nor concentrical*) *made by a central attractive power which make the velocity of Descent from the tangent line or equal straight motion at all Distances in a duplicate proportion to the Distances Reciprocally taken. I doubt not but that by your excellent method you will easily find out what Curve must be, and its proprieties, and suggest a Physical Reason of this proportion".*[16]

---

[14] *An Attempt to prove the motion of the Earth by Observation* (London, 1674), pp. 27 y siguientes, republicado en *Lectiones Cutlerianæ* (London, 1679), y en Gunther, *Early Science in Oxford*, vol. VIII, Oxford, (1930).

[15] Ver: *The Posthumous Works of Dr. Robert Hooke*, Publish'd by Richard Waller, R. S. Secr., London, 1705. páginas 184 – 185. También : J. Zennek, "Gravitation", *Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften* (Leipzig, 1903-1921), Bd. V, *Physik*.

[16] Ahora sólo queda por conocer las propiedades de una línea curva (ni circular ni concéntrica) hecha por un poder atractivo central que hace que la velocidad de descenso de la línea tangente, o que un movimiento rectilíneo similar, a todas las Distancias, en una proporción doble a esas distancias tomadas recíprocamente. No dudo que con vuestro excelente método, encontrará fácilmente qué curva debe ser y sus propiedades y sugerir una razón física de esta proporción.

En cuanto a la “paternidad” de la ley del cuadrado inverso, algunos autores afirmaron que Newton la desarrolló en sus *annus mirabilis*, 1665 – 1666, cuando tuvo que abandonar Cambridge por la peste y regresar a Woolsthorpe. El mismo Newton se lo manifestó en 1694 a William Whiston, su sucesor en la Cátedra Lucasiana de Cambridge y, en 1696, a Henry Pemberton, el editor de la tercera edición de los *Principia*.

Obviamente, cuando la paternidad de una teoría es confrontada, más que los comentarios de los contendientes, tienen valor las pruebas documentales. Por ello, cuando Robert Hooke se adjudicó la idea de la interacción gravitatoria, comenzó la búsqueda de alguna prueba que otorgase ese mérito a Newton.

Uno de los documentos usados como prueba, fue una carta que Newton le escribió a Oldenburg el 23 de junio de 1673, para ser enviada a Christiaan Huygens en la que, según la Royal Society, Newton le había comunicado a Huygens su cálculo de la interacción gravitatoria entre la Tierra y la Luna.[17] En el Tomo VII de las Obras Completas de Huygens, al reproducir esta carta hay una nota al pie que dice:

La lettre qui suit a été considérée par Newton comme ayant été écrite à Huygens lui-même. C'est ce qui résulte de sa célèbre correspondance avec Halley, au sujet de la découverte de l'attraction universelle, publiée par Brewster dans l'Appendice au premier volume de ses Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton, pp. 437 à 456, et reproduite par M. W. W. Rouse Ball dans sa monographie: An essay on Newton's “Principia”. London, Macraillan and C°. and New York 1893, pp. 153—174.

Dans sa lettre à Halley, du 20 juin 1686, Newton dit:

“That when Hugenius put out his *Horol. Oscil*. a copy being presented to me , *in my letter of thanks to him*, I gave those rules in the end thereof (c'est-à-dire les lois de la force centrifuge, données par Huygens) a particular commendation for their usefulness in Philosophy, and added out of-my aforesaid paper an instance of their usefulness, in comparing the forces of the moon from the earth, and earth from the sun; in determining a problem about the moon's phase, and putting a limit to the sun's parallax , which shows that I had than my eye upon the forces of the planets arising from their circular motion and understood it; so that a while after, when Mr. Hooke propounded the problem solemnly, in the end of his Attempt to prove the Motion of the Earth, if I had not known the duplicate proportion before, I could not but hâve found it now."

Dans le post-scriptum de cette même lettre Newton dit encore:

”*My letter to Hugenius*, which I mentioned above, was directed to Mr. Oldenburg , who used to keep the originals".

Enfin, dans sa lettre à Halley, datée du 27 juillet 1686, Newton écrit:

[17] Œvres Complètes de Christiaan Huygens, Tome septième, Correspondance 1670 – 1675, Societé Holandaise des Sciences, 1897, La Haye, pp. 325 – 332.

"Sir, Yesterday I unexpectedly struck upon a copy of *the letter* I told you of*, to Hugenius*. 'T is in the hand of one Mr. John Wickins, who was then my chamber-fellow, and is now parson of Stoke Edith near Monmouth and so is authentic. It begins thus, being directed to M. Oldenburg.

"Sir, I receiv'd your letters, with M. Hugen's kind présent, which I hâve viewed with great satisfaction , finding it full of very subtile and useful spéculations very worthy of the author. I am glad that we are to expect another discourse of the vis Centrifuga, which speculation may prove of good use in Natural Philosophy and Astronomy, as well as Mechanics. *Thus, for instance if the reason, why the same side of the moon is ever towards the earth, be the greater conatus of the other side to recède from it, it will follow* (*upon snpposition of the earth's motion about the sun*)*, that the greatest distance of the sun from the earth is to the greatest distance of the moon from the earth, not greater than* 10000 *to* 56*; and therefore the parallax of the sun not less than* 56/10000 *of the parallax of the moon, because were the sun's distance less in proportion to that of the moon, she would have a greater conatus from the sun than from the earth. I thought also some time that the moon's libration might dépend upon her conatus from the sun and earth compared together till I apprehended a better cause*."

Après cette citation, Newton continue:

"Thus far this letter concerning the Vis Centrifuga. The rest of it for the most part concerning colours, is printed in the *Phil. Trans*. of July 21,1 673, N°. 96. Now from thèse words it's évident, that I was at that time versed in the theory of the force arising from circular motion, and had an eye upon the forces of the planets, knowing how to compare them by the proportion of their periodical révolutions and distances from the centre they move about: an instance of which you have here in the comparison of the forces of the moon arising from her menstrual motion about the earth, and annual about the sun. So then in this theory I am plainly before Mr. Hooke. For he about a year after, in his *Attempt to prove the Motion of the Earth*, declared expressly that the degrees, by which gravity decreased, he had not then experimentally verified, that is, he knew not how to gather it from phenomena, and therefore he there recommends it to the prosecution of others.

Now, though I do not find the duplicate proportion expressed in this letter (as I hoped it might), yet if you compare this passage of it hère transcribed, with that hypothesis of mine, registered by Mr. Oldenburg in your book (voir Birch, History, III, p, 251), you will see that I then understood it. For I there suppose that the descending spirit acts upon bodies here on the superficies of the earth with force proportional to the superficies of their parts; which cannot be, unless the diminution of its velocity in acting upon the first parts of any body it meets with, be recompensed by the increase of its density arising from that retardation. Whether this be true is not material. It sufîîces, that 't was the hypothesis. Now if this spirit descend from above with uniform velocity, its density and consequently its force, will be reciprocal proportional to the square of its distance to the centre. But if it descend with accelerated motion, its density will every-where diminish as much as its velocity increases; and so its force (according to the hypothesis) will be the same as before, that is still reciprocally as the square of its distance.

In short, as thèse things compared together shew, that I was before Mr. Hooke in what he prétends to hâve been my master," etc.

On voit que le principal argument de Newton en faveur de sa priorité vis-à-vis de Hooke consiste dans le passage de sa lettre à Huygens que nous venons d'imprimer en italiques.

On remarquera que ce passage manque dans notre texte, c'est-à-dire dans la copie qu'Oldenburg a transmise à Huygens.[18] Il est difficile d'expliquer une omission aussi importante. Elle est absolument contraire aux habitudes d'Oldenburg. Toutes les copies de lettres qu'Oldenburg a transmises à Huygens ont été reconnues exactes. Ce n'est que dans de rares exceptions qu'Oldenburg omet une phrase, soit l'exorde ou les compliments de la fin d'une lettre, soit quelque détail personnel , une fois une phrase qui aurait pu blesser Huygens (Voir la Lettre N°. 1920, note 5). Or, le passage, omis ici par Oldenburg, paraît trop long pour pouvoir être sauté par inadvertance et n'a certainement rien de personnel; déplus Newton, au commencement de sa lettre d'envoi (l'Appendice N°. 1957), recommande expressément de transmettre ses notes à Huygens.

Si , comme il est probable, on doit exclure la conjecture qu'Oldenburg ait omis le passage soit par inadvertance, soit de son propre gré, il faudrait admettre qu'il l'a supprimé par suite d'instructions reçues.

Quelle est la main qui a soustrait aux yeux de Huygens les réflexions de Newton sur la force centrifuge, suscitées à la lecture de l'Horologium Oscillatorium, et dont Newton a voulu faire part à l'auteur ?

Sur l'authenticité tant de la lettre d'Oldenburg que de celle de Newton, transmise en copie à Halley, il ne peut rester aucun doute. La lettre originale de Newton est conservée dans les collections de la Société Royale, d'où elle a été reproduite pour la première fois par Horsley.

Nous mettons sous les yeux de nos lecteurs, dans les planches qui suivent cette page, les reproductions 1°) de la première partie de la lettre d'Oldenburg à Huygens, où manque le passage de la lettre de Newton, ensuite celles de deux pages de la lettre originale de Newton à Oldenburg, savoir: 2°) le commencement de la lettre destinée à être communiquée à Huygens, et 3°) la fin de la lettre de Newton plus particulièrement destinée à Oldenburg lui-même. l'Appendice N°. 1957. Nous devons à la libéralité de la Société Royale de Londres et aux soins bienveillants de M. Harrison, secrétaire assistant de cette Société, d'avoir pu nous procurer les photographies de ces deux pages de l'unique pièce de correspondance entre Newton et Huygens, dont, jusqu'ici, on ait connaissance.

L'en-tête de la lettre de Newton, le n°. 2, est de la main d'Oldenburg. La plus grande partie de la première page a été biffée et un nouveau titre inscrit au commencement de la partie qui a paru dans les Phil. Trans. Ce dernier titre est identique à celui de ce journal. La dernière partie de la lettre, celle qui forme la Lettre N°. 1957 de notre texte, est de nouveau biffée. Il paraîtrait qu'on ait voulu rendre illisibles les sept dernières lignes, exprimant les sentiments personnels de Newton et se rap-

[18] El resaltado es nuestro.

portant au payement de sa cotisation comme membre de la Société Royale. Elles ont, toutefois, été imprimées par Edleston et Brewster.[19]

Resulta algo difícil aceptar que, en 1673, Newton tenía una idea clara de la gravitación si se toma en cuenta el pasaje por él escrito en 1679[20]:

"La atracción gravitatoria de la Tierra puede ser causada por la condensación continua de algunas cosas como los espíritus etéreos, no sobre el principal cuerpo del flemático éter, sino algo muy tenue y sutil difuso a través de él, quizás de naturaleza untuosa, gomosa, tenaz y elástica; y guardando mucho la misma relación al éter que el espíritu aéreo vital, requisito para la conservación de la llama y los movimientos vitales que hace el aire.

Ya que si tal espíritu etéreo pudiera ser condensado en cuerpos fermentables o ardientes, o sino, coagulado en los poros de la tierra y el agua como alguna clase de materia húmeda activa para el continuo uso de la Naturaleza (adhiriéndose a los costados de esos poros de la manera en que los vapores se condensan en los costados de los vasos) el vasto cuerpo de la Tierra, que en todos lados [está dirigido] al verdadero centro, en una actividad perpetua, puede condensar continuamente tal cantidad de este espíritu para que sea la causa que descienda desde lo alto con gran celeridad para proveerse de ello, y en cuyo descenso puede arrastrar con él a los cuerpos que impregna *con una fuerza proporcional a las superficies de todas las partes sobre las que actúa*[21]; y la Naturaleza efectuando una circulación mediante la lenta ascensión de materia fuera de las entrañas de la Tierra, en una forma aérea, que por un tiempo constituye la atmósfera, pero que siendo continuamente impulsada por el nuevo aire, las exhalaciones y vapores que se elevan desde el suelo, con el tiempo (algunas partes de los vapores regresarán como lluvia) se desvanecen nuevamente en los espacios aéreos y, tal vez con el tiempo, se suavizan atenuándose a su primer principio."

Como la primera edición de los Principia iba a ser financiada por la Royal Society, la Presidencia le "sugirió" a Newton que haga mención de los antecedentes de la ley de gravitación a Christopher Wren, Robert Hooke y Edmond Halley. Así, en la Sección II del libro I, al final de la Proposición V, Teorema IV, se publicó un Scholium:

---

[19] Vale la pena traducirlo: El encabezado de la carta de Newton, el nº 2, es de la mano de Oldenburg. Gran parte de la primera página ha sido borrada y se ha registrado un nuevo título al comienzo de la sección que apareció en las *Phil. Trans*. Este último título es idéntico al del periódico. La última parte de la carta, que forma la Carta Nº. 1957 de nuestro texto, fue nuevamente borrada. Parece que la intención era hacer ilegibles las últimos siete líneas, que expresarían los sentimientos personales de Newton y se relacionarían con el pago de sus cuotas como miembro de la Royal Society. Sin embargo, fueron impresos por Edleston y Brewster.

[20] **Brewster, D**.,(**1855**): *Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton*, Vol. I, Hamilton, Adams, and Co, London, pp. 393-394.

[21] Hemos resaltado este texto pues muestra que para Newton la atracción gravitatoria es proporcional a las superficies de los cuerpos.

Casus Corollarii sexti obtinet in corpolibus cælestibus ut seorsun ellengerunt etiam nostrates *Wrennus, Hookius & Halleus* & propterea quæ spectant ad vim centripetam decrecentem in duplicata ratione distantiarum a centris decrevi fusius in sequetibus exponere.[22]

En el que Newton los reconoce como antecedentes de haber propuesto la ley del cuadrado inverso para describir el movimiento de los cuerpos celestes.

Las controversias entre Hooke y Newton, tanto por las ideas acerca de la naturaleza de la luz como en lo referente a la paternidad de la ley de la gravitación dejaron huellas indelebles en ambos científicos. Se afirma que cuando Newton le escribió a Hooke "*Si he visto más lejos es porque estaba montado a hombros de gigantes*", ironizó acerca de la baja estatura de Hooke.

Hooke falleció en 1703, el mismo año en que Newton fue nombrado Presidente de la Royal Society. Al no existir la fotografía, toda persona con una situación económica medianamente desahogada contrataba a un artista para que pinte su retrato. Robert Hooke, que desde 1664, prácticamente vivía en la Royal Society, tenía excelentes ingresos por ese trabajo y dejó una herencia considerable, por lo que no habría sido una excepción. Además, en la Royal Society existían y existen cuadros de todas sus autoridades, Presidentes, Secretarios, Consejeros y casi con seguridad, existió un cuadro de su primer curador que estuvo en ese puesto durante casi cuatro décadas. Sin embargo, a partir dela asunción de Newton como Presidente, tal cuadro desapareció. Algunos escritores han afirmado que ese cuadro nunca existió, lo que resulta extraño dadas las costumbres de la época. Otros escritores, sugirieron que Newton mandó destruirlo. Lo concreto es que ni en la Royal Society ni entre ninguna de las pertenencias de Hooke hay alguna imagen suya ni se ha encontrado alguna, en los tres siglos posteriores a su muerte. Es por eso que, al cumplirse el tercer centenario de su deceso, la pintora Rita Geer, sobre la base de toda la información que pudo recoger sobre el científico elaboró una imagen que es la muestra la Figura 6.3 de este trabajo.

6 - 3.- Gottfried Wilhelm Leibniz.

Gottfried Wilhelm Leibniz nació en Leipzig en 1646. A los quince años entró en la Universidad de su ciudad natal donde estudió una gran variedad de materias incluyendo Derecho, Teología, Filosofía y Matemáticas. A los 21 años obtuvo su doctorado en la Universidad de Altdorf, en Nuremberg. Allí le ofrecieron un puesto docente, pero lo rechazó.

Leibniz desarrolló actividades en múltiples campos. Fue diplomático y abogado representando al Príncipe elector de Maguncia y, desde 1676 hasta su muerte, trabajó para los Duques de Brunswick-Luneburgo, quienes a partir de 1692 fueron los príncipes electores de Hanover.

22 El caso del Corolario sexto se da en los cuerpos celestes, como han observado varias veces Wren, Hooke y Halley. Po eso mismo, pretendo en lo que se sigue, exponer más ampliamente lo concerniente a la fuerza centrípeta decreciente según los cuadrados de las distancias a los centros.


Figura 6.6.G. W. Leibniz

Además de los múltiples trabajos sobre Filosofía, Metafísica, Matemática, Historia, Física, Alquimia y otras disciplinas, inventó una máquina de calcular, que podía realizar las operaciones de multiplicación, división y extracción de raíces cuadradas. También se dedicó a optimizar prensas hidráulicas, diseñó molinos de viento y hasta desarrolló un proyecto para extraer el agua que inundaba las minas de plata de las montañas de Harz en la Baja Sajonia.

Para poder liberar los razonamientos de las limitaciones del idioma — por ese entonces seguía siendo el latín el idioma de las comunicaciones científicas y filosóficas — se propuso crear un lenguaje simbólico universal que permitiera expresar los razonamientos mediante símbolos y fórmulas, cuyas reglas de combinación permitieran reducir todo discurso racional a cálculos rutinarios de modo que cada razonamiento tuviera una interpretación unívoca. Por eso, a los veinte años, publicó su obra *Dissertatio de arte combinatoria* que contiene el germen de un plan que permitiría expresar y analizar los razonamientos mediante reglas matemáticas.

Esto quedó evidenciado en la notación matemática que desarrolló para el Cálculo, que fue muy superior a la usada por Newton.

Su interés por la Alquimia y la posibilidad de la transmutación lo llevaron a ingresar a la fraternidad de los Rosacruces[23] donde, en 1667, fue nombrado Secretario.

En 1700 fundó la Academia de Ciencias de Berlín, de la que fue su primer Presidente. También fue uno de los fundadores de la primera revista científica alemana, el *Acta Eruditorum*.

Las contribuciones de Leibniz al álgebra (determinantes, resolución de ecuaciones), la historia natural, la geología y la lingüística son también importantes.

[23] La fraternidad de los Rosacruces, fue una agrupación secreta fundada por Christian Rosenkreutz, un filósofo alemán que a fines del siglo XIV viajó a Tierra Santa y que estando gravemente enfermo en un lugar llamado Damcar, fue visitado por unos eruditos árabes con quienes trabó amistad y que le transmitieron los secretos de la Alquimia, especiamente de cómo obtener una larga y saludable vida. Lo curaron mediante la piedra filosofal y lo instruyeron en todos los secretos de la Alquimia. Se dice que regresó a Alemania en 1401, donde fundó una comunidad secreta mística y alquímica y que vivió hasta 1484.

En 1672, siendo asesor del elector de Maguncia, tuvo que intervenir en Paris en una negociación diplomática. Estando en esa ciudad, trabó amistad con Christian Huygens, quien ofició de guía para que Leibniz ordenara sus conocimientos sobre las propiedades de las series. El interés en ese tema, llevó a Leibniz a dedicarse intensamente al estudio de la matemática superior teniendo siempre como guía a Huygens. En enero de 1673 viajó a Londres en misión diplomática. Si bien la misión no tuvo el resultado esperado, conoció a Henry Oldenburg, Secretario de la Royal Society con quien trabó amistad e intercambió información científica. Oldenburg lo conectó con varios fellows de la Royal Society, entre ellos, Robert Boyle, Robert Hooke, al naturalista John Ray, con Thomas Syndenham, cuyos textos de medicina se usaron durante dos siglos. Oldenburg, inclusive, logró que Newton se contactara por correo con Leibniz. Se dice que Leibniz conoció al matemático John Collins (1625 – 1683) quien le habría mostrado el manuscrito de Newton *De analysi per aequationes numero terminorum infinitas*, con algunas ideas del autor acerca del *Calculus* circunstancia que, cuando se produjo la agria controversia con Isaac Newton, se usó para acusarlo de plagio.

Un día, al visitar a Boyle se encontró con el matemático John Pell (1611 – 1685) a quien, conversando sobre temas de matemática, le comentó que había desarrollado un método mediante el cual, con la ayuda de cierta clase de diferencias, que él llamó *differentia generatrices*, podía sumar los términos de cualquier serie creciente o decreciente de forma constante. Luego que Leibniz le explicara su teoría, Pell le hizo saber que una fórmula de ese tipo había sido descubierta por el matemático francés François Regnaud y había sido completamente explicada en un libro de Gabriel Mouton titulado *Observations diametrorum soils et lunæ apparentium*. Leibniz, que nunca había oído hablar sobre ese libro, le pidió a Oldenburg si se lo podía facilitar y de su lectura pudo comprobar que lo dicho por Pell era correcto sino que el método propio era muy superior al de Regnaud. La superioridad consistía en que mediante el método de Leibniz se podía, mediante los mismos principios, calcular cualquier progresión que consistiera en términos cuyos numeradores fueran la unidad y los denominadores fueran números de cualquier clase. Al día siguiente, Leibniz escribió un resumen de las circunstancias en que se había enterado del método de Regnaud y la demostración de que su método era superior. Ese resumen lo entregó en manos de Oldenburg y años más tarde se convertiría en una importante evidencia durante la controversia entre él y Newton sobre el descubrimiento del Cálculo diferencial. En la misma nota, Leibniz observó que había descubierto otra ley de las series numéricas que no había sido advertida por Pascal en su trabajo sobre el tema.

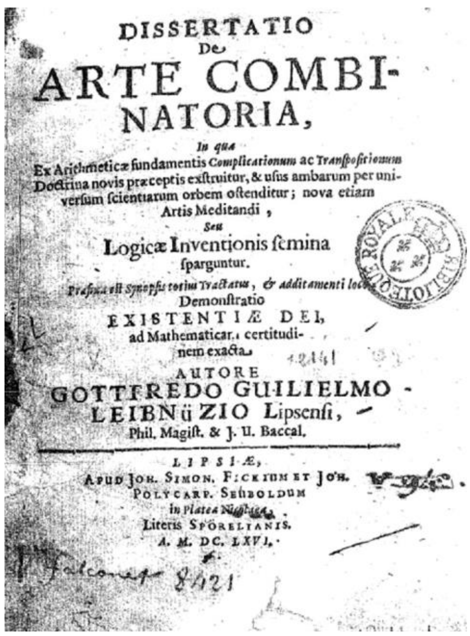

DISSERTATIO
DE
ARTE COMBINATORIA,
In qua
Ex Arithmeticæ fundamentis Complicationum ac Transpositionum
Doctrina novis præceptis exstruitur, & usus ambarum per universum scientiarum orbem ostenditur; nova etiam
Artis Meditandi,
Seu
Logicæ Inventionis semina
sparguntur.
Præfixa est Synopsis totius Tractatus, & additamenti loco
Demonstratio
EXISTENTIÆ DEI,
ad Mathematicam certitudinem exacta.
AUTORE
GOTTFREDO GUILIELMO
LEIBNüZIO Lipsensi,
Phil. Magist. & J. U. Baccal.
LIPSIÆ,
Apud Joh. Simon. Fickium et Joh. Polycarp. Seuboldum
in Platea Nicolaea.
Literis Spörelianis.
A. M. DC. LXVI.

Figura 6. 7. "*Dissertatio* …" (1666)

Pell también le había comentado a Leibniz que Nicolaus Mercator había publicado un trabajo sobre la cuadratura de la hipérbola, por lo que Leibniz adquirió una copia y la llevó consigo a Paris.

Con la guía de Christiaan Huygens, comenzó a analizar el tema del desarrollo en serie de las funciones y encontró una serie que cumplía para el círculo lo que Mercator había encontrado para la hipérbola. Huygens difundió su hallazgo entre los matemáticos Francia y, por ese trabajo, le ofreciero a Leibniz integrar la Académie des Sciences. Pero Leibniz no aceptó porque para ser miembro de esa institución tenía que unirse a la Iglesia de Roma y él era protestante.

Su hallazgo lo comunicó a Oldenburg, en una carta fechada el 15 de julio de 1674. El 8 de diciembre del mismo año, Oldenburg le contestó que "Un Sr. Newton, de Cambridge, había trabajado en el mismo tema, aplicando las series para la cuadratura, no sólo del círculo, sino para otras varias figuras geométricas".

Leibniz después afirmaría que, en 1675, encontró un método que mediante series arbitrarias (*series arbitrarii*) pudo arribar finalmente al cálculo diferencial, "un descubrimiento al que llegué, en parte, por las reflexiones hechas en mi juventud sobre las diferencias en las series numéricas y publicadas en *De arte combinatoria*, pero llegué a ese resultado, no como Newton a través de las fluxiones de líneas, sino a través de diferencias de números, cuando observé que esas diferencias , aplicadas a cantidades continuamente crecientes, desaparecían en relación a las mismas cantidades pero, por otro lado, continuaban subsistiendo en las series de números"[24]

El descubrimiento detallado del cálculo diferencial, se lo informó a Oldenburg en una carta fechada el 27 de agosto de 1676, pidiéndole que le comunique su contenido a Newton. Este pedido fue hecho debido a que en una carta fechada el 23 de junio de 1676, Newton le había dado su fórmula del binomio y le había expresado que estaba "en posesión de un método general que, en el caso de cualquier serie dada él podía determinar las cuadraturas, de las que proviene así como el volumen y el centro de gravedad del cuerpo del cual la curva proviene" pero que, por el momento, no quería darlo a conocer e insertando en la carta dos líneas con caracteres transpuestos que se supone que contenían una idea del método pero ni el más mínimo detalle del mismo.

El 21 de junio de 1677, Leibniz le escribió a Newton una carta con una exposición clara y completa de su cálculo diferencial, con su algoritmo, sus reglas y el modo de formar las ecuaciones diferenciales y las aplicaciones de ese método para la resolución de problemas de Geometría analítica.

Ante la Royal Society, Leibniz presentó una máquina, cuyo diseño está basado sobre las ideas de Blaise Pascal y en la que había estado trabajando desde 1670. Es máquina, que había bautizado *Staffelwalze* — y que en Inglaterra se conoció como *Stepped Reckoner* — podía efectuar las cuatro operaciones elementales y extraer raíces cuadradas. Por ese invento, la Royal Society lo nombró miembro externo.

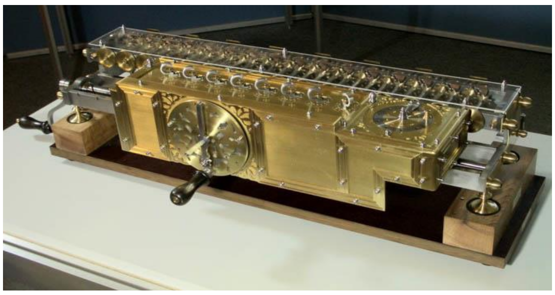


Figura 6. 8. Stepped Reckoner de Leibniz

En septiembre de 1676, también por cuestiones diplomáticas, viajó a Londres, y cuando regresó al Continente, en vez de hacerlo a través de los "Países bajos españoles" (Bélgica) y viajar por tierra a

[24] Carta al Abate Conti del 9 de abril de 1716.

Alemania, suponiendo que se había quedado sin trabajo, decidió ir a París. En este viaje de regreso se detuvo en La Haya donde conoció a Anton van Leeuwenhoek, quien al mejorar el microscopio, pudo descubrir a los microorganismos. También visitó a Baruch Spinoza que hacía poco había terminado su obra maestra, *Ética demostrada según el orden geométrico*. Igualmente dedicó varios días a una intensa discusión del tema de ese libro que apreciaba por su profundidad y racionalismo, pero cuyas conclusiones no podía aceptar por sus convicciones cristianas.

6 – 3.1.- Leibniz y el cálculo diferencial.

En las matemáticas de Leibniz son importantes los estudios sobre sucesiones numéricas y sus sucesiones de diferencias consecutivas asociadas. Dada una sucesión de números:

$$a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_{n-1}, a_n, \dots$$

Se puede formar la sucesión de sus diferencias primeras:

$$b_1 = a_1, b_2 = a_2 - a_1, b_3 = a_3 - a_2, b_4 = a_4 - a_3, \dots, b_n = a_n - a_{n-1}, \dots$$

Leibniz se dio cuenta de la relación:

$$b_1 + b_2 + b_3 +, \dots, + bn = a_n$$

de modo que el proceso de formar la sucesión de diferencias y después sumarla recuperaba la sucesión inicial, es decir, que se trataba de dos operaciones inversas entre sí. Esta sencilla idea, Leibniz la llevó al campo de la geometría y se convirtió en el concepto central de su cálculo diferencial.

Leibniz consideraba a una curva como si fuera un polígono de infinitos lados, cada uno de ellos de longitud infinitesimal. Supuesta la curva como un polígono de tal tipo, le asoció una sucesión de abscisas $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ y una sucesión de ordenadas $y_1, y_2, y_3, y_4, \dots$ donde todos los puntos (x_i, y_i) están en la curva y constituyen los vértices de esa poligonal de infinitos lados. A la diferencia entre dos valores sucesivos de x la llamó *diferencial de x* y la representó mediante el símbolo dx, mientras que a los valores sucesivos de y los representó mediante el símbolo dy. El diferencial dx es una cantidad fija, no nula, infinitamente pequeña en comparación con x, de hecho es una cantidad infinitesimal. Los lados del polígono que constituye la curva son representados por ds. Resulta así el triángulo característico de Leibniz que es el mismo que ya había sido considerado por Isaac Barrow.

El triángulo característico tiene lados infinitesimales *dx, dy, ds* y cumple con la relación $(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$. El lado *ds* sobre la curva o polígono se hace coincidir con la tangente a la curva en el punto (*x, y*). La pendiente de dicha tangente viene dada por *dy*/*dx* que es un cociente de diferenciales, al que Leibniz llamó *cociente diferencial.*

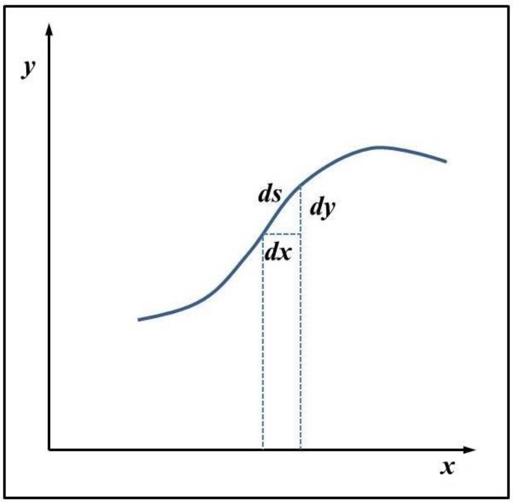


Figura 6.9. El "triángulo carácterístico" de Leibniz

A diferencia de lo que publicaría Newton en su *Cuadratura curvarum,* (1704), Leibniz nunca consideró a la derivada como un límite.

Leibniz investigó durante algún tiempo hasta encontrar las reglas correctas para diferenciar productos y cocientes. Dichas reglas se expresan fácilmente con su notación diferencial:

$$d(xy) = xdy + ydx \qquad d(x/y) = \frac{ydx - xdy}{y^2}$$

En cuanto a la integración, Leibniz la consideró como una sumatoria de rectángulos de ancho infinitesimal

A medida que la unidad de las abcisas se hace más pequeña, tanto más se aproxima la sumatoria de las áreas rectangulares bajo la curva al área real bajo esa curva. Leibniz razonó que si esa unidad fuese infinitesimal, las aproximaciones se tornarían exactas, la cuadratura sería igual a la suma de las ordenadas y, en cada punto de la curva la pendiente de la tangente sería igual a la diferencia de dos ordenadas sucesivas.

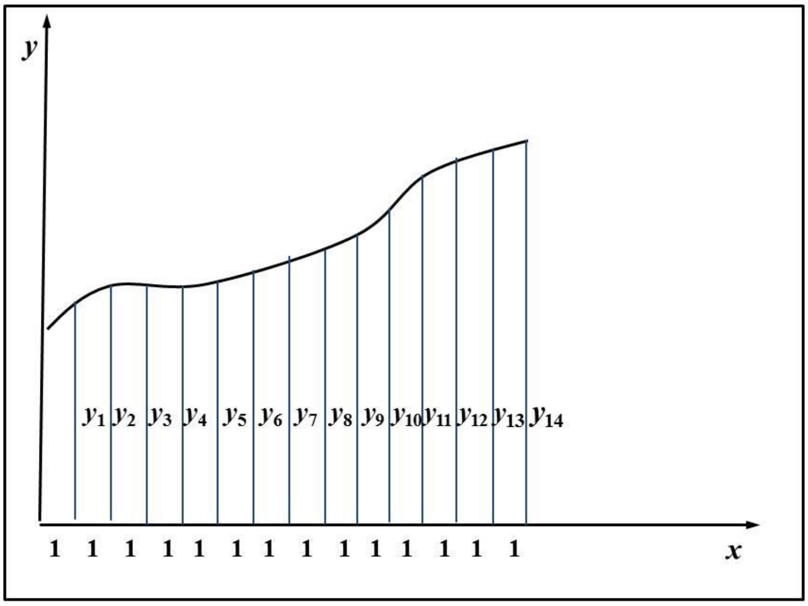


Figura 6.10. Método de aproximación a la cuadratura

De acuerdo con las notas de Leibniz, entre 1675 y 1676 él ya había desarrollado los aspectos esenciales del cálculo diferencial e integral, al punto que en junio de 1676 le envió a Henry Oldenburg una carta dirigida a Newton en la que describió su método.

La primera publicación formal sobre el cálculo diferencial la hizo en noviembre de 1684, en un artículo del *Acta Eruditorum* titulado *Nova Methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quæ nec fractal nec irrationales quantitates moratur et singulare pro illis calculi genus*. En este trabajo Leibniz reconoció que Newton había trabajado sobre el mismo tema. En 1686 pblicó *De Geometria recóndita er Analysi indivisibiliun atque infinitorum,* en el que agregó, a su trabajo de 1684, sus estudios sobre la integración. En este trabajo aparecen el teorema fundamental del cálculo y, por primera vez, el signo integral. En el *Acta Eruditorum* Nº IX, de septiembre de 1693, publicó *Supplementum geometriæ Dimensoriæ, seu generalissima ómnium Tetragonismorum effectio per motuum: Similiterque multiplex constructio lineæ ex data tangentium conditione*¸ donde muestra que el problema general de la cuadratura puede ser reducido a encontrar una curva que tenga “una dada ley de tangencia”. Una forma moderna de esta expresión sería que “el problema general de la integración definida puede ser reducido a encontrar una función que tiene una determinada derivada, es decir, encontrar una función antiderivada que es, eseciamente, el Teorema fundamental del Cálculo.

6 – 3.2- La monadología.

En su juventud, las convicciones religiosas de Leibniz lo habían hecho aceptar la doctrina aristotélica, pero el conocimiento de que es posible obtener el vacío y sus experiencias sobre la Alquimia, hicieron que se volcase hacia el atomismo. Sin embargo, sus reflexiones acerca de las características del alma, lo llevaron a rechazar la idea materialista de que sólo existen átomos y vacío.

En 1714, Leibniz publicó un trabajo sobre sus opiniones filosóficas y metafísicas, bajo el título “La monadología. Allí volcó sus reflexiones maduras sobre la naturaleza de la materia. En esta obra define a la mónada:

“La mónada, de que hablaremos aquí, no es otra cosa que una sustancia *simple*, que entra a formar los compuestos; simple, significa sin partes”. Luego justifica la existencia de entes simples: “Es necesario que haya sustancias simples, dado que hay compuestas; pues lo compuesto no es otra cosa que un montón o *aggregatum* de sustancias simples.” Usó un argumento no muy convincente para asignarle las características de “elementos indestructibles” a las mónadas: “…donde no hay partes no hay ni extensión, ni figura, ni divisibilidad. Y estas mónadas son los verdaderos átomos de la naturaleza y, en una palabra, los elementos de las cosas… no hay manera alguna concebible por la cual una sustancia simple pueda perecer naturalmente” Sostuvo que las mónadas experimentan cambios en forma instantánea: “…las mónadas no podrían comenzar ni acabar sino de repente, o sea, sólo podrían comenzar por creación y acabar por aniquilamiento; mientras que lo compuesto comienza o acaba por partes”. Las mónadas no pueden experimentar cambios en sus naturalezas: “…ni sustancia ni accidente alguno puede entrar a una mónada desde fuera.”. Esas mónadas tienen *cualidades*, “pues de lo contrario ni siquiera serían seres. Y si las sustancias simples no se distinguieran por sus cualidades, no habría medio de advertir ningún movimiento en las cosas…” Dado que en la Naturaleza no existen dos seres que sean perfectamente iguales, cada mónada es diferente, de las demás. Si bien todo ser creado está sujeto a cambios, también las mónadas que lo constituyen pueden experimentar cambios, no en sus naturalezas, sino en algunas de sus cualidades, pero esos cambios provienen de un *principio interno,* ya que ninguna causa externa podría influir en su interior. Como “todo cambio se lleva a cabo por grados, hay algo que cambia y algo que permanece. Por consiguiente, es necesario que en la sustancia simple haya una pluralidad de afecciones y relaciones, aunque no existan partes en ella.”

A la acción del principio interno que produce el cambio de una percepción a otra, Leibniz la llamó *apetición* y sostuvo que la percepción es inexplicable por razones mecánicas, que las mónadas son sustancias simples que poseen percepción, pero que son distintas al alma, ya que el alma, además de percepción posee memoria.

Leibniz afirmó que el razonamiento humano se funda en dos grandes principios: el de *contradicción,* en virtud del cual “juzgamos falso lo que encierra contradicción, y verdadero, lo opuesto o contradictorio a lo falso” y el de *razón suficiente,* en virtud del cual consideramos que “ningún hecho puede ser verdadero o existente y ninguna enunciación verdadera sin que haya una razón suficiente para que sea así y no de otro modo; aunque las más veces esas razones no podamos conocerlas”. Sostuvo que hay dos clases de verdades: las de *razón* y las de *hecho.* Las verdades de razón son necesarias y su opuesto es imposible; y las de hecho son contingentes y su opuesto es posible. “Cuando una verdad es necesaria puede encontrarse su razón por medio del análisis, resolviéndola en ideas y verdades más simples, hasta llegar a las primitivas”.

Una buena parte de la Monadología está dedicada a probar la existencia de Dios y su omnipotencia y a las características del alma.

6 – 4.- Isaac Newton.

Isaac Newton nació el 25 de diciembre de 1642 (calendario Juliano) en Woolsthorpe, Lincolnshire, Inglaterra. Sus padres fueron John Newton y Harriet Ayscough. De los ascendientes sólo se conoce a su abuelo Robert Newton, de familia escocesa originaria de Newton, en Lancashire, aunque vivió algún tiempo en Westby, condado de Lincoln.


Figura 6.11. Isaac Newton

El padre de Isaac falleció a los 36 años, unos meses después de su casamiento. Probablemente, por el estado emocional la mujer dio a luz un bebé prematuro y tuvo que hacerse cargo de la educación del pequeño en un entorno de estrechez económica. Cuando Isaac tenía tres años, su madre se volvió a casar con el Reverendo Barnabe Smith, Rector del North Witham y lo dejó al cuidado de su abuela materna. Luego de hacer sus estudios primarios en dos escuelas, a los doce años ingresó a la escuela pública de Grantham. Si bien el nivel educacional allí era muy bueno, Newton no se destacó como alumno, sino que su evolución estuvo por debajo de la media. Un día, el alumno que, en el ranking de la clase, estaba inmediatamente por encima de él, le dio una fuerte patada en el estómago. Newton no expresó manifestaciones de dolor sino que se dedicó con ahínco al estudio para superar a quien lo había golpeado y, al poco tiempo, pasó a ser el primero de la clase. Con el tiempo adquirió una notable habilidad para el manejo de las herramientas. Cuando se comenzó a construir un molino de viento en las proximidades de la escuela, Newton que habitualmente observaba la construcción produjo un modelo a escala que imitaba perfectamente al molino. No conforme con ello, propuso reemplazar las aspas del molino por un sistema movido por caballos. En esa época comenzó a diseñar un reloj de agua. Con el tiempo fue modificando su aparato el que finalmente funcionó a la perfección, siendo conocido por los vecinos como *El reloj de Isaac*.

En 1656, su madre enviudó nuevamente y por angustias económicas tuvo que mudarse a Woolsthorpe. Newton tenía entonces quince años y había hecho grandes progresos en sus estudios. Pero la situación económica de la madre la obligó a retirarlo de la escuela para que trabaje en la finca. Las actividades que desarrolló allí no le satisficieron y la madre, al darse cuenta de su situación y su estado de ánimo hizo un esfuerzo económico y lo volvió a inscribir en el Grantham School. Allí estuvo estudiando un tiempo y se preparó intensamente para ingresar al Trinity College, Cambridge, donde fue admitido el 5 de junio de 1660. En Cambridge estudió intensamente Astrología judicial[25] y luego su interés fue derivando cada vez más hacia las Matemáticas. Estudió las proposiciones de Euclides y, con mucho detalle, la *Geometría Analítica* de Des Cartes, la *Aritmética de infinitésimos* de Wallis, la *Lógica* de Saunderson y la *Óptica* de Kepler. El libro de Wallis fue el germen de su teoría sobre el cálculo infinitesimal. Su progreso en estos temas fue tan grande que resultó más versado en algunos de ellos que los tutores que le habían sido asignados.

En Cambridge estableció una gran amistad con el Dr. Isaac Barrow, que fue Profesor de Griego y que, en 1663, fue nombrado Profesor de la cátedra lucasiana del Trinity College. Barrow dio una serie de conferencias sobre Óptica y sus manuscritos fueron revisados — y en algunos puntos corregidos — por Newton. Esos trabajos fueron publicados recién en 1669. Además de la gran amistad, Barrow fue el mentor de muchas ideas filosóficas de Newton, especialmente sus concepciones sobre el espacio absoluto y el tiempo absoluto.

Newton obtuvo su Bachelor en 1665 y en 1666 expuso sus ideas sobre su *Method of Fluxions*, Años más tarde, al suscitarse la polémica con Leibniz, Newton diría que había desarrollado su método mucho antes de 1666. El análisis infinitesimal había sido empleado intuitivamente por Arquí-

[25] A diferencia de la Astrología de horóscopos, que trata de establecer la correlación entre la evolución de una persona y la posición de las estrellas en el momento de su nacimiento, la Astrología Judicial (o de Pronósticos) estudia la relación entre los fenómenos astronómicos y los cambios en la Tierra (las mareas según los movimientos lunares, la época de la siembre por el comienzo del invierno marcado por el levantamiento temprano de las Pléyades, el tiempo de trilla a principios del levantamiento de Orión, etc.

medes con el cual pudo determinar un valor aproximado para el número π [26], por Pappus de Alejandría y, entre los autores más modernos, por Kepler, Cavaleri, Roberval, Fermat y el propio Wallis, quien había mejorado la labor de sus predecesores. Newton, continuó y amplió los trabajos de Wallis a establecer el teorema del binomio. Aplicando este teorema a la rectificación de curvas y a la determinación de superficies y volúmenes de sólidos y a las posiciones de sus centros de gravedad descubrió el principio general que le permitía establecer el área bajo cualquier curva entre dos valores límites cualesquiera de las abcisas. Considerando a las líneas como generadas por el movimiento de puntos, a las superficies por el movimiento de líneas, a los sólidos por el movimiento de superficies y considerando que las coordenadas de las curvas así formadas varían de acuerdo con una ley que depende de la ecuación de la curva, dedujo de estas ecuaciones, las velocidades con que se generan esas líneas o superficies. A la velocidad con que se genera cada cantidad le dio el nombre de *fluxión* y a las cantidades mismas las llamó *fluentes*.

En esa época los más prestigiosos filósofos naturales, se dedicaban también a las observaciones astronómicas perfeccionando continuamente sus telescopios de refracción. Para investigar si se podían mejorar las observaciones con lentes que no fueran de superficie esférica, Newton comenzó a experimentar la refracción a través de superficies de cuerpos poliédricos. Al probar con un prisma triangular de vidrio encontró que "*la luz no es homogénea sino que consiste en rayos, algunos de los cuales son más refractables que otros*.[27] Obviamente, este tipo de lentes no eran aptos para la construcción de telescopios ya que cada rayo generaría un foco distinto, por lo que descartó el uso de estos prismas para telescopios de refracción. Pero como los prismas cumplen con las leyes de la reflexión supuso que en los telescopios se podían emplear superficies reflectantes que "*darían a los instrumentos ópticos en grado de perfección imaginable"*. Pero en ese tiempo tuvo que abandonar Cambridge debido a la epidemia de cólera que azotó a toda Inglaterra.

En 1667, fue nombrado *Junior Fellow* y en 1668 obtuvo su *Master of Arts*. Al regresar a Cambridge comenzó a trabajar en su telescopio de reflexión, un pequeño dispositivo que construyó personalmente. La longitud del tubo era de seis pulgadas y magnificaba hasta 40 veces, algo que para que un telescopio de refracción detectase con nitidez requería un tubo de 6 pies de largo. Con el aparato que construyó, pudo hacer observaciones de Júpiter con sus cuatro satélites y las fases de Venus. Dio cuenta de sus observaciones en una carta a un amigo, fechada el 23 de febrero de 1669. En ella hace alusión a sus descubrimientos concernientes a "*a la naturaleza de la luz*".

Entusiasmado por el éxito de sus primeros experimentos, construyó un nuevo telescopio de la misma clase, pero más potente. En 1671, la Royal Society, enterada de tipo de telescopio que estaba

[26] En su arenero, Arquímedes dibujó una circunferencia, inscribió en ella un cuadrado e inscribió esa figura en otro cuadrado. El perímetro de la circunferencia era intermedio entre los perímetros de los dos cuadrados. Luego reemplazó los cuadrados por octógonos, con lo que las diferencias entre el perímetro de la circunferencia y las de los octógonos se redujo. Fue reemplazando los octógonos por polígonos regulares hasta dos de 96 lados — los máximos que podía dibujar en el arenero con cierta precisión. De allí encontró que p estaba comprendido entre $3\,^{10}/_{71}$ y $3\,^{1}/_{7}$, es decir, entre 3,1408… y 3.1429…

[27] La refracción de la luz a través de superficies curvas, planas y prismas y la dispersión de sus colores fue estudiada por Abú Alī al-Ḥasan ibn al-Ḥasan ibn al-Haytham, conocido en Europa como Alhazen a principios del siglo X en su obra *Kitab al-Manazir*, que traducida al latín, fue publicada en 1572 por Friedrich Riesner, bajo el título *Opticæ Thesaurus Halasen,*

utilizando, le pidió examinarlo. Newton accedió y su invento generó tan entusiasmo que el aparato le fue presentado al Rey, quien pudo hacer algunas observaciones con el mismo. Un esquema con la descripción de su funcionamiento fue enviado a Paris, a la Académie des Sciences. El telescopio mismo fue cuidadosamente preservado en la Biblioteca de la Royal Society.

En julio de 1669, Newton hizo público su método de cálculo para obtener cuadraturas de curvas y resolver ecuaciones. Tituló su trabajo como *Analysis per Equationes Numero Terminorum Infinitas* y se lo comunicó a Isaac Barrow. Barrow se lo envió al Profesor John Collins, quien aprobó el trabajo y le dio amplia difusión a través de sus contactos con matemáticos de Inglaterra, Escocia, Francia , Holanda e Italia.

Ese mismo año, Barrow decidió dedicarse a la Teología y renunció a la cátedra de Matemática a favor de Newton quien obtuvo el nombramiento de las autoridades del Trinity College.

Durante los años 1669, 1670 y 1671, en la Cátedra lucasiana Newton se ocupó del dictado de temas de Óptica. Si bien en ella explicaba también sus propios trabajos sobre el tema, los mismos no fueron formalmente conocidos hasta unos meses antes de su admisión a la Royal Society en marzo de 1672. Su trabajo sobre la luz, despertó un enorme interés en la Society quien lo publicó en su número mensual de los *Transactions*[28].

En 1671 retomó los trabajos del jesuita Francesco María Grimaldi (1618 – 1663) sobre los fenómenos llamados inflexión y difracción de la luz[29], quien hizo pasar un haz de rayos solares a través de un pequeño orificio en una cámara oscura. La luz divergía del orificio en forma de cono, y los objetos que Grimaldi interpuso a esta luz daban sombras más largas que lo esperado, con tres bordes coloreados, siendo el más próximo el más ancho y el borde más alejado el más estrecho. Estos experimentos serían luego usados como argumentos muy fuertes en favor de la teoría ondulatoria de la luz.

Newton repitió los experimentos de Grimaldi midiendo el ancho de la sombra de un cabello humano, y el ancho de los bordes estando estas a diferentes distancias del cabello. Descubrió que los anchos de la sombra y de los bordes no eran proporcionales a las distancias del cabello. Supuso que los rayos que pasan por los bordes de los cabellos eran reflectados o alejados del mismo, como por una fuerza repulsiva. Los rayos más próximos al borde eran los que sufrían el mayor grado de deflexión y los rayos que pasaban más alejados del borde eran los que sufrían la menor deflexión.

La publicación de sus concepciones sobre la naturaleza corpuscular de la luz, provocaron la crítica de varios científicos de la época, particularmente Robert Hooke, a la sazón curador de la Royal Society y Christiaan Huygens[30].

---

[28] Isaac Newton, "New Theory about Light and colours" *Phil. Trans.*80, **1672**, pp. 3075-87.

[29] **Grimaldi, F. M.,** (**1665**): *Physico-mathesis de lumine coloribus et iride*, Victorii Benatij, Bologna.

[30] Newton se arrepintió de haber dejado publicar su teoría corpuscular sin haberla fundamentado lo suficiente. Al respecto escribió: "*I was so persecuted with discussions arising from the publication of my theory ot light, that I blamed my own imprudence for parting with so substantial a blessing as my quiet to run after a shadow*." Desde su publicación recibió cuatro observaciones de Huygens. La última de ellas era lo suficientemente crítica a su teoría para que el 8 de

Tratando de explicarse los colores de los bordes, Newton se preguntó si los rayos que difieren en refracción no difieren también en cuanto a su reflexión. Después de repetir los experimentos en condiciones diferentes, en febrero de 1675 comunicó su teoría sobre los colores a la Royal Society en un trabajo titulado *Theory of the Colours of Natural Bodies*. Los principios esenciales de su teoría fueron los siguientes: Los cuerpos que poseen los mayores poderes de refracción, reflejan la mayor cantidad de luz; las partículas más pequeñas de casi todos los cuerpos naturales son, en algún grado, transparentes; entre las partículas de los cuerpos hay poros, o espacios, que o están vacíos o llenos de un medio menos denso que las partículas mismas. Tanto esas partículas como los poros, o espacios tienen tamaños definidos.

A partir de estos supuestos, Newton "dedujo" las transparencias, las opacidades y los colores de los cuerpos naturales. La transparencia se debe a que las partículas y sus poros son demasiado pequeñas como para causar la reflexión de la luz en las superficies donde se contactan, por lo que la luz pasa a través de ellas; la opacidad se debe al tamaño excesivamente grande de los poros para reflejar la luz, la que es absorbida por los cuerpos. El color resultante se debe a los diversos tamaños de las partículas que absorben determinados colores y reflejan otros. El color que llega al ojo, es el color reflejado mientras que todos los otros rayos son transmitidos o absorbidos por el cuerpo sobre el que la luz incide.

Análogamente al origen de los colores de los cuerpos naturales, Newton investigó los colores que toman las láminas delgadas. De sus observaciones dedujo la ley de producción de dichos colores y la informó a la Royal Society. Su procedimiento era sencillo y curioso. Colocó una lente biconvexa de un radio de curvatura grande sobre la superficie plana de un cristal plano-convexo. Así, a partir del punto de contacto de las lentes, se produjeron láminas de aire, o espacios, cuyos espesores variaban desde un tamaño excesivamente pequeño a tamaños cada vez más grandes. Al incidir la luz, cada lámina de espesor diferente tomaba un color distinto. El punto de contacto de la lente biconvexa y el cristal plano convexo se convertía en el centro de un conjunto numeroso de anillos concéntricos coloreados. A partir de los radios de curvatura, pudo calcular el espesor de cada lámina de aire de color diferente con bastante exactitud. Registrando el orden en que aparecen los diferentes colores, repitió los ensayos usando agua y mica en vez de aire, comprobando que el orden de formación de esos colores es independiente de la naturaleza del medio. De los fenómenos observados en estos experimentos Newton dedujo su Teoría de la adecuación de la reflexión y la transmisión de la luz. Mediante esa teoría, supuso que cada partícula de luz, emitida por un cuerpo luminoso, posee a igual intervalo de distancia una igual disposición a ser reflejada desde o transmitida a través de las superficies de los cuerpos sobre los que incide.

---

marzo de 1673, Newton le escribiera a Henry Oldenburg, el Secretario de la Royal Society, pidiéndole que lo excluya como Socio: " *Sir I desire that you will procure that I may be put out from being any longer fellow of the Royal Society. For though I honour that body, yet since I see I shall neither profit them, nor* (*by reason of this distance*) *can partake of the advantage of their Assemblies, I desire to withdraw. If you please to do me this favour you will oblige* ..."

La comprobación experimental de Newton de que la difracción de la luz "blanca" da lugar a un conjunto de haces de diversos colores que van desde el rojo al azul, lo llevó a razonar que siendo el color una *cualidad* y que sólo los objetos poseen cualidades, la luz es de naturaleza material consistente en pequeñísimas partículas materiales emitidas por los cuerpos luminosos. Sobre esta base pensó que esas partículas podrían recombinarse formando materia sólida. En consecuencia, los cuerpos consistentes y la luz eran interconvertibles. Por ello, las partículas de la luz y las de los cuerpos sólidos interactuaban: la luz agitando y calentando a las de los cuerpos y estos últimos atrayendo o repeliendo a la luz. Curiosamente, Newton aceptó la idea de la polarización de la luz, fenómeno característico de las perturbaciones ondulatorias.

En el artículo *An Hypothesis Explaining Properties of Light*, publicado en diciembre de 1675, Newton introdujo la hipótesis del éter, opinión que poco después abandonó y luego volvería a retomar. Para él, el éter era "el espíritu más sutil que invade todos los cuerpos y que se expande por todos los cielos" Consideraba que era eléctrico, prácticamente inmensurable, elástico y raro. "Por la fuerza y acción de este espíritu las partículas de los cuerpos se atraen mutuamente y cohesionan si están próximos y permite que los cuerpos electrizados operen a distancias más grandes, tanto repeliendo como atrayendo a los cuerpos vecinos; permiten la emisión de la luz, su reflexión, refracción o inflexión y el calentamiento de los cuerpos y excitan todas las sensaciones[31]

Newton, también dedicó su tiempo a investigaciones alquímicas, aunque no publicó ningún libro o artículo sobre el tema. Pero a través de sus notas se comprobó que estaba muy interesado en descubrir cuáles eran los elementos constitutivos de la materia, si eran los cuatro aristotélicos o la tría prima de Paracelso. A partir de 1676, comenzó a intensificar sus investigaciones sobre los elementos. Cuando en 1678, Robert Boyle publicó "*Of a Degradation of Gold made by an anti-elixir: a strange chymical narrative*", en el que sugería la manera de efectuar la transmutación inversa, es decir, transformar oro en un metal vil, Newton sospechó que Boyle conocía la manera de transmutar metales en oro, pero que, por diversos motivos, no lo daba a conocer.

La curiosidad de Newton por los trabajos de Boyle sobre la alquimia quedó patentizada por las cartas que intercambió con John Locke, con Samuel Pepys, con John Millington y con el mismo Boyle.

De sus notas de laboratorio, se desprende que Newton trabajaba con cantidades muy grandes de reactivos, plomo, estaño, arsénico, mercurio y otros. No es de extrañar, entonces, que las sustancias volátiles produjeran algún daño en su salud. Esto se manifestó, como insomnio, inapetencia, poca coordinación en sus movimientos, problemas digestivos, irritabilidad y en su correspondencia redactada de manera inusual con frases fuera de estilo, algunas de ellas, con signos de irracionalidad.

[31] En una carta a Robert Boyle del 28 de febrero de 1678/9 Newton sintetiza sus suposiciones sobre el éter: " … first I suppose that there is diffused through all places an æthereal substance capable of contraction & dilatation, strongly elastick, & in a word much like air in all respects, but far more subtile… this æther pervades all gross bodies, but yet so as to stand rarer in their pores then in free spaces, & so much the rarer as their pores are less …this is … the cause why light incident on those bodies is refracted towards the perpendicular … why two well polished metalls cohere in a Receiver exhausted of air: why Quicksilver stands sometimes up to the top of a glass pipe though much higher than 30 inches: & one of the main causes why the parts of all bodies cohere…"

La crisis se hizo evidente entre 1692 y 1693. Algunos biógrafos de Newton, como David Brewster, achacaron la crisis a factores psicológicos.

Si bien muchos estudiosos intuyeron que el comportamiento anómalo de Newton se debió a una intoxicación, particularmente, mercurial, los argumentos más contundentes se dieron recién en 1979. Ese año se publicaron dos trabajos en las Notes and Records of the Royal Society of London. Uno de ellos fue presentado por L. W. Johnson and M. L. Wolbarsht[32] y el otro por P. E. Spargo y C. A. Pounds[33]. Mientras que el primer trabajo hace un estudio de la correspondencia de Newton para demostrar que la misma muestra el comportamiento típico de una persona intoxicada con metales pesados, especialmente mercurio, el segundo presenta un estudio cuantitativo de la cantidad de elementos metálicos que se encontraban en el cabello de Newton. Sabido es que aquellos agentes tóxicos que el cuerpo humano no puede eliminar por las vías usuales, tienden a ubicarse en aquellas partes donde menos daño puedan producir, como el cabello o las uñas.

Spargo y Pounds analizaron muestras del cabello de Newton mediante la activación de neutrones y análisis de absorción atómica y encontraron altos niveles de elementos tóxicos (ver Tabla I) que muestran que él tenía alrededor de cuatro veces más plomo, arsénico y antimonio que los valores normales y 15 veces más mercurio. Dos muestras auténticas del cabello de Newton habían sido preservadas en el castillo de la familia del Conde de Portsmouth. También se habían guardado muestras de cabello de Newton en el Trinity College de Cambridge y un cabello se encontró en una de sus libretas de anotaciones, que se supone que era de su cabeza. Uno de los cabellos de Newton tenía una concentración de mercurio de 197 ppm y otro tenía una concentración de plomo de 191 ppm, lo que demostraría que en alguna etapa de su vida tuvo una intoxicación crónica de mercurio y de plomo.

Estos hallazgos no son sorprendentes porque de sus libretas de anotaciones alquímicas surge que él no sólo experimentaba con plomo, arsénico, y antimonio, sino que en algunos casos trataba de volatilizarlos calentando esos metales a alta temperatura. Newton también escribió que evaporaba mercurio sobre el fuego, algo realmente peligroso para la salud. Si bien no hay fechas de cuando se tomaron esas muestras de cabellos, es muy probable que fueran de su cabeza cuando falleció, en 1727. De modo que el nivel de mercurio al cual estuvo expuesto en el período de su crisis (1692/3) tendría que haber sido mucho mayor. En todos los casos los valores hallados revelan un nivel de exposición notablemente alto. Pero además de sus experimentos alquímicos, Newto estaba expuesto a otras fuentes de intoxicación mercurial, quizás la más importante haya sido la decoración de sus habitaciones. A Newton le encantaba que las paredes estuvieran pintadas de color rojo. Y uno de los colorantes usados en las pinturas era el sulfuro de mercurio.

---

[32] L. W. Johnson and M. L. Wolbarsht: "Mercury Poisoning: A Probable Cause of Isaac Newton's Physical and Mental Ills", *Notes and Records of the Royal Society of London* - Vol. 34, No. 1 (July 1979), pp. 1 – 9.

[33] P. E. Spargo y C. A. Pounds: "Newton's derangement of the intellect; New Light on an Old Problem" *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 34 No.1 (July 1979), 11 – 32.

Tabla 6.12. Análisis de elementos tóxicos en el cabello de Newton

	Mercurio	Plomo	Arsénico	Antimonio
Nivel normal (en ppm) *	5	24	0,7	0,7
Nivel en el cabello de Newton	73	93	3	4

* Valores promedio normales en 1979.

Si el extraño comportamiento de los años 1692/93 se debió al mercurio, su efecto debió haber sido poco permanente ya que vivió hasta los 84 años manteniendo un alto grado de lucidez, aunque para la Física no produjo nada novedoso[34].

No es fácil establecer qué grado de la paranoia de newton se debió a la intoxicación mercurial. Su niñez fue tan traumática que indudablemente debió haber influido en su comportamiento a largo de su vida. Su padre murió antes de que él naciera y su madre se volvió a casar cuando él tenía tres años y se fue a vivir con su esposo a otra ciudad. Como el padrastro no quiso saber nada del niño, la madre lo abandonó, dejándolo al cuidado de su abuela. Durante toda la vida tuvo tendencias psicóticas y, probablemente, su exposición al mercurio puede haber contribuido a su inestabilidad mental. No obstante su esfuerzo lo llevó a descollar entre los científicos de su época llegando a dirigir la Royal Mint en 1696, ser Presidente de la Royal Society en 1703 y ser nombrado Caballero en 1705.

Newton falleció el 20 de marzo de 1727 y sus restos descansan en la Abadía de Westminster.

6 – 4.1.- Newton y la fórmula del binomio.

En 1665, una epidemia de peste asoló a Gran Bretaña lo que forzó a las escuelas y Universidades a suspender las clases. Por ello, Newton regresó a Woolsthorpe el 20 de junio de 1666. Allí desarrolló las primeras nociones de lo que hoy llamamos *Cálculo infinitesimal*. Las bases de esta rama de la Matemática las había recibido de John Wallis (1616 – 1703). Wallis había publicado en 1656 su libro *Arithmetica Infinitorum*. En esa obra, aplicando métodos algebraicos en vez de los tradicionales métodos geométricos, contribuyó sustancialmente a resolver problemas matemáticos que involucraban *infinitésimos*, es decir, aquellos problemas que involucraban cantidades incalculablemente pequeñas.

El llamado *binomio de Newton* fue encontrado por el matemático persa Abū Bakr Muḥammad ibn al-Ḥasan al-Karji (c.953 – c.1029). En su obra *Al-Fakhri fi'l-yabr wa'l-muqabala* (la gloria del álgebra), desarrolló el binomio $(a + b)^3$ y en *Al-Badi fi'l-hisab* (La maravilla del cálculo), publicó los coeficientes de los desarrollos de los binomios $(a – b)^3$ y $(a + b)^4$. Al-Karji también desarrolló el triángulo de Pascal el que también fue publicado, en 1275, por el matemático chino Che Shih-Chieh, en el libro "El precioso espejo de los cuatro elementos". En estos binomios, los exponentes eran números enteros y positivos. El mérito de Newton fue generalizar una fórmula de modo que el exponente fuera cualquier número real. En su tratamiento, una expresión polinómica podía trans-

---

[34] Si bien en 1704 publicó su öptica, esa obra es fundamentalmente una recopilación de sus estudios y trabajos realizados entre 1665 y 1690.

formarse en una serie infinita. Mediante este artificio, pudo calcular las áreas bajo diversas curvas entre límites definidos[35].

Newton afirmó haber deducido la fórmula del binomio en el invierno de 1664. Pero sólo la dio a conocer en dos cartas, la *Epistola prior* de junio de 1676 y la *Epistola posterior* de octubre de 1676, que envió al Secretario de la Royal Society, Henry Oldenburg, para que se las transmitiera a Leibniz.

Newton pudo generalizar el desarrollo de $(a+b)^n$ no sólo para valores pequeños y enteros de n mediante la expresión

$$(a+b)^n = a^n + \frac{n}{1}a^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{1\cdot 2}a^{n-2}b^2 + \cdots + b^n$$

Sino que la generalizó para exponentes fraccionarios $\alpha = p/q$

$$(a+b)^\alpha = a^\alpha + \frac{\alpha}{1}a^{\alpha-1}b + \frac{\alpha(\alpha-1)}{1\cdot 2}a^{\alpha-2}b^2 + \cdots +$$

Newton encontró este resultado cuando intentaba establecer la cuadratura de la función $y = (1-x^2)^{1/2}$. Comparó las fórmulas para $y = (1-x^2)^0$, $y = (1-x^2)^{1/2}$, $y = (1-x^2)^{2/2}$, $y = (1-x^2)^{3/2}$, $y = (1-x^2)^{4/2}$… De las expresiones primera, tercera, quinta, etc., pudo hallar sus cuadraturas entre 0 y x, ya que eran sumas de cuadraturas de términos en x^n que eran ya conocidas. Al observar que

La cuadratura de $\mathbf{y = (1-x^2)^0}$, es x

La cuadratura de $\mathbf{y = (1-x^2)^{2/2}}$ es $x - \frac{1}{3}x^3$

La cuadratura de $\mathbf{y = (1-x^2)^{4/2}}$ es $x - \frac{2}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5$

La cuadratura de $\mathbf{y = (1-x^2)^{6/2}}$ es $x - \frac{3}{3}x^3 + \frac{3}{5}x^5 - \frac{1}{7}x^7$

etc.

Cuando Newton examinó los coeficientes de estas cuadraturas, encontró que los denominadores son todos impares 1, 3, 5, 7, 9, etc., mientras que los numeradores son los números combinatorios que figuran en el triángulo de Pascal, dados por

[35] El matemático Pappus de Alejandría (c.290 – c.350) siguiendo a Arquímedes usó una serie infinita en su demostración de la propiedad del centro de gravedad de una figura plana, por medio de la cual se podía determinar el sólido que se forma por su revolución.

$$1,\ n,\ \frac{n(n-1)}{1\cdot 2},\frac{n(n-1)(n-2)}{1\cdot 2\cdot 3},\cdots$$

Por analogía, supuso que deberían obtenerse resultados similares cuando los exponentes fueran fraccionarios o negativos.

Buscando la cuadratura de la función $(1 - x^2)^{1/2}$, observó que sólo podía lograrla mediante el desarrollo de una serie con una cantidad enorme de términos, del tipo

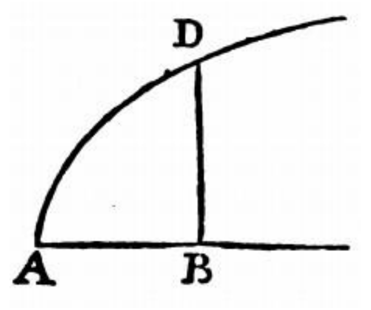


Figura 6.12.

$$(1-x^2)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{8}x^4 - \frac{1}{16}x^6 - \cdots$$

En la que la serie debería tener un desarrollo infinito. Así comprobó que empleando un número suficientemente grande de términos, al multiplicar la serie por $(1 - x^2)^{1/2}$, luego de algunas simplificaciones obtenía $1 - x^2$.

De este modo, Newton encontró una herramienta poderosa que le permitían emplear series infinitas para encontrar la cuadratura de una gran variedad de curvas.

6. – 4.2.- El método de las fluxiones.

En una carta fechada el 31 de julio 1669, Newton les dio a conocer al Dr. Barrow y al Profesor. John Collins las ideas matemáticas que había volcado en un trabajo que se conocería como *De Analysi per Aequationes Numero Terminorum Infinitas*.[36] En este trabajo presentó un método general para obtener curvaturas de funciones mediante el desarrollo de series infinitas. En este ensayo están expresadas sus ideas fundamentales acerca del cálculo infinitesimal.

El ensayo comienza con unas reglas para obtener la cuadratura de curvas simples. Sobre la base del diagrama de la Figura 6.

"Sea AB la base de una curva AD cuya ordenada es BD y llama a AB = x y a BD = y . Sean *a, b, c*, &, cantidades dadas y *m* y *n* números enteros, aplica las siguientes reglas:"

Regla Nº 1.

Para la cuadratura de curvas simples

Sea $ax^{\frac{m}{n}} = y$; entonces será $\dfrac{an}{m+n}x^{\frac{m+m}{n}}$ = ***Área ABD***

---

[36] Fue publicada en latín en 1711 y en inglés en 1745.

Regla Nº 2

"Para la cuadratura de una curva compuesta por curvas simples.

Si el valor de *y* resulta de varios de tales términos, é área total estará dada por la suma de las áreas que resultan de cada uno de los términos."

Para la cuadratura de todas las demás curvas, estableció la

Regla Nº 3

"Pero si el valor de *y*, o alguno de sus términos, fuera más compuesto que los anteriores, deberá ser reducido a términos más simples, mediante la realización de las operaciones con letras, de la misma manera en que los aritméticos dividen en números decimales, extraen la raíz cuadrada o resuelven las ecuaciones afectadas. Luego, mediante las reglas precedentes descubrirá las Superficies buscada de la curva."

Para cada uno de estos casos, Newton agregó varios ejemplos.

Luego dio un conjunto de ejemplos para la resolución de ecuaciones. Explicó la manera de emplear su método para encontrar la longitud de una curva, y como obtener el valor de la abcisa *AB* a partir de la longitud de la curva o del área bajo la curva.

Posteriormente, Newton desarrolló una ampliación del método de *De Analysi* con una formalización más rigurosa. Este tratado se conoce como *Methodus fluxionum et serierum infinitorum,* que se publicaría recién en 1736. Newton consideró a los cambios en las variables como cantidades que van fluyendo a lo largo de tiempo, a las que llamó *fluentes* e introdujo las relaciones de cambio instantáneo de dichos fluentes, a las que llamó *fluxiones*. Estas fluxiones son las derivadas de los fluentes respecto del tiempo. Newton eligió representar a los fluentes mediante las últimas letras de alfabeto, $x, y, z, \ldots$ y a las fluxiones colocando un punto sobre la letra del fluente $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \ldots$ Los incrementos de los fluentes $x, y, z, \ldots$, los representaba mediante los símbolos $\dot{x}o, \dot{y}o, \dot{z}o, \ldots$, a los que llamó *momentos*, en los que la *o* representaba un incremento infinitesimal de tiempo. Mediante su método fluxional, Newton pudo establecer la manera de determinar máximos y mínimos de curvas, calcular áreas bajo cualquier curva entre dos variables dadas, determinar la tangente a una curva en un punto dado, calcular el centro de gravedad de figuras en el plano, longitudes de arcos y muchas aplicaciones más.

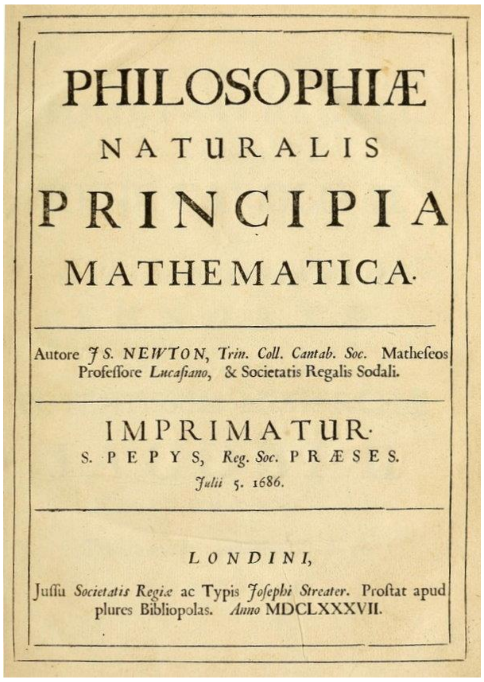
En esta obra el concepto fundamental es el de una cantidad en movimiento que fluye continuamente en el tiempo. Newton trató de evitar el uso de cantidades físicas infinitesimales, por las dificultades en determinar sus dimensiones. Por ello, en su tratamiento las magnitudes están generadas por el movimiento continuo y no por agregación de cantidades infinitesimales, aunque en realidad sustituyó los infinitesimales geométricos por infinitesimales de tiempo.

En *De Cuadratura curvarum*, publicada en 1704, Newton abandonó explícitamente el uso de cantidades infinitesimales al afirmar "*errores quam minimi in rebus mathematicis non sunt contem-*

nendi"[37] y enunció su teoría acerca de las razones primera y última de las cantidades evanescentes. En esta teoría estableció su concepto de *límite*. Así definió: " *Por velocidad última se entiende aquella con la que el cuerpo se mueve no antes de alcanzar el punto final en el que el movimiento cesa, ni después de haberlo alcanzado, sino la velocidad con que se mueve cuando alcanza el punto final y cesa el movimiento. Por última proporción de cantidades evanescentes debemos entender el cociente de estas cantidades, no antes de que desvanezcan, ni después que lo hagan, sino tal como van desvaneciendo*." Esto se puede interpretar como la derivada de una función entendida como límite.

6 – 4.3.- Los Principia.

En 1686, Newton decidió publicar sus ideas acerca de la Mecánica que, con el auspicio de la Royal Society, saldrían a la luz en 1687 bajo el título *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Según sus propias afirmaciones, los conceptos fundamentales que expuso en esta obra, los había desarrollado unas dos décadas antes.



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Figura 6.13. Los "Principia".

Todo indicaría que son dos las causas que provocaron tanto la demora de la publicación como en la elección del título. La intención de Newton habría sido publicar un libro en el que se desarrollarían los principios de la Física, llamada por entonces "Filosofía Natural" por lo que el título debería ser Principia Philosophiæ naturalis, pero para ello Newton tendría que poder dar una justificación de la ley del cuadrado inverso, regularidad que se podía deducir de las leyes de Kepler y que también había sido deducida por Hooke, Wren y Halley. Pero una cosa es describir un comportamiento de la Naturaleza y otra es justificarlo en el marco de una teoría física. La interacción entre cuerpos vinculados de alguna manera, se podía justificar mediante los conceptos de la Física de esa época. En cambio, ni Newton (ni ningún otro científico) podía explicar la fuerza de interacción entre dos cuerpos que no están en contacto. El empirismo antiaristotélico regía en la ciencia europea de la época y en la Royal Society en particular, la que había adoptado como lema la frase de la Epístola de Horacio: *Nullius in verba*[38]. De modo que si Newton usaba la ley del cuadrado inverso como *principio*, sus detractores lo acusarían de utilizar variables ocultas para (no) explicarlo, lo que sería considerado casi como una herejía. Al no poder incluir la atracción universal como principio, el libro ya no describiría los "principios de la Física". Por eso, el título (traducido) es Principios matemáticos de filosofía natural, en el que Newton no

[37] En Matemáticas no deben ser admitidos ni siquiera los errores más pequeños.

[38] Con un agregado, cuya traducción es «... es una regla establecida de la Sociedad, a la que siempre se adherirá, nunca dar su opinión, como Cuerpo, sobre ningún tema, ni de Naturaleza ni de Arte, que llegue ante ella.»

justificaba mediante un marco teórico la interacción a distancia, sino que sólo daba las ecuaciones matemáticas que la describen.

En 1644, Des Cartes había publicado su "Principios de Filosofía" obra en la que expuso sus principios de la Física. Por las anotaciones que hizo Newton en el ejemplar de su pertenencia, se nota que le tenía una marcada antipatía, al punto que llegó a sostener que el Principio de inercia era de Galileo[39]. No debió haber sido fácil para Newton resignarse a no llamar a su obra "Principios de Filosofía Natural".

En su "Principia" Newton expuso sus ideas básicas sobre la Física y la Astronomía, escritas al estilo de la Geometría pura. A partir de un conjunto de proposiciones generales, presentó un conjunto de teoremas cuyas soluciones dan por resultado la descripción de los problemas más generales de la Mecánica, la Hidrostática, la Hidrodinámica y la Acústica. De esta manera, sistematizó un método para el estudio de la Naturaleza mediante la Matemática. La obra se divide en tres libros, que van precedidos por un capítulo preliminar en el que se formulan las definiciones y otro en el cual se expresan los axiomas y las leyes del movimiento. Para precisar el vocabulario empleado explicitó ocho definiciones.

El Primer libro es, quizás, el más conocido está dedicado al movimiento de los cuerpos. El segundo, del movimiento de los cuerpos en medios resistentes y el tercero, trata del Sistema del Mundo desde el punto de vista matemático.

Antes del desarrollo del primer libro, Newton estableció varias definiciones y los Axiomas que acepta para el desarrollo de la Mecánica.

Las definiciones dadas por Newton son:

I. La cantidad de materia de un cuerpo es una medida del mismo que surge conjuntamente de su densidad y su magnitud.

II La cantidad de movimiento de un cuerpo es la medida del mismo, que surge conjuntamente de su velocidad y de su cantidad de materia.

III. La fuerza ínsita (*Vis insita*) de la materia es un poder de resistencia que tienen todos los cuerpos, en virtud de la cual *per*severan en continuar en el estado que se encuentran, ya sea el de reposo o movimiento rectilíneo y uniforme.

IV. La fuerza impresa (*Vis impressa*) es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, ya sea de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme.

[39] En su Diálogo acerca de los dos grandes sistemas del mundo (1632) Galileo, al referirse a la fuerza como causa de movimiento, da una idea de la inercia como la que adquiere un cuerpo que se desliza por un plano liso y perfectamente pulido, manteniendo un movimiento rectilíneo y uniforme "ad infinitum" … Por supuesto, siempre que la Tierra fuese plana y no ejerciera atracción gravitatoria…

V. La fuerza centrípeta (*Vis centrípetæ*) es aquella por la cual los cuerpos son impelidos o arrastrados o tienden de cualquier manera hacia un punto que actúa como centro [de giro].

VI La cantidad absoluta de una fuerza centrípeta es una medida proporcional a la eficacia de la causa que la provoca desde el centro [de giro] hacia las regiones circundantes.

VII. La cantidad de aceleración de una fuerza centrípeta (*Vis centripetæ quantitas acceleratrix*) es una magnitud proporcional al cambio de velocidad que produce en un tiempo dado.

VIII. La cantidad motriz de una fuerza centrípeta (*Vis centripetæ quantitas motrix*) es una magnitud proporcional al movimiento que genera en un tiempo dado.

Luego de estas definiciones, Newton introdujo sus concepciones del tiempo (absoluto) y del espacio (absoluto)

El tiempo absoluto, verdadero y matemático en sí y por su propia naturaleza, sin relación a nada externo, fluye uniformemente y se dice con otro nombre: duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar, es cierta medida sensible y exterior de la duración que se percibe mediante el movimiento y es usado por el vulgo en vez del tiempo verdadero. Son medidas de este tipo la hora, el día, el mes y el año.

El espacio absoluto, tomado en su naturaleza, sin relación a nada externo, permanece siempre similar e inmóvil. El espacio relativo es cierta medida móvil o dimensión del absoluto que nuestros sentidos captan por su posición respecto a los cuerpos y que la gente vulgar confunde con el espacio inmóvil. De ese tipo es la dimensión de un espacio subterráneo, o aéreo, relacionado por su posición respecto de la Tierra.

El espacio absoluto y el relativo son idénticos suelen ser idénticos en aspecto y magnitud aunque no siempre permanecen así.[40]

El tema de la existencia del tiempo con independencia de los eventos dio lugar a una de las múltiples controversias entre Newton y Leibniz. Este último [41] objetó el concepto de que el tiempo existe aún en ausencia de eventos. Sostuvo que Aristóteles y Newton habían exagerado la vinculación entre tiempo y duración y habían subestimado el hecho que, en última instancia, el tiempo involucra

[40] Estas concepciones de espacio y tiempo absolutos, las tomó de su maestro Isaac Barrow. En esta concepción es un inmenso contenedor que existe aunque en él no haya cuerpos. De manera análoga, el tiempo absoluto, existe aunque no ocurra ningún evento. Estas ideas, le traerían a Newton la acusación de ateísmo, especialmente del Obispo Bentley, ya que si el espacio y el tiempo existieron siempre y existirán siempre, se estaría negando tanto la Creación como el Juicio final. Eso motivó que en la Segunda edición de los Principia, Newton introdujera lo que motivó que en la segunda edición de los Principia, en el *Scholium Generale,* Newton agregase “Dios es eterno e infinito, existiendo siempre y en todo lugar, Él constituye la duración y el espacio”.

[41] **Leibniz, G.W**. *Nuevo tratado sobre el entendimiento humano.* Traducción E. Ovejero y Mauri. Prólogo de L. Rensoli Laliga. Ed. De Ciencias Sociales. La Habana (**1988**).

también orden. El tiempo es un ordenamiento de cambios, el ordenamiento completo y total de todos los eventos no simultáneos. Es por ello que el tiempo requiere de eventos.

El tema de la existencia del tiempo con independencia de los eventos dio lugar a una de las múltiples controversias entre Newton y Leibniz. Este último [42] objetó el concepto de que el tiempo existe aún en ausencia de eventos. Sostuvo que Aristóteles y Newton habían exagerado la vinculación entre tiempo y duración y habían subestimado el hecho que, en última instancia, el tiempo involucra también orden. El tiempo es un ordenamiento de cambios, el ordenamiento completo y total de todos los eventos no simultáneos. Es por ello que el tiempo requiere de eventos.

El movimiento absoluto es la traslación de un cuerpo de un lugar absoluto a otro y el movimiento relativo, la traslación de un lugar relativo a otro.

Luego, Newton enuncia los “Axiomas” o “Leyes del movimiento”[43]. El primero de estos enunciados establece:

Ley Primera:

Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impresas.[44]

Con otras palabras, esto mismo ya había sido enunciado por Des Cartes en 1644: "Cada cuerpo en particular persiste tanto como sea posible en el mismo estado y nunca lo cambia a menos que se produzca la acción de otro cuerpo" [45]

Ley Segunda:

La variación de la cantidad de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y se hace en la misma dirección de la línea recta en la que se imprime esa fuerza.[46]

---

[42] **Leibniz, G.W**. *Nuevo tratado sobre el entendimiento humano.* Traducción E. Ovejero y Mauri. Prólogo de L. Rensoli Laliga. Ed. De Ciencias Sociales. La Habana (**1988**).

[43] Newton utiliza indistintamene los términos “axioma” y “ley” a pesar de que tienen significados diferentes. Un axioma es un enunciado que se acepta como verdadero sin necesidad de demostración. Una ley (física) es una generalización empírica.

[44] Dado que no existe en la Tierra, ni en el Universo, algún lugar donde no se ejerzan fuerzas a distancia, este enunciado debe ser tomado como axioma y no como una generalización empírica.

[45] **Des Cartes, R.,** (**1644**): *Principia Philosophiæ*, Elzevier, Amsterdam, Parte II. p. 37.

[46] Newton la refiere a la variación de la cantidad de movimiento debido a lo que hoy llamamos impulso. En términos matemáticos $fdt = mdv$. Siendo la fuerza una magnitud vectorial, la dirección y el sentido del vector velocidad estarán dados por los de la fuerza. Para una transformación finita hay que integrar esta expresión, ($\int fdt = \int mdv$). Sin embargo, es muy común que se exprese $f = mdv/dt$ o $f = ma$, pero expresada de esta manera, la Segunda Ley del movimiento es sólo válida si la fuerza es constante y si le provoca una variación en la cantidad del movimiento al cuerpo sobre la que se ejerce. Newton lo aclara a continuación del enunciado: “Si una fuerza cualquiera genera un movimiento, una fuerza doble generará el doble, una triple el triple, tanto si la fuerza impresa se ejerce de una sola vez o si es gradual y sucesiva.”

Ley Tercera:

Para toda acción[47] *hay siempre una reacción igual y opuesta. Las acciones recíprocas entre dos cuerpos son siempre iguales y dirigidas hacia las partes contrarias*.

Luego de dar varios ejemplos, como el de arrastrar una cosa, Newton aclara: “Los cambios producidos por esas acciones no son iguales en las velocidades, sino en el movimiento de los cuerpos, siempre que no se vean estorbados por ningún otro impedimento.”

A partir de las definiciones de sus tres “leyes”, Newton deriva seis Corolarios¨:

Corolario I:

Un cuerpo afectado simultáneamente por dos fuerzas describirá la diagonal de un paralelogramo en el mismo tiempo en que describiría los lados de ser afectado separadamente por esas fuerzas.

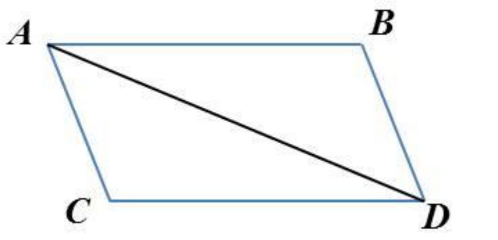


Figura 6.14. Composición de fuerzas.

Esta es, simplemente, la famosa regla del paralelogramo, para representar la composición de fuerzas.

Corolario II

Y así es explicada la composición de cualquier fuerza directa AD partiendo de cualesquiera fuerzas oblicuas AC y CD Tales composiciones y descomposiciones son abundantemente confirmadas por la Mecánica.

“Si en un instante dado, por la fuerza *M* impresa separadamente en el lugar *A* (ver Figura 6.14.) un cuerpo fuese llevado con un movimiento uniforme desde *A* hasta *B*, y por la fuerza *N* impresa separadamente en el mismo lugar, fuese llevado de *A* a *C*, se completa el paralelogramo *ABCD* y con ambas fuerzas actuando a la vez será llevado en el mismo tiempo por la diagonal desde *A* hasta *D*.”

Corolario III

La cantidad de movimiento que se obtiene tomando la suma de los movimientos dirigidos hacia las mismas partes y la diferencia de aquellos dirigidos hacia partes contrarias no sufre alteración por la acción de los cuerpos entre sí.

“Pues la acción y su reacción contraria son iguales de acuerdo con la Ley III y, en consecuencia, según la Ley II, producen en los movimientos cambios iguales hacia partes opuestas.”

Corolario IV

[47] En términos modernos, *acción* es una magnitud física que resulta del producto de una energía por el tiempo en que ha sido aplicada.

“El centro común de gravedad de dos o más cuerpos no altera su estado de movimiento o reposo por las acciones de los cuerpos entre sí. Por ello, el centro común de gravedad de todos los cuerpos interactuantes (excluyendo acciones externas e impedimentos) se encuentra o bien en reposo o moviéndose uniformemente en una línea recta.”

Corolario V

Los movimientos de los cuerpos incluidos en un espacio dado son idénticos entre sí, ya se encuentre ese espacio en reposo o moviéndose uniformemente en línea recta sin movimiento circular alguno.

“Porque las diferencias de los movimientos tendientes hacia las mismas partes y las sumas de los tendientes a partes contrarias son, en principio (por hipótesis) idénticas. […] Tenemos una prueba clara de esto en el experimento de un barco, donde todos los movimientos acontecen del mismo modo, estando el barco en reposo o moviéndose uniformemente en línea recta.”

Corolario VI

Si cuerpos movidos de cualquier manera entre sí son impulsados por fuerzas acelerantes iguales siguiendo líneas paralelas, continuarán todos moviéndose entre sí como si no hubiesen sido impulsados por esas fuerzas.

“Como esas fuerzas actúan igualmente (con respecto a las cantidades de los cuerpos a mover) y siguiendo líneas paralelas, moverán de la misma manera a todos los cuerpos (en lo que respecta a la velocidad) de acuerdo con la Ley II, y nunca producirán cambio alguno en las posiciones o movimientos de los cuerpos entre sí)

A partir de estos corolarios, Newton explica las afirmaciones de Galileo sobre la caída de los cuerpos, el movimiento de los proyectiles, los hallazgos de Wren, Wallis y Huygens sobre, choques elásticos y movimientos pendulares, entre otros.

En los Principia, no hay una enunciación específica de la ley de la gravitación universal. En la Sección XI del libro I, que lleva por título *Sobre los movimientos de cuerpos que tienden entre sí con fuerzas centrípetas*, escribió:

“Hasta aquí, he estado exponiendo las atracciones de cuerpos hacia un centro inmóvil, aunque muy probablemente no exista cosa semejante en la Naturaleza. Pues, por la Tercera Ley, las atracciones suelen dirigirse hacia cuerpos y las acciones de los cuerpos atraídos y atrayentes son siempre recíprocas e iguales, con lo cual, si hay dos cuerpos, ni el atraído ni el atrayente se encuentran verdaderamente en reposo, sino que ambos (por el Corolario IV de las Leyes del movimiento) giran en torno a un centro común de gravedad estando, por así decirlo, mutuamente atraídos.[…] En consecuencia, pasaré ahora a tratar el movimiento de cuerpos que se atraen los unos a los otros considerando a las fuerzas centrípetas como atracciones, aunque en estricto rigor físico deberían ser llamados, más apropiadamente, impulsos.”

A partir de esta Sección, comenzó a tratar la atracción entre los cuerpos *suponiendo* válida la ley del cuadrado inverso para un gran número de casos. Estos tratamientos los hizo como *teoremas* o como *problemas* para los cuales dio las respectivas demostraciones. Por ejemplo, el teorema XXIII de la Proposición LX del Libro I, tiene por enunciado:

Si dos cuerpos *S* y *P* que se atraen recíprocamente con fuerzas inversamente proporcionales al cuadrado de sus distancias giran en torno a un centro común de gravedad, afirmo que el eje principal de la elipse que cualquiera de los cuerpos — digamos *P* — describe por su movimiento alrededor del otro, *S*, será al eje principal de la elipse que el mismo cuerpo *P* pueda describir en el mismo período de tiempo al otro cuerpo *S* supuesto fijo, como la suma de los cuerpos $S + P$ a la primera de las dos medias proporcionales entre esa suma y el otro cuerpo *S*.

Como ejemplo de problema, asociado a la Proposición LXII, de esa Sección enunció el Problema XXXVIII:

“Determinar los movimientos de dos cuerpos que se atraen mutuamente con fuerzas inversamente proporcionales a los cuadrados de las distancias entre ellos, cuando los mencionados cuerpos se dejan caer desde lugares dados.”

El Libro I está dividido en catorce secciones en los que Newton analiza una gran variedad de movimientos que experimentan los cuerpos.

El Libro II está dividido en nueve secciones. Las primeras tres tratan sobre los movimientos de los cuerpos que son resistidos en razón de su velocidad, el cuadrado de su velocidad o ambas magnitudes al mismo tiempo. La cuarta sección se ocupa del movimiento circular en medios resistentes. La quinta está dedicada a la hidrostática, la sexta al movimiento y la resistencia de cuerpos pendulares. Las secciones séptima y octava, a la hidrodinámica y la novena al movimiento circular de los fluidos.

El Libro III se ocupa del desarrollo de las ecuaciones matemáticas que describen los fenómenos astronómicos. Newton aclaró que para su entendimiento bastaba “leer cuidadosamente las Definiciones, las Leyes del Movimiento y las tres primeras secciones del Libro primero” y sólo recurrir al resto del Libro I y al Libro II, para algunos casos puntuales.

El libro se inicia con cuatro “Reglas para filosofar”. La primera dice:

Para las cosas naturales, no debemos admitir más causas que las verdaderas y suficientes para explicar los fenómenos.

Aquí Newton parte de la premisa de que el comportamiento de la Naturaleza es sencillo.

La segunda Regla establece:

Por consiguiente debemos asignar, tanto como sea posible, las mismas causas a los mismos efectos.

Así, la caída de un cuerpo en Europa obedece a las mismas causas que las interacciones planetarias.

La tercera Regla afirma

Las cualidades de los cuerpos que no admiten intensificación ni reducción y que resultan pertenecer a todos los cuerpos dentro del campo de nuestros experimentos, deben considerarse cualidades universales de cualesquiera tipos de cuerpos.

"Pues como las cualidades de los cuerpos sólo nos son conocidas por experimentos, debemos considerar universal todo cuanto concuerda siempre con los experimentos y aquellas que no son susceptibles de disminuir, nunca deben ser separadas"

Esta regla establece la necesidad de generalizar las propiedades comunes a todos los cuerpos.

En cuanto a la cuarta Regla, ella dice:

En filosofía experimental debemos recoger proposiciones verdaderas o muy aproximadas inferidas por inducción general a partir de fenómenos, prescindiendo de cualesquiera hipótesis contrarias, hasta que se produzcan otros fenómenos capaces de hacer más precisas esas proposiciones o sujetas a excepciones.

Mediante esta regla, Newton recomienda el empleo exhaustivo del método inductivo para poder llegar a las generalizaciones empíricas.

El libro III continúa con la descripción de seis "fenómenos" astronómicos utilizando los datos disponibles de las observaciones. Por ejemplo, comprueba "que los planetas que circundan Saturno describen, mediante radios trazados al centro de ese planeta, áreas proporcionales a los tiempos que emplean en registrarlos y que sus tiempos periódicos, estando las estrellas fijas en reposo, están en proporción de ${}^{3}/_{2}$ a sus distancias a su centro".

Dicho libro continúa con cuarenta y dos proposiciones astronómicas que plantea como teoremas o como problemas y que resuelve. Por ejemplo, "Que la fuerza por la que la Luna es retenida en su órbita, tiende hacia la Tierra y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de su posición al centro de la Tierra" (Proposición III, Teorema III) o "Determinar las fuerzas con que el Sol perturba los movimientos de la Luna". (Proposición XXV, Problema VI).

Cuando Newton se refiere a la ley de la gravitación universal, usa la palabra "suponiendo". Así, por ejemplo, en el Corolario de la Proposición II, Teorema III, escribió: "Si aumenta la fuerza centrípeta media por la que la Luna es retenida en su órbita, primero en la proporción $177^{29}/_{40}$ a $178^{29}/_{40}$ y después en la proporción del cuadrado del semidiámetro de la Tierra a la distancia media entre los centros de la Luna y de la Tierra, obtendremos la fuerza centrípeta de la Luna sobre la superficie de la Tierra, *suponiendo* que esta fuerza aumenta continuamente en proporción inversa al cuadrado de la altura que desciende hacia la Tierra.

Si bien por razones de espacio no podemos explayarnos en comentarios sobre el Libro III, consideramos que es el más interesante e instructivo acerca de la Matemática newtoniana aplicada a la Astronomía.

Si bien Newton usó su calculus para sus desarrollos en los Principia, en el libro hay aplicaciones puntuales, como la Proposición XI, Problema Vi del Libro I.[48] pero no hay un desarrollo sistemático de su método.

6 – 4.4.- La Óptica de Newton.

En 1704, Newton publicó un conjunto de trabajos de Óptica, bajo el título *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of ligh.*

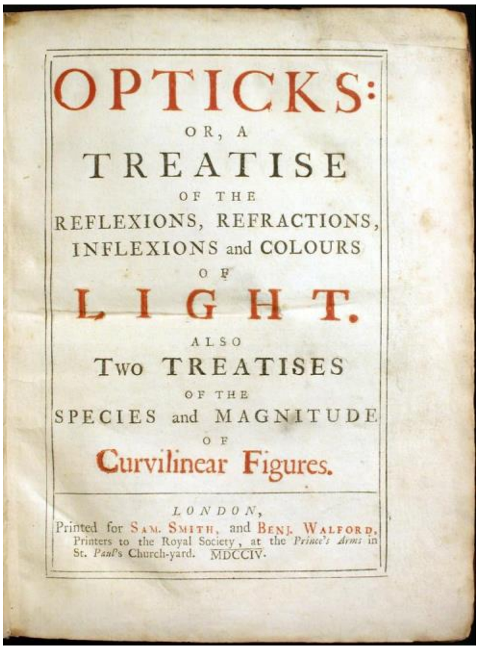


Figura 6.15. La Optica de Newton.

El libro, que es una recopilación de trabajos presentados en la Royal Society a partir de 1675, comienza advirtiendo que no usará hipótesis para explicar las propiedades de la luz. Sin embargo dice que las propondrá y las probará. Al respecto escribió:

"Mi diseño en este libro no es el de explicar las propiedades de luz mediante hipótesis, sino proponerlas y probarlas por la razón y los experimentos; para lo cual, voy a usar como premisas las siguientes definiciones y axiomas"[49]

Definición I:

Por rayos de luz entiendo sus partes mínimas, y también las sucesivas [que se mueven]*] en la misma líneas y las simultáneas* [que se mueven] *en varias Líneas*.

Definición II:

La refrangibilidad de los rayos de luz, es su disposición a ser refractados o desviados en su camino al pasar de un cuerpo o medio transparente a otro. Y una mayor o menor refrangibilidad de

[48] Si un cuerpo gira describiendo una elipse, encontrar la ley de la fuerza centrípeta que tiende hacia el foco de la elipse.

[49] Debe tenerse presente que una hipótesis es una construcción teórica que intenta explicar un hecho empírico. Si bien un resultado empírico puede concordar con gran precisión con la realidad, la hipótesis que lo explica puede ser un disparate. Se podría inferir que, luego del rechazo que tuvo su hipótesis acerca de la atracción a distancia entre los cuerpos, Newton no deseaba recibir una andanada de críricas a su "hipótesis" acerca de la naturaleza corpuscular de la luz, críticas que le habían formulado anteriormente, Hooke, Huygens y otros científicos.

los rayos es su disposición a ser desviados más o menos de su trayectoria en sus incidencias sobre un mismo medio.

Definición III:

La reflexibilidad de los rayos es su disposición a regresar hacia el mismo medio cuando inciden sobre la superficie de otro medio en contacto. Y los rayos son más o menos reflexibles cuando regresan con más o menos facilidad.

Definición IV.

El ángulo de incidencia, es el ángulo que forma la línea del rayo incidente con la perpendicular al a superficie reflectante o refractante en el punto de incidencia.

Definición V.

El ángulo de reflexión o de refracción, es el ángulo que forma el rayo reflejado o refractado con la perpendicular a la superficie reflectante o refractante en el punto de incidencia.

Definición VI.

Los senos de incidencia, de reflexión y de refracción, son los senos de los ángulos de incidencia, de reflexión y de refracción.

Definición VII.

La luz cuyos rayos son todos de la misma refrangibilidad, la llamo simple, homogénea y similar y aquellas cuyos rayos son algunos más refrangibles que otros, las llamo compuestas, heterogéneas o disimilares.

"Las luces anteriores a las que llamo homogéneas no lo hago por afirmar que los son en todos sus aspectos, sino porque los rayos que concuerdan en su refrangibilidad concuerdan, al menos, en todas sus otras propiedades"

Definición VIII.

A los colores de las luces homogéneas, los llamo primarios, homogéneos y simples, y aquellos de las luces heterogéneas, los llamo heterogéneos y compuestos.

Luego, Newton establece los siguientes axiomas:

Axioma I.

Los ángulos de incidencia de reflexión y de refracción, yacen sobre el mismo plano.

Axioma II.

El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Axioma III.

Si el rayo refractado retorna directamente al punto de incidencia, será refractado según la línea descripta anteriormente por el rayo incidente.

Axioma IV.

La refracción atraviesa el medio menos denso y entra al más denso, se desvía hacia la perpendicular, esto es, de modo que el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia.

Axioma V.

El seno de incidencia, está o exactamente o muy aproximadamente, en una razón dada con el seno de refracción.[50]

Axioma VI.

Los rayos homogéneos que fluyen desde diversos puntos de algún objeto y caen casi perpendicularmente so algún plano reflectante o refractante o sobre una superficie esférica, divergen de tantos otros puntos, o son paralelos a tantas líneas, o convergen a tantos otros puntoso exactamente o sin un error sensible. Y lo mismo ocurre si los rayos son reflejados o refractados sucesivamente por dos o tres planos más o superficies esféricas.[51]

Axioma VII.

Cuando los rayos que vienen desde todos los puntos de cualquier objeto vuelven a encontrarse en otros tantos puntos, luego de haber sufrido distintas reflexiones o refracciones, formarán una imagen de ese objeto sobre cualquier cuerpo blanco sobre el cual incidan.

---

[50] Esta es la llamada "ley de Snell", que aparece en el manuscrito *Kitāb al-Harraqāt* del matemático árabe Ibn Sahl (siglo X), pero que se la suele adjudicar a Willebrord Snel van Royen quien la formuló en 1621 o a Des Cartes, quien la publicó en 1637.

[51] Estos axiomas fueron enunciados por Abu ‘Ali al-Hasan bin al-Hasan bin al-Haytham, (965 – 1040), conocido como Alhazen, y publicados por él en una serie de siete volúmenes llamada Kitab al-Manazir, este "Tratado de Óptica" fue traducido en 1270 al latín con el nombre de *Opticæ thesaurus Alhazeni* e impreso por Federico Risner en Basilea en 1572. Los axiomas se conocen como *leyes de los ángulos iguales* y están explicados con detalle en los Capítulos IV y V, *De aspectibus*, de la Óptica de Alhazen. Estos capítulos fueron traducidos al inglés y comentados por A. Mark Smith, bajo el título "Alhacen on the principles of reflection" y fueron publicados por la American Philosophical Society en el año 2006. Las leyes de los ángulos iguales fueron empleadas por investigadores como Roger Bacon (c. 1220 – 1292), Johannes Kepler (1571 – 1630), Willebrord Snel van Royen (1580 – 1626), René Des Cartes (1596 – 1650), Pierre de Fermat (1601 – 1665) quien además demostró que esas leyes podían deducirse de su famoso principio "El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo", y por otros estudiosos.

Esta es la explicación de la formación de imágenes mediante el empleo de lentes y espejos.

Axioma VIII.

Un objeto visto por reflexión o por refracción aparece en aquel lugar de donde los rayos, después de su última reflexión o refracción, divergen al incidir sobre el ojo del espectador.

Así, explica, por ejemplo, la formación de una imagen en la parte posterior de un espejo plano.

Luego el libro establece un conjunto de Proposiciones que demuestra en forma sumamente didáctica mediante teoremas.

Proposición I. Teorema I

Las luces que difieren en sus colores, difieren también en su refrangibilidad. Lo que prueba mediante experimentos.

Proposición II. Teorema II.

La luz del Sol consiste en rayos de diferente refrangibilidad. Lo que prueba también mediante sus experimentos.

Proposición III. Teorema III.

La luz del Sol consiste en rayos que difieren en reflexibilidad y esos rayos son más reflexibles que otros que son más refractables.

Proposición IV. Problema I.

¿*Cómo separar los rayos heterogéneos componentes de una luz compuesta*?

La resolución consiste en la separación mediante la incidencia de la luz sobre prismas.

Proposición V. Teorema IV.

La luz homogénea es refractada regularmente sin ninguna división o fragmentación de los rayos, y la Visión confusa de objetos observados a través de los cuerpos refractantes atravesados por luz heterogénea surge de la diferente refrangibilidad de los diversos tipos de rayos.

Para su demostración propone tres experimentos.

Proposición VI. Teorema V.

El seno de incidencia de cada rayo de un haz, considerado individualmente, y su seno de refracción están en una razón dada.

Aquí Newton trató de diferenciarse de otros autores que consideraron que la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción de un *haz de rayos* son valores medios.

Proposición VII. Teorema VI.

La perfección de los telescopios es impedida por las diferencias en la refrangibilidad de los rayos de la luz,

Aquí Newton se opone a la creencia generalizada de que la imperfección de las imágenes captadas mediante telescopios se debe a deficiencias en las esfericidades de los cristales que en ellos se emplean.

En la segunda parte del Libro primero, Newton trata de probar, mediante 17 experimentos las propiedades que él define para los rayos luminosos.

La Primera parte del Libro segundo describe 24 "Observaciones" respecto de las reflexiones, refracciones y colores en cuerpos transparentes delgados. La Segunda parte, está dedicada al análisis de las principales observaciones descriptas en el Libro Primero.

La tercera parte del libro segundo lleva por título: "*Sobre los colores permanentes de los cuerpos naturales y la analogía entre ellos y los colores de láminas delgadas transparentes*". En ella trata de explicar, mediante veinte proposiciones, por qué las láminas delgadas adoptan el color de la luz que las atraviesan. En esta parte, también detalla sus resultados experimentales de lo que actualmente se llama índice de refracción de 22 materiales y los compara con sus respectivas densidades.

La parte cuarta del Libro segundo lleva por título: "*Observaciones sobre las reflexiones y colores de placas pulidas, transparentes y gruesas.*" En ella describe trece observaciones que realizó en distintas épocas sobre reflexiones luminosas sobre distintas superficies, analizando los fenómenos reflexión y de dispersión de los rayos reflejados.

El libro III, lleva por título:" *Observaciones relativas a las inflexiones de los rayos de luz y los Colores realizados por ellas*."

Newton inició esta parte contando que Grimaldi[52] había hecho entrar en una habitación oscura un rayo de luz que atravesaba un agujero muy pequeño y había observado que las sombras de los objetos expuestos a esta luz eran más grandes de lo que deberían ser si los rayos pasara a través de una abertura más ancha, y que "estas sombras tienen tres franjas paralelas, bandas o filas de luz coloreada adyacentes a ellas. Pero si el Agujero se agranda, las franjas se dilatan y se topan unas con otras, de modo que no pueden distinguirse".

[52] Francesco María Grimaldi (1618 – 1663), fue el primero en estudiar el fenómeno de difracción de la luz y en acuñar el nombre para ese fenómeno.

Para analizar los experimentos de Grimaldi, Newton hizo un agujero del ancho de un alfiler en una placa de plomo e hizo pasar un rayo de luz solar a través del mismo, observando el comportamiento al interponer en su paso, y a distintas distancias, pelos, hebras, alfileres, cabellos humanos y otros objetos de anchos muy pequeños. Su convicción sobre la naturaleza corpuscular de la luz lo llevó a hacer interpretaciones incorrectas de los fenómenos de difracción, — como que los rayos de luz comenzaban a desviarse *antes* de llegar a los objetos interpuestos (Cuestión 4 a la Observación XI) — los que podían explicarse en términos de la óptica ondulatoria de Huygens.

La "*Optiks…*" sigue con un tratado de Óptica geométrica (en latín) y un tratado de cuadratura de curvas, con las ecuaciones para encontrar áreas debajo de las curvas, también en latín.

En la edición de 1706 de su Óptica, Newton incorporó la atracción universal entre las partículas que forman los cuerpos sólidos. Supuso que en la materia hay pequeñas partículas sólidas, indivisibles e imperceptibles las que forman el primer grado de composición. Estos agregados se agrupan para formar partículas de segundo grado de composición y así sucesivamente, hasta formar las partículas que son accesibles a los sentidos y que participan en las reacciones químicas. Newton se diferenció de los atomistas clásicos y de los corpuscularistas mecanicistas al suponer que esas partículas están dotadas de fuerzas activas, que son las responsables de la gravitación y la cohesión de la materia. También supuso que la cohesión entre las partículas disminuía con su grosor.

En la Cuestión XXXI de esa edición trató con cierto detalle algunas reacciones de desplazamiento, por ejemplo cuando un metal desplaza a otro metal de su sal cuando están en solución acuosa.

6 – 4.5.- La controversia Newton – Hooke por la naturaleza de la luz.

Dado que Newton consideró que la luz era de naturaleza corpuscular debido a que tiene cualidades y solo los objetos tienen cualidades, no es difícil imaginar que su concepción iba a chocar con la de Hooke, quien en 1665 había realizado experimentos que lo llevaron a la convicción de que la luz era una especie de vibración.

De modo que, como curador de la Royal Society recibió el trabajo de Newton sobre la difracción de la luz por el paso a través cristales prismáticos, para su análisis, usó la máxima diplomacia posible para alabar los experimentos a la vez que cuestionar la hipótesis que los describía.

En la carta de respuesta a la Secretaría de la Royal Society, Hooke escribió:

He leído detenidamente el discurso del Sr. Newton acerca de los colores y las refracciones, y no fue poca mi satisfacción por la sutileza y la curiosidad en sus observaciones. Pero aunque estoy totalmente de acuerdo con él en cuanto a la verdad de lo que él ha alegado, habiéndolo encontrado mediante varios cientos de ensayos, en lo que respecta a su hipótesis para resolver el problema de los colores, confieso que todavía no puedo ver ningún argumento indiscutible para convencerme de la certeza de los mismos.

Por todos los experimentos y observaciones que he hecho hasta ahora, más aún, incluso los propios experimentos, que él alega, me parece que demuestran que la luz blanca no es más que un pulso o un movimiento, propagado a través de un medio uniforme, transparente y homogéneo y que el color no es nada más que la perturbación de la luz por la comunicación de ese pulso a otros medios transparentes, es decir, por la refracción de la misma. Que la blancura y la negrura no son nada más que la abundancia o escasez de los rayos de la luz no alterada y que los dos colores (de los cuales no hay en la naturaleza sin mezcla) no son más que los efectos de un pulso compuesto o una propagación perturbada de su movimiento causada por la refracción.

Pero a pesar de lo cierta que considero mi hipótesis (la que no acepté sin antes realizar unos cientos de experimentos), aun así me gustaría encontrar un *experimentum crucis* del Sr. Newton que me haga descartarla. Pero no es ese *experimentum crucis* como él lo llama, el que provocará el cambio, ya que el mismo fenómeno puede ser explicado por mi hipótesis tan bien como por la de él, sin ningún tipo de dificultad o esfuerzo. Más aún, me voy a ocupar de mostrar otra hipótesis, que difiere de la de él y de la mía, que deberá llegar al mismo resultado.

Que un rayo de luz se parta o se disperse por refracción es totalmente cierto; y que de este modo se propaga un pulso diferente, tanto en los costados como en las partes medias del rayo es fácil de concebir y también que los diferentes pulsos o movimientos compuestos deberían producir diferentes impresiones sobre el ojo, el cerebro o los sentidos, también es fácil de concebir y que, cualquiera sea el medio refractante que lo reduzca a su movimiento primitivo simple, por anulación de los movimientos adventicios, hace lo mismo restaurándolo a su blancura y simplicidad primitiva.

¿Qué necesidad hay de que todos esos movimientos, o cualquier otra cosa que sea lo hace los colores, se encuentre originalmente el los rayos simples de luz? Todavía no entiendo esa necesidad, como tampoco que en los órganos, los sonidos que se escuchan luego de ser emitidos por los tubos, deben estar en el aire de los fuelles, o que en una cuerda la vibración sea producida mediante la parada o la pulsión. Por cierto, una cuerda vibrante es una representación bastante adecuada de la forma en que se ve un rayo refractado y es una manera en que, por esta similitud, se puede imaginar que el rayo es como una cuerda tensada entre el objeto luminoso y el ojo y que la parada o los dedos actúan como una superficie refractante que, de un lado de la cuerda no tiene movimiento y del otro tiene un movimiento vibratorio. Por cierto, aquí podríamos decir o imaginar que el reposo o el estado recto de la cuerda se logra por el cese de todos los movimientos o por la coalición de todas las vibraciones y que todas las vibraciones están latentes en ese estado. Sin embargo, me parece más natural imaginarlo de manera opuesta.

Y estoy un poco preocupado porque esta suposición haga que el Sr. Newton deje totalmente de lado sus ideas de mejorar los telescopios y los microscopios mediante refracciones; ya que no es improbable que él, que ha hecho tan buenas mejoras a los telescopios mediante sus propios ensayos sobre reflexión podría, de haberse dedicado, haber logrado más mejoras mediante refracción, ya que la reflexión no es la única manera de mejorar los telescopios. Posiblemente, más adelante podré mostrar una prueba de ello. La verdad es que la dificultad de eliminar el inconveniente de la división del rayo y, consecuentemente, del efecto de los colores es muy grande, pero no insuperable. He hecho muchos ensayos tanto para telescopios de reflexión como para microscopios de reflexión, loa que mencioné en mi Micrographia, pero abandoné los de telescopios cuando consideré que el foco de una concavidad esférica no es un punto sino una línea y que los rayos se reflejan con menos nitidez hacia un punto de una superficie cóncava que cuando se refractan a través de una superficie convexa, lo que me hizo ver que lo que había obtenido por refracción, no podía racionalmente esperarse por reflexión, ni tampoco pude encontrar ningún efecto por reflexión mediante el aparato de seis pies de radio que hace unos seis o siete años el Sr. Reeves construyó para el Sr. Gregory, con el cual hice varios ensayos. Pero ahora parece que era por falta de una buena encheiria[53] (lo que causó que muchos buenos experimentos se hayan perdido) Estas consideraciones me desanimaron a intentar seguir por ese camino, especialmente desde que encontré que la parábola era mucho más difícil de describir que la hipérbola o la elipse. Por lo que lo quité la reflexión completamente de mis pensamientos y busqué diversos caminos que, en teoría, contestaron todo lo que podría desear. Pero teniendo mucho trabajo, no pude ocuparme de poner mis ideas en práctica para el uso de telescopios, si bien para microscopios, las apliqué durante un buen tiempo. Todo esto ha sido como un preámbulo; Consideraré ahora las proposiciones mismas.

En primer lugar, el Sr. Newton sostiene que, dado que los rayos de luz se diferencian en refrangibilidad, difieren en su disposición a exhibir tal o cual color: con lo cual, en lo principal, concuerdo; esto es, que por refracción un rayo es, por así decirlo, dividido o rarificado y que uno de los lados, a saber, el lado que se ha refractado más, da un color azul y el que se ha refractado menos, da color rojo. Los colores intermedios son diluciones o mezclas de esos dos, lo que yo explico así: El movimiento de la luz en un medio uniforme, en el que se genera, se propaga por pulsos u ondas simples y uniformes, que forman un ángulo recto con la línea de dirección; pero caen oblicuamente en el medio al cual se refractan, Este medio, produce otro efecto o movimiento que perturba el movimiento anterior, algo así como la vibración de una cuerda y lo que antes era una línea ahora se convierte en una superficie triangular, en la cual el pulso no se propaga en ángulo recto con su línea de vibración sino de manera oblicua, como expliqué más extensamente en mi Micrographia, y lo que se desvía hacia un lado e impresiona como un movimiento compuesto en el fondo del ojo, del cual tenemos la imaginación de que es de color rojo, y lo que se desvía hacia el otro lado, provoca una sensación que imaginamos de color azul y algo similar ocurre con todas las mezclas intermedias de esos colores. Ahora, con el experimento de las dos cajas en forma de cuña de mi Micrographia, creo haber probado suficientemente que los colores intermedios no son más que mezclas de los dos primarios. Sobre esta base no puedo asentir a la última parte de la proposición del Sr. Newton, según la cual los colores no son cualidades de la luz que derivan de refracciones o resecciones de los cuerpos sino propiedades originales e innatas, etc.

Con la segunda proposición concuerdo totalmente, pero no exactamente en el sentido que expresa sino en la manera de expresarla; esto es, que la parte de los rayos escindidos que más se inclina, exhibe un color azul, mientras que la que menos se inclina, exhibe color rojo y las partes del medio, colores intermedios y que todas esas partes van a exhibir siempre esos colores hasta que se destruya el movimiento compuesto y se reduzca por otros medios a un pulso simple y uniforme como lo fue al principio.

[53] Manipulación, manejo manual.

Esto va a explicar y dar razón a los fenómenos de la tercera proposición a la que respaldo prontamente en todos los casos, excepto cuando, mediante otra refracción los rayos escindidos se convierten nuevamente en uno entero y uniforme para divergir y separarse, lo que explica su cuarta proposición.

Pero en cuanto a la quinta proposición, según la cual hay una variedad indefinida de colores primarios u originales, entre los que se encuentran los de color amarillo, verde, violeta, púrpura, naranja, etc.., y hay una infinidad de gradaciones intermedias, no puedo asentir a ello, ya que como suposición es completamente inútil porque implicaría multiplicar entidades sin necesidad y yo, en otro lugar, he demostrado que todas las variedades de colores en el mundo pueden ser hechas a partir de dos.

Estoy de acuerdo con la sexta proposición, pero no puedo aprobar su manera de explicar la séptima.

Ya he demostrado antes, cómo se hace para que los rayos divididos produzcan una luz clara y uniforme; esto es, por estar unidos mediante un movimiento superficial, que es susceptible de realizar dos movimientos, a un movimiento lineal que sólo puede realizar un solo movimiento y es tan fácil de concebir como aparecen nuevamente todos estos movimientos aparecen luego que los rayos son divididos o rarificados. Él debería considerar un poco la ondulación superficial de un pequeño río de agua en una canaleta o un lecho similar podrá fácilmente ver, con curiosidad, toda la forma ejemplificada.

Por las razones dadas más arriba, no puedo asentir, en absoluto, con la octava proposición y las razones del color azul de la llama del azufre, del color amarillo de una vela, del verde del cobre y de los diversos colores de las estrellas y otros cuerpos luminosos, considero que provienen de una causa muy diferente, fácilmente explicable y resuelta mediante mi hipótesis.

La causa de los fenómenos de mi experimento, que él afirmó, es tan fácil de resolver por mi hipótesis como por la suya y son también aquellas que se mencionan en la proposición decimotercera. Por lo tanto, no veo ninguna necesidad absoluta de creer que su teoría ha sido demostrada, ya que le puedo asegurar al Sr. Newton que, mediante mi hipótesis, no sólo puedo resolver todos los fenómenos de la luz y de los colores que he publicado anteriormente y ahora la estoy explicando, sino que mediante otras dos o tres muy diferentes a ella y a partir de ellas, la que él ha descripto en su ingenioso discurso.

Tampoco se me entendería por haber dicho todo esto contra su teoría, en tanto es una hipótesis, después de haber manifestado rápidamente mi acuerdo con la mayoría de las partes de ella y haber estimado que es muy sutil, ingeniosa y capaz de explicar todos los fenómenos de los colores, Pero no puedo pensar que ella sea la única hipótesis. Ni tan cierta como sería una demostración matemática. Pero conceder su primera proposición, según la cual la luz es un cuerpo y que según los colores y las gradaciones de los colores que pueda haber, habrá tantas clases de cuerpos, todos los cuales mezclados darán el color blanco; y después conceder que todos los cuerpos luminosos están compuestos de tales sustancias condensadas y que mientras brillan, emiten continuamente una cantidad infinita de esos cuerpos en todas las direcciones, lo que en un instante se dispersan hacia los límites más lejanos del Universo. Digo que si se concede esto, no habría mayor dificultad en dar por demostrada todo el resto de su curiosa teoría aunque, me parece, que todos los cuerpos coloreados del mundo, mezclados juntamente no formarían un cuerpo blanco y me gustaría ver un experimento de esa clase hecho por la otra parte. Si se aceptara mi suposición de que la luz no es otra cosa que un movimiento simple y uniforme, o pulso sobre un medio homogéneo dado (esto es, transparente) que, en un instante, se propaga desde el cuerpo luminoso hacia todos lados y a todas las distancias imaginables y que ese movimiento comienza primero por alguna otra clase de movimiento en el cuerpo luminoso, tal como la disolución de cuerpos sulfurosos por el aire, o por la acción del aire en sus diversas partes componentes al estar unas sobre otras, en la madera podrida o en el pescado en descomposición, o por un golpe externo, como sobre un diamante, azúcar, agua de mar, o dos rocas o cristales frotados entre sí; y que este movimiento se propaga a través de los cuerpos transparentes, y que se mezclan con otros movimientos adventicios, generados por la oblicuidad de un impacto sobre un cuerpo refractante y siempre que esos movimientos sigan siendo distintos en la misma parte del medio en que el rayo se propaga producirán el mismo efecto, pero cuando se mezclan con otros movimientos producen otros efectos y suponiendo que por un movimiento en dirección contraria al recién impreso el adventicio sea destruido y el movimiento sea reducido al movimientos simple primitivo, creo que el Sr. Newton concluirá que mediante mi hipótesis se podrán resolver de una manera no difícil todos los fenómenos, no sólo los del prisma, los licores coloreados, y los cuerpos sólidos, sino también los colores de los cuerpos plateados , que parecen presentar las mayores dificultades. Es cierto que, mediante mi suposición puedo concebir que el movimiento uniforme o blanco de la luz está formado por los movimientos compuestos de todos los demás colores, como cualquier movimiento estrecho y uniforme puede estar compuesto de miles de movimientos compuestos, de la misma manera en que Descartes explicaba la causa de la refracción; pero no veo necesidad de ello. Si el Sr, Newton tiene algún argumento que el supone que es una demostración absoluta de su teoría, yo estaría muy contento de ser convencido por ello. En mi opinión, el fenómeno de la luz y los colores son dignos de contemplación, como cualquier otro tema en el mundo".

El 20 de febrero de 1672, Newton le envió una carta a Oldenburg prometiéndole una respuesta a las observaciones de Hooke a su teoría de la luz y el color

6 – 4.6.- La controversia con Huygens sobre la luz.

El 11 de marzo de 1672, Henry Oldenburg le envió a Christiaan Huygens el ejemplar impreso de las *Transactions* y en la carta que acompañaba a la publicación escribió:

[…] En este impreso, encontrará una nueva teoría del Sr. Newton (el inventor del telescopio catadióptrico) referida a la naturaleza de la luz y a los colores, donde él sostiene que la luz no es una cosa similar sino una mezcla de rayos diferentemente refrangibles como Ud. podrá ver ampliamente en el Discurso. [Quisiera] que Ud. tenga la bondad de decirnos su parecer…

El 9 de abril, Huygens le comentó:

[…] Me alegra encontrar en los últimos [Transactions] lo que escribió el Sr. Newton respecto al efecto de lentes y espejos para telescopios, donde veo que él remarcó, como yo, el defecto de la refracción de las lentes objetivos convexas, debido a la inclinación de sus superficies. Con respecto a su nueva teoría de los colores, me parece muy ingeniosa, pero habrá que ver si ella es compatible con todos los experimentos.

El 1º de julio, Huygens le envió otra carta a Oldenburg, donde le dio su opinión sobre el telescopio de Newton y se refirió a la teoría de los colores:

[…] En cuanto a su nueva hipótesis de los colores, de la que usted quiere conocer mi opinión, admito que hasta ahora me parece muy plausible, y que el *experimentum crucis* — si lo he entendido bien, porque esta descrito de manera un poco oscura — lo confirma bastante. Pero en lo que respecta a lo que escribió sobre la aberración de los rayos a través de las lentes convexas, yo no soy de su opinión; porque leyendo su escrito, encontré que siguiendo su principio, esta aberración debería ser el doble de lo que él considera, a saber, 1/25 de la abertura de la lente, lo que parece repugnar a la experiencia. Por lo que puede ser que esta aberración no siempre sea proporcional a los ángulos de inclinación de los rayos…

El 8 de julio, Oldenburg le transmitió a Huygens, la respuesta de Newton, agradeciendo el comentario acerca de su telescopio de reflexión y agregando una explicación sobre su teoría de los colores, En lo que hace a esto último escribió:

[…] En cuanto a la Teoría de la Luz y de los Colores, puedo creer que algunos de los Experimentos pueden parecer oscuros a causa de la brevedad, donde lo que escribí, debería haber sido descrito más ampliamente y explicado con esquemas. Pero esta teoría había sido destinada al público…

A continuación, Newton trató de refutar la opinión de Huygens acerca de que la aberración de un telescopio debe ser mayor de alrededor de 1/50 de la apertura de sus lentes.

En una carta, fechada el 27 de septiembre de 1672, Huygens le escribió a Oldenburg:

Lo que figura del Sr. Newton en una de sus recientes revistas confirma bastante su doctrina de los colores. Sin embargo, la cosa bien podría ser de otra manera, y me parece que él se tendría que contentar con haber avanzado al formular una hipótesis muy probable. Además, si fuera cierto que los rayos de luz, que originalmente eran de color rojo, azul, etc., todavía habría una gran dificultad para explicar mediante la Física mecánica en qué consiste esta diversidad de colores. Lo que he dicho sobre la aberración de las lentes objetivo fue sin duda mal entendido, ya que al leer las Transactions hice esa nota al margen, debería haberla analizado antes de enviarla...

A raíz de la publicación de la controversia entre Hooke y Newton sobre la teoría de los colores, el 27 de septiembre, Huygens le expresó a Oldenburg:

[…] He visto como el Sr. Newton se empeña en sostener su nueva opinión con respecto a los colores. Creo que la objeción más importante que se le hizo en forma de Consulta es ¿hay más de dos tipos de colores? Porque creo que una hipótesis que pueda explicar mecánicamente y por la naturaleza del movimiento los colores amarillo y azul sería suficiente para explicar todos los demás colores porque son más acentuados (tal como aparecen mediante los prismas del Sr. Hooke) produciendo el rojo y el azul oscuro y que, de esos cuatro se puede componer todos los colores por reflexión. No veo por qué el Sr. Newton no se contenta con sólo dos de los colores, por ejemplo, amarillo y azul, ya que sería mucho más fácil encontrar alguna hipótesis para el movimiento que explique estas diferencias en vez de tantas diversidades que pueden resultar de los otros colores. Y aún hasta que él encontró esta hipótesis, no hemos aprendido en qué consiste la naturaleza y a que se debe la diferencia de los colores, sino sólo este accidente (que, por cierto, es muy considerable) de su diferente refrangibilidad.

En cuanto a la otra cuestión, a saber, la composición del blanco mediante el conjunto de todos los colores, podría ser que el amarillo y el azul seguirían siendo suficientes para esto, por lo que vale la pena ensayarlo y se podría, mediante la experiencia que propuso el Sr. Newton, recibir contra la pared de una habitación oscura, los colores del prisma e iluminar un papel blanco mediante la luz reflejada.

Se debería evitar que los colores de los extremos, a saber, el rojo y el púrpura lleguen hasta la pared y dejar que solamente los colores entre ellos, el amarillo, el verde y el azul incidan, para comprobar si la luz de estos solos no harían parecer blanco el papel, tal así como cuando se lo ilumina con todos los colores. Incluso dudo si el lugar más claro del amarillo no sería suficiente para ese efecto y creo que sería conveniente ensayarlo, ya que este pensamiento vino a mí en este momento.

Ud. verá muy bien, Señor, que si estos experimentos tienen éxito, ya no podremos decir que todos los colores son necesarios para componer el blanco y que sería muy probable que todos los demás colores sean sólo grados del amarillo y del azul, más o menos acentuados.

Por último, en cuanto a los efectos de las diferentes refracciones de los rayos a través del vidrio de las lentes, lo cierto es que la experiencia no está de acuerdo con lo que ha encontrado el Sr. Newton. Esto se debe a que sólo ha tomado en cuenta el hecho de una imagen distinta lograda mediante un objetivo de 12 pies en un recinto oscuro, vemos que es demasiado clara y demasiado nítida para ser cumplida por los rayos que se dispersan de la 50ava parte de la abertura, de modo que como creo haberle dicho, hasta ahora la diferencia de la Refrangibilidad no puede ser siempre la misma en las grandes y pequeñas inclinaciones de los Rayos sobre la superficie del vidrio.

El 7 de abril de 1673, Oldenburg le escribió a Huygens

Para cumplir con la promesa que le hice en mi carta de 10 de febrero pasado le envío la respuesta del Sr. Newton sobre las consideraciones que Ud. tuvo la amabilidad de poner en su carta del 14 de enero referida a su nueva teoría del color. Quiero creer, usted no la leerá sin placer, y que le dará tiempo para reflexionar más sobre este asunto importante y hermoso. Les puedo asegurar que el Sr. Newton se ve como una persona de gran sinceridad, como un hombre que dice ligeramente las cosas que adelanta.

En la carta que Newton le adjunta a Oldenburg para ser dirigida a Huygens, — a quien en vez de nombrarlo lo representa mediante la letra “H”,— dice

Me parece que [Huygens] adopta una manera inadecuada de examinar la naturaleza de los colores, ya que él procede a componer los que ya están compuestos; Como lo hace en la primera parte de su Carta.

Quizá antes se satisficiera resolviendo la Luz en sus Colores, en la medida en que se puede hacer por el Arte, y luego, examinando aparte las propiedades de esos colores, y luego probar los efectos de volver a unir dos o más o todos ellos; Y por último, separándolos de nuevo para examinar, qué cambios que la re-conjunción se habrían producido en ellos. Esto, confieso, resultará una tarea tediosa y difícil de hacer como debe hacerse; Pero no podía satisfacerse, hasta que lo hubiese cumplido. Sin embargo, sólo lo propongo, y dejo a cada hombre que siga su propio método.

En cuanto al contenido de su carta, concibo, mi anterior Respuesta a la Consulta sobre qué número de colores es suficiente, para este efecto [formar la luz blanca]. Que no todos los colores se pueden derivar prácticamente del amarillo y del azul y, consecuentemente, que esas hipótesis son infundadas, así como las implicaciones que tienen. Si usted pregunta, ¿Qué colores no se pueden derivar de amarillo y del azul? Respondo, ninguno de los que definí como Originales; Y si él puede demostrar mediante el experimento, cómo se puede, reconoceré mi error. Tampoco es más fácil enmarcar una Hipótesis suponiendo sólo dos colores Originales en lugar de una variedad indefinida; A menos que sea más fácil suponer que hay sólo dos figuras, tamaños y grados de velocidad o fuerza de los corpúsculos etéreos o pulsos, en vez de una variedad indefinida; lo que ciertamente sería una suposición áspera. Nadie se sorprende por la variedad indefinida de las olas del mar, ni por las arenas de las playas; Pero, si fueran todas de sólo dos tamaños, sería un fenómeno muy "desconcertante", y creo que inexplicable, si las varias partes o corpúsculos, en que consiste un cuerpo brillante, que se deben suponer de varias figuras, tamaños y movimientos, impresionaran sólo dos tipos de movimiento sobre el medio etéreo circundante, o cualquier otra forma engendraran sólo dos tipos de rayos. Pero, es además mi propósito, examinar cómo los colores pueden ser explicados hipotéticamente. Nunca pretendí mostrar, en qué consisten la Naturaleza y la Diferencia de los colores, sino sólo demostrar que de hecho son cualidades originales e inmutables de los Rayos que los exhiben; y dejar a otros que expliquen, por medio de Hipótesis Mecánicas, la Naturaleza y la Diferencia de esas cualidades: lo que considero que no es una cuestión difícil. Pero no me entenderían, como si su Diferencia consistiera en la Diferente Refrangibilidad de esos rayos; Porque esa diferente Refrangibilidad no conduce a su producción, sino que separa los Rayos por sus cualidades. De donde se observa que los mismos Rayos exhiben los mismos Colores cuando están separados por cualquier otro medio; así como por su diferente Reflexibilidad, una cualidad aún no discutida.

En el siguiente detalle, donde [Huygens] mostraría, que no es necesario mezclar todos los colores para la producción de blanco; la mezcla de amarillo, verde y azul, sin rojo, ni violeta, que propone para ese fin, no producirá blanco, sino verde, y la parte más brillante del amarillo no dará otro color que el amarillo, si el experimento se hace en una habitación bien oscura, como debería; Porque la Luz Coloreada está muy debilitada por la Reflexión, y por tanto puede ser diluida por la mezcla de cualquier otra luz dispersante. Pero aún hay un Experimento o dos mencionados en mi Carta del número 88 de las *Transactions*, por las cuales he producido el Blanco a partir de dos colores y de manera variada, como con Naranja y el azul pleno, con el Rojo y azul pálido, y a partir del amarillo y el violeta, como también de otros pares de colores intermedios. El experimento más conveniente para realizar esto, fue el de hacer incidir los colores de un Prisma sobre los de otro, mediante la debida manera. Pero lo que [Huygens] puede deducir de esto, no lo veo. Pues los dos colores estaban compuestos de todos los demás, y por lo tanto el Blanco resultante, (para decirlo correctamente), estaba compuesto de todos ellos, y sólo se descompuso en esos dos.

Por ejemplo, el naranja se compone de rojo, naranja, amarillo y un poco de verde; Y el azul, de violeta, del azul pleno, de la azul claro, y de algo de verde, con todos sus grados intermedios; Y por lo tanto el anaranjado y el azul juntos, hicieron un Agregado de todos los colores para constituir el blanco. Así, si uno mezcla los polvos rojo, naranja y amarillo para hacer un naranja; y verde, azul y colores violeta para hacer un azul; Y por último, las dos mezclas, para hacer un gris; que el gris aunque descompuesto de no más de dos Mezclas, está compuesto aún de los seis polvos, tan verdaderamente como si los polvos hubieran sido mezclados todos a la vez.

Esto es tan claro, que yo concibo que no puede haber más escrúpulos; Especialmente a los que saben cómo examinar, si un color es simple o compuesto, y de qué colores se compone; Que habiendo explicado en otro lugar, no necesito ahora repetir. Si, por tanto, [Huygens] concluyera algo, debería demostrar cómo puede producirse el blanco a partir de dos colores no compuestos y que, cuando lo haya hecho, le diré además, por qué no puede concluir nada de eso, ya que creo que no se puede encontrar un experimento de ese tipo; Porque, como recuerdo, una vez probé, por sucesión gradual, mezclar todos los pares de colores no compuestos ; y aunque algunos de ellos eran más pálidos y más cercanos al blanco que otros, ninguno podía ser verdaderamente llamado Blanco. Pero habiendo transcurrido algunos años desde que este ensayo fue hecho, no recuerdo bien las circunstancias, y por lo tanto recomiendo que sea ensayado otra vez.

Por último, si hubiera pensado, las diferencias de imagen, que (por ejemplo) una lente objeto de doce pies arroja en una habitación oscura, eso es tan contrario a mí como [Huygens] se complace en afirmar, debería haber postergado mi teoría por ese punto antes de proponerla. Pues, si yo hubiese pensado en esa dificultad, se puede fácilmente adivinar — por una expresión, que hice en algún lugar de mi primera Carta con ese propósito — que me preguntaría cómo los telescopios podían ser llevados a una perfección tan grande provocando refracciones tan irregulares. Pero, para eliminar la dificultad, debo dar a conocer, primero, que, aunque considero que el error lateral más grande de los rayos de uno a otro pueda ser cercano al 1/50 del diámetro de las lentes, su mayor error entre los puntos sobre los que deberían caer, será sólo 1/100 de ese diámetro: De modo que los rayos, cuyo error es tan grande, son muy pequeños en comparación con los que se refractan más. Justamente; como los rayos que caen sobre las partes medias de la lente son refractados con exactitud suficiente, así como los que caen cerca del perímetro y tienen un grado medio de Refrangibilidad; De modo que quedan solamente los rayos, que caen cerca del perímetro y son los más o menos refrangibles son los que pueden causar alguna confusión sensible en la imagen. Y éstos están aún más debilitados por el espacio mayor por el cual están dispersados y que la Luz que cae sobre el punto debido es infinitamente más densa que la que cae en cualquier otro punto alrededor de ella.

Que aunque puede parecer una paradoja, sin embargo es ciertamente demostrable. Aunque la Luz, que atraviesa las partes medias de la lente fuera enteramente interceptada, la luz restante se reuniría infinitamente más densa en los puntos debidos, que en otros lugares. Y por este exceso de Densidad, la Luz, que cae o se oculta cerca del punto justo, permite concebir que golpee más vigorosamente al sensorio, que la impresión de la luz débil que incide errada alrededor de ella y que, en comparación, la experiencia muestra que no es lo suficientemente fuerte como para ser animad vertida, o para causar cualquier confusión sensible en la imagen.

Esto, creo yo, es suficiente para mostrar, porqué la imagen aparece tan nítida, a pesar de la refracción irregular. Pero, si esto no lo satisface, [Huygens] puede intentar, si lo desea, establecer cuan nítida aparecerá la imagen, cuando toda la lente esté cubierta excepto un agujero próximo a su borde en un solo lado: Y si en este caso a él le place medir la amplitud de los colores así obtenidos en el borde de la imagen del Sol, él quizás encuentre que se acerca más a mi proposición que la que él espera.

Quizás influido por su polémica con Robert Hooke acerca de la naturaleza de la luz y de los colores, Newton consideró que la sugerencia de Huygens de hacer experimentos con dos colores era un intento de refutar su teoría. Además, la opinión (correcta) de Huygens acerca de que la aberración de un telescopio debe ser mayor que la que había supuesto, exacerbó el tono de la respuesta de Newton excediendo lo que aconsejaba el estilo de intercambio epistolar con un miembro de una Academia extranjera. Por ello, Huygens le puso punto final a la controversia en una carta que le dirigió a Oldenburg el 10 de junio de 1673. En ella, Huygens escribió:

[…] Con respecto a las soluciones del Sr. Newton a las dudas que me surgieron respecto a su teoría del color no serían suficientes para cumplir e incluso producirían nuevas dificultades, pero al ver que él apoya su opinión con tanto calor aparté de mi las ganas de discutir.

6 – 4.7.- La controversia Newton – Leibniz.

A comienzos de 1673, Leibniz viajó a Londres invitado por el Rey de Inglaterra, de quien había sido asesor en Hanover. Allí se contactó con grandes personalidades vinculadas a las ciencias, con varios de los cuales trabó una relación epistolar. Entre ellos estaba Henry Oldenburg[54], a la sazón Secretario de la Royal Society. En marzo de ese mismo año, Leibniz viajó a París donde, con la asistencia de Huygens, se dedicó al estudio de la Geometría analítica. En julio de ese año, renovó su correspondencia con Oldenburg y le comunicó algunos de los descubrimientos que había hecho

[54] Henry Oldenburg, cuyo nombre está tan íntimamente asociado con la historia de los descubrimientos de Newton, nació en Bremen y fue cónsul de esa ciudad en Londres, durante la usurpación de Cromwell. Cuando perdió su trabajo y fue compelido a buscar medios de subsistencia, trabajó como tutor de un noble inglés, a quien acompaño a Oxford en 1656. Durante su estancia en esa ciudad se relacionó con los filósofos que establecerían la Royal Society y, a la muerte de William Crown, el primer Secretario, fue nombrado Secretario Adjunto con el Sr. Wilkins en 1663. Mantuvo una extensa correspondencia con filósofos de todas las naciones y fue el autor de varios trabajos publicados en los *Philosohical Transactions* y otros trabajos que no adquirieron mucha celebridad. Falleció en Charlton, cerca de Greewich, en agosto de 1677.

respecto de las series, particularmente las series para un arco de circunferencia en función de las tangentes. En retribución, Oldenburg le informó de los descubrimientos hechos por Isaac Newton y por James Gregory.

En 1676, por intermedio de Oldenburg, Newton le envió a Leibniz una carta de quince hojas, escritas en quartos y, fechada el 23 de junio, conteniendo muchos de sus descubrimientos analíticos y afirmando que él poseía un método general para encontrar tangentes, pero que consideraba necesario no darlo a conocer todavía[55]. En esta carta no le comunicó ni el método de las fluxiones ni sus principios, sino algunas referencias a las innovaciones que había hecho para obtenerlo. En la carta había dos frases con las letras transpuestas para que no se pudieran leer pero, llegado el caso, mediante la clave de Newton podría establecerse que contenían los fundamentos del método fluxional.

Si al tiempo de recibir esa carta, Leibniz ignoraba totalmente lo que después se conocería como su método diferencial, las pocas pistas que Newton le proveyó pueden haber provocado su curiosidad y estimulado sus esfuerzos por obtener tal método. Newton le había indicado que su método estaba íntimamente conectado con el tema del desarrollo en series. En los últimos años, Leibniz había profundizado sus estudios en esta rama del Análisis, por lo que es altamente probable que la mera indicación de Newton lo llevase a alcanzar su objetivo mediante una investigación directa. Esta probabilidad, puede inferirse de la carta que, el 21 de junio de 1677, le envió a Oldenburg (para ser comunicada a Newton). En la carta, Leibniz comentó que, por un tiempo, había desarrollado un método para encontrar tangentes, que era mucho más general que el método de Slusius[56], y que trabajando con diferencias de ordenadas llegó a encontrar el método diferencial. En la carta explicó su cálculo diferencial con entera franqueza, sin ocultar ningún detalle de importancia, describió el algoritmo que había adoptado, la formación de ecuaciones diferenciales y la aplicación del cálculo a varias cuestiones geométricas y analíticas. A pesar de la novedad importante que expresaba la carta, no obtuvo respuesta, ni de Oldenburg ni de Newton.

Salvo una pequeña misiva fechada el 12 de julio de 1677 no hubo más intercambio de correspondencia entre Leibniz y Oldenburg. A partir de la muerte de Oldenburg, ocurrida en agosto de 1677, tampoco hubo intercambio epistolar con Newton.

El Cálculo diferencial era más versátil que el método de las fluxiones de Newton y, en las manos de Leibniz, hizo rápidos progresos. En el *Acta Eruditorum*, que fue publicada en Leipzig en noviembre de 1684, Leibniz publicó el primer trabajo sobre ello, describiendo el algoritmo de la misma manera que lo había hecho en la carta a Oldenburg y puntualizando su aplicación al trazado de las tangentes y a la determinación de los máximos y mínimos de varias funciones. En ese trabajo comentó que Newton había desarrollado un método similar de Cálculo. En junio de 1686 y en la misma publicación, él retomó el tema y presentó nuevas aplicaciones de su método. A ese tiempo,

[55] Por ello en la carta, donde se supone que habría alguna indicación del método, había dos oraciones con caracteres transpuestos que imposibilitaban su lectura.

[56] René-François de Sluse (1622 – 1685), *Mesolabum seu duae mediae proportionales inter extremas datas per circulum et ellipsim vel hyperbolam infinitis modis exhibitae. Accedit problematum quorumlibet solidorum effectio per easdem curvas, jisdem modis. & appendix de eorundem solutione per circulum & parabolam*, van Milst, lieja, (1659) Newton, que luego revelaría que comenzó a desarrollar las fluxiones veinte años antes, no había publicado una sola palabra sobre el tema, así como tampoco había hecho conocer su notación.

La divulgación del Cálculo diferencial y su versatilidad hizo que comenzara a experimentar rápidos avances en Europa. Principalmente, gracias a los desarrollos de Jakob Bernoulli[57] y de su hermano Johann[58], el método de Leibniz probó ser un medio sumamente eficaz para resolver algunos de los más importantes y más difíciles problemas de la Matemática tales como el de la isocrona, la catenaria, la tractriz, la isocrona paracéntrica o la braquistocrona.

Finalmente, en 1687, con la publicación de los *Principia*, en el segundo Lema del segundo Libro, Newton publicó un resumen de su método. La descripción del Cálculo fluxional apenas ocupó tres páginas[59] y terminó con el siguiente *scholium*:

"En una correspondencia que tuvo lugar unos diez años atrás, entre el muy inteligente geómetra, G. W. Leibniz y yo, le anuncié que poseía un método para determinar máximos y mínimos, para encontrar tangentes y para realizar operaciones similares, las que eran igualmente aplicables a cantidades racionales como irracionales y oculté lo mismo en letras traspuestas que involucraban esta afirmación (*data equatione quotcunque fluentes quantitates involvente, fluxiones invenire es vice versa*) . Este hombre ilustre respondió que él también arribó a un procedimiento de la misma clase y me comunicó su método que apenas se diferencia del mío excepto en la notación [y en la idea de la generación de cantidades]"[60]

De la lectura de este texto se infiere, naturalmente, que cuando Newton lo escribió consideraba a Leibniz como un segundo inventor. Años más tarde, haría público su cambio de opinión.

Entre los hechos que motivaron el cambio de opinión de Newton respecto de considerar a Leibniz "un segundo inventor" se destaca una comunicación enviada a la Royal Society, en 1699, por Nicolas Fatio de Duiller, un matemático suizo residente en Londres. Esa comunicación consistía en un trabajo sobre el descenso de la pendiente de una curva y en ella, el autor había incluido las siguientes observaciones: "Obligado por la evidencia de los hechos, sostengo que Newton ha sido el primer inventor de este Cálculo y el pionero por muchos años y si Leibniz, *el segundo inventor* tomó prestado alguna cosa del otro, preferiría, por mi propio juicio, al primero al igual que aquellos que han visto las cartas de Newton y las copias de sus manuscritos. A pesar del silencio del muy modesto Newton, el esfuerzo activo de Leibniz en todas partes, adscribiéndose la invención de su Cálculo, se puede imponer sobre cualquier persona que examine esos documentos como yo lo he hecho".

Si bien, de acuerdo con el estilo académico de la época, la observación puede considerarse imprudente, no implicaba necesariamente una denuncia por plagio ya que Duillier lo estaba designan-

[57] También se lo conoció como James Bernouilli (1654 – 1705).

[58] Johann Bernouilli (1667 – 1748) era conocido en Inglaterra como John Bernouilli.

[59] Sin embargo, allí Newton no expuso el algoritmo ni la notación. Recién en 1695 el método sería comunicado al mundo matemático al publicarse en el segundo volumen de las obras del Dr. Wallis.

[60] Las palabras entre corchetes están en la segunda edición (1713) pero no en la primera.

do a Leibniz como *segundo inventor*, pero la expresión "tomó prestado alguna cosa del otro" estaba arrojando algunas sospechas sobre su comportamiento.

Leibniz respondió a la observación de Duiller con muy buena onda. Él apeló a los hechos como los que se exhiben en su correspondencia con Oldenburg; se refirió al *scholium* de Newton como un testimonio a su favor y sin disputar ni reconocer la prioridad en el reclamo, afirmó su derecho a la invención del cálculo diferencial.

Duillier envió una respuesta a las *Leipsic Acts*, pero el editor rehusó insertarla. Por lo tanto, la disputa terminó y los sentimientos de las partes contendientes se mantuvieron por un tiempo en estado de reposo.

Cuando en 1704 apareció la Óptica de Newton, acompañada por su *Treatise on the Quadrature of Curves* y su enumeración de las curvas de tercer orden, el editor de *Leipsic Acts*[61] tuvo ocasión de revisar el primero de esos tratados. Después de dar un análisis somero de sus contenidos, comparó el método de las fluxiones con el Cálculo diferencial y, mediante un texto bastante ambiguo afirmó que Newton empleó fluxiones en lugar de las diferenciales de Leibniz y que las usó en sus *Principia* de la misma manera que Honoratus Fabri en su *Sinopsis of Geometry* había sustituido movimientos progresivos en vez de los indivisibles de Cavalieri.[62] Como Fabri no fue el inventor del método que aquí se comenta, sino que lo tomó de Cavalieri y sólo le cambió la manera de expresarlo, no cabe duda que la expresión de más arriba, podía transmitir la impresión de que Newton le *había robado* su método de fluxiones a Leibniz. La manera en que fue redactado ese texto sugiriendo la idea de plagio, provocó la indignación de muchos científicos ingleses. Muchos *fellows* de la Royal Society sospechaban que Leibniz había sido el autor de la revisión o, en alguna medida, una parte de ella. Por eso, consideraron que correspondía que la entidad ejerciera algún tipo de represalia.

El Dr. John Keill (1671 – 1721), que había sido profesor en Oxford, no pudo tolerar la insinuación agraviante y, en representación de los amigos de Newton publicó una carta en las *Philosophical Transactions* de 1708, en la que sostuvo que Newton era más allá de toda duda, el primer inventor de las fluxiones. Él se refirió a esta afirmación en sus cartas publicadas por Wallis; y afirmó "que el mismo Cálculo fue poco después publicado por Leibniz con el nombre y el modo de notación cambiados."

En una carta a Hans Sloane, Secretario de la Royal Society, fechada en marzo de 1711, Leibniz se quejó de la Royal Society por el tratamiento que había recibido. Él expresó su convicción de que Keill se había equivocado más por el apresuramiento para juzgar que por algún motivo impropio y por eso no consideró que la acusación como una calumnia y él le requirió a la Sociedad que le pida al Sr. Keill que repudie públicamente el sentido injurioso que sus palabras pudieran tener. Cuando

[61] Newton suponía que el editor del *Leipsic act* era el propio Leibniz, o una persona que escribía lo que Leibniz le ordenaba.

[62] El texto original decía: "Pro differentiis igitur Leibnitianis D, Newtonus adhibet, semperque adhibuit, fluxiones, quæ sunt quam proxime ut fluentium augmenta, æqualibus temporis particulis quam minimis genita; iisque tam in suis Principiis Naturæ Mathematicis, tum in aliis postea editis, eleganter est usus; quem admodum er Honoratus Fabrius in sua Synopsi Geometrica, motuumque progressus Cavallerianæ método substituit."

esta carta fue leída en la Society, Keill se justificó ante Sir Isaac Newton y los otros miembros mostrándoles la odiosa revisión de *Quadrature of Curves* en el *Leipsic Acts*. Todos acordaron agregar el mismo significado injurioso al párrafo que hemos citado antes y autorizaron a Keill a explicar y defender su afirmación. De acuerdo con esto, Keill le envió una carta a Sir Hans Sloane, que fue leída en la Society el 24 de marzo de 1711 y se ordenó que una copia de la misma le fuera enviada a Leibniz. En esta carta, que es de considerable extensión él declaró que nunca quiso dar a entender que Leibniz conocía el nombre del método de Newton o su forma de notación y que el significado real del párrafo era "que Newton fue el primer inventor de las fluxiones o del cálculo diferencial y que eso se lo había expresado en dos cartas a Oldenburg y las cuales se las trasmitió a Leibniz con indicaciones de ello *lo suficientemente inteligibles para una mente aguda*, de lo cual Leibniz derivó, o al menos, podía haber derivado los principios de su Cálculo diferencial".

El cargo de plagio, que podía considerarse implicado en la carta anterior de Keill, fue aquí atenuado bastante, aunque no negado por completo. En esta carta Keill expresó su *opinión* de que la carta que Newton le envió a Leibniz *contenía indicios inteligibles* del cálculo fluxional, pero no había ninguna afirmación acerca de si Leibniz los vio o no o si los aprovechó o no, o si ya había desarrollado su propio método con anterioridad a la recepción de la carta.

Leibniz consideró que era una respuesta "elegante" pero que no se retractaba de la acusación de plagio, sino que la insinuaba. Por ello le escribió una carta a Sir Hans Sloane, fechada el 19 de diciembre de 1711, alegando que Keill había atacado su candor y sinceridad de manera más abierta que antes; que había actuado sin ninguna autorización de Isaac Newton, que era la parte interesada y que era en vano justificar su proceder al referirse a la provocación en la *Leipsic Arts*, porque esa revista *no había cometido ninguna injusticia a ninguna de las partes porque cada uno recibió lo que le era debido*.

En esa carta, calificó a Keill como advenedizo y poco familiarizado con las circunstancias del caso[63] e hizo un llamado a la Society para silenciar sus clamores vanos e injustos[64], las cuales, él creía, que serían desaprobadas por el mismo Newton, que estaba muy familiarizado con los hechos y que, él estaba persuadido, de buena gana daría su opinión sobre el asunto.

Lo que Leibniz no sabía, era que Keill había escrito la carta con pleno conocimiento y autorización de Newton. La carta fue aprobada y trasmitida por la Royal Society, de la cual Newton era Presidente y Leibniz era miembro, por lo cual se convirtió en un acto oficial de la institución.

La carta de Leibniz produjo una irritación mayor en la Royal Society. La declaración "*cada uno recibió lo que le era debido*" fue tomada por los integrantes de la Royal Society como una adhesión de Leibniz a la opinión del revisor de la *Leipsic Acts,* la que para ellos significaba la asignación a Newton del cargo de plagiario.

El 11 de marzo, Newton nombró un comité integrado por el Dr. Arbuthnot, el Sr. Hill, el Dr. Halley, el Sr. Jones, el Sr. Machin y el Sr. Burnet a quienes les dio instrucciones para examinar los

[63] Homine docto, sed novo, et parum perito rerum ante actarum cognitare.
[64] Vanæ et injustæ vociferaciones.

registros antiguos de la Society, a investigar la disputa y producir los documentos que ellos pudieran encontrar conjuntamente con sus propias opiniones sobre el tema. En esa comisión no había ningún miembro que pudiese apoyar la postura de Leibniz. El 24 de abril el comité produjo el siguiente informe:

"Hemos consultado las cartas y los libros de correspondencia en custodia de la Royal Society y hemos encontrado entre los papeles del Sr. John Collins, fechados entre los años 1669 y 1677 inclusive y las hemos mostrado a quien las conoce y las reconocidas como entregadas en mano de los Sres. Barrow, Collins, Oldenburg y Leibniz y comparamos las del Sr. Gregory con cada uno de ellos y con copias de cada una de ellas entregadas en mano del Sr. Collins y extractamos de ellas lo relacionado con el asunto que se nos encomendó, todo lo extraído al presente se entrega a Ud. creemos que es genuino y auténtico y mediante estas cartas y papeles encontramos que:

"I. El Sr. Leibniz estuvo en Londres a comienzos del año 1673 y, por lo tanto fue en marzo o alrededor de marzo a Paris, donde mantuvo una correspondencia con el Sr. Collins por medio del Sr. Oldenburg, hasta alrededor de septiembre de 1676 y luego regresó a Londres y de allí a Ámsterdam y a Hanover: y que el Sr. Collins fue muy libre en la comunicación a los matemáticos notables de lo que había recibido del Sr. Newton y del Sr. Gregory.[65]

II. Que cuando el Sr. Leibniz estuvo por primera vez en Londres, él disputó la invención de otro método diferencial, propiamente así llamado y, a pesar de que el Dr. Pell le había mostrado que era el método de Newton[66], persistió en mantener que era su propia invención, mediante la razón de que lo había encontrado sin conocer lo que Newton había hecho antes, y que lo había mejorado mucho. Pero no encontramos alguna mención de que él tenía algún otro método diferencial que el de Newton antes de su carta del 21 de junio de 1677, que fue un año después que una copia de la carta de Newton del 10 de diciembre de 1672, fue enviada a Paris para serle comunicada y alrededor de cuatro años después que el Sr. Collins, comenzó a comunicarle a sus corresponsales, en cuya carta el método de las fluxiones estaba suficientemente descrito para cualquier persona inteligente.

III. Que por la carta del Sr. Newton del 13 de junio de 1676[67], parece que él tenía el método de las fluxiones alrededor de cinco años antes de escribir esa carta. Que por su *Analysis per Æquationes numero Terminorum Infinitas*, comunicada por el Dr. Barrow al Sr. Collins, en julio de 1669, encontramos que él había inventado el método antes de esa fecha.

IV. Que el método diferencial es uno y el mismo que el método de las fluxiones, excepto el nombre y el modo de notación, el Sr. Leibniz llama a esas cantidades *diferenciales* a las cuales el

[65] En ninguna de las cartas de Collins figura que le envió información a Leibniz sobre el método de las fluxiones. Collins había fallecido en 1683. Por lo tanto, no podía dar testimonio si le entregó o no una copia de *De analysi* ... a Leibniz.

[66] Pell le informó a Leibniz sobre el método de Mercator para la cuadratura de la hipérbola y no el método generalizado de Newton. Ya hemos mencionado que Leibniz le informó a Pell que su método se aplicaba a arcos de circunferencia.

[67] La carta estaba fechada el 21 de junio.

Sr. Newton llama *momentos de fluxiones*, y marcándolas con la letra *d* , marca no usada por el Sr. Newton.

Por lo tanto, encaramos el problema de determinar no quien inventó tal o cual método sino quien fue el que inventó primero ese método. Y creemos que aquellos que han reputado al Sr. Leibniz el primer inventor, sabían poco o nada de su correspondencia con el Sr. Collins y con el Sr. Oldenburg mucho antes, ni que el Sr. Newton tenía este método alrededor de 15 años antes de que el Sr. Leibniz comenzara a publicar en el Acta Eruditorun de Leipsic.

"Por esta razón, reconocemos al Sr. Newton como el primer inventor y, en nuestra opinión, el Sr. Keill, al afirmar lo mismo, de ningún modo ha sido injurioso hacia el Sr. Leibniz. Y ponemos a consideración de la Society si el extracto y los papeles que ahora les presentamos, conjuntamente con lo atinente al mismo propósito que figura en el tercer volumen de la obra del Dr. Wallis no merece ser hecho público"

Una vez que este informe fue leído, la Society inmediatamente ordenó que fueran impresos todas las cartas y manuscritos y nombró al Dr. Halley, al Sr. Jones y al Sr. Machin para supervisar la impresión. Bajo el título *Commercium Epistolicum D. Johannis Collins et aliorum de analyst promota* fueron enviados a la Society el 8 de enero de 1713 e Isaac Newton, como Presidente, ordenó que le fuera enviada una copia a cada persona integrante del comité para ser examinadas antes de su publicación.

Leibniz recibió información de la aparición del *Commercium Epistolicun* cuando estaba en Viena y "se mostró satisfecho" — según lo expresó — "de que debe contener maliciosas falsedades" y le escribió a Johann Bernoulli poniéndolo al tanto de lo que estaba ocurriendo.

El 7 de junio, Bernoulli, — que había descubierto un error en el tratamiento de Newton del Corolario I a las Proposiciones 11 – 13 de los Principia y había escrito dos artículos explicándolo — le escribió a Leibniz una carta desde Basilea en la cual dijo que le parecía probable que Sir Isaac Newton haya elaborado su Calculus después de haber visto el de Leibniz. Esa carta circuló ampliamente y fue publicada, con aclaraciones de amigos de Leibniz, en el *Journal Literaire*.

A principios de 1714, John Chamberlayne intentó mediar entre los dos distinguidos filósofos y el 28 de abril de 1714[**] le envió una carta a Leibniz que aún se encontraba en Viena. En respuesta a esa carta, Leibniz declaró que él no había dado lugar a la disputa, que Newton había "procurado la publicación del *Commercium Epistolicum* con el propósito de desacreditarlo y enviado a Alemania, etc., en nombre de la Society" y afirmó que no había lugar a dudas que Newton conoció su invento en 1677 antes que él conociera al del inglés en 1687.

Chamberlayne le comunicó esta carta a Sir Isaac Newton, quien replicó que Leibniz había atacado su reputación en 1705 al insinuar que el método de las fluxiones lo había tomado de él y si Chamberlayne podía puntualizarle alguna cosa en la cual él hubiese injuriado al Sr. Leibniz, el brindaría las correspondientes satisfacciones, que no se iba a retractar de ninguna cosa que sabía

[**] Ver Des Maizeaux, tom. ii. p. 116.

que eran ciertas y que creía que la Royal Society no había hecho ninguna injusticia al publicar el *Commercium Epistolicum.*

Cuando la Royal Society tomó conocimiento de que Leibniz se había quejado de que lo habían condenado sin escuchar su descargo, insertaron una declaración en sus *Journals* del 20 de mayo de 1714, donde dijeron que ellos no pretendieron que el informe del Comité fuese considerador como una decisión de la Society (*Sic*). Chamberlayne le envió a Leibniz una copia de esta declaración, conjuntamente con la carta de Sir Isaac Newton y la respuesta de Keills al paper insertado en el *Journal Literaire*. Luego de analizar esos documentos, Leibniz contestó que Sir Isaac Newton había escrito con muy poca urbanidad y que él no estaba de ánimo para apasionarse en una discusión con tal tipo de gente y que había otras cartas entre las de Oldenburg y Collins que deberían haberse publicado y que a su regreso a Hanover, podría ocuparse en publicar otra *Commercium epistolicum* que quedaría al servicio de la Historia de la enseñanza". Cuando esta carta fue leída ante la Royal Society, Sir Isaac Newton remarcó que la última parte de ella acusaba injuriosamente a la Society de haber hecho una selección parcial de los escritos para la *Commercium Epistolicum*, que él no había interferido en modo alguno como la publicación de ese trabajo y que había retenido del Comité dos cartas, una de Leibniz de 1693 y otra de Wallis de 1695, que eran altamente favorables a su causa. Él afirmó que no pensaba que era adecuado para el Sr. Leibniz pero que, si él tenía cartas para mostrar a su favor, ellas podían ser publicadas en las *Philosophical Transactions* o en Alemania.

Alrededor de ese tiempo, el Abate Antonio Schinella Conti, un noble veneciano vino a Inglaterra. Él era corresponsal de Leibniz y, a raíz de una carta que había recibido a poco de su arribo a Londres[***], él se enteró en la disputa con Newton. En ella, Leibniz acusó al inglés de "querer pasar como el único inventor" y declaró que Johann Bernoulli había juzgado correctamente al decir "que Newton no había poseído antes que él las características infinitesimales y el algoritmo" Remarcó que Newton lo había precedido sólo en series, y confesó que en su segunda visita a Inglaterra, "Collins le mostró parte de su correspondencia" o, como lo expresó después, el vio "algunas de las cartas de Newton a Collins" y conoció la filosofía de Sir Isaac, particularmente sus opiniones acerca de la gravedad y el vacío, la intervención de Dios en la preservación de sus criaturas y lo acusó de haber revivido las *cualidades ocultas* de los escolásticos. Pero el pasaje más notable de esa carta es el siguiente:

"Yo soy un gran amigo de la filosofía experimental, pero Newton se desvió mucho de la misma cuando pretende que toda la materia es pesante, o que cada partícula de materia atrae a toda otra partícula"

La carta de Leibniz al Abate Conti fue difundida ampliamente en Londres y fue muy comentada en la Corte a raíz de que Leibniz había sido consejero privado del Elector de Hanover cuando ese Príncipe accedió al trono de Inglaterra. Muchas personas distinguidas y, particularmente, el Abate Conti, urgieron a Newton a responder la carta de Leibniz, por lo que lo hizo mediante una carta fechada el 26 de febrero de 1715 – 1716. En ella afirmó que cuando Leibniz estuvo en Londres en

[***] Escrita en noviembre o diciembre de 1715.

octubre de 1676[68], Collins le mostró una carta en la que Newton le había resumido su método. La carta estaba fechada el 24 de octubre de 1676. Newton afirmó que Leibniz no sólo vio esa carta sino todas las anteriores. "En ellas", escribió, "yo describí mi método de fluxiones y en esa última describí también dos métodos generales para las series, uno de los cuales es hoy reclamado por el Sr. Leibniz como suyo"

Al transmitir esta carta a Leibniz, el Abate Conti le informó que la había leído con gran atención y sin el menor prejuicio, el *Commerciun Epistolicum* y esta pequeña pieza[*] que contiene el extracto. "De todo esto", escribió, "infiero que si se eliminan todas las digresiones, el único punto es si Sir Isaac Newton obtuvo el método de las fluxiones o infinitesimales antes que Ud., o si Ud., lo obtuvo antes que él. Ud. lo publicó primero, es cierto, pero Ud. ha reconocido también que Sir Isaac Newton, en sus cartas, le dio muchos indicios sobre ello al Sr. Oldenburg y a otros. Esto ha sido probado muy extensamente en el Commercium y en su extracto. ¿Qué respuesta me da? Esto es lo que le falta al público para formarse un juicio exacto del asunto." El Abate agregó que los propios amigos del Sr. Leibniz esperaban su respuesta con gran impaciencia y que ellos pensaban que no podía abstenerse de contestarle, si no al Sr. Keill, al menos al mismo Sir Isaac Newton que lo había desafiado en términos muy expresos.

Leibniz no tardó mucho en cumplir con este pedido. Le envió una carta al Abate Conti, con fecha 9 de abril de 1716, pero también, a través de su amigo, el Sr. Raimond de París, se la comunicó a otros. Cuando el Abate Conti la recibió, Newton escribió algunas observaciones sobre ella, pero sólo las comunicó a algunos amigos, las cuales, si bien sostenían su defensa sobre una base infranqueable, al mismo tiempo arrojaban mucha luz sobre la temprana historia de sus descubrimientos matemáticos.

La muerte de Leibniz el 14 de noviembre de 1716, puso fin a esta controversia y algún tiempo después Newton publicó la correspondencia con el Abate Conti, que hasta ese momento sólo circulaba privadamente entre los amigos de los contendientes.[*]

En 1722, se publicó una nueva edición de los Commercium Epistolicum a la cual se le prefijó una revisión general de los contenidos, la que fue adjudicada a Newton.[†]

---

[68] Leibniz volvió de Londres en septiembre de 1676. Regresando a Paris, Amsterdam y Hanover. Cfe. The English Cyclopædia, Arts and Sciences, Vol. III, Scribner, London (1867). Página 78.

[*] Esta es la *Resencio Comercii Epistolicii*, o una revisión de la misma, que fue publicada por primera vez en las *Phil. Trans.*, en 1715.

[*] jean Baptiste Biot resaltó que la animosidad de Newton no se calmó por la muerte de Leibniz, ya que ni bien se enteró, hizo imprimir dos cartas manuscritas de Leibniz, escritas el año anterior acompañándolas con una refutación muy amarga (*en les accompagnant d'un refutation tres-amere*). Algunos partidarios de Newton aseguraron que la "amarga refutación" fue escrita antes de la muerte de Leibniz y, consecuentemente, Newton no mostró animosidad sobre la tumba de su rival. Pero aunque haya sido escrita antes de la muerte no se debió publicar pues un muerto no puede replicarla.

[†] Biot afirmó que Newton hizo que se imprimiera esta edición del *Commercium Epistolicum* y que colocó en el encabezado un resumen parcial de la colección, resumen que parece haber sido escrito por él mismo.

Cuando, en 1725, se publicó la tercera edición de los *Principia*, el célebre *scholium* del Lema II del Libro segundo, en el cual se mencionaba el calculus diferencial de Leibniz, fue eliminado por Newton.

La mayoría de los matemáticos ingleses tomaron partido por Newton. En cambio, en el Continente, durante los siglos XVIII y XIX, se consideró a Leibniz como el inventor del Cálculo diferencial, no sólo por su mayor versatilidad, sino por la carta del 21 de junio de 1677 a Oldenburg, donde Leibniz le explica con detalles su cálculo diferencial, por haberlo publicado dos años antes de que Newton diera a conocer un resumen de su método en los Principia y por el reconocimiento de Newton efectuado en el *scholium* del Libro II de su obra. Entre los matemáticos que sustentaron esta opinión, pueden citarse a Johann Bernoulli, Leonhard Euler, Joseph-Louis de Lagrange, Pierre Simon de La place, Siméon Denise Poisson, Pierre-Louis Moreau de Maupertuis y, especialmente, a Jean Baptiste Biot, quien hizo un exhaustivo análisis de toda la documentación involucrada en la controversia, marcando la parcialidad de la Royal Society respecto de la misma.

Bibliografía:

Birch, T: (**1756**): *The History of The Royal Society of London for Improving of Natural Knowledge from its First Rise,* Vols. I y II, A. Millar, London.

Birch, T: (**1757**): *The History of The Royal Society of London for Improving of Natural Knowledge from its First Rise,* Vols. III, IV, A. Millar, London.

Blackwell, R. J. (traductor), (**1986**): *Christiaan Huygens' the pendulum clock, or, Geometrical demonstrations concerning the motion of pendula as applied to clocks*. Iowa State University press, Ames.

Brewster, D., (**1831**): *The Life of Sir Isaac Newton*, J. & J. Harper, New York.

Brewster, D., (**1855**): *Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton*, Vol. I y II, Thomas Constable & Co, Edinburgh.

Des Cartes, R., (**1824**): « *Œuvres de Descartes, La Dioptrique* » T. V., Victor Cousin, Paris.

Grimaldi, F. M., (**1665**): *Physico-Mathesis de Lumine*, Libri Duo, Victorii Benatij, Bononiæ.

Huygens, Ch., (**1895**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance* 1666 – 1669, Tome 6º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1897**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance* 1670 – 1675, Tome 7º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1899**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance* 1676 – 1684, Tome 8º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1901**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance* 1685 – 1690, Tome 9º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1905**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Correspondance* 1691 – 1695, Tome 10º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1905**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens, Supplément a la Correspondance Varia et Biographie de Christiaan Huygens*, Tome 22º, Societé Holandaise des Siences, La Haye

Huygens, Ch., (**1932**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens¸Le horloge a pendulum* 1657, Tome 17º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Huygens, Ch., (**1937**): *Œuvres Complètes de Christiaan Huygens¸ Mécanique Théorique et physique de* 1666 a 1695, Tome 19º, Societé Holandaise des Siences, La Haye.

Johnson, L. W., Wolbarsht, M. L.: "Mercury Poisoning: A Probable Cause of Isaac Newton's Physical and Mental ills", *Notes and Records of The Royal Society of London*, 1979 Jul;34(1):1-9.

Lohne, Johs. "Hooke versus Newton: An Analysis of the Documents in the Case on Free Fall and Planetary Motion," *Centaurus* 7 (1960), 6–52; on 48–49.

Louise Diehl Patterson, "Hooke's Gravitation Theory and its Influence on Newton", *Isis* 40, November 1949, pp. 327-341.

Louise Diehl Patterson, "Hooke's Gravitation Theory and its Influence on Newton, II. The Insufficiency of the Traditional Estimate", *Isis* 41, march 1950, pp. 32 – 45.

Michael Nauenberg, "Hooke, orbital motion, and Newton's Principia," *American Journal of Physics* 62 (1994), 331–350.

Newton, I., (**1687**): *Philosophiæ naturalis Principia Mathematica*, The Royal Society, London.

Newton, I., (**1704**) : *Optiks : or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, Smith & Warford, London.

Ronchi, V., (**1983**): *Storia della luce*, Laterza Editori, Bari.

Waller, R., (Editor), (**1705**): *The Posthumous Works of Dr. Robert Hooke*, The Royal Society, London.

VII. LA MECÁNICA EN EL SIGLO XVIII

7 – 1.- Pierre-Louis Moreau de Maupertuis

Figura 7.1. P. L. M. de Maupertuis.

Fue filósofo, matemático y astrónomo. Nació el 28 de septiembre de 1698 en Saint Malo. Su padre, René Moreau de Maupertuis fue el representante de Bretaña ante el Consejo Real de Comercio.

En 1714 Maupertuis ingresó al Collège de la Marche donde estudió filosofía durante dos años. Luego comenzó a estudiar música y finalmente se interesó seriamente por la Matemática. A los veinte años, su padre gestionó su ingreso como teniente al Regimiento de La Roche Guyon, estacionado el Lille. Sin embargo, la carrera militar no le interesó demasiado y en 1722 la abandonó para viajar a Paris y dedicarse de lleno al estudio de la Matemática.

En 1723 fue nombrado miembro Adjunto en Geometría de la Académie des Sciences, aunque su trabajo "*Sur la forme des instruments de musique*",[1] versó sobre aspectos físicos de los instrumentos musicales. En 1725 pasó de la categoría Adjunto a la de Asociado, pero en Astronomía, aunque siguió publicando gran cantidad de trabajos sobre geometría[2]. En 1728 viajó a Inglaterra donde permaneció durante seis meses actualizando sus conocimientos matemáticos y enriqueciéndolos con la aplicación del cálculo diferencial e integral. Luego viajó

---

[1] Histoire de l'Académie des Sciences 1724, p. 90. *Mémoires de l'Académie des Sciences,* 1724, p. 245.

[2] Observations, sur des courbes paraboliques qui auront des aires données correspondantes des abscisses données. *Hist*., 1726 p. 42.

Observations, sur une question de *maximis* et *minimis*. *Mém*., 1726 p. 84.

Quadrature et rectification des figures formées par le roulement des polygones réguliers. *Hist*., 1727, p. 52; *Mém*., 1727 p. 204.

Nouvelle manière de développer les courbes. *Hist*., 1727, p. 57 ; *Mém*., p. 340.

Observations sur toutes les développées qu'une courbe peut avoir l'infini. Hist., 1728, p. 58; Mém., 1728, p. 225. Observations sur quelques affections des courbes. Hist., 1729, p. 44; Mém,.1729, p. 277.

a Basilea, donde estudió con Johann Bernoulli. Como resultado de su aprendizaje, al regresar a París escribió para la Académie un trabajo[3] sobre la "*curva descensus aequabilis*"[4] propuesto por Leibniz en 1687, resuelto por Johann Bernoulli en 1694 y generalizado por Pierre Varignon en 1699. Pero mientras Bernoulli y Varignon lo habían resuelto para medios no resistentes, Maupertuis lo resolvió para medios resistentes.

En 1731 Maupertuis publicó su primer trabajo sobre Astronomía: un método para encontrar, mediante una única observación, la distancia de la aurora boreal a la Tierra[5]. Al año siguiente envió un trabajo[6] a la *Royal Society* en el que se ocupó de la rotación de los cuerpos. En él hay una discusión sobre la naturaleza de los anillos de Saturno (que él creía que era la cola de un cometa capturada por el planeta) y el contorno que adquiere un cuerpo en rotación.

En noviembre de 1732, fue uno de los primeros científicos franceses en aceptar la teoría de la gravitación de Newton al publicar uno de sus trabajos más importantes[7], sobre las figuras de los astros. En el segundo capítulo, titulado *Discussion métaphysique sur l'attraction* trató de demostrar que cuando se la considera como una propiedad de la materia, la teoría newtoniana no contiene nada de absurdo o contradictorio. Al compararla con la hipótesis de los vórtices de Descartes, demostró que esta está en contradicción con las leyes de Kepler. En este trabajo, Maupertuis anticipó su posición sobre el contorno de la Tierra.

Desde los tiempos de Eratóstenes, los científicos habían intentado medir los meridianos terrestres. En 1616, Willebrord Snel van Royen (1580 – 1626) intentó calcular, mediante triangulación, el radio de la Tierra a partir de la determinación del arco de meridiano entre dos localidades holandesas, Alcmaer y Berg-op-Zoom[8]. Snel calculó la distancia entre esas dos localidades en 34018 perches[9], equivalente a 132,202 *km*. La diferencia de latitudes entre ellas es de 1º 11' 30", lo que permite deducir una cuerda de 90,117 *km*. A partir de este valor, encontró el radio de la Tierra igual a 6356,3 *km*. A principios del siglo XVIII, Cassini rehizo los cálculos de Snel, pero la comprobación experimental de que la Tierra no es esférica puso en evidencia que el valor de su radio depende de la diferencia de las latitudes entre los puntos de su superficie.

Entre los trabajos propuestos para determinar el radio de la Tierra, se encuentran dos, escritos por Maupertuis en 1733[10] y 1735[11]. En el primero, propuso cinco problemas relativos a la figura de

---

[3] Observations, sur la courbe *Descensus æquabilis*, dans un milieu résistant comme une puissance quelconque de la vitesse. *Hist*., 1730, p. 94; *Mém*., 1730, p. 233 (29 novembre).

[4] Una curva isócrona tal que una partícula cae sobre ella con movimiento uniforme respecto de la vertical.

[5] Problème astronomique. *Mém*., 1731, p. 464.

[6] Maupertuis, L. "De figure quas Fluida rotata induere possant", *Phil. Trans.* 1733, pp. 240 – 256.

[7] Discours sur les différentes figures des astres, d'où l'on tire des conjectures sur les étoiles qui paraissent changer de grandeur et sur l'anneau de Saturne, avec une exposition abrégée des systèmes de Descartes et de Newton. *Hist*., 1732, p. 85.

[8] Su método fue publicado en 1617 en Eratosthenes Batavus, sive de terræ ambitus vera quantitate.

[9] 1 perche = 12 pies (Rhenish) = 12 × 03238535 m.

[10] Observations sur la figure de la terre et sur le moyens que l'atronomie et la géographie fournissent pour la determiner. *Mém.* 1733, p. 453.

[11] Observations sur la figure de la terre. *Hist.*, 1735, p. 302.

la Tierra, suponiéndola un elipsoide de revolución, pero sus soluciones eran casi imposibles de comprobar experimentalmente. En el segundo trabajo propuso establecer un sistema de cuatro ecuaciones una de cuyas variables, la longitud de un grado de arco de meridiano en el ecuador debía determinarse empíricamente. Con ese dato se podía resolver el sistema y calcular el radio de la Tierra en el Ecuador. Su trabajo despertó tal interés que fue preparada una expedición al ecuador para esa comprobación. Poco después de la partida, Maupertuis comandó otra expedición, esta vez a Laponia, para medir la longitud de un grado de arco de meridiano en las proximidades del Polo. La expedición de Maupertuis culminó con éxito su tarea, demostrando que la Tierra no es esférica sino que su contorno es parecido a un elipsoide de revolución en el que los polos están achatados en 1/300 del diámetro ecuatorial.

De los experimentos realizados en su viaje, Maupertuis encontró que el peso de un cuerpo en París era al de ese cuerpo en Laponia como 100,000 es a 100,137.

En 1740 fue invitado por el Rey Friedrich der Große para ir a Alemania. El Rey le informó que pensaba fundar la Academia de Berlín y le propuso a Maupertuis ser su Presidente. Estando en Alemania y recordando su pasado militar, en abril de 1741, Maupertuis acompañó al Rey en la batalla de Mollwitz, donde fue tomado prisionero por soldados austríacos y llevado a Viena. En Viena fue liberado y enviado a Berlín. Regresó a París en junio, donde fue nombrado Director Asistente de la Académie. Al año siguiente fue nombrado Director. Sin embargo, su enemistad con los Cassini provocó que estando en Berlin, fuera desplazado de la Académie.

En Berlín, en 1745, se casó con Eleonor von Borck y el 12 de mayo de 1746 asumió formalmente la Presidencia de la *Berliner Akademie,* cargo que detentó durante ocho años.

Maupertuis escribió sobre diversos temas que abarcaron Matemáticas, Geografía, Moral, Filosofía, Biología, Astronomía y Cosmología. Una de sus obras más importantes fue *Venus phisique* (1745) donde discutió la teoría biológica de la formación del embrión. Esta obra es considerada por algunos estudiosos como una versión temprana de la teoría de la evolución.

Poco después de asumir la Presidencia de la Berliner Akademie, Maupertuis publicó *Les lois du mouvement et du repos, déduites d'un principe de métaphysique,* donde estableció el llamado *Principio de mínima acción.* En este trabajo, tomó una idea esbozada cuatro años antes en su *Essai de Cosmologie,* de que en las leyes físicas subyace una lógica divina según la cual para que el Universo funcione a la perfección, todos los fenómenos que en él ocurren deben obedecer a un supremo principio de economía. Sobre esta base propuso que cuando un cuerpo. que se puede considerar como un punto material, evoluciona espontáneamente modificando su posición desde un punto *A* hasta otro punto *B,* su trayectoria será tal que el producto de la cantidad de movimiento (*p*) por el desplazamiento producido (*s*) hará mínima la integral curvilínea $\int_A^B \boldsymbol{p\,ds}$. Leonhard Euler (1707 – 1783) y Lagrange formalizaron el tratamiento matemático de este principio y William Rowan Hamilton (1805 – 1865) le encontró un gran número de aplicaciones a la Mecánica.

Maupertuis falleció el 27 de julio de 1759 en Basilea, Suiza.

7 – 2.- Daniel Bernoulli

Figura 7.2. Daniel Bernoulli

Daniel Bernoulli nació el 9 de febrero de 1700 en Groningen, donde su padre Johann Bernoulli (1667 – 1748) era Profesor de Matemáticas. Jakob Bernoulli, (1654 – 1705) el hermano de Johann fue también un distinguido matemático y Profesor en la Universidad de Basilea. Como integrante de esa familia, Daniel recibió pronto una excelente educación científica, pero su padre no quería que él fuese matemático, sino comerciante. Tanto Johann como su hermano mayor habían sido destinados al comercio, pero ambos resistieron a los deseos de sus padres. Copiando la actitud de su padre, Daniel despreció el comercio. En su *Éloge de M. Bernoulli*, escribió poéticamente "*... ses yeux étoient accoutumés dès l'enfance à l'éclat de la gloire, & on ne put le résoudre a les abaisser sur la fortune*"[12]. Pero consciente de que los motivos de su padre eran que tuviese una actividad sin mayores apremios económicos, se decidió a estudiar Medicina, que aseguraba una profesión liberal, respetada y que permitía un buen pasar.

En 1705, al morir Jakob Bernoulli su hermano Johann ocupó su cátedra de Matemáticas en la Universidad de Basilea y regresó con su familia a su ciudad natal. En Basilea, si bien Daniel iba a estudiar Medicina, su padre, que consideraba a las Matemáticas como el fundamento de todas las ciencias y como un instrumento útil en todas las profesiones, se ocupó en instruirlo en los aspectos más importantes de esa disciplina. Pero la manera de enseñar de Johann Bernoulli habría generado el rechazo de cualquier niño que no hubiese nacido para ser científico. Un día, para probar la capacidad de su hijo, le propuso un pequeño problema. El joven Daniel lo llevó a su cuarto, lo examinó, lo resolvió y volvió, emocionado de gozo, para mostrarlo a su padre. Esperaba aplausos. "El caso es que no lo has resuelto en el acto", fue la única respuesta que recibió. Esa respuesta, el tono en que fue dicha y el gesto que la acompañó, no se borraron nunca de la memoria de Daniel.

En Basilea Daniel Bernoulli aprendió el idioma alemán. Sus estudios fueron tan distinguidos que a su finalización, en 1713, le aseguraban un cargo público. Luego ingresó a la Universidad de Basilea donde obtuvo su Maestría en Artes a fines de 1716.

Como estaba destinado a la carrera de Medicina, siguió con la máxima dedicación a los mejores docentes de la Universidad de Basilea. En 1718 fue a la escuela de Medicina de la Universidad de Heidelberg, donde estudió, bajo la mirada del sabio Daniel Nebel (1664 – 1733), diversas discipli-

[12] "... Sus ojos estaban acostumbrados desde la infancia al resplandor de la gloria y no podían decidirse a bajar hacia la fortuna", Caritat, M. L. S, Caritat,M. J. A. N., (1804): Œuvres complètes de Condorcet, T. II, Vieweg, Brunswick, p, 273.

nas de este arte, regresando a Basilea en 1720 donde al año siguiente defendió una tesis sobre la respiración, y recibió el grado de Licenciado.

Pero el ejemplo de su padre, y el de su eminente hermano Nicolás Bernoulli, influían notablemente en su inclinación por las Matemáticas, a las que comenzó a dedicarse con tanta pasión, que resulta sorprendente que no hubiera descuidado la Medicina. La afición por las matemáticas, no le impidió ir a Venecia, en 1723, para perfeccionarse en la práctica médica bajo la dirección del célebre fisiólogo Pietro Antonio Michelotti quien, además era un matemático distinguido.

En 1724, un noble veneciano, el Conde Jacopus Rizzatti, hizo imprimir, a sus expensas, una trabajo con el título: *Danielis Bernoulli exercitationes quædam Mathematicæ*. Esta fue la primera publicación de la extensa obra del autor.

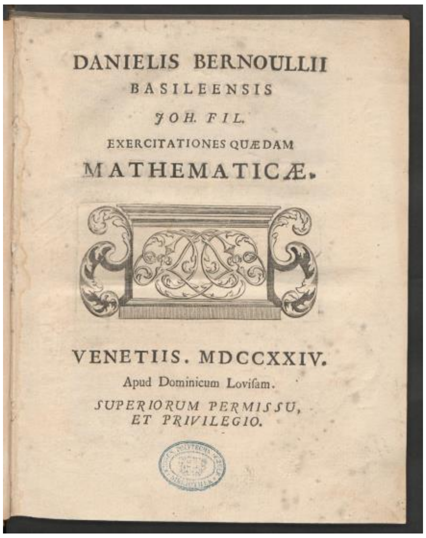


Figura 7.3. Exercitationes... (1724)

En 1723, la *Académies des Sciences* de París, instituyó un premio de 2000 £ al mejor trabajo de investigación que sirviera para mejorar los sistemas de navegación de la época. Daniel Bernoulli presentó el trabajo *Sur la manière la plus parfaite de conserver sur mer l'égalité du mouvement des clepsidres ou sabliers*, por el que se le concedió el premio en 1724. Ese mismo año, en otro concurso, su padre obtuvo el premio accesit por su trabajo *Sur les loix de la communication du mouvement*, (el premio mayor, de 2500 £, lo obtuvo Mc. Laurin por su trabajo *Démonstration des loix du choc des corps*). Todos los estudiosos coinciden que el haber obtenido un premio menor que el que obtuvo Daniel provocó el disguto de Johann Bernoulli.

La reputación del célebre anátomopatólogo Giovanni Battista Morgagni (1682 – 1771) lo indujo, en 1724, a viajar a Padua, pero casi al llegar, fue atacado por una fiebre violenta de la que no habría podido zafar sin el cuidado del gran médico que había venido a ver. Sus fuerzas quedaron tan decaídas por esa fiebre, que le fue imposible cultivar las ciencias durante más de los seis meses que habitó en esa ciudad. Sin embargo, su estancia en Italia fue fructífera ya que la Academia de Bologna lo recibió entre sus miembros.

En esa época, la República de Génova había pensado en fundar una Academia en esa ciudad y le ofreció a Daniel Bernoulli la dirección; pero este la rechazó, pensando en volver a Basilea.

A su regreso a Basilea encontró una solicitud de Pedro el Grande para ir a San Petersburgo para ocupar un lugar en la Academia que acababa de fundarse. Viajó con su hermano Nicolás, que murió ocho meses después de su llegada. La tristeza por la pérdida de su hermano, sería en parte compensada por la llegada a San Petersburgo de Leonhard Euler, con quien mantuvo una amistad no sólo científica sino también personal. Cinco años después deseaba regresar a su país por razones de salud; pero la Academia le hizo una tentadora oferta concediéndole el título de Profesor Honorario, y asignándole una excelente pensión, con la libertad de permanecer en San Petersburgo sólo cuando lo considerara necesario. Esta distinción le hizo permanecer tres años más. Pero como su salud estaba bastante comprometida, pensó seriamente en volver a Suiza, y para hacerlo con más dignidad, antes de su partida quiso ofrecer a la Academia su tratado de hidrodinámica, que él subtituló Comentarios sobre la fuerza y el movimiento de los fluidos, obra que se imprimiría en Strasbourg en 1738.

En 1731, compitió por otro premio propuesto por la Academia de Ciencias de París sobre la inclinación mutua de las órbitas de los planetas. En este trabajo, Daniel había incluido a su padre como autor, ya que había utilizado sus desarrollos matemáticos. El trabajo fue premiado, pero Johann se disgustó porque él había presentado un trabajo que no lo ganó. A pesar de los intentos del hijo, la relación con el padre se enfrió.

En 1733, acompañado por su hermano menor, Johann II (1710 – 1790) salió de Petersburg. Luego de un viaje azaroso en medio de un conflicto bélico fueron desviados a Danzig y, una vez liberados, viajaron a Paris.

A su regreso a Basilea, la Academia local lo nombró Profesor de las cátedras de Botánica y Anatomía. Si bien tenía preferencias por las matemáticas, la posibilidad de estar en cercanía con su familia y amistades, le hicieron aceptar el ofrecimiento. Ya en Basilea, a fines de 1733 recibió un Doctorado en Medicina y en el dictado de sus clases se esforzó por cumplir su trabajo con dignidad. Pero cuando la Cátedra de Física quedó vacante, la Academia no creyó necesario rehusarle un intercambio de asignaturas que se ajustara mejor a su inclinación.

Matizaba sus clases de Física con estudios sobre diversos temas de Matemática y el mantenimiento de correspondencia con científicos importantes. La Académie des Sciences le otorgó en 1737 un premio por su trabajo *Discors sur les ancres*; en 1740, por su trabajo *Sur le flux et reflux de la mer*; en 1743 por su trabajo *Sur La Meilleure Construction Des Boussoles d'inclinaison*, con Leonhard Euler; en 1746 por *L'explication de l'attraction mutuelle de l'aimant & du fer, de la direction de l'aiguille aimantée vers le nord, de sa déclinaison & de son inclinaison*, con Leonhard Euler y su hermano Johann II; en 1747, por su trabajo *Recherches méchaniques et astronomiques*; en 1751 por *La meilleure manière de déterminer quand on est en mer, les courans, leur force & leur direction*; en 1753 por *La manière la plus avantageuse de suppléer à l'action du vent sur les grands vaisseaux, soit en y appliquant les rames, soit en employant quelque'autre moyen que ce puisse être*; en 1757 por *La meilleure manière de diminuer le plus qu'il est possible le roulis & le tangage d'un navire, sans qu'il perde sensiblement par cette diminution aucune des bonnes qualités que sa construction doit lui donner*.

Además de los diez premios de la *Académie des Sciences*, fue nombrado Miembro Asociado extranjero de la Académie Royales des Sciences de París, de la Royal Society de Londres, del Instituto de Bologna, de las Academias de San Petersburgo, de Berlín, de Turín y de Manheim y de la Société économique de Berne.

Daniel Bernoulli publicó 86 trabajos, la mayoría de los cuales versaban sobre aplicaciones matemáticas a la Física y entre ellos el más relevante fue su tratado de hidrodinámica.

Nunca se casó. Al final de su vida, su gusto por la soledad aumentó hasta tal punto que ya no deseaba ver a los extraños; recibía con dificultad la visita de sus parientes cuando llegaban en gran número. En sus últimos años estuvo afectado por una especie de asma que le causaba opresión, angustia e insomnio; en sus últimos días esos efectos aumentaron. Murió pacíficamente de paro cardiorrespiratorio el 17 de marzo de este año, de 82 años y un mes.

7 – 2.1.- La Hydrodynámica.

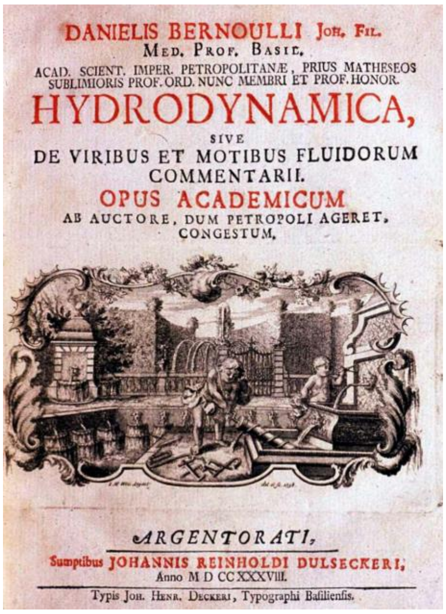

DANIELIS BERNOULLI Joh. Fil.
Med. Prof. Basil.
ACAD. SCIENT. IMPER. PETROPOLITANÆ, PRIUS MATHESEOS SUBLIMIORIS PROF. ORD. NUNC MEMBRI ET PROF. HONOR.
HYDRODYNAMICA,
SIVE
DE VIRIBUS ET MOTIBUS FLUIDORUM COMMENTARII.
OPUS ACADEMICUM
AB AUCTORE, DUM PETROPOLI AGERET, CONGESTUM.
ARGENTORATI,
Sumptibus JOHANNIS REINHOLDI DULSECKERI,
Anno M D CCXXXVIII.
Typis Joh. Henr. Deckeri, Typographi Basiliensis.

Figura 7.4. La Hydrodynamica

El título completo del libro puede traducirse como "Hidrodinámica, o Comentarios sobre las fuerzas y los movimientos de los fluidos".

En este libro, Bernoulli presenta la primera teoría adecuada que explica de un fluido incompresible en recipientes y cuantifica el escape de fluidos a través de orificios, a la vez que introduce la noción de presión hidrodinámica. El tratado, no está sólo restringido al estudio teórico de la hidráulica sino que, además, analiza aspectos novedosos de la Física y la Mecánica, entre ellos desarrolla una teoría cinética del comportamiento gaseoso — que hoy sabemos que es sólo válida para gases monoatómicos que se comporten idealmente —, se aproxima al principio de la conservación de la energía, establece los fundamentos para el análisis de la eficiencia de las máquinas y desarrolla una teoría sobre la propulsión de naves por agua, incluyendo una solución al primer problema de movimiento de un sistema de masa variable.

Los desarrollos que se exponen en la Hydrodynamica están basados principalmente en el principio de la conservación de las "fuerzas vivas"[13] pero no en la formulación newtoniana sino en la de Christiaan Huygens. A ese principio Bernoulli los llamó *Principio de igualdad entre el descenso real y el ascenso potencial* (*æqualitatis inter descensum actualem ascensumque potentialem*) expresándolo: "Si cualquier número de pesos comienza a moverse de alguna manera por la fuerza de su propia gravedad, las velocidades de los pesos individuales estarán en todas partes tal que los productos de los cuadrados de estas velocidades multiplicados por las masas apropiadas, reunidas, sean proporcionales a la altura vertical a través de la cual el centro de gravedad del conjunto formado por todos los cuerpos desciende, multiplicado por las masas de todos ellos "

Aplicando este principio al caso de un fluido incompresible que mueve en régimen estacionario, entre dos alturas diferentes z_1 y z_2, modificando su presión, Bernoulli llega a una expresión que en términos modernos es

[13] *Conservationis virium vivarum*. *Vis viva* era, en esa época, una magnitud que cuantificaba la energía debido al movimiento y estaba dada, para un cuerpo de masa m que se mueve con velocidad v, por el producto mv^2.

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2}+gz_1=\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2}+gz_2$$

donde p_1 y p_2 son las respectivas presiones, V_1 y V_2 las velocidades y g es la aceleración de la gravedad. Años más tarde, Johann Bernoulli lo generalizaría para el caso de movimientos no estacionarios y la expresión matemática conocida generalmente como la *ecuación de Lagrange-Cauchy*, fue obtenida más adelante, en I757.

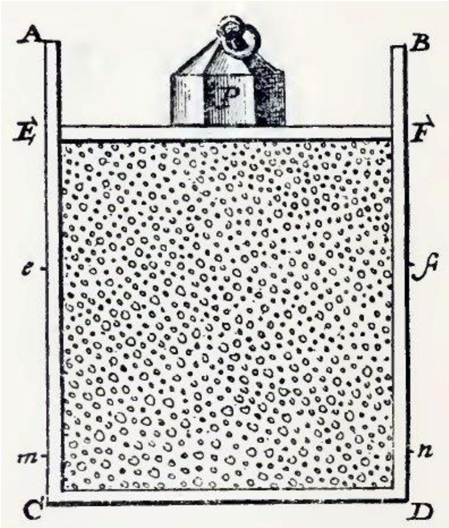


Figura 7.5. Compresibilidad de los gases

En el desarrollo de su sistema hidráulico, Bernoulli tomó en cuenta las posibles pérdidas de una parte de las fuerzas vivas durante el movimiento de los fluidos, tanto por el impacto del fluido contra las paredes en los que están contenidos, así como la pérdida de energía por fricción, por lo que, en sus cálculos aplicó implícitamente el principio de conservación de la energía, además del principio de conservación de la masa.

En la sección X del tratado, Bernoulli propone que la *elasticidad* del aire se debe a la incesante agitación de sus partículas, cada una se las cuales se desplaza en línea recta y sin interactuar con las demás, pero que experimentan choques elásticos con otra o con las paredes del recipiente en que está contenida. La suma de la enorme cantidad de estos choques elásticos con las paredes son los responsables de la presión del gas, que se observa macroscópicamente. La velocidad media que tienen esas partículas aumenta con la temperatura del aire encerrado y, por lo tanto, aumenta el número de choques por unidad de tiempo con lo que aumenta la presión. Al estimar que la elasticidad (*presión*) del aire es proporcional a V^2, propuso medir la temperatura del aire ('aëris calor') a partir de los valores de la presión a densidad constante. De esta manera la temperatura sería proporcional a V^2, anticipándose a lo que en el siglo siguiente sería a escala termométrica del gas ideal.

En esta sección Bernoulli deja bien aclarado que si bien este comportamiento ha sido probado por muchos experimentos y que puede ser adoptada con seguridad para atmósferas *menos densas que el aire natural*. Si puede ser sostenida para aires considerablemente más densos que el aire natural *no lo he investigado suficientemente aún: no he hecho experimentos fundados, con la exactitud que se requiere en estos casos.* Esto es, la relación entre la presión y la velocidad y la relación entre la temperatura y la presión son válidas cuando la presión es lo suficientemente baja para que el aire se considere de comportamiento ideal.

En la sección XIII, Bernoulli analizó la idea de utilizar la reacción de un chorro de agua emitida para producir la propulsión de barcos y estudió el movimiento de una embarcación hidrorreactiva e, inclusive, estimó la eficiencia que podría rendir este tipo de propulsión. Mediante este análisis Bernoulli fue el primero en considerar un problema de movimiento de un cuerpo de masa variable y diseñar una solución simple basada en la ley de conservación del momento.

En la Hydrodynamica, Bernoulli trató de cuantificar la relación entre la presión y la temperatura de la atmósfera así como trató obtener una relación entre la presión atmosférica y la altitud de una ubicación sobre el nivel del mar. Algo que obtendría James Clerk Maxwell un siglo más tarde.

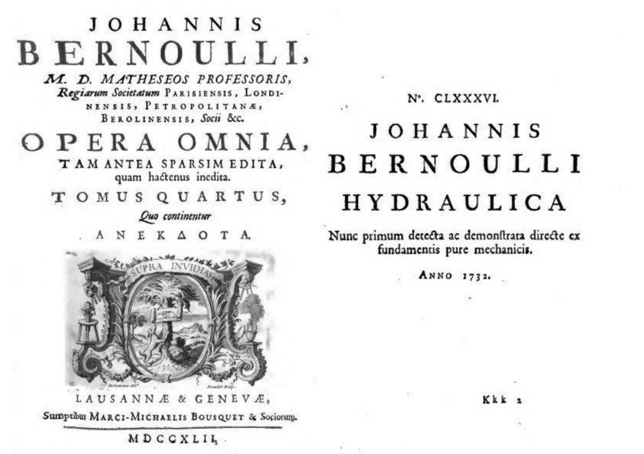
También analizó el uso del aire comprimido como fuente de movimiento y evaluó la potencia de los gases producidos en la deflagración de la pólvora según el trabajo que puedan realizar. Al respecto escribió que el efecto de ... la ignición de una libra de pólvora para elevar pesos puede ser mayor que el trabajo que efectúen continuamente durante todo un día, cien hombres muy robustos.

La primera versión de la *Hydrodynamica* fue escrita en Petersburg, probablemente entre 1731 y 1732. Cuando partió de la Academia de esa ciudad, en 1733, dejó una copia manuscrita como agradecimiento por todas la facilidades que allí le habían dado. Al regresar a Basel, le dio también una copia a su padre para conocer su opinión. La primera noticia de su próxima publicación apareció en septiembre de 1734 en el diario *Mercure Suisse*. A fines de 1734 Bernoulli le escribió a Euler contándole que su libro estaba siendo impreso por un Sr. Dulsecker de Strassbourg quien le había dado 30 copias y táleros de en concepto de derechos de autor. Sin embargo la continuación de la impresión se fue demorando hasta 1737 y salió a la venta a principios de Mayo de 1738. Ese mismo mes, Bernoulli le envió unas copias a Euler, para la Academia y para él, pidiéndole una revisión de la obra y una crítica. Pero en el viaje a Petersburgo, el paquete conteniendo los libros se perdió. Un par de meses después, creyendo que Euler había recibido los libros, le escribió pidiéndole consejos de cómo encarar una segunda edición teniendo en cuenta las observaciones y sugerencias que Euler le habría hecho.

Finamente el paquete con los libros llegó a Petersburg y a Euler, recién en la primavera de 1739. Con lo que Euler le pudo escribir Bernoulli que, finalmente, se había podido familiarizar con su libro:

"...Mientras tanto, he leído su Tratado incomparable con la atención completa y he sacado un inmenso provecho de él. Le felicito, señor, de todo corazón por la feliz ejecución de un tema tan difícil y tan oscuro, así como por la fama inmortal que ha adquirido. Toda la ejecución del proyecto merece toda la atención concebible, y tanto más cuanto que no es sólo accesible a las matemáticas rigurosas, sino que exige la ayuda de varios principios físicos importantes, que usted ha sabido emplear con una ventaja indescriptible. En el caso de una nueva edición de este Tratado, especialmente le aconsejo humildemente que exponga la mayoría de los temas con más detalle, en parte para la conveniencia del lector, pero principalmente para asegurar que la gran utilidad que se obtiene de muchas investigaciones se destaque con más prominencia: de hecho, he encontrado en ella tantos temas diferentes, importantes y completamente nuevos que la mayoría merecerían ser tratados en publicaciones separadas".

Una vez publicado el libro, Johann Bernoulli se dedicó a analizar en profundidad la copia que él tenía y consideró que el libro estaba incompleto, ya que sólo se ocupaba de fluidos moviéndose en régimen estacionario, por lo que empezó a preparar subrepticiamente su propia versión de la ciencia de la "hidráulica". En octubre de 1838, le envió a Euler una copia de los temas que pensaba anexar al trabajo de su hijo, pero sin comentarle a Euler que iba a tomar los contenidos del libro de Daniel. El comentario de Euler fue tan halagüeño que Johann lo incluyó en su *Opera omnia* publicada a


JOHANNIS
BERNOULLI,
M. D. MATHESEOS PROFESSORIS,
Regiarum Societatum Parisiensis, Londinensis, Petropolitanæ, Berolinensis, Socii &c.
OPERA OMNIA,
TAM ANTEA SPARSIM EDITA,
quam hactenus inedita.
TOMUS QUARTUS,
Quo continentur
ANEKΔOTA.
LAUSANNÆ & GENEVÆ,
Sumptibus Marci-Michaelis Bousquet & Sociorum.
MDCCXLII.

Nº. CLXXXVI.
JOHANNIS
BERNOULLI
HYDRAULICA
Nunc primum detecta ac demonstrata directe ex fundamentis pure mechanicis.
Anno 1732.
Kkk 2

Figura 7.6. La *Hydraulica*

principios de 1743 (con el año 1742 en la portada), suministrándole un subtítulo adicional: "*Nunca antes revelada ni demostrada directamente desde bases puramente mecánicas*. 1732".

Después que la Opera omnia de Johann Bernoulli apareció. Daniel se quejó a Euler de lo que le parecía una injusticia extrema. El 4 de septiembre de 1743 le escribió[14]

"... De toda mi Hydrodynamica, ni una sola palabra se la debo a mi padre. He sido robado completamente y así, en un momento, perdí los frutos de diez años de mi obra. Todas las proposiciones fueron tomadas de mi Hydrodynamica, y luego mi padre llamó a sus escritos Hydraulica, *ahora por primera vez revelado en* 1732, mientras que mi Hydrodynamica se imprimió recién en 1738. Todo esto mi padre lo ha tomado de mi obra, excepto que ha pensado en otro método para determinar el incremento de la velocidad, cuyo descubrimiento ocupa unas pocas páginas. Lo que mi padre no atribuye completamente a sí mismo, lo desprecia. y finalmente, para colmo de mi desgracia, inserta tu carta, en la que mis descubrimientos (de los cuales soy completamente el primer y, de hecho, el único autor, y que considero haber agotado por completo) los minimizan, en cierto modo [...] Al principio eso me resultó simplemente insoportable; pero finalmente he tomado todo con cierta resignación; pero me ha provocado un disgusto y una repugnancia por mis estudios anteriores, de modo que de buena gana aprendería a remendar zapatos que a estudiar matemáticas."

Todo parece indicar que Johann Bernoulli falsificó conscientemente la datación de sus trabajos, indiscutiblemente muy interesantes, sobre la dinámica de fluidos que, indudablemente, escribió entre 1738 y 1740, estimulado por la hidrodinámica de su hijo y que su Hydraulica ni siquiera podría haber sido concebido en 1732.

Ya en el verano de 1738 Daniel Bernoulli había evaluado la preparación de una segunda edición de la Hydrodynamica y, a finales de 1740, había negociado una nueva edición de su tratado traducido al francés. Pero esas ediciones nunca se concretaron. Más aún Daniel abandonó sus investigaciones en dinámica de fluidos. La razón fue sin duda el pesado trauma psicológico que le infligió su padre.

[14] **Fuss, P.-H.** (ed), (**1843**): *Correspondance mathématique et phyºsique de quelques célèbres gèomètres du* XVIII *siècle*. ***Vol. 2***, Saint Petersburg¸[Académie des Sciences] pp. 530 – 532.

7 –3. Leonhard Euler


Figura 7.7. L. Euler

Leonhard Euler, uno de los más grandes y prolíficos matemáticos de todos los tiempos, nació en Basilea, el 15 de abril de 1707, y murió en San Petersburgo, el 18 de noviembre de1783. Recibió su instrucción preliminar de matemáticas de su padre que era docente de esa especialidad en el pueblo de Riechen, localidad muy cercana a Basilea. Estudió en la Universidad de Basilea donde cursó Matemáticas bajo la tutoría de Johann Bernoulli, con cuyos dos hijos, Nicholas y Daniel, trabó una amistad que duraría toda la vida. Con ellos, la Geometría pasó a ser su centro de interés. En 1723, luego de obtener la Maestría en Artes y cumpliendo con los deseos de su padre comenzó sus estudios de Teología y de lenguas orientales, con la intención de entrar al ministerio, pero al darse cuenta que esa no era su real vocación y. con el consentimiento de su padre, volvió a su la tema favorito, el estudio de las matemáticas. Al mismo tiempo, inducido por Daniel Bernoulli, que se había trasladado a Petersbourg en 1725, se dedicó al estudio de la fisiología, disciplina a la que luego haría útiles aplicaciones de sus conocimientos matemáticos. Mientras se dedicaba con entusiasmo a las investigaciones fisiológicas. A los diecinueve años, compitió por un premio de la Académie Royale des Sciences de Paris, presentado el trabajo *Meditationes super problemate náutico quod illustrisima Regia Parisiencis Academia Scientarum proposit*[15], que trata sobre el método para instalar el mástil en una nave, trabajo por el cual recibió el segundo premio.

A los 20 años, se postuló para la cátedra de Física en la Universidad de Basilea y, para la posible admisión, presentó el trabajo *Dissertatio physica de sono*[16] que consta de dos capítulos: *De natura et propagatione soni* y *De productione soni*, con seis anexos.

En 1727, Daniel Bernoulli que estaba a cargo de la cátedra de Matemática en la Academia de Petersbourg, le sugirió a Catalina I que invite a Euler a trabajar en esa Academia. Catalina accedió y Euler fue a Petersbourg donde lo asociaron a la Academia. En 1730 le dieron la cátedra de Física y en 1733 reemplazó a su amigo Daniel en la Cátedra de Matemática, al haber este renunciado por motivos de salud.

En Petersbourg enriqueció la colección académica con muchos trabajos. Allí llevó al Cálculo integral a su más alto grado de perfección. Inventó el cálculo con funciones trigonométricas, redujo las operaciones analíticas a una mayor simplicidad y desarrolló nuevos aspectos en casi toda la Matemática, pura y aplicada.

[15] Publicado en Piece qui a remporté le prix de l'academie royale des sciences 1727, 1728, pp. 1- 48.

[16] Publicado en Basilea en 1727 y republicado en *Disputationes anatomicae selectæ*, ed A. Haller 7:2, Gottingen 1751, pp. 207-226.

Al comienzo de su asombrosa carrera, enriqueció la colección académica con muchas memorias, lo que excitó una noble emulación entre él y los Bernouillis, aunque esto no afectó de ninguna manera a su amistad.

En 1733, Euler redactó para la Academia Imperial de Petersbourg, *De Indorum anno Solari astronómico*[17] que contiene los comentarios matemáticos sobre el año astronómico de los indios.

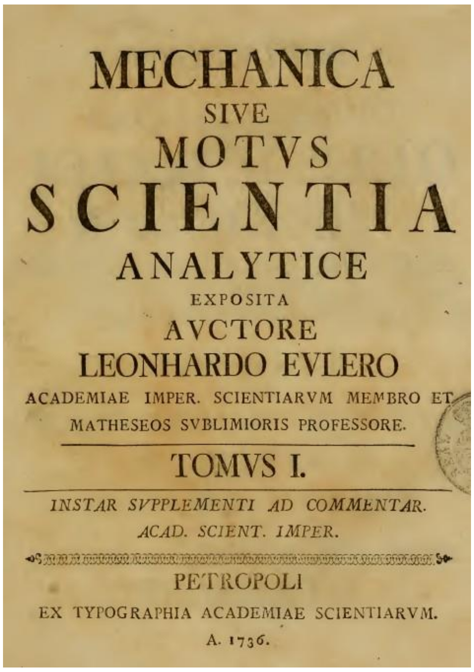


Figura 7.8. Mecánica T. 1.

Tres años después publicó el primer volumen de su *Mechanica* en el que aplicó muchas innovaciones matemáticas para el tratamiento de los problemas mecánicos y unos meses después la Academia de Petersbourg publicó el segundo volumen.

En 1741, viajó a Berlín donde, a instancias de Friedrich II der Große fue electo miembro de la *Königliche Akademie der Wissenschaften* y nombrado Profesor de Matemáticas en la Universidad de Berlin.

En los años que pasó en Prussia, 1741– 1762, redactó 264 trabajos. Entre los cuales, de interés para la Física pueden destacarse: *Theoria motuum planetarum et cometarum Sumtibus Ambrosii Haude*. Bibliop. Reg. & Acad. Scient. privilegiati., 1744; *De observatione inclinationis magneticæ dissertatio, illustrissimae academiae regiae scientarum Parisinæ æquissimo judicio, pro anno* 1743, publicado en *Pièces qui ont remporté le prix de l'Académie Royale des Science*, 1748, pp. 1– 47; Dissertatio de magnete, publicado en Pièces qui ont remporté le prix de l'Académie Royale des Sciences, 1748, pp. 63-97; De la force de percussion et de sa véritable mesure, publicado en las Memorias de la *Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1, 1746, pp. 21-53 ; Nova theoria lucis et colorum, publicado en Opuscula varii argumenti, Haude & Spener, I (Berlin, 1746), pp. 169 – 244 y considerado uno de los tratados de Óptica más influyentes del siglo XVIII; Recherches physiques sur la nature des moindres parties de la matière, publicado en Opuscula varii argumenti, Haude & Spener, pp 287 – 300. Esta es la primera obra de Euler en la que trata de la naturaleza de la materia y en la que discute las distintas concepciones acerca de la fuerza el espacio y el tiempo. En ella se opuso a los criterios de Leibniz quien consideraba a las partículas últimas como meros puntos geométricos y a las teorías que consideraban que las partículas últimas de cada sustancia tenían características que las diferenciaban de las demás y afirmó que iba a demostrar tan claramente que nadie pudiese dudar que "las moléculas últimas que constituyen los cuerpos que nos rodean tienen el mismo peso y todas tienen la misma gravedad específica" para lo cual usó como argumento que todos los cuerpos caen con la misma aceleración de la gravedad.

[17] Publicado en Bayer, T. S, (1738): Historia Regni Græcorum Bactriani,*Acad. Scient, Petrópolis*, pp. 201-213

En 1747, escribió su *Recherches sur le mouvement des corps celestes en général* [18] — que es un tratado de Matemática aplicada a la Astronomía basado sobre la Mecánica newtoniana—, *Méthode pour trouver les vrais momens tant des nouvelles que des pleines lunes*[19]; *De relaxione motus planetarum*[20]; *De la parallaxe de la lune tant par rapport a sa hauteur qu'a son azimuth, dans l'hypothèse de la terre sphéroïdique*[21]; *Mémoire sur l'effet de la propagation successive de la lumière dans l'apparition tant des planètes que des comètes*[22]; *Mémoire sur la plus grande équation des planètes* [23]; *Sur la perfection des verres objectifs des lunettes*[24]*; De vibratione chordarum exercitatio*[25]*; De propagatione pulsuum per medium elasticum* [26]; *Examen artificii navis a principio motus interno propellendi*[27]*; De motu nodorum lunæ eiusque inclinationis ad eclipticam variatione*[28]*; Quantum motus terræ a luna perturbeter accuratius inquiritur*[29]*; Sur la vibration des cordes*[30]*; Sur l'accord des deux dernières éclipses du soleil et de la lune avec mes tables, pour trouver les vrais moments des pleni-lunes et novi-lunes*[31]*; Sur l'atmosphère de la lune prouvée par la dernière éclipse annulaire du soleil*[32], Trabajo en el que, a partir de ciertos fenómenos observados durante el eclipse del 25 de julio de 1748, trató de deducir que son evidencias de que la Luna tiene una atmósfera cuya densidad es casi 1/200 de la de la Tierra; *Sur le frottement des corps solides* [33] *; Recherches sur les plus grands et plus petits qui se trouvent dans les actions des forces*[34], trabajo en el que demostró que todo sistema discreto obedece al Principio de Maupertuis y a partir de eso dedujo una ecuación general para el balance de momentos en un conjunto de fuerzas que operan en un plano; *De atmosphæra lunæ ex eclipsi colis annulari evicta*[35] *; Recherches sur la decouverte des courants de la mer*[36,] un ensayo inconcluso sobre las corrientes marinas y los métodos a emplear para investigarlas; *Méthode de trouver le vrai lieu géocentrique de la lune par l'observation de l'occultation d'une étoile fixe*[37] ; *Méthode de déterminer la longitude des lieux par l'observation d'occultations des étoiles fixes par la lune*[38]; *Sur la diminution de la résistance du frottement* [39]. *Reflexions sur quelques loix gene-*

---

[18] *Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 3, 1749, pp. 93 – 143.
[19] *Idem* 3, 1749, pp. 154–173.
[20] Publicado en *Opuscula varii argumenti* Vol. 1, Haude & Spener, Berlin. 1746, pp. 245 – 276.
[21] Publicado en *Memoires de l'academie des sciences de Berlin* 5, 1751, pp. 326 – 338.
[22] *Idem* 2, 1746, pp. 141–181.
[23] *Idem* 2, 1748, pp. 225 – 248.
[24] *Idem* 3, 1749, pp. 274 – 296.
[25] Publicado en *Nova acta eruditorum*, 1749, pp. 512 – 527.
[26] Publicado en *Novi Commentarii academiæ scientiarum Petropolitanæ* 1, 1750, pp. 67 – 105.
[27] *Idem* 1, 1750, pp. 106 – 123.
[28] *Idem* 1, 1750, pp. 387 – 427.
[29] *Idem* 1, 1750, pp. 428 – 443.
[30] *Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 4, 1750, pp. 69 – 85.
[31] *Idem* 4, 1750, pp. 86 – 98.
[32] *Idem* 4, 1750, pp. 103 – 121.
[33] *Idem* 4, 1750, pp. 122 – 132.
[34] *Idem* 4, 1750, pp. 149 – 188.
[35] Publicado en *Opera Postuma, matematica et physica 2, Petropoli, Academia Scientiarum,* 1862, pp. 391 – 401.
[36] *Idem* 2, 1862, pp. 790–792.
[37] *Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 3, 1749, pp. 174 – 177.
[38] *Idem* 3, 1749, pp. 178 – 179
[39] *Idem* 4, 1750, pp. 133 – 148.

rales de la nature qui s'observent dans les effets des forces quelconques[40]. En este trabajo, Euler demostró que dado el principio estático, puede derivar las condiciones de equilibrio para un fluido, y de éstas, obtener las condiciones de integrabilidad para una forma "pfaffiana" en tres variables. También analizó el equilibrio de un peso suspendido de tres cuerdas elásticas tomado, por analogía, como un caso especial del problema para los fluidos. *Coniectura physica circa propagationem soni ac luminis*[41]¸ en la que presentó una hipótesis acerca de la manera en que se propagan el sonido y la luz; *De perturbatione motus planetarum ab eorum figura non sphaerica oriunda*[42], donde trató la influencia de la figura de un planeta que no es estrictamente esférico sobre los cambios en su trayectoria; *Sur le mouvement de l'eau par des tuyaux de conduite*[43], que es el primer trabajo de Euler sobre Hidráulica. *Discussion plus particulière de diverses manières d'élever de l'eau par le moyen des pompes avec le plus grand avantage*[44], donde analizó los métodos con mayor eficiencia para elevar agua mediante bombas. *Recherches sur la précession des équinoxes st sur la nutation de l'axe de la terre*[45]*; Decouverte d'un nouveau principe de Mecanique*[46], en este trabajo expresó por primera vez el segundo axioma del movimiento de Newton como $F = ma$, para el caso en el que la fuerza que dirige el movimiento fuera constante en intensidad, dirección y sentido (que, erróneamente, muchos físicos aplican para cualquier fuerza). *Recherches sur l'effet d'une machine hydraulique proposée par M. Segner, professeur à Göttingen*[47], trabajo en el que realiza un exhaustivo análisis del funcionamiento de las máquinas hidráulicas y sus eficiencias. *Theoria motus lunae exhibens omnes eius inaequalitates. In additamento hoc idem argumentum aliter tractatur simulque ostenditur quemadmodum motus lunae cum omnibus inaequalitatibus innumeris aliis modis repraesentari atque ad calculum revocari possit auctore L. Eulero Impensis academiae imperialis scientiarum Petropolitanae anno* 1753.48;obra que, a lo largo de 18 capítulos describe todos los movimientos de la Luna y sus irregularidades y sus ecuaciones correspondientes. *Application de la machine hydraulique de M. Segner a toutes sortes d'ouvrages et de ses avantages sur les autres machines hydrauliques dont on se sert ordinairement*[49], donde compara la máquina hidráulica de Segner con las máquinas hidráulicas en uso en esa época. *Recherche sur une nouvelle manière d'élever de l'eau proposée par m. de Mour*[50]*; Tentamen theoriæ de frictione fluidorum*[51], donde presentó diversos experimentos para medir el coeficiente de fricción. Du mouvement de rotation des corps solides *autour d'un axe variable*[52]. *Recherches sur le mouvement des rivières*[53], que contiene la ecuación

---

[40] *Idem* 4, 1750, pp. 189 – 218.

[41] *Opuscula varii argumenti* Vol 2, Haude & Spener, Berlin. 1750, pp. 1 – 22

[42] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 3, 1753, pp. 235 – 253.

[43] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 8, 1754, pp. 111 – 148.

[44] Idem 8, 1754, pp. 149 – 184.

[45] Idem 5, 1751, pp. 289 – 325.

[46] Idem 6, 1752, pp. 185 – 217.

[47] Idem 6, 1752, pp. 311 – 354.

[48] Opera Omnia: Series 2, Volume 23, pp. 64 – 336.

[49] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 7, 1753, pp. 271 – 304.

[50] Idem 7, 1753, pp. 305 – 330.

[51] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 6, 1761, pp. 338 – 38.

[52] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 14, 1765, pp. 154 – 193.

[53] Idem 16, 1767, pp. 101 – 118.

de la hidrodinámica de Lagrange. *Recherches sur les inégalités de Jupiter et de Saturne*[54]. *Recherches sur l'origine des forces*[55]; *De motu corporum coelestium a viribus quibuscunque perturbato*[56]. *De descensu corporum super plano inclinato aspero* [57]; *De motu corporum super plano horizontali aspero* (presentado en 1741, publicado en 1751)[58]. *Réflexions sur les divers degrés de lumière du soleil et des autres corps célestes*[59]. *Harmonie entre les principes généraux de repos et de mouvement de M. de Maupertuis*[60]. *Recherches sur la véritable courbe que décrivent les corps jettes dans l'air ou dans un autre fluide quelconque*[61]. *De la réfraction de la lumière en passant par l'atmosphère selon les divers degrés tant de la chaleur que de l'élasticité de l'air*[62]. *De promotione navium sine vi venti*[63]¸donde trata la manera de suplir la acción del viento sobre las embarcaciones. *Détermination de l'effet d'un machine hydraulique inventée par M. Segner, professeur à Göttingen*[64]. *Essai d'une explication physique des couleurs engendrées sur des surfaces extrêmement minces*[65]. *Principes généraux de l'état d'équilibre des fluides*[66], obra que es la primera de una serie de tres, que constituye el tratado de la Mecánica de fluidos y que contiene un desarrollo de la Hidrostática. *Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau*[67]. *Mémoire sur la plus grande équation des planètes*[68]. *Recherches physiques sur la diverse réfrangibilité des rayons de lumière*[69]. *De la variation de la latitude des Etoiles fixes et de l'obliquité de l'écliptique*[70]. *Principes généraux du mouvement des fluides*[71]. *Continuation des recherches sur la theorie du mouvement des fluides*[72]. *Recherche pour servir à la perfection des lunettes*[73]. *Recherches plus exactes sur l'effet des moulins à vent*[74]. *Règles générales pour la construction des Télescopes et des Microscopes, de quelque nombre de verres qu'ils soient composes*[75]. *Recherches sur les lunettes à trois verres qui représentent les objets renverses*[76]. *Dilucidationes de resistentia fluidorum*[77]. *Principia*

---

[54] Publicado en Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences 7, 1769, pp. 2 – 84.
[55] Idem 6, 1752, pp. 419 – 447.
[56] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 4, 1758, pp. 161 – 196.
[57] Publicado en Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 13, 1751, pp. 197 – 219.
[58] Idem 13, 1751, pp. 220 – 254.
[59] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 6,1750, 1752, pp. 280 – 310 + 1 diagrama.
[60] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 7, 1753, pp. 169 – 198.
[61] Idem 9, 1755, pp. 321 – 352.
[62] Idem 10, 1756, pp. 131 – 172.
[63] Publicado en Pièce qui a remporté le prix de l'académie royale des sciences 1753, 1771, pp. 1– 47.
[64] Publicado en Opera Postuma 2, 1862, pp. 146 – 173.
[65] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 8, 1754, pp. 262 – 282.
[66] Idem 11, 1757, pp. 217 – 273.
[67] Idem 10, 1756, pp. 227 – 295.
[68] Idem 2, 1748, pp. 225 – 248.
[69] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 10, 1756, pp. 200 – 226.
[70] Idem 10, 1756, pp. 296 – 336.
[71] Idem 11, 1757, pp. 274 – 315.
[72] Idem 11, 1757, pp. 316 – 361.
[73] Publicado en Opera Postuma 2, 1862, pp. 668 – 738.
[74] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 12, 1758, pp. 165 – 234.
[75] Idem 13, 1759, pp. 283 – 322.
[76] Idem 13, 1759, pp. 323 – 372.
[77] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 8, 1763, pp. 197 – 229.

theoriæ machinarum[78]. *Règles générales pour la construction des télescopes et des microscopes*[79]. *Expériences pour déterminer la réfraction de toutes sortes de liqueurs transparentes*[80]. *Recherches sur la déclinaison de l'aiguille aimantée*[81]. *Sur la force des colonnes*[82]. *De motu et attrutu lentium dum super catinis poliuntur*[83], donde trata la mejor manera de pulir las lentes.

Sin contar su producción matemática, la obra de Euler es tan extensa que aún una somera descripción de cada una de ellas llevaría más de un centenar de páginas, por lo que preferimos continuar dando solamente los títulos de los principales trabajos sobre Astronomía, Mecánica de cuerpos rígidos, Hidrodinámica, Sonido y Óptica y dónde fueron publicados. Los trabajos a que haremos referencia son:

Recherches sur la connaissance mécanique des corps[84]. *Remarques générales sur le mouvement diurne des planètes*[85]. *Des lunettes à trois verres qui représentent les objets debout*[86]. *Du mouvement d'un corps solide quelconque lorsqu'il tourne autour d'un axe mobile*[87]. *Sur la perfection des lunettes astronomiques qui représentent les objets renverses*[88]. *Remarques sur l'effet du frottement dans l'équilibre*[89]. *Sur le roulis et le tangage*[90]. *De motu vibratorio fili flexilis, corpusculis quotcunque onusti* [91]. *De motu corporis ad duo centra virium fixa attracti*[92]. *De la propagation du son* [93]. *Supplément aux recherches sur la propagation du son* [94]. *Continuation des recherches sur la propagation du son95. Recherches sur le mouvement de rotation des corps célestes* [96]. *Du mouvement des absides des satellites de Jupiter*[97]. *Meditationes in quæstionem utrum motus medius planetarum semper maneat æque velox, an successu temporis quampiam mutationem patiatur*? & *quænam sit ejus causa? ...*[98]. *Astronomia mechanica adjecta Digressione de cometa* A 1757 [99]. *De motu vibratorio cordarum inæqualiter crassarum* [100]. *Theoria mo-*

---

[78] Idem 8, 1763, pp. 230 – 253.
[79] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 17, 1768, pp. 201 – 211.
[80] Idem 12, 1758, pp. 235 – 266.
[81] Idem 13, 1759, pp. 175 – 251.
[82] Idem 13, 1759, pp. 252 – 282.
[83] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 8, 1763, pp. 254 – 270.
[84] Publicado en Memoires de l'académie des sciences de Berlin 14, 1765, pp. 131 – 153.
[85] Idem 14, 1765, pp. 194 – 218.
[86] *Idem* 15, 1766, pp. 200 – 239.
[87] *Idem* 16, 1767, pp. 176 – 227.
[88] *Idem* 17, 1768, pp. 212 – 230.
[89] *Idem* 18, 1769, pp. 265 – 278.
[90] Publicado en *Pièce qui a remporté le prix de l'académie royale des sciences* 1749, 1771, pp. 1 – 47.
[91] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 9, 1764, pp. 215 – 245.
[92] *Idem* 10, 1766, pp. 207–242.
[93] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 15, 1766, pp. 185 – 209.
[94] *Idem* 15, 1766, pp. 210 – 240.
[95] *Idem* 15, 1766, pp. 241 – 264.
[96] *Idem* 15, 1766, pp. 265 – 309.
[97] *Idem* 19, 1770, pp. 311 – 338.
[98] Publicado en *Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences* 8, 1771.
[99] Publicado en *Opera Postuma* 2, 1862, pp. 177 – 316.
[100] *Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 9, 1764, pp. 246 – 304.

tus corporum solidorum seu rigidorum[101]. *Tentamen de sono campanarum*[102]. *Conjecture sur la raison de quelques dissonances généralement reçues dans la musique*[103]. *Lettres a un princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique & de philosophie*[104]. *De motu et reactione aquæ per tubos mobiles transfluentis*[105]. *Constructio lentium obiectivarum ex duplici vitro quæ neque confusionem a figura sphærica oriundam neque dispersionem colorum pariant*[106]. *De motu vibratorio tympanorum*[107]. *Recherches sur les microscopes simples et les moyens de les perfectionner*[108]. *Considérations sur les difficultés qu'on rencontre dans l'exécution des verres objectifs de toute confusion*[109]. *De telescopiis quatuor lentibus instructis eorumque perfectione*[110]. *Considerationes de motu corporum coelestium*[111]. *Recherches sur les microscopes à trois verres et les moyens de les perfectionner*[112]. *Disquitio de vera lege refrationis radiorum diversicolorum*[113]. *Recherches sur les télescopes à réflexion et les moyens de les perfectionner*[114]. *Recherches sur un autre construction des télescopes a réflexion*[115]. *Sur la confusion que cause dans les instruments dioptriques la diverse réfrangibilité des rayons*[116]. *Considérations sur les nouvelles lunettes d'Angleterre de Mr. Dollond et sur le principe qui en est le fondement*[117]. *Nouvelle méthode de déterminer les dérangements dans le mouvement des corps célestes, causes par leur action mutuelle*[118]. *Recherches sur la construction des nouvelles lunettes à* 6 *et* 6 *verres et leur perfection ultérieure*[119]. *De motu rectilineo trium corporum se mutuo attrahentium*[120]. *De motu corporis ad duo centra virium fixa attracti*[121]. *De phænomenis coeli per segmenta sphærica diaphana spectati*[122]. *De novo microscopiorum genere ex sex lentibus composito*[123]. *Considerationes de theoria motus Lunae perficienda et imprimis de eius variatione* [124]. *Annotatio quarundam cautelarum in investigatione inaequalitatum quibus corpora coelestia in motu perturbantur*

[101] Libro publicado en 1765 por A. F. Rose, Rostock.
[102] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 10, 1766, pp. 261 – 281.
[103] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 20, 1766, pp. 165–173.
[104] Libro en 3 volúmenes publicado por la Imprenta de la Academia Imperial de San Petersburgo en 1768 – 1772.
[105] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 6, 1761, pp. 312 – 337.
[106] Publicado en *Opera Omnia*: Series 3, Volume 6, pp. 115 – 139.
[107] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 10, 1766, pp. 243 – 260.
[108] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 20, 1766, pp. 105 – 116.
[109] *Idem* 18, 1769, pp. 117 – 142.
[110] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 12, 1768, pp. 224 – 271.
[111] *Idem* 10, 1766, pp. 544 – 558.
[112] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 20, 1766, pp. 117 – 143.
[113] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 12, 1768, pp. 166–194.
[114] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 18, 1769, pp. 143–184.
[115] *Idem* 18, 1769, pp. 185 – 194.
[116] *Idem* 18, 1769, pp. 195 – 225.
[117] *Idem* 18, 1769, pp. 226 – 248.
[118] *Idem* 19, 1770, pp. 141 – 179.
[119] Publicado en *Mélanges de philosophie et de la mathématique de la société royale de Turin* 3, 1766, pp. 92 – 151.
[120] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 11, 1767, pp. 144 – 151.
[121] *Idem* 11, 1767, pp. 152 – 184.
[122] *Idem* 11, 1767, pp. 185 – 204.
[123] *Idem* 12, (1766/7), 1768, p. 195 – 223 + 2 figuras.
[124] *Idem* 13, 1769, pp. 120 – 158.

observandarum[125]. *Investigatio accuratior phænomenorum quae in motu terræ diurno a viribus coelestibus produce possunt*[126]. *De æquilibrio et motu corporum flexuris elasticis iunctorum*[127]. *Réflexions sur les diverses manières don't on peut représenter le mouvement de la lune*[128]. *De telescopiis quatuor lentibus instructis eorumque perfectione*[129]. *Du véritable caractère de la musique moderne*[130]. *De motu fluidorum a diverso caloris gradu oriundo*[131]. *Construction des objectifs composés de deux différentes sortes de verre qui ne produisent aucune confusion ni par leur ouverture, ni par la différente réfrangibilité des rayons, avec la manière la plus avantageuse d'en faire des lunettes*[132]. *Eclaircissemens sur le mouvement des cordes vibrantes*[133]. *Recherches sur le mouvement des cordes inégalement grosses*[134]. *Sur le mouvement d'une corde, que au commencement n'a été ébranlée que dans un partie*[135]. *Eclaircissemens plus détaillés sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho*[136]. *Methodus facilis motus corporum coelestium utcunque perturbatos ad rationem calculi astronomici revocandi*[137]. *Réflexions sur la manière d'examiner la réfraction du verre par le moyen des prismes*[138]. *Corrections nécessaires pour la théorie de la déclinaison magnétique, proposée dans le* XIII *volume des Mémoires*[139]. *Considérations sur le problème des trois corps*[140]. *Théorie générale de la dioptrique*[141]. *Construction des objectifs composes propre à détruire toute la confusion dans les lunettes*[142]. *Sectio prima de statu æquilibrii fluidorum*[143]. *Sectio secunda de principiis motus fluidorum*[144]. *Nouvelle manière de comparer les observations de la lune avec la rie*[145]. *Sectio tertia de motu fluidorum lineari potissimum aquæ*[146]. *Sectio quarta de motu aeris in tubis* [147]. *Recherches générales sur la mortalité et la multiplication du genre humain*[148]. *Recherches sur la confusion des verres dioptriques causée par leur ouverture* [149]. *Recherches sur les moyens de diminuer ou de réduire même à rien la confusion causée par l'ouverture des*

125 *Idem* 13, 1769, pp. 159 – 201.
126 *Idem* 13, 1769, pp. 202 – 241.
127 *Idem* 13, 1769, pp. 259 – 304.
128 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 19, 1770, pp. 180 – 193.
129 Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 12, 1768, pp. 224 – 271.
130 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 20, 1766, pp. 174 – 199.
131 Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 11, 1767, pp. 232 – 267.
132 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 22, 1768, pp. 119 – 170.
133 Publicado en *Mélanges de philosophie et de la mathématique de la société royale de Turin* 3, 1766, pp. 1 – 26.
134 *Idem* 3, 1766, pp. 27 – 59.
135 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 21, 1767, pp. 307 – 334.
136 *Idem* 21, 1767, pp. 335 – 363.
137 Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 12, 1768, pp. 129 – 16.
138 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 22, 1768, pp. 202 – 212.
139 *Idem* 22, 1768, pp. 21 – 264.
140 *Idem* 19, 1770, pp. 194 – 220.
141 Publicado en *Opera Postuma* 2, 1862, pp. 567 – 604.
142 Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 22, 1768, pp. 171 – 201,
143 Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ* 12, 1769, pp. 305 – 416.
144 *Idem* 14, 1770, pp. 270 – 386.
145 Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 19, 1770, pp. 221 – 234.
146 Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 15, 1771, pp. 219 – 360.
147 Idem 16, 1772, pp. 28 – 425.
148 Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 16, 1767, pp. 144 – 164.
149 Idem 17, 1768, pp. 107 – 146.

verres[150]*. Nouvelle manière de perfectionner les verres objectifs des lunettes*[151]*. Détermination du champ apparent que découvrent tant les télescopes que les microscopes*[152]*. Précis d'une théorie générale de la dioptrique*[153]*. Dioptricæ pars prima continens lubrum primum de explicatione principiorum, ex quibus constructio tam telescopiorum quam microscopiorum est petenda*[154]*, el primer tomo de tres que compendia todos los trabajos sobre Óptica de Euler. Dioptricæ pars secunda continens lubrum secundum de constructione telescopiorum diopticorum cum appendice de constructione telescopiorum catoptico-dioptricorum*[155]*, el segundo tomo del tratado de Óptica. Considerationes de traiectoriis orthogonalibus*[156]*. Appendice de constructione telescopiorum catoptrico-dioptricorum* [157]*,* este es el tercer tomo del tratado de Óptica de Euler. *Theoria motuum lunæ* [158]*. Sur les avantages des verres objectifs composes de deux verres simples*[159]*, Méthode pour porter les verres objectifs des lunettes à un plus haut degré de perfection*[160]*. Réponse a la question proposée par l'académie royale des sciences de Paris, pour l'année* 1770 [161]*. Recherches et calculs sur la vraie orbite elliptique de la comète de l'an* 1769 *et son tems périodique*[162]*. Expositio methodorum, cum pro determinanda parallaxi solis ex observato transitu Veneris per solem, tum pro inveniendis longitudinibus locorum super terra, ex observationibus eclipsium solis, una cum calculis et conclusionibus inde deductis*[163] *. De solidis quorum superficiem in planum explicare licet* [164]*. Genuina principia doctrinæ de statu æquilibrii et motu corporum tam perfecte flesibilium quam elasticorum* [165]*. De ictu glandium contra tabulam explosarum166. Réponse a la question proposée par l'académie royale des sciences de Paris, pour l'année* 1772 [167]*. De perturbatione motus terræ ab actione Veneris oriunda* [168]*. De chordis vibrantibus disquisitio ulterior*[169]*. Animadversiones in solutionem Bernoullianam de motu chordarum ex duabus partibus diversæ crassitiei compositarum Tomo* XVI *Novorum Commentariorum*[170]*. De motu vibratorio chordarum ex partibus quotcunque diversae crassitiei compositarum*[171]*. De motu vibratorio chordarum crassitie utcunque variabili praeditarum*[172]*. De motu vi-*

---

[150] Idem 17, 1768, pp. 147 – 180.
[151] Idem 17, 1768, pp. 181 – 190.
[152] Idem 17, 1768, pp. 191 – 200.
[153] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Paris 1765, 1768, pp. 555 – 575.
[154] Libro publicado por la Academia de Ciencias de San Petersburgo en 1769.
[155] Idem en 1770.
[156] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 14, 1770, pp. 104 – 128.
[157] Libro publicado por la Academia Imperial de Ciencias de San Petersburgo en 1771.
[158] Idem en 1772.
[159] Publicado en Mémoires de l'académie des sciences de Berlin 18, 1769, pp. 249 – 264.
[160] Idem 23, 1769, pp. 131 – 164.
[161] Publicado en Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences 9, 1777, 94 pgs.
[162] Publicado en Anmerck ungen uber die zeitungen, 1770, 159 pgs. y 2 tablas.
[163] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 14, 1770, pp. 322 – 554.
[164] Idem 16, 1772, pp. 3 – 34.
[165] Idem 15, 1771, pp. 381 – 413.
[166] Idem 15, 1771, pp. 414 – 436.
[167] Publicado en Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences 9, 1777, 38 pgs.
[168] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanæ 16, 1772, pp. 426 – 467.
[169] Idem 17, 1773, pp. 381 – 409.
[170] *Idem* 17, 1773, pp. 410 – 421.
[171] *Idem* 17, 1773, pp. 422 – 431.

bratorio laminarum elasticarum, ubi plures novæ vibrationum species hactenus non pertractatæ evolvuntur[173]. *De motu gravium citissimo super curvis specie datis*[174]. *Nova methodus motus planetarum principalium ad tabulas astronomicas reducendi* [175]. *Théorie complète de la construction et de la manœuvre des vaisseaux*[176]. *De collisione corporum gyrantium*[177]. *De collisione corporum pendulorum, tam obliqua, quam motu gyratorio perturbata*[178]. *Determinatio motus oscillatorii in præcedente dissertatione pertracti, ex primus mechanicæ principiis petita*[179.] *De pressione ponderis in planum cui incumbit* [180]. *De harmoniæ veris principiis per speculum musicum repræsentatis* [181]. *Instruction détaillée pour porter les lunettes de toutes les différentes espèces au plus haut degré de perfection dont elles sont susceptibles*[182]. *Disquitio de lentibus obiectivis triplicatis, quæ vel nullam confusionem pariant vel etiam datam confusionem a reliquis lentibus ortam destruere valeant*[183]. *De applicatione lentium obiectivarum compositarum ad omnis generis teescopia*[184]. *De oscillationibus minimis penduli quotunque pondusculis onusti* [185]. *De motu oscillatorio binarum lancium ex libra suspensarum* [186]. *Explicatio motus oscillatorii mirabilis in libra maiore observati* [187]. *De motu turbinatorio chordarum musicarum; ubi simul universa theoria æquilibrii quam motus corporum flexibilium simulque etiam elasticorum breviter explicatur*[188]. *De gemina methodo tam æquilibrium quam motum corporum flexibilium determinandi et utriusque egregio consensu*[189]. *Vera theoria refractionis et dispersionis radiorum rationibus et experimentis confirmata*[190]. *De corporibus regularibus per doctrinam sphæricam determinatis; ubi simul nova methodus globos sive coelestes sive terrestres charta obducendi traditur*[191]. *De motu oscillatorio mixto plurium pendulorum ex eodem corpore mobili suspensorum*[192]. *Investigatio motuum, quibus laminæ et virgæ elasticæ contremiscunt*[193]. *De motu oscillatorio pendulorum ex filo tenso dependentium*[194]. *Determinatio omnium motuum, quos chorda tensa et uniformiter crassa recipere potest*[195]. *De motu libero plurium corporum filis*

[172] *Idem* 17, 1773, pp. 432 – 448.
[173] *Idem* 17, 1773, pp. 449 – 487.
[174] *Idem* 17, 1773, pp. 488 – 504.
[175] *Idem* 18, 1774, pp. 354 – 376.
[176] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1773.
[177] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae 17, 1773, pp. 272 – 314.
[178] *Idem* 17, 1773, pp. 315 – 332.
[179] *Idem* 18, 1774, pp. 268 – 288.
[180] *Idem* 18, 1774, pp. 289 – 329.
[181] *Idem* 18, 1774, pp. 330 – 353.
[182] Publicado en *Anmerck ungen uber die zeitungen*, 1774.
[183] Publicado en Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae 18, 1774, pp. 377 – 414.
[184] *Idem* 18, 1774, pp. 415 – 500.
[185] *Idem* 19, 1775, pp. 285 – 301.
[186] *Idem* 19, 1775, pp. 302 – 324.
[187] *Idem* 19, 1775, pp. 325 – 339.
[188] *Idem* 19, 1775, pp. 340 – 370.
[189] *Idem* 20, 1776, pp. 286 – 303.
[190] Publicado en *Acta Academiæ Scientarum Imperialis Petropolitinæ* 1777, 1778, pp. 174 – 189.
[191] *Idem* 2, 1780, pp. 3 – 19.
[192] *Idem* 1779, 1782, pp. 89 – 102.
[193] *Idem* 1779, 1782, pp. 103 – 161.
[194] *Idem* 1778, 1783, pp. 95 – 105.
[195] *Idem* 1779, 1783, pp. 116 – 125.

colligatorum super plano horizontali[196]*. Dilucidationes de motu chordarum inæqualiter crassarum*[197]*. De oscillationibus minimis funis libere suspensi*[198]*. De perturbatione motus chordarum ab earum pondere oriunda*[199]*. Remarques de M. Euler sur quelques passages qui se trouvent dans le troisième volume des opuscules mathématiques de M. d'Alembert* [200]*. Eclaircissemens sur le mouvement des cordes vibrantes*[201]*. Recherches sur le mouvement des cordes inégalement grosses*[202]*. Sur le mouvement d'une corde, qu'au commencement n'a été ébranlée que dans une partie*[203]*. Eclaircissemens plus détailles sur la génération et la propagation du son et sur la formation de l'écho*[204]*. Methodus facilis motus corporum coelestium utcunque perturbatos ad rationem calculi astronomici revocandi*[205]*. Réflexions sur la manière d'examiner la réfraction du verre par le moyen des prismes*[206]*. Corrections nécessaires pour la théorie de la déclinaison magnétique, proposée dans le* XIII *volume des Mémoires*[207]*. Théorie générale de la dioptrique*[208]*. Construction des objectifs composes propre à détruire toute la confusion dans les lunettes*[209]*. Sectio prima de statu æquilibrii fluidorum* [210]*. Sectio secunda de principiis motus fluidorum*[211]*. Nouvelle manière de comparer les observations de la lune avec la théorie*[212]*. Sectio tertia de motu fluidorum lineari potissimum aquæ* [213]*. Sectio quarta de motu aeris in tubis*[214]*. Recherches sur la confusion des verres dioptriques causée par leur ouverture*[215]*. Recherches sur les moyens de diminuer ou de réduire même à rien la confusion causée par l'ouverture des verres*[216]*. Nouvelle manière de perfectionner les verres objectifs des lunettes*[217]*. Détermination du champ apparent que découvrent tant les télescopes que les microscopes*[218]*. Précis d'une théorie générale de la dioptrique*[219]*. Dioptricæ pars prima continens lubrum primum de explicatione principiorum, ex quibus constructio tam telescopiorum quam microscopiorum est petenda* [220]*. Dioptricæ pars secunda continens lubrum secundum de constructione telescopiorum*

[196] *Idem* 1780, 1783, pp. 107 – 118.
[197] *Idem* 1780, 1784, pp. 99 – 132.
[198] *Idem* 1781, 1784, pp. 157 – 177.
[199] *Idem* 1781, 1784, pp. 178 – 190.
[200] Publicado en *Journal encyclopedique* 2, 1765, pp. 114 – 127.
[201] Publicado en *Mélanges de philosophie et de la mathématique de la société royale de Turin* 3, 1766, pp. 1 – 26.
[202] *Idem* 3, 1766, pp. 27 – 59.
[203] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 21, 1767, pp. 307 – 334.
[204] *Idem* 21, 1767, pp. 335 – 363.
[205] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 12, 1768, pp. 129 – 165.
[206] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 22, 1768, pp. 202 – 212.
[207] *Idem* 22, 1768, pp. 213 – 264.
[208] Publicado en *Opera Postuma* 2, 1862, pp. 567 – 604.
[209] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 22, 1768, pp. 171 – 201.
[210] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 12, 1769, pp. 305 – 416.
[211] *Idem* 14, 1770, pp. 270 – 386.
[212] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 19, 1770, pp. 221 – 234.
[213] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 15, 1771, pp. 219 – 360.
[214] *Idem* 16, 1772, pp. 281 – 425.
[215] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 17, 1768, pp. 107 – 146.
[216] *Idem* 17, 1768, pp. 147 – 180.
[217] *Idem* 17, 1768, pp. 181 – 190.
[218] *Idem* 17, 1768, pp. 191 – 200.
[219] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Paris* 1765, 1768, pp. 555 – 575.
[220] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1769.

dippticorum cum appendice de constructione telescopiorum catoptico-dioptricorum[221]. *Appendice de constructione telescopiorum catoptrico-dioptricorum*[222]. *Theoria motuum lunæ*[223]. *Sur les avantages des verres objectifs composes de deux verres simples* [224]. *Méthode pour porter les verres objectifs des lunettes à un plus haut degré de perfection*[225]. *Réponse a la question proposée par l'académie royale des sciences de Paris, pour l'année* 1770 [226]. *Recherches et calculs sur la vraie orbite elliptique de la comète de l'an* 1769 *et son tems périodique* [227]. *Expositio methodorum, cum pro determinanda parallaxi solis ex observato transitu Veneris per solem, tum pro inveniendis longitudinibus locorum super terra, ex observationibus eclipsium solis, una cum calculis et conclusionibus inde deductis* [228]. *Genuina principia doctrinæ de statu æquilibrii et motu corporum tam perfecte flesibilium quam elasticorum*[229]. *De ictu glandium contra tabulam explosarum*[230]. *Commentatio hypothetica de periculo a nimia cometæ approponquatione metuendo*[231]. *Formulæ generales pro translatione quacunque corporum rigidorum*[232]. *De pressione funium tensorum in corpora subiecta eorumque motu a frictione impedito. Ubi præsertim methodus traditur*[233]. *De traiectu citissimo stellæ per duos circulos almicantarath datos pro qualibet elevatione poli*[234]. *De circulo maximo fixo in coelo constituendo, ad quem orbitæ planetarum et cometarum referantur*[235]. *De Theoria Lunæ ad maiorem perfectionis gradum evehenda*[236] . *De motu oscillatorio duorum corporum ex filo super trochleas traducto suspensorum*[237]. *Nova methodus motum planetarum determinandi*[238]. *Dilucidationes super aliquot casus æquilibrii difficiliores*[239]. *Cautiones necessariæ in determinatione motus planetarum observandæ* [240]. *De vi fluminis ad naves sursum trahendas applicanda*[241]. *De statu æquilibrii maris a viribus solis et lunæ sollicitati* [242]. *De effectu frictionis in motu volutorio* [243]. *Accuratior evolutio formularum pro filorum flexibilium æquilibrio et motu inventarum* [244]. *De figura apparente an-*

[221] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1770.
[222] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1771.
[223] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1772.
[224] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin* 18, 1769, pp. 249 – 264.
[225] *Idem* 23, 1769, pp. 131 – 164.
[226] Publicado en *Recueil des pièces qui ont remporté les prix de l'académie royale des sciences* 9, 1777, 94 pgs.
[227] Libro publicado por la imprenta de la Academia imperial de ciencias de San Petersburgo en 1770.
[228] Publicado en *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 14, 1770, pp. 322 – 554.
[229] *Idem* 15, 1771, pp. 381 – 413.
[230] *Idem* 15, 1771, pp. 414 – 436.
[231] *Idem* 19, 1775, pp. 499 – 548.
[232] *Idem* 20, 1776, pp. 189 – 207.
[233] *Idem* 20, 1776, pp. 304 – 342.
[234] *Idem* 20, 1776, pp. 503 – 508.
[235] *Idem* 20, 1776, pp. 509 – 540.
[236] Publicado en *Acta Academiæ Scientarum Imperialis Petropolitinæ* 1777, 1778, pp. 281 – 327.
[237] *Idem* 1778, 1781, pp. 137 – 149.
[238] *Idem* 1778, 1781, pp. 277 – 302.
[239] *Idem* 1779, 1783, pp. 106 – 115.
[240] *Idem* 1780, 1783, pp. 295 – 334.
[241] *Idem* 4, 1783, pp. 119 – 131.
[242] *Idem* 4, 1783, pp. 132 – 153.
[243] *Idem* 1781, 1785, pp. 131 – 175.
[244] *Idem* 1782, 1786, pp. 148 – 169.

nuli Saturni pro eius loco quocunque respectu terræ [245]*.De apparitione et disaparitione annuli Saturni* [246]*. De motu oscillatorio penduli cuiuscunque, dum arcus datae amplitudinis*[247]*. Determinatio facilis orbitæ cometæ, cuius transitum per eclipticam bis observare licuit*[248]*. De motu penduli circa axem cylindricum, fulcro datæ figuræ incumbentem, mobilis*[249]*. De motu penduli circa axem cylindricum, fulcro datæ figuræ incumbentem, mobilis. Habita frictionis ratione*[250]*. De viribus centripetis, ad curvas non in eodem plano sitas describendas, requisitis* [251]*. De motu trium corporum se mutuo attrahentium super eadem linea recta* [252]*. De figura quam ventus fluido stagnanti inducere valet*[253]*. Considerationes super problemate astronomico in tomo commentarior. veter.* IV. *Pertractato* [254]*. Réflexions sur les inégalités dans le mouvement de la Terre causées par l'action de Venus; avec un Table des corrections du Lieu de la Terre* [255]*. De variis motuum generibus, qui in satellitibus planetarum locum habere possunt* [256]*. De motibus maxime irregularibus, qui in systemate mundano locum habere possent, una cum methodo hujusmodi motus per temporis spatium quantumvis magnum prosequendi* [257]*. De inventione longitudinis locorum ex observata lunae distantia a quadam stella fixa cognita* [258]*. Sur l'effet de la refraction dans les observations terrestres* [259]*. Solutio problematis mechanici* [260]*. Investigatio perturbationum quæ in motu terræe ab actione Veneris producunter: cum tabula perturbationum istarum*[261]*. Conjectura circa naturam aeris, pro explicandis phaenomenis in atmosphæra observatis.*[262]*. Theoria parallaxeos, ad figuram terræ sphæroidicam accomodata* [263]*. De eclipsibus solaribus in superficie terræ per proiectionem repræsentandis*[264]*. De motu oscillatorio penduli circa axem cylindricum plano horizontali incumbentem*[265]*. Constructio manometri densitatem aeris quovis tempore accurate monstrantis* [266]*. Essai d'une théorie de la résistance qu'éprouve la proue d'un vaisseau dans son mouvement* [267]*. Calculs sur les ballons aerostatiques* [268]*.*

[245] *Idem* 1777, 1778, pp. 276 – 287.
[246] *Idem* 1777, 1778, pp. 288 – 316.
[247] *Idem* 1777, 1780, pp. 159 – 182.
[248] *Idem* 1780, 1783, pp. 243 – 254.
[249] *Idem* 1780, 1784, pp. 133 – 163.
[250] *Idem* 1780, 1784, pp. 164 – 174.
[251] *Idem* 3, 1788, pp. 111 – 125.
[252] *Idem* 3, 1788, pp. 126 – 141.
[253] *Idem* 1777, 1778, pp. 190 – 194.
[254] *Idem* 1777, 1778, pp. 269 – 275.
[255] *Idem* 1778, 1780, pp. 297 – 307.
[256] *Idem* 1780, 1780, pp. 255 – 279.
[257] *Idem* 1780, 1780, pp. 280 – 302.
[258] *Idem* 1780, 1783, pp. 301 – 307.
[259] *Idem* 1777, 1780, pp. 129 – 158.
[260] Publicado en *Nova Acta Academiæ Scientarum Imperialis Petropolitinæ* 3, 1788, pp. 64 – 69.
[261] Publicado en *Acta Academiæ Scientarum Imperialis Petropolitinæ* 1778, 1780, pp. 308 – 316.
[262] *Idem* 1779, 1779, pp. 103 – 161.
[263] *Idem* 1779, 1782, pp. 241 – 278.
[264] *Idem* 1780, 1784, pp. 303 – 323.
[265] Publicado en *Nova Acta Academiæ Scientarum Imperialis Petropolitinæ* 6, 1790, pp. 145 – 153.
[266] Publicado en *Opera Postuma* 2, 1862, pp. 561 – 566.
[267] Publicado en *Mémoires de l'académie des sciences de Paris* 1778, 1781, pp. 597 – 602.
[268] *Idem* 784, 1784, pp. 264-268.

En 1741, fue invitado por el Rey de Prusia, Fredrich der große [269] para instalarse en Berlin, donde fue electo Miembro de la Academia de Ciencias y fue nombrado Profesor de Matemáticas. En Berlin produjo una cantidad enorme de trabajos de investigación, tanto de Matemáticas como en distintos campos de la Física, Mecánica, Óptica, Astronomía, Hidrodinámica y Aerostática. A pesar de estar en Prusia, seguía colaborando con la Academia Imperial de San Petersburgo la que, en 1742, le asignó una pensión vitalicia. El agradecimiento y la empatía de la Academia Rusa quedó patentizado en 1760. Durante la "Guerra de los siete años" las tropas rusas arrasaron su casa, en las proximidades de Charlottenburg. Cuando el comandante de las tropas se enteró ordenó inmediatamente que le den una reparación monetaria y la Emperatriz rusa Elisaveta Pretrovna le otorgó una compensación adicional de cuatro mil coronas.

A lo largo de su vida Euler mantuvo siempre un muy bajo perfil a causa de su gran timidez. Se cuenta que la Princesa Anna Amalia, le preguntó por qué era tan tímido, a lo que Euler respondió "Porque vengo de un país donde el que habla termina colgado".

En 1755, Euler fue electro Miembro de la Académie de Sciences de París y poco después recibió los premios de esa academia por tres de sus trabajos sobre las irregularidades en los movimientos de los planetas.

En 1766, la emperatriz Ekaterina Alexeievna[270] lo llamó para que colabore en la reorganización de la Academia. Con la autorización del rey de Prusia viajó a San Petersburgo. A poco de llegar las cataratas le hicieron perder la visión de uno de sus ojos. No obstante, continuó trabajando durante los diez y siete años siguientes. Uno de sus discípulos ponía por escrito todos sus razonamientos lo que permitió que su obra se conociera en toda Europa. En 1770 produjo su Anleitung zur Algebra, Elementos de Álgebra, considerada una de las mejores obras de su género y que, durante más de un siglo, fuera usada como libro de texto en muchas universidades.

A poco de regresar a San Petersburgo, se impuso la tarea de escribir sus Lettres à une Princesse d'Allemagne sur quelques sujects de Phyjsique et de Philosophie, (3 vols. 1768 – 72), a pedido de la Princesa de Anhalt Dessau. En esta obra Euler presentó una exposición admirablemente clara sobre los principales temas de Mecánica, Óptica, Acústica y Astronomía, empleando sólidas bases matemáticas.

A pesar de sus dificultades visuales siguió trabajando para la Academia de San Petersburgo dejando una obra que fue recopilada por su asistente matemático, Nicolas Fuss.

Leonhard Euler, falleció el 18 de septiembre de 1783, víctima de una apoplejía. Su vasta obra fue recopilada como Opera Omnia (82 volúmenes que abarcan más de 40 libros y 850 artículos). Obtuvo 12 veces el Premio de la Académie des Sciences de París.

[269] Federico II el grande (1712 – 1786)
[270] Catalina II de Rusia (1729 – 1796)

7 – 4. J**oseph-Louis Lagrange.**

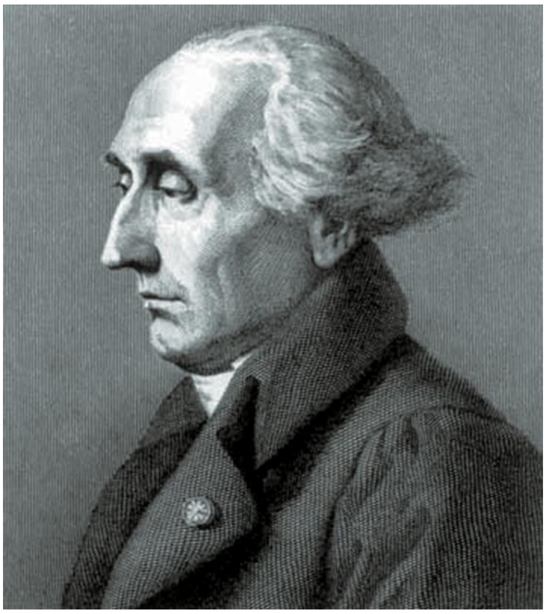


Figura 7.9. J.L. Lagrange

Su verdadero nombre fue Giuseppe Ludovico Lagrangia. Nació en Turin el 25 de enero de 1730 donde su padre Giuseppe Francesco Lodovico Lagrangia era funcionario del Reino de Cerdeña. Su madre, Teresa Grosso, era hija de un médico de esa ciudad.

En su juventud, estudió en la Universidad de Turín, donde se apasionó con la lectura clásica, especialmente con las obras de Cicerón y de Virgilio. Pero cuando pudo tomar contacto con la obra de Arquímedes, se convirtió en un entusiasta admirador de la geometría de los antiguos. Ese gusto por la Matemática y la Física se acentuó con la lectura de la obra de Isaac Newton por lo que decidió dedicarse a esas dos disciplinas. Sus trabajos fueron pioneros en muchos campos, como el de las permutaciones, el análisis de las variaciones, la resolución de ecuaciones diferenciales, el empleo de los multiplicadores indeterminados, así como en diversos aspectos de la Estática, la Dinámica y la Astronomía. Sus méritos le fueron reconocidos en vida. Fue nombrado Miembro extranjero de la Académie de Sciences, integró el Bureau des Longitudes, fue Senador, Napoleón lo condecoró como Grand Officier de la Légion de Honneur y fue nombrado Conde del Imperio francés.

En 1755, cuando tan sólo tenía diecinueve años le envió una carta a Leonhard Euler en la cual proponía un método novedoso para resolver los problemas de isoperimetría, los que habían sido tema de discusión durante más de medio siglo, para esta resolución, el propuso la técnica del cálculo de variaciones. Tiempo después le envió a Euler sus trabajos sobre la propagación del sonido. Euler quedó muy impresionado por la jerarquía del trabajo de Lagrange, que lo propuso como Asociado a la Academia de Berlin donde fue aceptado al año siguiente.

Ese mismo año, el Rey Carlos Manuel III de Cerdeña, lo nombró profesor en la escuela de Artillería de Turín, para adiestrar a los alumnos en los cálculos sobre trayectorias balísticas, aunque más que actividades prácticas sus cursos versaron sobre aspectos teóricos de la Cinemática y la Dinámica.

En 1758 comenzó a desarrollar la publicación de una revista científica, llamada *Miscellanea philosophico-mathematica Societatis privatæ Taurinensis*, más conocida como *Miscellanea Taurinensia*, la que fue puesta bajo la dirección de la Academia de Turín. En esa revista, Lagrange publicó:

« Recherches sur la méthode de maximis, et minimis. », T. 1, 1759, pp. 18 – 32.

« Sur l'intégration d'une équation différentielle à différences finies qui contient la théorie des suites récurrentes. T. 1, 1759, pp. 33 – 42.

« Recherches sur la nature du son ». Section première, T. 1, 1759, pp. 1 – 82. « De la propagation du son ». Section seconde. pp. 83 – 112.

« Nouvelles recherches sur la nature et la propagation du son ». T. II, 1760 – 1761, pp. 319 – 334.

« Essai d'une nouvelle méthode pour déterminer les maxima et les minima des formules intégrales indéfinies », T. II, 1760 – 1761, pp. 173 – 195.

« Application de la méthode exposée dans le Mémoire précédent à la solution de différents problèmes de dynamique » T. II, 1760 – 1761, pp. 196 – 298.

« Solution de différents problèmes de calcul intégral », T. III, 1762 – 1765, pp. 179 – 380.

« Solution d'un Problème d'Arithmétique », T. IV. 1766 – 1769. pp. 41 – 90. « Usage des Méthodes précédentes pour la résolution des équations du second degré à deux inconnues, par des nombres entiers ». pp. 91 – 97.

« Sur le intégration de quelques équations différentielles dont les indéterminées sont séparées, mais dont chaque membre en particulier n'est point intégrable ». T. IV. 1766 – 1769, pp. 98 – 125.

« Sur la Méthode des variations », T. IV. 1766 – 1769, pp. 163 – 187.

« Recherches sur le mouvement d'un corps qui est attiré vers deux centres fixes ». Première Mémoire. . T. IV. 1766 – 1769, pp. 188 – 215.

« Recherches Sur le mouvement d'un corps qui est attiré vers deux centres fixes ». Seconde Mémoire, T. IV. 1766 – 1769, pp. 216 – 243.

« Sur las figures des colonnes», T. V. 1770 – 1773, pp. 123 – 166.

« Mémoire sur l'utilité de la méthode de prendre le milieu entre le résultat de plusieurs observations, dans lequel on examine les avantages de cette méthode par le calcul des probabilités, & où l'on ressoude différents problèmes relatifs à cette matière », T. V. 1770 – 1773, pp. 167 – 232.

En 1762, la Académie des Sciences de París anunció el inicio de una competencia por el premio al mejor trabajo sobre la libración de la Luna, es decir, el movimiento oscilatorio de la Luna que hace que, aunque dirija siempre la misma cara hacia la Tierra, permite ver hasta el 59% de su superficie. Al año siguiente Lagrange presentó la solución analítica al problema. Esto motivó que, en 1766, la Académie instituyese un premio para quien pudiese demostrar el comportamiento de las cuatro lunas de Júpiter sobre la base del principio de gravitación universal. Los matemáticos más prestigiosos de la época, — entre ellos, Euler, D'Alambert, Clairaut y Bailly — se abocaron a la resolución del problema, pero fue Lagrange quien propuso el método analítico para su resolución. En 1788, Laplace completó el análisis de Lagrange.

La jerarquía de los trabajos de Lagrange fue reconocida por los matemáticos de su época. Tanto Pierre-Louis de Maupertuis, como Leonhard Euler y Jean Le Rond D'Alembert le insistían en que dedicase más tiempo a la Academia de Berlin y en 1766, D'Alembert y Euler lo propusieron para el cargo que dejaba Euler en Berlin. Friedrich II de Prusia le escribió una carta a Lagrange en la que decía: "El Rey más grande de Europa, desea que el matemático más grande de Europa viva en su Corte". Lagrange aceptó el cargo de Director de la Sección de las ciencias físico-matemáticas en la Academia de Berlin y durante las dos décadas siguientes produjo la serie de documentos matemáticos y físicos más importante que se había publicado hasta entonces. En ella se incluyó su monumental obra *Mécanique Analytique*.

En 1767, estando ya en Berlín, se casó con su prima, Vittoria Conti, pero no quiso tener hijos.

Su obra en la Academia de Berlín, quedó plasmada en los siguientes trabajos publicados en las *Mémoires de l'Academie Royale des Sciences et Belles Lettres*:

« Sur les courbes tautochrones »[271], T. XXI, 1765, pp. 364 – 380.

« Mémoire sur le passage de Vénus du 3 juin 1769 »272 T. XXII 1767 265 – 301.

« Sur la solution des Problèmes indéterminés du second degré. » T. XXIII, 1767, pp. 165 – 310.

« Sur la résolution des équations numériques. » T. XXIII, 1767, pp. 311 – 352.

« Additions au Mémoire sur la résolution des équations numériques. » T. XXIV, 1770, pp. 251-280.

« Nouvelle méthode pour résoudre les Problèmes indéterminés en nombres entiers. » T. XXIV, 1770, pp. 181 – 250.

« Sur la force des ressorts pliés » T. XXV, 1771, pp. 167 – 203.

« Sur le Problème de Képler. »[273] T. XXV, 1771, pp. 204 – 233.

« Sur l'élimination des inconnues dans les équations. » T. XXV, 1771, pp. 303 - 318.

---

[271] La tautócrona o isócrona es una curva tal que si se hace deslizar sobre ella un cuerpo sin rozamiento a partir del reposo, le tomará el mismo tiempo llegar al punto más bajo de la curva desde cualquier punto inicial. El nombre deriva del griego *tauto*, por mismo y *chronos*, por tiempo.

[272] En este trabajo, Lagrange analizó cómo podría calcularse el paralaje solar a raíz del pasaje de Venus sobre el Sol, que tendría lugar dos años más tarde.

[273] Para cualquier órbita elíptica, la dependencia de la posición relativa r en función del tiempo t no puede encontrarse en forma explícita. Lagrange propuso un método aproximado mediante el desarrollo en serie, que funciona bien para cuerpos cuyas excentricidades no excedan el valor límite 0,6627 (por ejemplo. la Tierra)

« Nouvelles réflexions sur les Tautochrones. » T. XXVI, 1772, pp. 97 – 122.

« Démonstration d'un Théorème d'Arithmétique » T. XXVI, 1772, pp. 123 – 133.

« Réflexions sur la résolution algébrique des équations. » T. XXVI, 1772, pp. 134 – 215.

« Démonstration d'un Théorème nouveau concernant les nombres premiers. » T. XXVII, 1774, pp. 125 – 137.

« Sur une nouvelle espèce de calcul relatif à la différentiation et à l'intégration des quantités variables. » T. XXVII , 1774, pp. 185 - 197.

« Sur la forme des racines imaginaires des équations. » T. XXVII, 1774, pp. 222 – 258.

« Sur les réfractions astronomiques. » T. XXVII, 1774, pp. 259 – 282.

« Sur l'intégration des équations à différences partielles du premier ordre. » T. XXVII, 1774, pp. 353 – 372.

« Nouvelle solution du Problème du mouvement de rotation d'un corps de figure quelconque qui n'est animé par aucune force accélératrice. » T. XXVIII, 1775, pp. 85 – 120.

« Sur l'attraction des Sphéroïdes elliptiques. » T. XXVIII, 1775, pp. 121 – 148.

« Solutions analytiques de quelques Problèmes sur les pyramides triangulaires... » T. XXVIII, 1775, pp. 149 – 176.

« Recherches d'Arithmétique. » T. XXVIII, 1775, pp. 265 – 312.

« Sur le mouvement des nœuds des orbites planétaires. »[274] T. XXIX, 1776, pp. 276 – 307.

« Recherches sur les suites récurrentes dont les termes varient de plusieurs manières différentes, ou sur l'intégration des équations linéaires aux différences finies et partielles; et sur l'usage de ces équations dans la théorie des hazards. » T. XXX, 1777, pp. 183 – 272.

« Sur l'attraction des Sphéroïdes elliptiques. Addition. » T. XXX, 1777, pp. 173 – 179.

« Recherches d'Arithmétique. Suite. » T. XXX, 1777, pp . 313 – 356.

« Sur l'altération des moyens mouvements des planètes. » T. XXXI, 1779, pp. 199 – 213.

« Solutions de quelques problèmes d'Astronomie sphérique par le moyen des séries » T. XXXI, 1779, pp. 214 – 235.

---

[274] Dada la trayectoria de un planeta que esté inclinada respecto del plano de la eclíptica, se llaman *nodos* los puntos de la órbita donde cortan a la eclíptica.

« Sur l'usage des fractions continues dans le Calcul intégral. » T. XXXI, 1779, pp. 236 – 264.

« Recherches sur la détermination du nombre des racines imaginaires dans les équations littérales. » T. XXXI, 1779, pp. 112 – 139.

« Sur quelques problèmes de l'analyse de Diophante. »[275] T. XXXI, 1779, pp. 140 – 154.

« Remarques générales sur le mouvement de plusieurs corps qui s'attirent mutuellement en raison inverse des carrés des distances. » T. XXXI, 1779, pp. 155 – 172.

« Réflexions sur l'Échappement. » T. XXXI, 1779, pp. 173 – 185.

« Sur la théorie des lunettes » T. XXXII, 1780, pp. 162 – 180.

« Sur une manière particulière d'exprimer le tems dans les sections coniques, décrites par des forces tendantes au foyer et réciproquement proportionnelles aux carrés des distances. » T. XXXII, 1780, pp. 181 – 202.

« Sur différentes questions d'analyse relatives à la théorie des intégrales particulières. » T. XXXIII, 1781, pp. 122 – 160.

« Sur la construction des Cartes Géographiques »: Premier et second mémoire. T. XXXIII, 1781, pp. 161 – 210.

« Théorie de la libration de la lune, et des autres Phénomènes qui dépendent de la figure non sphérique de cette Planète. » T. XXXIV, 1782, pp. 204 – 310.

« Rapport d'une quadrature du cercle. » T. XXXV, 1783, pp. 17 – 20.

« Mémoire sur la Théorie du mouvement des fluides. » T. XXXV, 1783, pp.151 – 198.

« Théorie des variations séculaires des éléments des Planètes: Première partie. Contenant les principes et les formules générales pour déterminer ces variations. » T. XXXV, 1783, pp. 199 – 276.

« Théorie des variations séculaires des éléments des Planètes: Seconde partie. Contenant la détermination de ces variations pour chacune des Planètes principales. » T. XXXVI, 1784, pp. 169 – 292.

« Théorie des variations périodiques des mouvements des Planètes: Première partie. Contenant les formules générales de ces variations. » T. XXXVII, 1785, pp. 161 – 190.

---

[275] El análisis de Diofante es el área de estudio donde se buscan soluciones enteras para las ecuaciones, y las ecuaciones diofánticas son aquellas ecuaciones polinómicas con coeficientes enteros de las que sólo se buscan soluciones enteras.

« Sur les variations séculaires des mouvements moyens des Planètes. » T XXXVII, 1785, pp. 191 – 223.

« Sur la manière de rectifier les méthodes ordinaires d'approximation pour l'intégration des équations du mouvement des Planètes. » T XXXVII 1785 pp. 224 – 242.

« Sur une méthode particulière d'approximation et d'interpolation. » T. XXXVII, 1785, pp. 279 – 289.

« Sur une nouvelle propriété du centre de gravité. » T. XXXVII, 1785, pp. 290 – 295.

« Sur le problème de la détermination des orbites des Comètes d'après trois observations: Troisième mémoire, dans lequel on donne une solution directe et générale de ce problème. » T. XXXVII, 1785, pp. 296 – 332.

« Théorie des variations périodiques des mouvements des Planètes: Seconde partie Contenant le calcul des variations indépendantes des excentricités et des inclinaisons pour chacune des six Planètes principales. » T. XXXVIII, 1786, pp. 187 – 258.

« Méthode générale pour intégrer les équations aux différences partielles du premier ordre, lorsque ces différences ne sont que linéaires. » T. XXXIX, 1787, pp. 174 – 190.

« Théorie géométrique du mouvement des aphélies des Planètes, pour servir d'Addition aux Principes de Newton. » T. X, 1788, pp. 161 – 180.

« Sur la manière de rectifier deux endroits des Principes de Newton, relatifs à la propagation du son, et au mouvement des ondes. » T. X, 1788, pp. 181 – 199.

Friedrich II murió el 17 de agosto de 1786 y fue sucedido por su sobrino Friedrich Wilhelm II quien, a diferencia de su tío no tenía inclinación especial ni por las ciencias ni por las artes. La esposa de Lagrange había fallecido en 1783, lo que lo afectó anímicamente y la diferencia en el trato con el nuevo monarca lo llevaron a la conclusión de que su ciclo en la Academia de Berlín había terminado. Recibió ofertas para trabajar en Nápoles y Sicilia, pero aprovechó una invitación del Rey Luis XVI para emigrar a París. En 1787 fue nombrado miembro veterano en la Académie, donde había sido miembro extranjero durante quince años. Eso le dio derecho a votar en todas las deliberaciones y a vivir en el Louvre. No obstante de haber sido recibido con honores y percibir el afecto de sus colegas, sufrió un cuadro de melancolía que lo mantuvo inactivo hasta la Revolución del 14 de julio.

La *Mécanique analytique* que Lagrange había completado en Berlin, fue publicada en 1788. Su publicación fue aprobada por un comité de la Académie des Sciences integrado por Laplace, Cousin, Legendre y Condorcet, siendo este último el encargado de la edición. Esta obra resume todos los adelantos efectuados en la Mecánica desde el tiempo de Newton y es notable por el uso de la teoría de las ecuaciones diferenciales. Mediante esta técnica, Lagrange transformó a la Mecánica en una rama del Análisis Matemático.

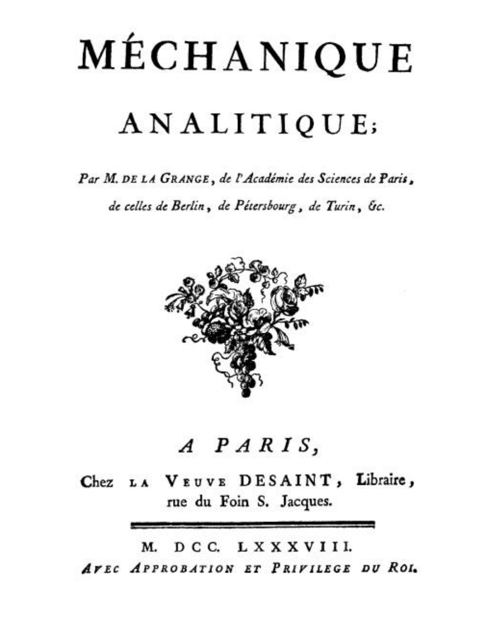

MÉCHANIQUE
ANALITIQUE;
Par M. DE LA GRANGE, de l'Académie des Sciences de Paris, de celles de Berlin, de Pétersbourg, de Turin, &c.
A PARIS,
Chez LA VEUVE DESAINT, Libraire, rue du Foin S. Jacques.
M. DCC. LXXXVIII.
AVEC APPROBATION ET PRIVILEGE DU ROI.

Figura 7.10. Méchanique Analytique

En el prólogo, Lagrange escribió:

On ne trouvera point de Figures Dans cet Ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnemens géométriques ou méchaniques. Mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche réguliere et uniforme. Ceux qui aiment l'Analyse, verront avec plaisir la Méchanique en devenir une nouvelle branche, et me sauront gré d'avoir étendu ainsi le domaine.

La obra está divida en dos partes. La primera parte trata de la Estática, o teoría del equilibrio y la segunda trata de la Dinámica o teoría del movimiento. En cada una de las partes trata por separado los comportamientos de los sólidos y los líquidos.

La Sección primera de la primer parte contiene un análisis muy completo de los principios de la Estática. En la segunda Sección se demuestran de manera muy rigurosa las interacciones de un número cualquiera de fuerzas virtuales que llevan a un estado de equilibrio. En la tercera Sección se exponen las propiedades generales del equilibrio deducidas de las fórmulas precedentes. En la cuarta Sección se expone un método sencillo para encontrar las ecuaciones necesarias para que se alcance el equilibrio en un sistema de cuerpos considerados como puntos materiales o como masas finitas. Aquí se emplea el método de las variaciones. La quinta sección propone un cierto número de problemas de Estática y sus resoluciones. La sexta está dedicada a la Hidrostática y la séptima al equilibrio de fluidos incompresibles mientras que la octava está dedicada al análisis del equilibrio en fluidos elásticos.

La segunda parte está dedicada da la Dinámica. En su primer Sección se hace un análisis de los principios de la Dinámica. En la segunda, se plantean las ecuaciones de movimiento de un sistema de cuerpos impulsados por fuerzas cualesquiera. En la tercer Sección se analizan las propiedades relativas al movimiento del centro de gravedad, y cómo calcular las áreas barridas por un cuerpo en rotación a partir de las fórmulas expuestas en la sección anterior. La sección cuarta, expone un método para establecer las ecuaciones que determinan los movimientos de un sistema de cuerpos cualquiera impulsado por fuerzas que provocan su aceleración. La sección quinta está dedicada a la resolución de problemas de Dinámica (oscilaciones pequeñas de un sistema de cuerpos, movimiento de un cuerpo atraído por varios centros, movimientos de varios cuerpos que interactúan por atracción, por ligaduras o por palancas) La sexta sección está dedicada al estudio de la rotación de los cuerpos: fórmulas generales relativas a la rotación, ecuaciones del movimiento rotatorio de cuerpos sólidos cualesquiera debidos a fuerzas de cualquier índole, etc.) La sección séptima está dedicada a los principios de la Hidrodinámica. La sección octava analiza el movimiento de fluidos incompresibles mientras que la novena se dedica al movimiento de fluidos elásticos.

En mayo de 1790, Lagrange fue nombrado miembro de una comisión de la Académie de Sciences destinada a estandarizar los sistemas de pesas y medidas basadas sobre el sistema decimal. A

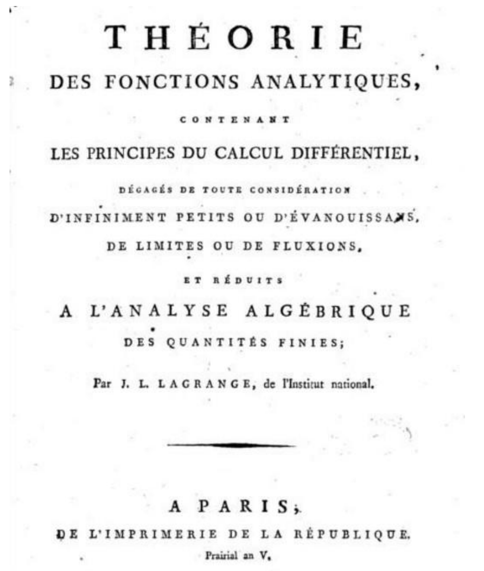

THÉORIE
DES FONCTIONS ANALYTIQUES,
CONTENANT
LES PRINCIPES DU CALCUL DIFFÉRENTIEL,
DÉGAGÉS DE TOUTE CONSIDÉRATION
D'INFINIMENT PETITS OU D'ÉVANOUISSANS,
DE LIMITES OU DE FLUXIONS,
ET RÉDUITS
A L'ANALYSE ALGÉBRIQUE
DES QUANTITÉS FINIES;
Par J. L. LAGRANGE, de l'Institut national.
A PARIS,
DE L'IMPRIMERIE DE LA RÉPUBLIQUE.
Prairial an V.

Figura 7.11. Théorie des fonctions analytiques

pesar de la vorágine política que había invadido Francia, él se mantuvo distante y alejado de cualquier discusión sobre los temas de la actualidad política. En 1792 se volvió a casar con Renée-Françoise-Adélaide, hija del astrónomo Pierre Charles Le Monnier su colega de la Académie. Durante el Reino del Terror hubo un desguace de las instituciones científicas y el 8 de agosto de 1793 fue disuelta la Académie des Sciences. Curiosamente, la Comisión de pesas y medidas continuó subsistiendo, ahora con Lagrange como Director mientras que Lavoisier, Jean Charles de Borda, Pierre Simon de La Place, Charles Agustin Coulomb, Barnabé Brisson y Jean Baptiste Delambre fueron echados de la misma. Al mes siguiente se dictó un decreto de expulsión de todos los extranjeros nacidos en países enemigos ordenando la confiscación de todos sus bienes. Lagrange quedaba incluido en los términos de este decreto pero Lavoisier y otros colegas intercedieron y el Gobierno le permitió quedarse en Paris.

El 8 de mayo de 1794, luego de un juicio que duró menos de un día, Lavoisier, su suegro y 26 personas más fueron condenadas a la guillotina por un Tribunal Revolucionario. De nada valieron los argumentos de su defensor a quien el Presidente del Tribunal, Jean Baptiste Coffinhal respondió: « *La République n'a pas besoin de savants ni de chimistes; le cours de la justice ne peut être suspendu.* » Conmovido y dolido por esa ejecución Lagrange dijo: « *Il ne leur a fallu qu'un moment pour faire tomber cette tête et cent années, peut-être, ne suffiront pas pour en reproduire une semblable.* »

En diciembre de 1794 comenzó a funcionar la École Polytechnique que había sido creada unos meses antes. Allí Lagrange fue nombrado profesor de Análisis Matemático. Al año siguiente se inauguró la École Normal destinada a capacitar a los maestros de escuelas. Allí dictó cursos de matemática elemental teniendo como colega a Jean-Baptiste Joseph Fourier.

De una recopilación de sus clases de Análisis surgieron dos publicaciones. En 1797 se editó su teoría de las funciones de variable real, bajo el título *Théorie des fonctions analytiques contenant les principes du calcul différentiel, dégagés de toute considération d'infiniment petits ou d'évanouissans, de limites ou de fluxions, et reduits a l'analyse algébrique des quantités finies*. En 1800 se publicó su *Leçons sur le calcul des fonctions.*

El 25 de junio de 1795 se emitió un decreto creando el Bureau des Longitudes destinado a estandarizar las unidades de peso y de otras medidas. De los diez miembros originales, los "geómetras" fueron Laplace y Lagrange.

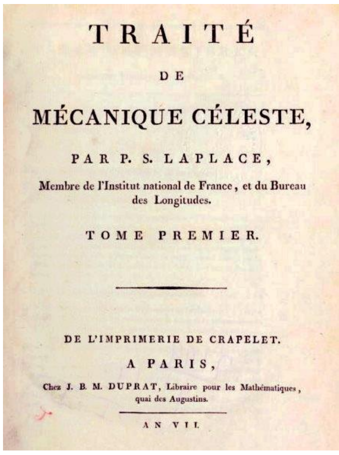
En 1808, Napoleón le confirió el título de Conde del Imperio francés y el 3 de abril, a la orden de la Légión de Honneur, le agregó la Grand Croix de l'Ordre Impérial de la Réunion. Unos días después, el 10 de abril, Lagrange falleció.

Figura 7.14. P.S. de Laplace

7 – 5. Pierre-Simon de La place.

La place nació en Beaumont-en-Auge, Normandía el 28 de marzo de 1749. Su familia eran granjeros de la baja Normandía. De los 7 a los 16 años, asistió a la Escuela Prioral Benedictina 'Duc d'Orleans' en Beaumont: Luego fue a la Universidad de Caen, con la idea de estudiar Teología. En esa universidad estudió Matemáticas con Christophe Gadbled y Pierre Le Canu, quienes lo entusiasmaron en el estudio de esa disciplina. Siendo todavía estudiante, La place redactó la memoria *Sur le Calcul integral aux differences infinitment petites et aux differences finies* que fue publicada en Turín la revista *Miscellanea Taurinensia* dirigida por Lagrange[276].

Mientras estudiaba en Caen, La place se dio cuenta que su vocación no era la Teología sino las matemáticas, por lo que abandonó la Universidad sin recibirse y decidió viajar a Paris. Pierre Le Canú le dio una carta de recomendación para Jean Le Rond d'Alembert quien, por esa época era uno de los matemáticos más prominentes de Francia. En una breve entrevista con d'Alembert, éste le dio un libro de Matemáticas y le dijo que vuelva una vez que lo hubiese leído y entendido. Laplace regresó a los pocos días. D'Alembert le planteó su duda de que realmente hubiese leído y entendido el contenido del libro y comenzó a interrogarlos sobre diversos temas del mismo. Poco a poco se fue dando cuenta no sólo que había leído el libro sino que la inteligencia de Laplace superaba largamente la correspondiente a jóvenes de su edad. Por lo que se dedicó a guiarlo en el aprendizaje y perfeccionamiento de las Matemáticas. Cuando se abrió una dependencia de la École Royale Militaire, d'Alembert recomendó a Laplace, que sólo tenía 19 años, como instructor de Matemáticas.



TRAITÉ
DE
MÉCANIQUE CÉLESTE,
PAR P. S. LAPLACE,
Membre de l'Institut national de France, et du Bureau des Longitudes.
TOME PREMIER.

DE L'IMPRIMERIE DE CRAPELET.
A PARIS,
Chez J. B. M. DUPRAT, Libraire pour les Mathématiques, quai des Augustins.
AN VII.

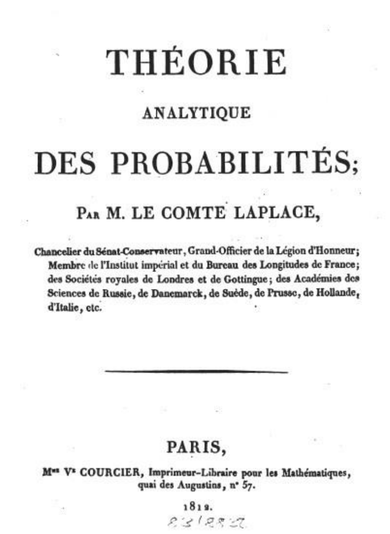
Figura 7.16. Traité de Mécanique céleste.

En 1771 y 1172, fue propuesto para integrar la Académie Royale des Sciences pero recién fue aceptado como Adjunto el 31 de marzo de 1773, a los 24 años. A la fecha de su elección ya llevaba publicados 13 trabajos sobre cálculo integral, ecuaciones diferenciales, aplicaciones de la Matemática a la Astronomía y la teoría de la

[276] *Misc. Taur.* IV, 1766 – 69, pp. 273 – 345.

Probabilidad.

A partir de su ingreso a la Académie, concentró su programa de investigación en dos áreas: Probabilidades y Mecánica celeste, en los que desarrolló las herramientas matemáticas por el resto de su vida. Su actuación en la Académie fue consolidando su fama que él mismo alimentaba titulándose “el mejor matemático de Francia”.


THÉORIE
ANALYTIQUE
DES PROBABILITÉS;
PAR M. LE COMTE LAPLACE,
Chancelier du Sénat-Conservateur, Grand-Officier de la Légion d'Honneur; Membre de l'Institut impérial et du Bureau des Longitudes de France; des Sociétés royales de Londres et de Gottingue; des Académies des Sciences de Russie, de Danemarck, de Suède, de Prusse, de Hollande, d'Italie, etc.

PARIS,
Mme Ve COURCIER, Imprimeur-Libraire pour les Mathématiques, quai des Augustins, nº 57.
1812.

Fig 7.15. Théorie analytique des probabilités.

Su amistad con Lavoisier lo llevó a incursionar, en 1780, en un nuevo campo del saber, la teoría del calórico, un elemento imponderable constituyente de toda la materia que se intercambiaba en las transformaciones. En el siglo siguiente, cuando se aceptó que el calor era una forma particular de energía, las generalizaciones empíricas de Lavoisier y Laplace se convirtieron en leyes fundamentales de la Termodinámica.

En 1784, Laplace fue nombrado evaluador en el Cuerpo de Artillería, donde tuvo como alumno a un cadete de 16 años, llamado Napoleón Bonaparte. En 1785, fue electo miembro pleno de la Académie y su producción científica se potenció cuando dos años después se incorporó Lagrange. Si bien ambos científicos rivalizaban, se complementaron activamente para la resolución de problemas matemáticos.

El 15 de mayo de 1788, La place se casó con Marie-Charlotte de Courty de Romanges, una joven de 19 años, con quien tuvo dos hijos. Al año siguiente estalló la Revolución Francesa que influiría negativamente en las actividades de la evolución de la Académie, al punto que fue disuelta el 8 de agosto de 1793. Poco antes, La place y su familia abandonaron París y se ubicaron en una finca distante a unos 50 kilómetros. Ese año, La place fue convocado, junto con Lagrange, con el astrónomo Joseph Jerôme Lefrançois de Lalande y otros científicos para solucionar los problemas que surgían de considerar el inicio del *calendrier révolutionnaire* el 1º de enero de 1789.[277] Si bien este calendario no se ajustaba a los datos astronómicos, Laplace evitó refutar su utilidad sobre la base de datos científicos y, con algunas modificaciones, el calendario fue utilizado hasta 1806.

Disuelta la Académie, el 22 de agosto de 1795 en su reemplazo fue creado el Institut National des Sciences et des Arts y Laplace fue llamado a integrarlo. Dos meses antes, se había creado el Bureau des Longitudes destinado a mejorar la navegación, a estandarizar las unidades y las mediciones de distintas magnitudes y del tiempo. En esa institución, que funcionó como academia, Laplace fue uno de los diez miembros originales y allí trabajó en la utilización del sistema decimal para la medición de ángulos. Ese año, comenzó a funcionar la *École Normal de l'an III* destinada a la capacitación de docentes. En ella, Laplace dictó varios cursos de matemática y un curso sobre Probabili-

[277] El 23 de septiembre de 1792, al proclamarse la República, la Convención estableció que el año 2 de la República comenzaría el 1º de enero de 1793 Pero esto fue revocado mediante la introducción de un nuevo calendario que estableció el 23 de septiembre de 1793 como el inicio del año II.

dad. Sobre la base de ese curso, Laplace escribió su *Essai philosophique sur les probabilités*, que fue publicado en 1814.

1796 fue el año en que Laplace publicó *Exposition du système du monde*, donde expuso su *hipótesis nebular* sobre la formación del sistema solar. Tres años más tarde comenzaría a darle forma matemática a las ideas expresadas en la *Exposition*, al publicar el primero de los cinco volúmenes de su *Traité de Mécanique Céleste* los que se completarían en 1827.

A pesar de la inestabilidad política imperante en Francia a partir de la Revolución de 1789, Laplace supo mantenerse en puestos importantes, Al producirse la llamada *Revolución del* 18 *de brumario*[278], fue nombrado Ministro de Interior, cargo en que fue reemplazado a menos de un mes[279] para integrar el Senado. En julio de 1803 fue vicepresidente del Senado y en septiembre de ese año fue nombrado Canciller.

Durante el régimen imperial, 1804 – 1814, Laplace fue un modelo perfecto de todas las cualidades indispensables de un buen cortesano. Se decía de él que en las mañanas visitaba todas las antecámaras y en las noches todos los salones. Su esposa fue Dama de honor de la Princesa Élisa Bonaparte, hermana del Emperador. En 1805, Napoleón le otorgó la Legión de Honor y en 1806 el título de Conde del Imperio.

En 1812 publicó su *Théorie Analitique des Probabilités*, y en 1814 el *Ensayo filosófico sobre la probabilidad*. En 1816 fue elegido miembro de la Academia Francesa. A pesar de su pasado bonapartista, al restaurarse la monarquía de los Borbones fue lo bastante hábil como para conseguir ser nombrado marqués en 1817

La place falleció en Paris el 5 de marzo de 1827.

Más allá de sus vaivenes ideológicos, La place realizó una extensa obra tanto en el campo de la Astronomía, como de la Matemática en general y la teoría de las probabilidades en particular, ameritando el apodo de "el Newton francés". Sus concepciones fueron fuertemente deterministas. Al respecto escribió:

Tous les effets de la nature ne sont que résultats mathématiques d'un petit nombre de lois immuables.[280]

Estaba tan convencido del determinismo dado por leyes inmutables que escribió:

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était suffisamment vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus

[278] 9 de noviembre de 1799.

[279] Por Lucien Bonaparte.

[280] "Todos los efectos de la Naturaleza no son más que resultados matemáticos de un pequeño número de leyes inmutables." Œuvres de Laplace, Tome Septieme. Imprimerie Royale. Paris. (1847). Introduction p. CLIV.

grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.[281]

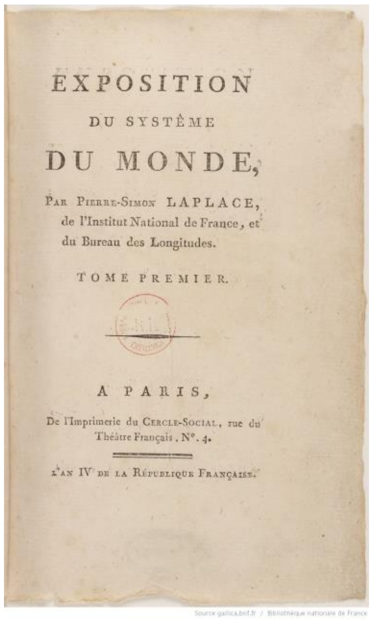


Figura 7.17. Exposition du système du monde.

Este enunciado, que afirma que un intelecto que conociese las posiciones y las ecuaciones de movimiento de todos los cuerpos del Universo, podría informar dónde estuvo cualquier cuerpo en el pasado y dónde estará en el futuro, se conoce históricamente como el "*demonio de Laplace*". El desarrollo de la Mecánica Cuántica puso en evidencia la imposibilidad de establecer simultáneamente y con exactitud las posiciones y cantidades de movimiento de tres o más cuerpos que interactúan.

En su *Exposition du système du monde*, publicado en 1796, desarrolló una teoría sobre la formación del Sol y del sistema solar a partir de una nebulosa o remolino de polvo y gas. Esta teoría se conoce como *hipótesis nebular*, la cual fue propuesta inicialmente por Emanuel Swedenborg[282] y ampliada por Immanuel Kant[283] en 1755. Según esta teoría las estrellas y planetas se han formado a partir de nubes gaseosas, las *nebulosas*, que han ido girando lentamente, atrayéndose gravitacionalmente y aplanándose hasta colapsar y formar esos cuerpos celestes. Sobre la base de los descubrimientos de nebulosas publicados por William Herschel[284] en 1786, Laplace se planteó la hipótesis de que el origen de la formación del Sol y de los materiales que orbitan a su alrededor podía haber sido el colapso gravitatorio de una nebulosa que al condensarse habría dado origen al sistema solar. Analizando múltiples destalles Laplace pudo explicar de manera natural el hecho de que todos los planetas orbitan alrededor del Sol en el mismo sentido (de Oeste a Este) y que todas las órbitas planetarias están, prácticamente, en un mismo plano. Posteriormente, Herschel aceptó la hipótesis laplaciana y la generalizó para explicar la formación y evolución de todas las estrellas y sistemas estelares.

La *Exposition* está formada por cinco libros: el primero trata del movimiento aparente de los cuerpos celestes, el movimiento de los mares y también sobre la refracción atmosférica. El segundo, trata sobre el movimiento real de los cuerpos celestes. El tercero trata sobre fuerzas y cantidades de movimiento en el sistema solar. El cuarto se ocupa de la teoría de la gravitación universal incluyendo un detalle sobre el movimiento de los mares y el contorno de la Tierra. El quinto, da un desarrollo histórico de la Astronomía e incluye su famosa hipótesis nebular.

---

[281] "Un intelecto que, en un momento dado, conociera todas las fuerzas que animan a la Naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen y que fuera lo suficientemente vasta para poder someter todos los datos al análisis, abarcaría en la misma fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del Universo y los del átomo más pequeño; nada sería incierto para él y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos" *Essai philosophique sur les probabilités*, Sixième Edition, Bachelier, Paris. (1840), p. 4.

[282] Swedenborg, E. , (1734)*: Opera Philosophica et Mineralia*¸3 Vols., Dresden y Leipzig.

[283] Kant, I., (1755): *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, Johann Friedrich Petersen, Königsberg und Leipzig.

[284] Herschel, W. "Catalogue of One Thousand New Nebulæ and Clusters of Stars", *Philos. Trans. R. Soc*. **76,** 457–499 (1786).

Esta obra fue escrita por Laplace como una introducción no matemática a su obra más importante: *Traité de Mécanique Céleste*.

El *Traité de Mécanique Céleste* es una descripción enciclopédica de toda la Astronomía conocida a fines del siglo XVIII enfocada de modo totalmente analítico. En esta obra Laplace expuso algunos perfeccionamientos del modelo newtoniano que él había desarrollado en la década de 1780 y que le permitieron resolver algunos de los problemas astronómicos que surgieron durante el siglo XVIII. Entre esos problemas se encontraban la aceleración de Júpiter y la desaceleración de Saturno. Si estos movimientos continuaban indefinidamente, Saturno terminaría cayendo sobre el Sol y Júpiter se iría alejando del sistema solar. Partiendo de las posiciones de Júpiter y Saturno respecto del Sol, Laplace demostró que los movimientos de cada planeta obedecían a variaciones periódicas en las que su aceleración cambia de signo siendo cada período del orden de un milenio. Él ya había demostrado que las variaciones periódicas en las que la aceleración de la Luna cambia de signo se debían a las posiciones relativas del sistema Sol – Tierra – Luna. Sobre la base de sus cálculos, postuló que el sistema solar es un sistema autorregulado. Los tratamientos matemáticos de la obra están influenciados por la obra de Joseph Louis Lagrange y Adrien-Marie Legendre, — incluso su famosa ecuación, en derivadas parciales de segundo orden, de tipo elíptico y la solución mediante polinomios y funciones asociadas, fue desarrollada por Legendre.

La *Mécanique Céleste* está dividida en dos partes. La primera lleva por título *Théorie générale des mouvements et de la figure des corps célestes* y se desarrolla en dos libros. El primero, *Des loix générales de l'équilibre et du mouvement*, trata sobre "los principios generales del equilibrio y del movimiento de los cuerpos y la resolución de los problemas de Mecánica, donde la solución es indispensable para la teoría del Sistema del mundo". Su primer capítulo se ocupa del equilibrio y de la composición de las fuerzas que actúan sobre un punto material. El capítulo siguiente trata sobre el movimiento de un punto material. El Capítulo III analiza el equilibrio en un sistema de cuerpos. El siguiente analiza el equilibrio en sistemas fluidos. En el Capítulo V establece los principios generales que rigen los movimientos de un sistema de cuerpos. En el Capítulo VI, aplica las leyes del movimiento de un sistema de cuerpos mediante todas las relaciones matemáticas posibles entre fuerza y velocidad. En el Capítulo VII, establece las ecuaciones diferenciales para el movimiento de un cuerpo sólido de cualquier forma. El capítulo siguiente incluye el tratamiento matemático para el movimiento de los fluidos.

El segundo libro lleva por título *De la loi de la pesanteur universelle, et du mouvement des centres de gravité des corps célestes*. Su primer capítulo está dedicado a la ley de la gravitación universal obtenida de la observación de los fenómenos. En el Capítulo II expone las ecuaciones diferenciales que cuantifican el movimiento de un sistema de cuerpos sometidos a atracción mutua. En el capítulo siguiente hace una descripción de la teoría del movimiento elíptico de los cuerpos celestes. En el Capítulo IV hace una descripción del tratamiento matemático del movimiento elíptico. En el siguiente expone los métodos generales para determinar. por aproximaciones sucesivas, los movimientos de los cuerpos celestes. En el Capítulo VI, explica la teoría de las perturbaciones como un método aproximado adicional para determinar los movimientos de los cuerpos celestes. En el siguiente, detalla las variaciones seculares de los movimientos celestes. En el Capítulo VIII suministra otro método de aproximación a los movimientos planetarios.

La segunda parte se desarrolla en tres libros. El primero de esta parte es el Libro III, que lleva por título *De la figure des corps celestes*. Su primer capítulo trata de las atracciones entre los esferoides homogéneos. En el Capítulo siguiente aplica el desarrollo en series para determinar las atracciones de esferoides cualesquiera. En el Capítulo III analiza la figura de una masa fluida dotada de un movimiento de rotación. Luego trata de establecer el modelo matemático de un esferoide recubierto de una capa fluida en equilibrio cuya figura difiere muy poco de la de una esfera. En el Capítulo V pone a prueba ese modelo matemático con las observaciones empíricas. El Capítulo VI está dedicado al análisis de la figura de los anillos de Saturno. El capítulo siguiente establece la manera de predecir la figura de la atmósfera de un cuerpo celeste.

El libro IV se titula *Des oscillations de la mer et de l'atmosphère.* En el primer capítulo desarrolla una teoría sobre el flujo y reflujo del mar. El capítulo siguiente se ocupa de la estabilidad del equilibrio de los mares. El tercer capítulo analiza los factores que influyen sobre las mareas y en el capítulo IV compara las predicciones de su teoría sobre el flujo y reflujo con los resultados experimentales. El capítulo V está dedicado a las oscilaciones de la atmósfera y sus causas.

El libro V, lleva por título: *Des mouvemens des corps célestes autour de leurs propres centres de gravite*. En particular, el primer capítulo está dedicado al movimiento de la Tierra alrededor de su centro de gravedad. El segundo capítulo trata el movimiento de la Luna alrededor de su centro de gravedad. El tercero se ocupa del movimiento giratorio de los anillos de Saturno.

Laplace dedicó la tercera parte de su Mecanique céleste[285] a las "*Théories particulières des mouvemens celestes*". Comprende los libros VI y VII. El Libro VI, cuyo título es *Théorie des mouvemens planétaires*, consta de 18 capítulos. El primero se ocupa de las fórmulas que permiten calcular las variaciones del movimiento orbital en función de la excentricidad y la inclinación respecto de la eclíptica. En el segundo desarrolló las ecuaciones que permiten establecer las variaciones dependientes del cuadrado de la fuerza perturbadora. El Capítulo III está dedicado a las perturbaciones planetarias debidas a que la rotación del Sol sobre su eje, el que no muestra una figura exactamente esférica sino una suerte de elipsoide de revolución. El Capítulo IV, trata las perturbaciones que provocan los satélites en el movimiento de los planetas. Luego considera las trayectorias elípticas de las órbitas de los planetas. En el capítulo VI calcula las masas de los planetas tomando a la del Sol como unidad, los movimientos siderales medios de los planetas por año juliano, las distancias medias de los planetas al Sol tomando a la distancia media de la Tierra al Sol como unidad, las excentricidades de cada uno de ellos a las distancias medias del Sol, las longitudes de los perihelios y las inclinaciones de las órbitas respecto a la eclíptica. El capítulo siguiente contiene los cálculos de los valores numéricos de las variaciones seculares de los elementos de las órbitas planetarias. El capítulo VIII está dedicado al desarrollo de las variables del movimiento del planeta Mercurio, el noveno al de Venus, el décimo al de la Tierra, el undécimo al de Marte, el duodécimo al de Júpiter, los dos capítulos siguientes antes están dedicados al desarrollo de las variables dinámica de Saturno y Urano, el capítulo XV a las interacciones de los planetas y la posibilidad de verificarlas cuantitativamente, siguiente al cálculo de las masas de los planetas y de la Luna. El capítulo XVII está dedi-

[285] En las ediciones posteriores, La place agregó un suplemento presentado en el Bureau des Longitudes, en 1808, en el que trata de perfeccionar su teoría sobre las perturbaciones planetarias.

cado a la formación de las Tablas astronómicas y el capítulo XVIII a la influencia de las estrellas sobre el sistema solar.

El Libro VII está dedicado a la “teoría de la Luna” y las dificultades que le son propias resultantes de las múltiples variaciones que experimenta el movimiento del satélite. En el primer capítulo se desarrolla la integración de las ecuaciones diferenciales del movimiento lunar. El Capítulo II, contiene el tratamiento matemático de las variaciones en el movimiento lunar debido a la falta de esfericidad de este satélite y de la Tierra. El capítulo siguiente trata sobre las variaciones en el movimiento lunar debido a su interacción con otros planetas. En el Capítulo IV se comparan los resultados de las ecuaciones matemáticas dadas en los tres anteriores con los valores empíricos. El Capítulo V está dedicado a las variaciones en el movimiento lunar durante lapsos temporales extensos. En el capítulo siguiente, Laplace analiza la hipótesis de que las variaciones seculares de los movimientos de la Luna y la Tierra, podrían ser producidas por la resistencia de un “fluido etéreo” que rodea extensamente al Sol.

El Libro VIII se encuentra en el cuarto tomo de la *Mecanique céleste* y está dedicado por completo al comportamiento de las lunas de Júpiter, Saturno y Urano. A la época en que Laplace lo escribió, se conocían sólo 4 lunas de Júpiter, hoy son unas 400. Por lo que los tratamientos matemáticos están sujetos a multitud de errores. Algo similar ocurre con las lunas de Saturno, hoy 62 y las de Urano, hoy 27.

El libro IX está dedicado al estudio del comportamiento de los cometas, las dificultades en establecer las ecuaciones de sus movimientos y la influencia gravitacional de su paso por las proximidades de un planeta.

El libro X, lleva por título *Sur differens points relatifs au systeme du monde* y abarca temas tan diversos como la refracción atmosférica, la reflexión de la luz, la caída libre de los cuerpos, el uso del barómetro, la influencia de los cometas sobre la Tierra, las lunas de Júpiter, las masas de los planetas y sus satélites y las Tablas astronómicas.

El libro XI se encuentra en el quinto tomo de la *Mecanique Céleste* y lleva por título *De la figure et de la rotation de la terre*. El libro comienza con una descripción histórica de los diversos intentos para establecer la geometría de nuestro planeta. El capítulo segundo se titula *De la figure de la Terre* y plantea las ecuaciones correspondientes al esferoide terrestre sobre la base de las variaciones de la aceleración de la gravedad a lo largo de un meridiano. El capítulo III está dedicado al eje de rotación de la Tierra y en el siguiente, hace una curiosa demostración matemática del acortamiento del día en función del enfriamiento de la Tierra.

El Libro XII. Se titula *De l'attraction et de la répulsion des sphères, et des lois de l'équilibre et du mouvement des fluides élastiques*. Comienza analizando las opiniones de Newton sobre la interacción gravitatoria entre cuerpos esféricos y las de Gay Lussac y Dalton sobre el comportamiento de los gases. En el Capítulo II, plantea las ecuaciones sobe la atracción de los cuerpos y la repulsión entre las partículas de los gases que permiten mantenerlos en equilibrio. El capítulo siguiente está dedicado a las propiedades del sonido y al movimiento de los gases.

El Libro XIII lleva por título *Des oscillations des fluides qui recouvrent les planètes* y se inicia con una reseña de las teorías de Kepler, Galileo y Newton de la influencia de la Luna y el Sol sobre las mareas. Luego analiza su teoría de las mareas y su principio según el cual, el estado de un sistema de cuerpos en el que las condiciones primitivas de movimiento desaparecen por las resistencias que sufre, tiene oscilaciones periódicas proporcionales a las fuerzas que lo animan. En los capítulos III, IV y V, compara el análisis anterior con las observaciones de las alturas de las mareas en las que el período de oscilación es, aproximadamente, medio día; con los intervalos de las mareas y cuando el período de oscilación es de casi un día. En el Capítulo VI establece que el flujo parcial de las mareas es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia de la Luna a la Tierra. El capítulo siguiente está dedicado al flujo y reflujo de la atmósfera.

El Libro XIV lleva por título *Des mouvemens des corps celestes autour de leur centre de gravité*. Se inicia con los antecedentes históricos de la determinación de la precesión de los equinoccios. El Capítulo II está dedicado a los antecedentes históricos y al cálculo de la libración lunar. El capítulo siguiente trata de los anillos de Saturno.

El título del Libro XV es *Du mouvement des planètes et des comètes* y comienza con los antecedentes históricos sobre el tema. El capítulo siguiente está dedicado a las variaciones de los movimientos elípticos de los cuerpos celestes.

En el Libro XVI trata el movimiento de los satélites. El primer capítulo está dedicado al movimiento de la Luna, Luego explica la teoría lunar de Newton. En el capítulo III analiza las variaciones en el movimiento lunar al cabo de plazos muy largos debido a que la Tierra no es, estrictamente, esférica. El capítulo siguiente está dedicado a la aplicación de la ley de atracción universal para la interacción de la Tierra y la Luna. En el capítulo V analiza los movimientos de los satélites de Júpiter. A continuación analiza cómo influyen las grandes variaciones en el movimiento de Júpiter en el movimiento de sus satélites.

La otra gran obra de Laplace es la *Théorie analytique des probabilités*. Este tratado fue preparado para un curso universitario de 1812, sobre la base de los cursos dictados en 1795 en la École Normale donde fue Profesor conjuntamente con Lagrange y que, a partir de la tercera edición, incluyó su trabajo *Essai philosophique sur les Probabilités*, y tres suplementos relacionados con la aplicación del Cálculo de probabilidades a las ciencias naturales y a las operaciones geodésicas. Luego de una introducción donde da la noción de probabilidad, los principios generales del cálculo de probabilidades, de la esperanza matemática, de los métodos analíticos del cálculo de probabilidades y de sus aplicaciones, el Libro I está dedicado al cálculo de las funciones generatrices y de la teoría de las aproximaciones mediante fórmulas que son funciones de números muy grandes. En el segundo libro Laplace hace un desarrollo matemático de su “Teoría general de las probabilidades”. Incluye la probabilidad de ocurrencia de eventos simples y compuestos, las leyes probabilísticas que resultan de la multiplicación de eventos, la probabilidad de los errores de los resultados medios de un número muy grande de observaciones, de la evaluación de los resultados medios. También trata de la aplicación del Cálculo de Probabilidades en la investigación de fenómenos y de sus causas, de la probabilidad de ocurrencia de eventos futuros a partir de los eventos observados. Uno de sus capítulos está dedicado a la duración media de la vida, del matrimonio y de cualquier sociedad. Analiza también los beneficios que pueden resultar de la probabilidad de eventos futuro y las probabilidades de las muestras.

Uno de los grandes logros de la *Théorie analytique des probabilités* fue el desarrollo del método de los cuadrados mínimos, de fundamental importancia para la teoría de los errores.

Los méritos de Laplace le fueron reconocidos en vida. Además de ser uno de los 40 miembros de la l'Académie française, de la Académie des Sciences y miembro del Bureau des Longitudes de Francia; fue miembro fundador de la Société d'Arcueil, de la Royal Society of London, de la Royal Society of Edinburgh de las Academias de Göttingen, de Rusia, de Dinamarca, de Suecia, de Prusia, de los Países Bajos, de Italia. Fue Par de Francia y Grand Officier de la Légion de Honneur.

Bibliografía

Andoyer, H., (**1922**): *Le œuvre scientifique de Laplace*, Payot & Cie., Paris.

Angliviel de la Beaumelle, E., (**1856**): *Vie de Maupertuis*, Ledoyen Libraire, Paris.

Benvenuto E., *La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico* (prima edizione Sansoni 1981), Edizioni di Storia e Letteratura, Roma 2006,ISBN 88-8498-282-0.

Cohen, R. S., Renn, J., Gavroglu, K., (Eds);(**2007**): *Hans Christian Ørsted and the romantic legacy in science*, Springer, Dodrecht ISBN 978-1-4020-2979-0 (HB).

Delambre, J.B. « Biographical Account of M. le Comte Lagrange ». *Annals of Philosophy*, May 1814, pp. 321 – 329.

Huber, F.. (**1958**): *Daniel Bernoulli* (1700 – 1782) *als Physiologe und Statistiker*, Swabe, Stuttgard.

Timoshenko, S., (**1956**); *History of Strength of Materials*, D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey.

http://www.EulerArchive.org

VIII. ACCIÓN DE LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO SOBRE LA MATERIA

8 – 1. - Introducción.

Las propiedades magnéticas de la magnetita y las del ámbar se conocen desde la Antigüedad y han sido citadas por los filósofos y los historiadores más antiguos.

Aristóteles, en el Libro 12 Capítulo 2 de su libro *De Anima*, dice que Tales de Mileto (c.624 a.C. – 546 a.C.), había hablado sobre los imanes como una piedra que atrae al hierro. Otros dicen que Onomácrito (C. 530 a.C – c.480 a.C) llamó a esa piedra Μαγνῆτης afirmando que era en lo que se había convertido Orfeo. Platón en Io, Teofrasto de Lesbos, Gaius Plinius Secundus (Plinio el Viejo), y otros eruditos antiguos mencionaron algunas de las propiedades de los imanes naturales conocidos o las escribieron por haberlas escuchado de algún tercero. Así, por ejemplo, Plinio el Viejo, escribió que la *antipathia* del diamante hacia la magnetita es tan grande que, cuando se le acerca, no le permtirá atraer al hierro y si ya lo ha atraído, capturará al hierro y lo llevará lejos del imán.[1]

Plinio también escribió que Sotacus describió cinco clases diferentes de imanes; el de Ethiopía, en de Magnesia en Macedonia, el de Hyettus en Boecia, el de Alejandría en Troas y un quinto de Macedonia en Asia. Estas se diferencian "por el sexo, hombre o mujer" y por el color. Los de Magnesia de Macedonia son negro-rojizo, los de Boecia son de color más rojo que negro, el de Troas es negro y de sexo femenino "y, en consecuencia, desprovisto del poder de atraer al hierro". El más inferior de todos es el de Macedonia en Asia que es blanco carece de influencia atractiva sobre el hierro y su apariencia semeja a la piedra pómez. La experiencia ha mostrado que cuánto más se aproxima el imán a un color azul tanto mejor es su calidad.

En la Edad Media, Petrus Peregrinus[2] , — ingeniero militar al servicio de Charles de Anjou, Rey de Sicilia,— escribió en 1269, *Epistola de Magnete*[3], mientras participaba del sitio de Lucerna. Este texto puede considerarse el primer escrito científico sobre el magnetismo porque describe los métodos experimentales para determinar las propiedades físicas de los imanes, la ubicación de los polos, la imantación por contacto, las atracciones y repulsiones magnéticas, entre otras.

---

[1] Plinio, *Historia Natural*, Libro XXXVII, Capítulo V.

[2] Pierre Pelerin de Maricourt (¿ – 1299)

[3] Hay una traducción al inglés hecha por Joseph Charles Mertens (El Hermano Arnold): *The letter of Petrus Peregrinus on the Magnet*, McGraw-Hill Publishing, New York, 1904.

De Magnete está dividida en dos partes. La primera consta de diez capítulos. El primer capítulo de la primera parte se refiere al alcance del trabajo. El segundo capítulo, se refiere a lo qué debe saber un investigador sobre este tema. El tercer capítulo trata el reconocimiento de la magnetita. El cuarto capítulo versa sobre la ciencia de encontrar las partes actuantes en el mineral. El quinto capítulo se ocupa de describir el hallazgo de los polos del imán, cuál de las partes identifica al Norte y cuál al Sur. El sexto capítulo explica cómo un imán atrae a otro imán. El séptimo capítulo trata cómo el hierro atraído por un imán gira hacia los polos de la Tierra . El capítulo ocho de cómo un imán atrae hierro. El noveno capítulo describe cómo la parte norte atrae a la parte sur y viceversa. El décimo capítulo se ocupa de la investigación de donde un imán recibe la "virtud esencial" que posee, de atraer al hierro.

En esta primera parte, este autor escribió que usó un imán de forma esférica y le acercó un aguja de hierro que podía girar libremente pivoteada sobre un soporte. Cuando la aguja se detenía, marcaba el punto de la superficie del imán hacia donde apuntaba la aguja. Luego iba cambiando la posición del soporte y marcando los puntos sobre la superficie del imán hacia donde apuntaba la aguja en cuanto se estabilizaba. Uniendo los puntos marcados, encontró que cuando formaban un círculo máximo, esa curva era análoga a un meridiano terrestre. Haciendo diversos experimentos de este tipo, encontró varias circunferencias que se intersectaban en dos puntos de la esfera magnética. Debido a esta analogía, Peregrinus denominó *Polos* a los puntos de intersección. También hizo varios experimentos para determinar la orientación de esos polos respecto del campo magnético terrestre lo que le permitió establecer empíricamente, lo que llamó *Polo norte* y *Polo Sur* de un imán. A partir de este hallazgo pudo establecer empíricamente las principales propiedades de los imanes.

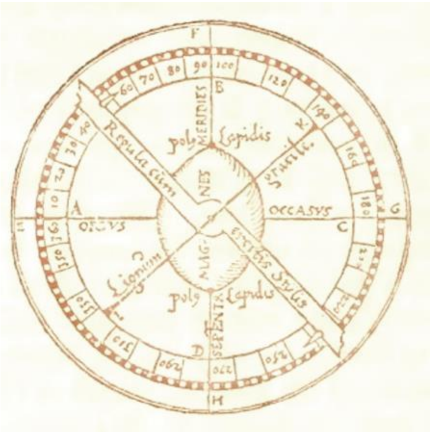


Fig. 8.1. Astrolabio de P. Peregrinus.

En la segunda parte, el primer capítulo trata sobre la construcción de un astrolabio sencillo que permitiría conoce el Azimut del Sol, el de la Luna y el de cualquier estrella en el horizonte. El segundo capítulo describe la construcción de otro instrumento mejor para el mismo propósito. El tercer capítulo desarrolla la teoría de la construcción de un *mobile perpetuum artificæ* una rueda dentada de hierro, ligeramente inclinada, que por la interacción con un imán podría producir un movimiento perpetuo.

Girolamo Fracastorio (1478 - 1553), en su libro *De Sympathia et Antipathia*[4] explicó que el imán y el hierro se juntan porque sus las partes semi-incorpóreas de ambas forman una nube donde se atraen. En cambio Thomas Hobbes (1588 – 1679) rechazó la idea de una atracción semi-incorpórea, sosteniendo que se producía el contacto físico debido a que cada uno potenciaba la fuerza del otro provocando el movimiento de sus moléculas.

[4] Hieronymi FracastoriiVeronensis, *Opera Omnia Quorum Nomina* (*De Sympathia et Antipathia*) Verona, 1555 p. 83.

Ya en el siglo XVI, William Gilbert estudió esas propiedades con un criterio eminentemente científico y publicó su libro *De Magnette*, que sirvió de base para los desarrollos posteriores que culminarían con una teoría electromagnética de la luz.

Fig.8.2. William Gilberd (1540 – 1603)

8 – 2.- William Gilbert y el magnetismo.

William Gilbert (o Gilberd, como él solía escribir), nació el 24 de mayo de 1540[5] en Colchester, condado de Essex, Inglaterra. Fue el mayor de los cinco hijos de Hierome y Elizabeth Gilberd. Su padre fue un funcionario judicial del condado de Essex, considerado "un consejero de gran estima en su profesión". No hay información confiable respecto a sus primeros años, pero se sabe que pasó por la Escuela de Gramática de su pueblo natal y, en mayo de 1558, ingresó al St. John's College de Cambridge (de donde, algunos dicen que fue a Oxford), obteniendo su Bachelor of Arts en 1560. En 1561 se graduó como Master of Arts. Durante 1565 - 1566, ejerció como *mathematical examiner* y obtuvo el título de médico en 1569. Ese año fue electo Senior Fellow del St. John's College.

Después de egresar de la universidad, viajó por el Continente europeo, donde probablemente obtuvo el título de Doctor en Física, ya que no hay registros de que lo haya obtenido en Oxford o en Cambridge, donde había estudiado. Se dice que "practicó como médico con gran éxito y aplauso". En 1573, fue elegido miembro del *Royal College of Physicians*, y ocupó muchos cargos importantes en esa institución, fue Censor en tres períodos no consecutivos (1581 – 1582, 1584 – 1587 y I589 – I590), Tesorero (1587 – 1591, I597 – I599) Consiliarius[6] (1597 – 1599) y Presidente (1600). Su habilidad atrajo la atención de la reina Isabel, por lo que ella lo nombró su *Physician in ordinary*[7]. La estima por su persona y por su calidad profesional hicieron que la Reina estableciese un legado para que, a su muerte, Gilbert cobrase una pensión anual que le permitiesen continuar sus investigaciones científicas. En 1603, James I, sucesor de Isabel I, también lo nombró *Pysician in ordinary*, pero Gilbert falleció el 30 de noviembre de ese año.

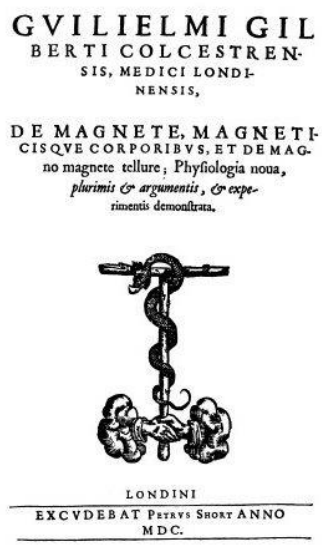
En el año 1600, publicó su obra más famosa, conocida como *De Magnete* cuyo título es *De Magnete, magneticisque Corporibus, & de magna magnete Tellure, Physiologia nova*[8]. La edición fue bastante escasa pero le imprimió en distintos países europeos, particularmente en Alemania, con

[5]Muchos autores escribieron que nació en 1544. Pero en la lápida de su tumba esta grabado que su nombre era William Gilberd y que falleció el 30 de noviembre de 1603 a los 63 años. En la tumba de su padre también figura con el apellido Gilberd. (*Biographia Britannica*, Vol. IV, London, 1757, p. 2202.

[6] Consejero, asesor del Presidente.

[7] Médico personal estable.

[8] Sobre el imán (o la magnetita), los cuerpos magnéticos y ese gran imán que es la Tierra.


GVILIELMI GIL
BERTI COLCESTREN-
SIS, MEDICI LONDI-
NENSIS,

DE MAGNETE, MAGNETI-
CISQVE CORPORIBVS, ET DE MAG-
no magnete tellure; Physiologia noua,
plurimis & argumentis, & expe-
rimentis demonstrata.

LONDINI
EXCVDEBAT PETRVS SHORT ANNO
MDC.

Fig. 8.3. *De Magnete.*

un prefacio del Dr. Wolfgang Lochman, del cual se hicieron 17 ediciones en latín entre 1628 y 1635. El libro recién fue traducido al inglés en 1892, por Paul Fleury Mottelay.

La obra está dividida en seis libros, cada uno de ellos subdividido en capítulos. El libro primero se ocupa de la historia del estudio de los imanes naturales. El segundo, discute los cinco movimientos magnéticos, especialmente el fenómeno de la atracción magnética entre polos opuestos. En el capítulo segundo de ese libro analiza la similitud de la acción del ámbar y el magnetismo. En el tercer libro se ocupa de la dirección del movimiento magnético incluyendo el concepto moderno de polaridad; en el cuarto libro introduce la teoría de las variaciones del compás y su aplicación a la navegación; en el quinto libro analiza la inclinación magnética y su medición, en el sexto continua los experimentos de Petrus Peregrinus de Maharncuria[9] sobre imanes esféricos llamados *terrellas* porque se comportan como modelos del magnetismo de la Tierra.

Gilberd fue el primero en emplear los términos *fuerza eléctrica* y *atracción eléctrica*. Él les dio el nombre de polos a las extremidades de las agujas magnéticas apuntando hacia los polos de la Tierra, llamando *polo sur* al extremo que apunta hacia el polo Norte terrestre y *polo norte* al que está orientado hacia el Polo Sur.

En su obra consideró que el fenómeno de la electricidad tiene un considerable parecido al del magnetismo, si bien indicó las diferencias que existen entre las dos clases de fenómenos.

Entre los muchos artilugios ingeniosos a los que se alude con frecuencia en su libro, Gilbert menciona el *versorio*, una aguja de hierro que se mueve libremente alrededor de un punto, con el que pudo medir la excitación eléctrica. Además, es el inventor de "los dos instrumentos más ingeniosos y necesarios para que los hombres del mar descubran así la latitud de cualquier lugar sobre el mar o la tierra, en la noche más oscura, sin la ayuda del Sol, la Luna o las estrellas". Estos instrumentos se describen en la obra en cuarto de Thomas Blunderville titulada "*The Theory of the seven Planets, shewing their diverse motions*" impreso en Londres 1602".

De Magnete fue muy elogiada por Francis Bacon, Barón de Verulam, Galileo Galilei y Alexander von Humboldt, entre otros distinguidos científicos. Poggendorf, en su "*Geschichte der Physik*" (page 288) llamó a Gilbert "El Galileo del Magnetismo."

[9] Pierre Pèlerin de Maricourt, quien descubrió que si una aguja imantada se deja libremente en distintas posiciones sobre un imán natural esférico, se orienta a lo largo de líneas que, rodeando el imán, pasan por puntos situados en extremos opuestos a la esfera. Estos puntos fueron llamados polos del imán. También observó que los polos iguales de dos imanes se repelen entre sí y los polos distintos se atraen mutuamente. En 1269 publicó *Epistola ad Sigerum de Foucaucourt militem de magnete* considerado el primer tratado científico sobre magnetismo.

Además de *De Magnete*, en 1651,apareció en Amsterdam, un volumen en cuarto de 316 páginas titulado *De Mundo Nostro Sublunari Philosophia Nova*, que fue editado, algunos dicen por su hermano William Gilbert Junior — según otros, por el erudito inglés John Gruter a partir de dos manuscritos encontrados en la biblioteca de Sir William Boswell, Knight. Según John Davy[10], "este trabajo de Gilbert, que es tan poco conocido, es muy notable, tanto en estilo como en materia, y hay un vigor y una energía de expresión que le son muy adecuados para su originalidad, de un conocimiento más minucioso y práctico de la filosofía natural que Bacon, su oposición a la filosofía de las escuelas fue más intensa y particular, y al mismo tiempo, probablemente, un poco menos eficiente. " En opinión del Prof. John Robinson, *De Mundo* consiste en un intento de establecer un nuevo sistema de filosofía natural sobre las ruinas de la doctrina aristotélica".

8 – 3.- Charles-Augustin de Coulomb.


Figura 8.4. Charles A. de Coulomb

Charles Augustín de Coulomb, nació en Angoulême, Francia, el 23 de agosto de 1736. Sus padres fueron Henry Coulomb y Catherine Bajet. Coulomb creció en el sudoeste de Francia hasta que su familia se mudó a Paris, donde asistió al Collège Mazarin y donde se interesó particularmente en literatura y filosofía.

En febrero de 1760, entró en la École du Génie en Mézieres, donde estudió ingeniería, graduándose en 1761 como ingeniero militar con el grado de primer teniente. Fue destinado a las Indias Occidentales, donde cumplió diversas tareas, entre ellas, distintas aplicaciones de la Mecánica a las construcciones. En el año 1772, sus problemas de salud lo obligaron a regresar a París y orientar sus actividades hacia la investigación científica. En 1773, redactó su ensayo « Esai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture, avec 2 planches »[11]. En este trabajo, presentado a la Academia en 1774, usó el método de las variaciones para calcular la resistencia a la flexión de las vigas e incluyó una ley de fricción donde definió esfuerzo cortante y propuso un método para evaluar la resistencia de los materiales.

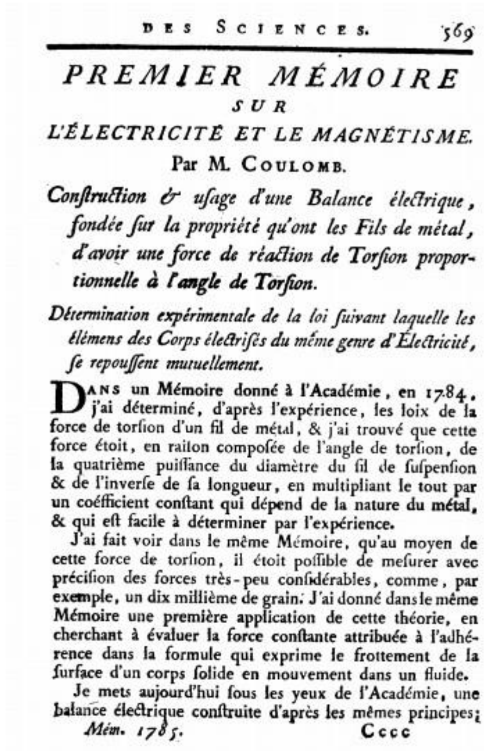
En 1775 presentó su trabajo: « Recherches sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées, de les suspendre, de s'assurer qu'elles sont dans le véritable méridien magnétique, enfin

---

[10] "*Memoirs of the Life of Sir Humphry Davy*," London 1836, Vol. I, page 311

[11] *Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie royale des sciences par savantes étrangères* (Vol. 7, 343-382, **1776**).

de rendre raison de leurs variations diurnes régulières, avec 4 planches »[12]. Por este trabajo, compartió con Jan Hendrik van Swinden el Premio de la Académie Royale des Sciences de 1777.



DES SCIENCES. 569

PREMIER MÉMOIRE
SUR
L'ÉLECTRICITÉ ET LE MAGNÉTISME.
Par M. COULOMB.

Conſtruction & uſage d'une Balance électrique, fondée ſur la propriété qu'ont les Fils de métal, d'avoir une force de réaction de Torſion proportionnelle à l'angle de Torſion.

Détermination expérimentale de la loi ſuivant laquelle les élémens des Corps électriſés du même genre d'Électricité, ſe repouſſent mutuellement.

DANS un Mémoire donné à l'Académie, en 1784, j'ai déterminé, d'après l'expérience, les loix de la force de torſion d'un fil de métal, & j'ai trouvé que cette force étoit, en raiſon composée de l'angle de torſion, de la quatrième puiſſance du diamètre du fil de ſuſpenſion & de l'inverſe de ſa longueur, en multipliant le tout par un coéfficient conſtant qui dépend de la nature du métal, & qui eſt facile à déterminer par l'expérience.

J'ai fait voir dans le même Mémoire, qu'au moyen de cette force de torſion, il étoit poſſible de meſurer avec préciſion des forces très-peu conſidérables, comme, par exemple, un dix millième de grain. J'ai donné dans le même Mémoire une première application de cette théorie, en cherchant à évaluer la force conſtante attribuée à l'adhérence dans la formule qui exprime le frottement de la ſurface d'un corps ſolide en mouvement dans un fluide.

Je mets aujourd'hui ſous les yeux de l'Académie, une balance électrique conſtruite d'après les mêmes principes;

Mém. 1785. Cccc

Fig.8.5. Primera Memoria sobre electricidad y magnetismo.

En 1781, obtuvo el Gran Premio de la Académie Royale des Sciences por su trabajo: « Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leur partie, et à la raideur des cordages, avec 5 planches ».[13]

El 14 de diciembre de ese mismo año, fue elegido miembro Adjunto de la Académie Royale des Sciences en el campo de la Mecánica

Otro de los trabajos importantes de Coulomb fue « Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion, et sur l'élasticité des fils de métal: application de cette théorie à l'emploi des métaux dans les arts et dans différentes expériences de physique - Constructions de différentes balances de torsion, pour mesurer les plus petits degrés de force - Observations sur les lois de l'élasticité et de la cohérence, avec 2 planches »[14]. Para la mayoría de los historiadores este trabajo, presentado por Coulomb en el año 1784, lo acredita como el inventor de la balanza de torsión. Sin embargo, autores modernos le acreditan tal invento al Reverendo John Michell (1724 – 1793). Mitchell habría inventado la balanza de torsión antes de 1784 ya que en una carta de Henry Cavendish a Michell de 1783 menciona que la balanza de torsión puede servir para medir el peso de la Tierra. En su memoria de 1797[15] en la que describe el método para determinar la densidad de la Tierra mediante una balanza de torsión, Cavendish le otorga todo el crédito de los resultados de su trabajo a John Michell.

Destacable es también el trabajo: «Description d'une boussole, dont l'aiguille est suspendue par un fil de soie, avec 2 planches.»[16] Fue presentado en 1785 y publicado en 1788 y sus conclusiones permitieron mejorar notablemente la precisión de las brújulas.

La culminación de la carrera científica de Coulomb comenzó en 1785, cuando aplicando su balanza de torsión pudo estimar los valores de las intensidades de fuerzas electromagnéticas. Ese año

---

[12] Mémoires de mathématiques et de physique présentés à l'Académie royale des sciences par savantes étrangères (Vol. 9, 165 – 264, **1777**)

[13] Recueil des savants étrangers de l'Académie royale des sciences (T.10, 161 – 332. **1781**)

[14] Mémoires de l'Académie royale des sciences (vol. 87, 229-269, **1787)**

[15] Cavendish, H. 'Experiments to determine the Density of the Earth', Philosophical Transactions of the Royal Society of London, (part II) **88** p.469-526 (21 June 1798),

[16] *Mémoires de l'Académie royale des sciences* (vol. 88, 560 – 568, **1788**)

presentó su Primera memoria sobre la electricidad y el magnetismo: « Construction et usage d'une balance électrique fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les éléments du même genre d'électricité se repoussent mutuellement, avec 1 planche. »[17] En esta memoria expone su famosa ley.

Sus ideas sobre electromagnetismo fueron continuadas por otras seis memorias:

« Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme, où l'on détermine, suivant quelles lois le fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction, avec 1 planche. »[18]

« Troisième mémoire sur l'électricité et le magnétisme. De la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans le temps donné, soit par le contact de l'air plus ou moins humide, soit le lond des soutiens plus ou moins idio-électriques, avec 1 planche. »[19]

« Quatrième mémoire sur l'électricité ; où l'on démontre deux principales propriétés du fluide électrique: la première, que ce fluide ne se répand dans aucun corps par une affinité chimique ou par une attraction élective, mais qu'il se partage entre différents corps mis en contact uniquement par son action répulsive ; la seconde, que dans les corps conducteurs le fluide parvenu à l'état de stabilité, est répandu sur la surface du corps, et ne pénètre pas dans l'intérieur. »[20]. Presentada en 1786.

« Cinquième mémoire sur l'électricité. De la manière dont le fluide électrique se partage entre deux corps conducteurs mis en contact, et de la distribution de ce fluide sur les différentes parties de la surface de ces corps. »[21]. Presentada en 1787.

« Sixième mémoire sur l'électricité. Suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs corps conducteurs : détermination de la densité électrique dans les différents points de la surface de ces corps, avec 1 planche. »[22]. Presentada en 1788.

« Septième mémoire sur l'électricité et le magnétisme. Du magnétisme. »[23]. Presentada en 1790.

En total Coulomb publicó más de veinticinco trabajos sobre estática, rozamiento, electricidad, magnetismo, telegrafía y construcciones.

En 1801 Coulomb fue nombrado Presidente del Institut de France. En 1802 se casó con Louise Françoise LeProust Desormeaux, la madre de sus dos hijos. Falleció el 23 de agosto de 1806.

---

[17] *Ibid.* (vol. 88, 569 – 577, **1788**)
[18] *Ibid.* (vol. 88, 578 – 611, **1788**)
[19] *Ibid.* (vol. 88, 612 – 638, **1788**)
[20] *Ibid.* (vol. 89, 67 – 77, **1788**)
[21] *Ibid.* (vol. 90, 421 – 467, **1789**)
[22] *Ibid.* (vol. 91, 617-705 **1791**)
[23] *Ibid*, (vol. 92, 455 – 505, **1793**)

Las investigaciones de Coulomb sobre la electricidad y el magnetismo permitieron que esta área de la Física saliera del estrecho marco del conocimiento cualitativo y se convirtiera en una rama empírica y cuantitativa que alcanzaría su formalización teórica en el siglo siguiente con los trabajos de James Clerk Maxwell.

8 – 4.- Luigi Galvani y la "electricidad animal".

Luigi Galvani nació en Bolonia, el 9 de septiembre de 1737. Varios miembros de su familia se habían dedicado a la Teología y a la jurisprudencia. Los primeros años de su juventud se caracterizaron por la práctica austera de la religión por lo que ingresó a la Universidad de Bolonia para estudiar Teología, disciplina que abandonó en 1755 para dedicarse al estudio de la Medicina. Allí tuvo como maestros al eminente químico Jacopo Bartolomeo Beccari (1682 – 1766), considerado el precursor de la microbiología, a Gaetano Tacconi (1689 – 1782) que era el Profesor titular de Cirugía, Antonio Galli (1708 – 1782) en Técnica quirúrgica y particularmente el Profesor Doménico Maria Gusmano Galeazzi (1686 – 1775), quien escribió sobre los cálculos en el uréter y cuya descripción anatómica y fisiológica del intestino se tornaría clásica. Con este docente, Galvani, fue estrechando una amistad que trascendió lo estrictamente académico e incluso se casó con Lucie, una de sus hijas, (1743 – 1790) la que luego colaboró con él en muchos experimentos.

Fig. 8.6. L. Galvani (1737 –1798

Luego de defender con honores su tesis doctoral sobre la naturaleza y la formación de los huesos, comenzó su carrera docente enseñando Anatomía en el Instituto de Ciencias de la Universidad de Bolonia. Particularmente se dedicó al estudio experimental de la Anatomía comparada. Inicialmente, Galvani se dedicó al estudio de la anatomía de las aves y su primer trabajo fue un estudio sobre el tracto urinario de las aves.

Un accidente provocó el inicio de sus famosas conclusiones sobre las propiedades de la corriente eléctrica de provocar contracciones en los nervios y músculos de los seres vivos y aun en los organismos muertos, propiedades que serían popularizadas con el nombre de *galvanismo*. Estaba una tarde en su laboratorio, con su esposa y algunos colegas y sobre la mesa había un generador eléctrico de von Guericke y algunas ranas desolladas destinadas a otros usos[24], que estaban a muy corta distancia del generador. Un ayudante que cooperaba con los experimentos de Galvani, sin darse cuenta, apoyó un bisturí sobre el nervio crural de una de las ranas e, inmediatamente, todos los

[24] Se ha informado que en esa época, Galvani solía preparar caldos de rana para su esposa, en la covicción que ello la ayudaría a mejorar su salud, algo debilitada.

músculos del animal comenzaron a agitarse como si la rana sufriera fuertes convulsiones, mientras que el generador emitía chispas. Lucie Galvani fue la primera en observar el movimiento convulsivo del animal muerto y alertó a su esposo sobre ello, quien de inmediato resolvió investigar ese fenómeno.

Galvani volvió a conectar un bisturí a los nervios crurales de la rana y comprobó que cada vez que se producía una chispa en la máquina eléctrica, se producían contracciones en los músculos de la rana. Pensando que quizás, las contracciones podrían producirse por el mero contacto de la punta metálica con los nervios crurales, más que a la descarga eléctrica, Galvani tocó los mismos nervios en otras ranas, mientras que la máquina eléctrica estaba en reposo, observando que las contracciones no tenían lugar. La repetición del experimento fue seguida siempre por un resultado similar. Observando los detalles de sus experimentos, Galvani pensó que podría existir una electricidad inherente al cuerpo animal que se manifestaba aún en organismos muertos.

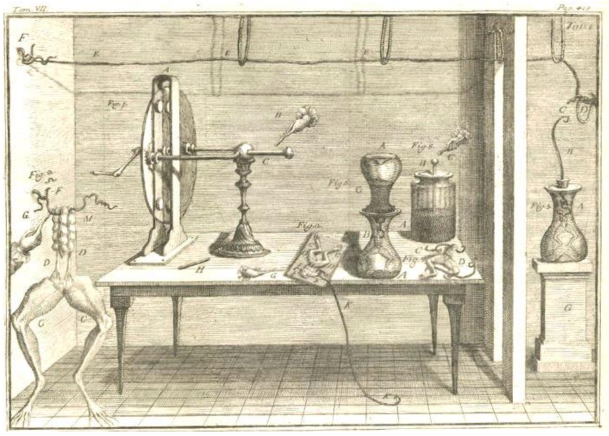


Fig.8.7. Laboratorio de Galvani

Al repetir los ensayos con un escalpelo, encontró que las contracciones no ocurrían, a pesar del contacto con los nervios y la proyección simultánea de la chispa eléctrica. Al investigar la causa, notó que sostenía el escalpelo por el mango, que era de hueso (que era un mal conductor). Para cerciorarse de su sospecha utilizó, alternativamente un cilindro de vidrio pulido, libre de polvo y humedad, y un cilindro de hierro. En el primer caso, Galvani no sólo tocaba sino que frotaba los nervios crurales de la rana al mismo tiempo que la máquina producía las chispas, pero no logró excitar el menor movimiento de los músculos del animal. En cambio al emplear el cilindro de hierro, se produjeron las convulsiones más violentas. Con ello se cercioró de la necesidad de emplear un cuerpo conductor para producir el fenómeno. Ante la duda de si las contracciones se debían sólo al cilindro metálico o al contacto de su mano con dicho cilindro, probó colocar el cilindro en contacto con los nervios y, sin tocarlo, hacer funcionar la máquina eléctrica. Con esta disposición experimental, cuando la máquina funcionaba no se producían contracciones. Mediante otro experimento comprobó que podía reemplazar la mano de la persona conectando un alambre de hierro muy largo a los nervios de la rana, con lo que la capacidad de producir las contracciones aumentaba con la longitud del conductor. Alrededor del generador, colocó varias ranas con alambres conectados a sus nervios y comprobó que el efecto producido por la máquina eléctrica tenía lugar en todas direcciones. También comprobó que las contracciones eran más intensas si ligaba las patas de las ranas a conductores metálicos que tocasen el suelo.

Finalmente comprobó que podía provocar las contracciones conectando, mediante un alambre, los nervios con los músculos de la rana.

A partir de los múltiples experimentos realizados, Galvani llegó a la conclusión de la existencia de una "electricidad animal" e identificó a esa electricidad con la "fuerza vital" que animaba a los músculos de los animales.

Sus resultados experimentales sobre este tema fueron publicados en 1791, bajo el título *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari. Commentarius.*

Alessandro Volta, reprodujo los experimentos más significativos de Galvani y concluyó que si bien los resultados eran correctos, la interpretación dada por Galvani no los justificaba. Lo que lo llevó desarrollar su famosa "pila voltaica".

Con sus experimentos, Luigi Galvani inauguró una nueva rama de la Fisiología animal que abarca el funcionamiento del sistema nervioso de los animales.


Fig. 8.8. A.G.A.A.Volta (1745 – 1827)

Continuó a cargo de la Cátedra de Anatomía de la Universidad de Bologna hasta 1797 y falleció el 4 de diciembre del año siguiente.

8 – 5.- Alessandro Volta y la pila voltaica.

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta nació en Como, la capital de la Provincia de Como, en la Lombardía italiana, el 18 de febrero de 1745. Su madre Maria Maddalena, era hija del Conde Inzaghi, su padre, Filippo, era un hombre adinerado. Fue el sexto de los siete hijos del matrimonio y se cuenta que tuvo tal retraso madurativo que la primera palabra la pronunció a los cuatro años. Recibió la educación primaria en su casa y aunque su madre quería que fuese jurista y sus docentes que fuera clérigo, él se inclinó por el estudio de las ciencias naturales, particularmente, la Física. Desde la adolescencia se interesó por los fenómenos eléctricos por lo que comenzó a mantener correspondencia con los especialistas en estos temas, Entre ellos con el Abate Jean Antoine Nollet. En 1764 compuso un poema en latín en el que describió los más importantes descubrimientos en la Física y en 1767, le escribió a Givan-Battista Beccaria, por entonces Profesor de la Universidad de Torino, planteándole algunas de sus ideas sobre la electricidad, quien no las aprobó. Dos años más tarde Volta le replicó con su primer texto impreso, *De vi attractiva ignis electrici ac phaenomenis inde pendentibus*[25], dedicado a la teoría y el funcionamiento de la "botella de Leyden" que había sido inventada en 1746. Cabe considerar que en este trabajo está el germen de toda la doctrina eléctrica de Alessandro Volta.

En el año 1771, publicó un trabajo en el que describió todos los experimentos que había hecho para poder establecer la naturaleza de la electricidad en cuerpos recubiertos de distintos revesti-

[25] De vi attractiva ignis electrici, ac phaenomenis inde pendentibus Alexandri Voltae ... ad Joannem Baptistam Beccariam ... dissertatio epistolaris, Novo-Comi: Typis Octavii Staurenghi impressoris episcopalis, 1769.

Fig.8.9. Uso del electróforo. Guillemin, A. *El mundo físico*. T. 3, Montaner, Barcelona 1882.

mientos y por establecer la influencia que podía tener la temperatura, la naturaleza de los mismos, así como la descripción de un aparato generador de electricidad.[26]

Si bien se le adjudica a Volta haber inventado del *elettroforo perpetuo* en 1775[27], lo que él hizo fue perfeccionar el dispositivo inventado por el físico sueco Johann Carl Wilcke en 1762. El electróforo perpetuo constaba de un disco de material conductor, llamado *escudo*, colocado de manera concéntrica sobre otro disco de material aislante de diámetro algo mayor. El dispositivo incluye un mango de material aislante colocado en el centro de ambos discos. La electricidad se generaba frotando el disco de material aislante con una piel de gato con lo cual ese disco quedaba con carga negativa. Al poner en contacto el disco conductor, su cara en contacto con el disco inferior quedaba cargada positivamente y la cara opuesta con carga negativa. Apoyando un dedo sobre esta última, se descargaba y, entonces, el disco quedaba cargado positivamente.

En 1777 fue nombrado Regente de la Escuela Real de Como y al año siguiente, Profesor de Física en la Universidad de Pavia.

En 1778 presentó una memoria[28] en la que demostró que la electrificación de los cuerpos ocurre en su superficie y es la misma tanto si el cuerpo está vacío como si está lleno y cualquiera sea su forma siempre que su superficie sea la misma.

Al tiempo que hacía sus investigaciones sobre la electricidad, se ocupó de estudiar las características de un gas que surgía de la ribera pantanosa del lago de Como y que ardía con una llama azulada que no correspondía con la llama de ningún gas a ese entonces conocido y al que llamó *air inflammable natif des marais*[29], nombre que perduró durante más de un siglo para el metano. Analizó su composición y los productos de su combustión cuyos resultados publicó en varias memorias.

[26] Novus ac simplicissimus electricorum tentaminum apparatus, seu, De corporibus eteroelectricis quae fiunt idioelectrica: experimenta, atque observationes Alexandri de Volta …, Novo-Comi: in typographia Caprana, 1771.

[27] Descrito en la carta que le envió a Joseph Priesley fechada el 10 de junio de 1775 en Scelta di opuscoli interessanti raccolti dalle varie lingue, 8 (1775), pp. 127-30. Amoretti, C. ed., Milano, 1775.

[28] "Osservazioni sulla capacità de' conduttori elettrici e sulla commozione che anche un semplice conduttore è atto a dare eguale a quella di una boccia di Leyden del signor don Alessandro Volta in una lettera al signor de Saussure. Como, 20 Agosto 1778", *Opuscoli scelti sulle scienze e sulle arti*, 1 (1778), pp. 273-80. Amoretti, C. ed., Milano, 1778.

[29]Aire inflamable nacido de los pantanos en "Première lettre adressée à M. Priestley, sur l'inflammation de l'air inflammable mêlé à l'air commun dans des vaisseaux fermés …", *Observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts*, 12 (1778), Rozier François, ed. Paris. pp. 365-73. "Seconde lettre adressée à M. Priestley sur l'inflammation de l'air inflammable …", en *Observations…* 13 (1779), pp. 278-306.

También inventó algunas aplicaciones del metano, como un fusil y una pistola eléctrica, así como una lámpara de iluminación.

También hizo experimentos sobre los fenómenos eléctricos en la atmósfera y manera de hacer más eficientes los pararrayos.[30]

Los experimentos que a Galvani lo habían convencido de la existencia de una electricidad animal, fueron de sumo interés para Volta quien, a partir de 1790, no sólo reprodujo esos experimentos, sino que diseñó otros con los que comprobó que el tejido muscular animal no era necesario para producir una descarga eléctrica[31]. Los trabajos de Volta sobre este tema, iniciaron una controversia con Galvani que se extendió a la comunidad física de la época durante la década de 1790. El desarrollo de la *pila de Volta* puso fin a la misma.

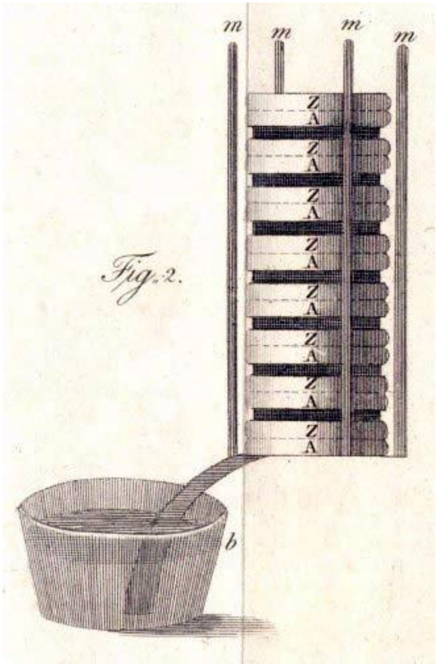


Fig.8.10. Pila de Volta, A: Ag; Z: Zn.

En el año 1800, Volta le envió una carta al Secretario de la Royal Society, Sir Joseph Banks cuyo título es *On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds*[32], en la que describió la estructura y funcionamiento de su famosa pila. Curiosamente, la memoria está redactada en francés, aunque se nota que Volta no manejaba muy bien ese idioma. En ella expuso los detalles de su pila tanto constructivos, como el diseño de experimentos para comprobar los efectos fisiológicos de la misma, comparándola con las descargas de la anguila temblorosa (*Electrophorus electricus*) y

[30] Lettere del sig. don Alessandro Volta, patrizio comasco membro di diverse accademie e p. p. di fisica sperimentale nella r. i. Università di Pavia, [al Lichtenberg] sulla meteorologia elettrica. Lettera prima [28 luglio, 27 agosto 1787]", *Biblioteca fisica d'Europa*, 1 (gennaio-febbraio) (1788), pp. 73-137. "Continuazione delle lettere [al Lichtenberg] del sig. don Alessandro Volta sulla meteorologia elettrica. Lettera seconda [28 luglio 1787]", *Biblioteca fisica d'Europa*, 2 (marzo-aprile) (1788), pp. 103-42. "Continuazione delle lettere [al Lichtenberg] del sig. don Alessandro Volta sulla meteorologia elettrica. Lettera terza [5 agosto 1787]", *Biblioteca fisica d'Europa*, 3 (maggiogiugno) (1788), pp. 79-122.

[31] [Sopra l'elettricità animale] del signor don Alessandro Volta de' 3 aprile al dottor Baronio altro de medici assistenti all'Ospedale Maggiore di Milano", *Giornale fisico-medico*, 2 (1792), "Memoria prima sull'elettricità animale del signor don Alessandro Volta, membro della Società Reale di Londra e di molte altre Accademie, prof. di fisica particolare e sperimentale nella r. i. Università di Pavia [Pavia, 5 maggio 1792]", *Giornale fisico-medico*, 2 (1792), pp. 146-87. "Memoria seconda sull'elettricità animale del signor don Alessandro Volta [14 maggio 1792]", *Giornale fisico-medico*, 2 (1792), pp. 241-70. "Sull'elettricità animale ed alcune nuove proprietà del fluido elettrico, del sig. cav. Volta", *Giornale fisico-medico*, 2 (1792), pp. 287-90. "Continuazione della seconda memoria del signor don Alessandro Volta sopra l'elettricità animale", *Giornale fisico-medico*, 3 (1792), pp. 35-73. "Nuove osservazioni sull'elettricità animale comunicate dal sig. cav. d. Alessandro Volta", *Giornale fisico-medico*, 4 (1792), pp. 192-6.

[32] Philosophical transactions of the Royal Society, 2 (1800), pp. 403-31.

con las rayas de la familia de las *torpedinidiæ* vulgarmente llamadas *rayas torpedo eléctricas* que, al igual que las anguilas temblorosas, puede producir descargas eléctricas de hasta 220 V y 1A. Por eso, Volta llamó a su pila *órgano eléctrico artificial*. Lo esencial de la pila de Volta fue el contacto de pares de discos metálicos uno de cobre (o de plata) y el otro de estaño (o de cinc), conectados a otro del mismo tipo, mediante un disco de cuero embebido en solución acuosa de sal (o de lejía alcalina). Unos 20 de esos pares formaban una “columna”. La columna estaba sostenida por varillas de un material no conductor. En la memoria enviada a la Royal Society, Volta detallaba que al contactar el primer disco con el cuarto o el quinto ya se percibía la descarga y que esa descarga era más intensa a medida que se conectaba el primer par con el sexto, el séptimo, etc., hasta alcanzar la intensidad máxima contactando el primer par con el último.

Para demostrar el carácter direccional de la corriente eléctrica, Volta armó lo que él llamó *appareil a couronne de tasses* que constaba de un conjunto de veinte pequeñas tazas conteniendo solución salina intercomunicadas entre sí por dos conductores uno de plata y el otro de cinc soldados y colocados el extremo de plata colocado en una taza y el cinc en otra, todos ellos orientados de la misma manera. Cuando colocaba el último conductor en la primera taza de un dispositivo similar pero que tenía los conductores en sentido contrario y sumergía el dedo en la primer taza de la primera corona e iba tocando con la otra mano las tazas de la segunda corona, la intensidad de la corriente comenzaba a disminuir y se volvía decreciente a medida que las tazas de la segunda corona se iban distanciando de las correspondientes a la primer corona. En cambio si repetía el experimento con tres coronas en la que los metales estaban ordenados en la misma dirección la intensidad de la corriente aumentaba con el número de orden de las tasas y se hacía máxima cuando con un dedo tocaba la primera y con un dedo de la otra mano tocaba la última de la cadena.

Su memoria sobre la pila concitó el interés de los científicos de la época. En Francia, fue invitado por Napoleón para exponer las características de su invento ante el Institut de France. El mismo Napoleón participó de las reuniones en las que disertó Volta y cuando la Académie des Sciences avaló el trabajo, el Emperador le otorgó la medalla al mérito científico, el título nobiliario de Conde y lo nombró Senador del reino de Lombardía.

Impresionado por las múltiples aplicaciones de la pila de Volta, en 1815, Franz I, Emperador de Austria lo nombró Director de la Facultad de Filosofía de la Universidad de Padua. En 1817 Volta se retiró a su casa en Camnago, cerca de Como, donde falleció en 1827.

Fig.8.11. G.S. Ohm (1787 – 1854)

8 – 6.- Georg-Simon Ohm y la corriente eléctrica.

Georg-Simon Ohm nació en Erlangen, el 16 de marzo de 1787; su familia vivió en esta ciudad durante un siglo, y el oficio que se transmitía de padre a hijos era la cerrajería. Georg-Simon y su hermano Martin, estaban destinados a seguir el mismo oficio; pero su padre, Wolfgang Ohm, era un hombre muy afecto al estudio y quiso que sus hijos pudieran recibir un cierto grado de instrucción: después de terminar sus estudios primarios, los hizo asistir al liceo de Erlangen. Sin dejar de prepararlos para la práctica de su oficio, él mismo les impartió nociones de Álgebra, Geometría y Física. Los jóvenes, tenían las mejores disposiciones para el aprendizaje y pronto hicieron rápidos progresos y, de pronto, una circunstancia accidental vino a cambiar sus carreras. En 1797, el sabio matemático Karl Christian von Langsdorff, (1757 – 1834), que era Profesor de Matemática en la Universidad de Erlangen evaluó, por casualidad, la extraordinaria capacidad que mostraban los dos aprendices de cerrajeros y afirmó que veía renacer en ellos a los hermanos Bernoulli y, en este sentido, libró una especie de certificado que decidió al padre a renunciar al oficio que quería que ellos aprendiesen, para permitirles que se dedicaran a la carrera de la enseñanza.

Fig. 8.12. *Die galvanische Kette*

Esto fue, seguramente, una determinación feliz para la ciencia pero, sin embargo, las decepciones y frustraciones que tuvo Georg-Simon Ohm a lo largo de su vida, permiten suponer que más de una vez habría añorado la tranquila existencia que podía haber tenido en el modesto taller de su padre.

Georg-Simon estudió en el liceo de Erlangen entre los once y los quince años y, a la edad de dieciséis años, fue admitido en la Universidad de Erlangen donde von Langsdorf lo formó en Matemáticas. Allí estudió durante tres semestres, para luego ir a trabajar como docente en la Institución Gottstadt, en el cantón de Berna; Al partir, Langsdorf le recomendó que continúe los estudios matemáticos por sí mismo y que lea los trabajos de Euler, Laplace y Lacroix. Después de permanecer en esta posición durante dos años, se fue a Neuchâtel, donde, durante dos años y medio, dio clases particulares de Matemáticas; regresó a Erlangen en 1811, para defender su tesis doctoral e ingresó a la Academia como profesor; pero sólo ocupó este cargo transitoriamente. Enviado poco después de la escuela real de Bamberg, pronto se encontró sin trabajo, como consecuencia de la disolución de esta escuela; No fue hasta 1817 que logró obtener un puesto fijo y adecuado. Durante los trece años transcurrido desde 1804 a 1817, él vivió en un estado de miseria, como uno puede juzgar por unas palabras del prefacio del libro *Grundlinien zu einer zweckmäßigen Behandlung der Geometrie als höheren Bildungsmittels an vorbereitenden Lehranstalten / entworfen*[33]. Allí menciona "*el hielo que cubría mi estufa sin fuego*".

Por último, en 1817, fue nombrado profesor de matemáticas en el Colegio de los jesuitas en Colonia. Aquí, por primera vez, él encontró ocio que le permitió estudiar de una manera continua, y tener a su disposición muchos instrumentos de la física, mediante los cuales podía someter sus ideas al control de la experiencia. Gracias a la destreza manual que había adquirido en el trabajo de su juventud, pronto se convirtió en un experto en el manejo y en la transformación de estos dispositivos; por lo que pudo comprobar empíricamente las ideas que había concebido y lograr descubrir relacio-

[33] Líneas básicas para un tratamiento adecuado de la geometría con recursos educativos superiores para instituciones educativas preparatorias (1817) Palm & Enke, Erlangen, 1224 pgs.

nes previamente desconocidas vinculadas con los fenómenos galvánicos. En 1820 obtuvo una licencia, con goce de la mitad de su sueldo, que le permitió ir a Berlín, para ocuparse de la publicación de su obra, y finalmente, en 1827, él publicó su libro titulado: *Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet*[34].

Este trabajo, que después le valiera una reputación bien merecida, no fue para él más que una nueva fuente de desgracias, los científicos que estaban a la cabeza de la educación no le prestaron la menor atención y cuando, algún tiempo después, el autor tuvo la oportunidad de informar al Ministerio acerca de su libro, tuvo una recepción tan desdeñosa que incluso aconsejaba cancelar su trabajo en Colonia. Ohm pasó así varios años llevando una vida precaria y privado de todos los medios necesarios para continuar su investigación.

En 1833 el gobierno bávaro lo nombró Profesor de la Escuela Politécnica de Nuremberg; donde dictó Física, a la vez que cumplía tareas administrativas.

El reconocimiento internacional vino en 1841 cuando la Royal Society of London le otorgó la medalla Copley. Después de la Presidencia, esta medalla es la máxima distinción que otorga la Royal Society. A partir de este momento, las leyes de Ohm comenzaron a aparecer en todos los tratados de Física y en todos los centros científicos comenzaron a considerar al autor como uno de los principales científicos de Alemania. En 1842, la Royal Society lo nombró Miembro Extranjero y en 1845 fue electo Miembro de la Academia de Ciencias de Baviera.

En 1849, dejó la Escuela Politécnica de Nuremberg y fue llamado a Munich, como curador de las colecciones de Física; Este cambio lo obligó durante algún tiempo a dejar la investigación sobre fenómenos eléctricos, pero lo llevó a publicar una obra muy notable sobre los *fenómenos de interferencia en los cristales de un eje*.

Finalmente, en 1852, gracias a un cambio en la dirección de educación superior, Ohm obtuvo la Cátedra de Física experimental en la Universidad de Munich; Consideró necesario componer un Tratado sobre Física que fuese apropiado para la enseñanza pero su salud comenzó a deteriorarse. Murió el 7 de julio de 1854 de una apoplejía.

Su famosa ley que vincula la diferencia de potencial con la intensidad de corriente cuando la circulación de corriente eléctrica ocurre en régimen estacionario, no es otra cosa que la aplicación de la ley de Fourier para la transmisión de calor en régimen estacionario a ese caso particular. En efecto, la Ley de Fourier establece que, en régimen estacionario, el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperaturas. En símbolos matemáticos modernos

$$\frac{1}{dA}\frac{\eth Q}{d\tau} = -\lambda \nabla T$$

[34] El circuito galvánico, tratamiento matemático. (1827) Rieman, Berlin, 245 pgs.

donde el primer término representa la cantidad de calor que circula por unidad de superficie y por unidad de tiempo, λ es el coeficiente de conductibilidad térmica y ∇T es el gradiente de temperaturas. Si la circulación ocurre en una única dirección, digamos *x*, la expresión anterior toma la forma

$$\frac{1}{dA}\frac{\eth Q}{d\tau} = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

Para el caso de la circulación de corriente eléctrica en régimen estacionario y en una cierta dirección *x*, llamando *q* a la carga eléctrica que circula a través de una superficie *dA*, la ley de Fourier toma la forma

$$\frac{1}{dA}\frac{dq}{d\tau} = \kappa \frac{dV}{dx}$$

Donde *dV* es la diferencia de potencial y κ el coeficiente de conductibilidad eléctrica. $dq/d\tau$ es la intensidad de corriente. Si la corriente circula a través de un conductor de sección uniforme ΔA y a lo largo de una cierta longitud Δx de ese conductor la diferencia de potencial ΔV es constante, la expresión anterior toma la forma

$$\frac{1}{\Delta A} i = \kappa \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

Expresión que reordenada toma la forma

$$\Delta V = \frac{1}{\kappa}\frac{\Delta x}{\Delta A} i$$

$1/\kappa$ recibe el nombre de *resistividad* del conductor y se representa mediante la letra griega ρ. Por lo tanto

$$\Delta V = \rho \frac{\Delta x}{\Delta A} i$$

Siendo Δx y ΔA constantes y para un conductor dado a una temperatura dada ρ = constante; el coeficiente de *i* es constante y constituye la *resistencia eléctrica* del conductor (*R*). En consecuencia.

$$\Delta V = Ri$$

8 – 7.- Humphry Davy

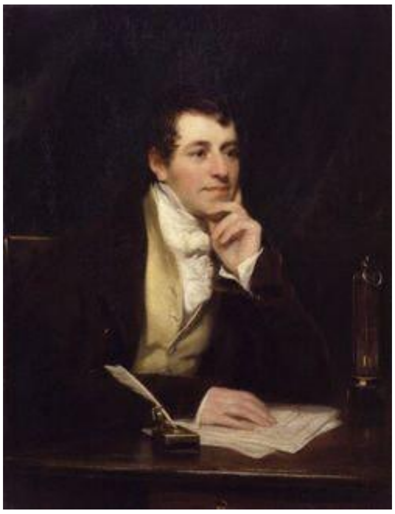


Fig. 8.13. Humphry Davy

Humphry Davy nació en Penzance en Cornwall, el 17 de diciembre de 1778. Su padre, Robert Davy, fue un artesano de la madera y su madre, Grace Millett, descendía de una familia tradicional de la zona. Cuando Grace quedó huérfana de ambos padres fue adoptada por John Tonkin, un eminente cirujano de Penzance. Humphry, fue el mayor de cinco hermanos y siendo niño, la familia se mudó a Varfell donde él pasaba parte del tiempo con sus padres y parte con Tonkin quien lo inscribió en una preparatoria dirigida por un clérigo de apellido Bushell. Bushell quedó impresionado por la capacidad y el talento de Davy y convenció a Robert Davy para que enviase a su hijo a una escuela dirigida por el Reverendo J. C. Coryton. En esa escuela, Davy mostró su precocidad intelectual y su capacidad para leer rápidamente, y comprender libros sobre distintos temas a la vez que componer baladas y escribir poemas. En esa época, se familiarizó con el experimento de Galvani y el funcionamiento de la "botella de Leiden". En 1793, viajó a Truro donde completó su formación bajo la dirección del Reverendo Dr. Cornelius Cardew. Al año siguiente falleció su padre y John Tonkin consiguió que comenzara a trabajar como aprendiz en la farmacia de John Bingham Borlase, farmacéutico y médico que con el tiempo llegó a ser uno de los profesionales más prestigiosos de Penzance. En la farmacia de Borlase, Davy se interesó por la Química y comenzó a utilizar una bohardilla de la casa de Tonkin para sus experimentos. Los amigos decían que era "incorregible" y que, algún día, iba a volar por el aire debido a sus ensayos explosivos.

Trabajando en la farmacia, Davy conoció a Davies Giddy, quien luego cambiaría el apellido Giddy por el de su esposa, Gilbert. Davies, quien desde 1791 era miembro de la Royal Society, quedó impresionado por la inteligencia y la capacidad de Davy y le ofreció la posibilidad de usar su biblioteca. Para esa época, Gregory Watt, el hijo del mejorador de la máquina de vapor visitó Penzance por razones de salud y se alojó en la casa de Davy donde trabó amistad con Humphry, ofreciendo darle clases de Química. También en esa época visitó Penzance Thomas Wedgewood, cuya familia poseía una de las fábricas de porcelana más importantes de Inglaterra, con los que Davy trabó amistad. Davies le presentó al Dr. Edwards, quien le permitió a Davy usar su laboratorio de Química. Trabajando con Edwards, Davy se interesó por la corrosión de las esclusas del puerto de Hayle, que se deterioraban rápidamente por el contacto del cobre con el hierro en el agua de mar. En esa época, este tipo de fenómeno galvánico no tenía una explicación científica, pero de alguna manera influyó para que, posteriormente, Davy hiciera experimentos para cubrir con cobre a las superficies de los barcos expuestas al agua.

En 1797, Davy se interesó en los trabajos de Lavoisier y repitió algunos de sus experimentos a la vez que desarrolló otros de su propia inventiva. Como resultado escribió *Young man's Researches on Heat and Light.*

En 1798, el Dr. Thomas Beddoes (1760 – 1808), quien fuera profesor de Química en Oxford, y el geólogo John Hailstone (1759 – 1847), visitaron Cornwall para examinar la conformación geológica de su costa ya que sostenían hipótesis diferentes acerca de la formación de las rocas. Allí se encontraron con Davies Gilbert quien les presentó a Humphry Davy. En esa época, Beddoes estaba a cargo de la organización de la Pneumatic Medical Institution, un centro de estudios situado en Bristol que se dedicaría a investigar los tratamientos más adecuados para las enfermedades causadas por la inhalación de diferentes gases. Beddoes necesitaba un asistente para hacerse cargo del laboratorio de la institución y Gilbert le recomendó a Davy a la vez que Gregory Watt le entregó el manuscrito de *Young man's Researches on Heat and Light*, que luego sería publicado por Beddoes en el primer volumen de su obra *West-Country Contributions*.

El 2 de octubre de 1798, Davy comenzó a trabajar en la Pneumatic Institution donde se dedicó a analizar la composición de los óxidos de nitrógeno. Razonando acerca del fenómeno de la respiración se fue convenciendo de los errores de la teoría de Lavoisier. El 22 de febrero de 1799, en una carta a Davies Gilbert escribió "Ahora estoy tan convencido de la inexistencia del calórico como de la inexistencia de la luz". El 10 de abril de ese año, en otra carta a Davies le expresó: "Ayer descubrí cuan necesario es repetir los experimentos. El óxido de azote gaseoso (N_2O, gas hilarante) es perfectamente respirable cuando es puro. Nunca es nocivo salvo cuando contiene gas nitroso (NO). En uno de sus experimentos aspiró dieciséis cuartos (1 cuarto = ¼ de galón = 0,946 dm^3) y no se intoxicó en absoluto. Ese año publicó "*Researches, Chemical and Philosophical, chiefly concerning Nitrous Oxide and its Respiration*." Años más tarde, Davy se lamentaría de haber publicado esas hipótesis inmaduras a las que consideraría como "los sueños de un genio mal empleado al que la luz del experimento y la observación nunca lo condujeron a la verdad"[35]. Sin embargo, el libro describía tantos experimentos novedosos que tuvo una buena acogida entre los científicos de la época.

En 1799, el Conde Rumford propuso crear en Londres una "institución para difundir el conocimiento", la "Royal Institution of Great Britain". George Finch, el 8º Conde de Winchilsea fue su primer Presidente, el Conde Rumford su primer Secretario y el Dr. Thomas Garnett (1766 – 1802) su primer "Lecturer". En 1801, El Dr. Garnett enfermó gravemente y tuvo que renunciar. Rumford propuso, y logró, que la Royal Institution nombrase a Davy "Assistant Lecturer in Chemistry" y director del laboratorio químico.

8 – 7.1.- Los experimentos electroquímicos de Davy.

Ya en el año 1800 Davy le había informado a Gilbert que, mientras analizaba los efectos de los óxidos de nitrógeno, en sus ratos de ocio había repetido varios experimentos galvánicos con éxito. Davy fue un pionero en el campo de la electrólisis al usar una pila de Volta para descomponer compuestos comunes y obtener así nuevos elementos.

El 20 de noviembre de 1806, leyó ante la Royal Society su trabajo "*On some chemical Agencies of Electricity*,"[36] considerado el mejor trabajo de su producción. Ya se había demostrado que cuan-

---

[35] "Davy, Sir Humphry (1778 –1829), natural philosopher," by Robert Hunt, *Dictionary of National Biography*, (1888).

[36] *Phil. Trans.* 1807, 1, pp. 1 – 56.

do dos alambres de platino, unidos a los bornes de una pila de Volta, se sumergen cada uno en un recipiente con agua y ambos recipientes se contactan mediante un trozo de asbesto humedecido, se forma un ácido alrededor del alambre que actúa como electrodo positivo y un álcali alrededor del alambre que actúa como electrodo negativo. Algunos decían que el álcali era soda cáustica otros, que era amoníaco. En cuanto al ácido, algunos decían que era ácido nítrico mientras que otros afirmaban que era clorhídrico e inclusive, ácido oximuriático. Mediante experimentos concluyentes, Davy demostró que, en todos los casos, el ácido y el álcali derivan de la sal contenida en el agua o en el recipiente en que se encuentra la solución. La sal más común que se descompone es el cloruro de sodio, debido a que existe en el agua y en el ágata, basalto, y otros materiales que forman el recipiente. Cuando el mismo recipiente de ágata se usa en sucesivos experimentos, las cantidades de ácido y de álcali formados disminuyen y al final, sus concentraciones no son apreciables. Cuando Davy usaba recipientes de vidrio se liberaba hidróxido de sodio y el vidrio quedaba sensiblemente corroído. Si sumergía los alambres en agua destilada y los recipientes no contenían siquiera trazas de materiales salinos, no se formaba ni ácido ni álcali y sólo se liberaba hidrógeno en el electrodo positivo y oxígeno en el negativo.

Cuando Davy disolvía nitrato de calcio en el recipiente en que sumergía el electrodo positivo y agua destilada en el que colocaba el electrodo negativo y entre ambos recipientes colocaba un tercero conteniendo una solución de ácido sulfúrico, al conectar los tres recipientes mediante tiras de asbesto húmedas se formaba sulfato de calcio en el recipiente intermedio y casi nada de hidróxido de calcio en el recipiente que contenía al electrodo negativo.

Davy continuó con sus trabajos y en noviembre de 1807 dio otra conferencia en la Royal Society titulada "*On some new phenomena of chemical changes produced by electricity, particularly the decomposition of the fixed alkalies, and the exhibition of the new substances which constitute their bases; and on the general nature of alkaline bodies*"[37]. En este trabajo describió una serie de experimentos que lo llevaron a formular conclusiones importantes: que toda sustancia que tiene afinidad química por otra tiene un estado particular de electricidad y que el grado de afinidad entre dos sustancias es proporcional a la intensidad de esos estados opuestos. Cuando una sustancia compuesta resultante de la afinidad de otras dos se pone en contacto con los polos de una batería eléctrica, el polo positivo atrae al constituyente de la sustancia compuesta que tiene un estado de electricidad negativo y repele al otro constituyente. El polo negativo actúa de manera inversa, atrayendo al constituyente positivo y repeliendo al negativo. Cuanto mayor es la potencia de la batería, mayores son las fuerzas de esas atracciones y repulsiones. Por lo tanto, incrementando suficientemente la energía que suministra la batería podría descomponerse cualquier sustancia compuesta. Davy concluyó que el oxígeno, el cloro, el bromo, el yodo, el cianógeno y los ácidos son cuerpos "negativos", debido a que siempre se forman en el entorno del polo positivo, mientras que el hidrógeno, el azote, el carbono, el selenio, los metales, los álcalis, las "tierras" y los óxidos básicos se depositan alrededor del polo negativo y, por lo tanto, son cuerpos "positivos".

De acuerdo con la opinión de Davy, la afinidad química es un mero caso de atracciones ejercidas por cuerpos en diferentes estados de electricidad y fue más allá de sus resultados experimentales

---

[37] *Phil. Trans.* 1808. 1 *et seq*. Reimpreso en "*Alembic Club Reprint*" Nº 6.

al concluir que las atracciones que existen entre los *átomos* de las diferentes sustancias son meramente consecuencia de esos diferentes estados de electricidad.

Davy supuso que la electricidad consiste en dos fluidos distintos que se atraen con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Si las partículas de cada fluido repelen a las otras con una fuerza que varía según esa ley, entonces los átomos de cada sustancia deben estar cubiertos externamente con una capa de alguno de esos fluidos eléctricos y que esa cobertura debería tener mayor o menor extensión según la sustancia considerada. El oxígeno y otras sustancias que favorecen la combustión tendrían sus átomos recubiertos de una capa de electricidad negativa, mientras que el hidrógeno, el carbono y los metales tendrían átomos recubiertos con electricidad positiva. No hizo referencia alguna de cuál es la causa de la adherencia de la electricidad a los átomos ni por qué esa cantidad de electricidad no es proporcional a la cantidad de materia sino a la superficie, pero afirmó que esa adherencia es fuerte.

La teoría de Davy sobre la afinidad eléctrica, si bien era bastante imperfecta, fue adoptada por los químicos de la época y modificada bastante debido a los trabajos de Berzelius.

Provisto de una máquina voltaica suficientemente potente, formada por 250 placas de cinc y de cobre de 24 pulgadas cuadradas de superficie, Davy se abocó a la descomposición de la potasa y de la soda, sustancias que si bien se admitía que son compuestas, todos los intentos para descomponerlas habían fracasado. Su intento fue exitoso. Al polo negativo de una batería potente le conectó un alambre de platino que hacía contacto sobre un terrón de potasa ligeramente húmedo. La potasa reposaba sobre una bandeja de platino conectada al polo positivo de la batería. Al accionar el dispositivo a pleno, la potasa comenzó a fundir en la zona de contacto con el platino, se produjo una efervescencia violenta en la superficie superior y en la inferior se formaron pequeños glóbulos de un brillo metálico intenso que parecía similar al del mercurio. Algunos de esos glóbulos ardían con explosión, produciendo una llama brillante mientras que otros no ardían pero perdían su brillo quedando recubiertos por una capa superficial de color blanco. Davy concluyó que esos glóbulos estaban formados por un metal al que le dio el nombre de *potassium*. A partir de este resultado comprobó que la potasa es un compuesto formado por cinco partes en peso del metal y una parte de oxígeno. De este modo confirmó que la potasa es un óxido metálico, algo que estaba en duda desde la época de Lavoisier. Pocos días después comprobó que la soda es un compuesto de otro metal blanquecino al que bautizó *sodium*, que la cal viva es un compuesto de *calcium* y oxígeno, que la magnesia está formada por *magnesium* y oxígeno, que la barita está formada por *barium* y oxígeno, que la estronciana está compuesta por *strontium* y oxígeno. En resumen, los “álcalis fijos” y las “tierras alcalinas” son óxidos metálicos. Cuando en 1817, el químico sueco Johann Arfvedson (1792 – 1841) descubrió la “lithia”, Davy tuvo éxito en descomponerla mediante una batería, resolviéndola en oxígeno y un metal blanquecino al que bautizó *lithium.* En cambio, no pudo descomponer la glucinia (BeO) descubierta por Louis Nicolas Vauquelin en 1797, ni la yttria (Y_2O_3), descubierta por Johann Gadolin en 1794, ni la zirconia (ZrO_2) descubierta por Martin Heinrich Klaproth en 1789, lo que sí lograría Berzelius en 1824. Tampoco pudo descomponer la alúmina. Estas sustancias no eran lo suficientemente buenas conductoras de la electricidad como para poder ser descompuestas por la batería de Davy, pero ningún químico de la época, que conociera el tema, podía dudar que eran óxidos metálicos. Años más tarde estos óxidos fueron descompuestos mediante la acción conjunta de cloro y potasio, obteniéndose los respectivos metales.

De esta manera, los trabajos de Davy lograron que las bases que antes se distinguían en cuatro clases, álcalis, tierras alcalinas, tierras propiamente dichas y óxidos metálicos, comenzaran a ser consideradas como integrantes de una sola clase ya que eran todos óxidos metálicos.

8 – 8.- El fin de la controversia sobre el cloro.

El cloro fue descubierto en 1774 por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele (1742 – 1786) calentando pirolusita (MnO_2) con ácido clorhídrico.

$$\mathbf{4\ HCl + MnO_2 \rightarrow MnCl_2 + 2\ H_2O + Cl_2}$$

Scheele bautizó al gas formado como "ácido marino deflogisticado" pero no lo consideró un elemento. Claude Louis Berthollet[38] repitió y mejoró los experimentos de Scheele y de ellos concluyó que el ácido clorhídrico se combinaba con el oxígeno del dióxido de manganeso formando un ácido oxigenado, de allí el nombre de *ácido oximuriático* impuesto al cloro. La opinión de Berthollet fue aceptada por los químicos de la época. Joseph – Louis Gay Lussac (1778 – 1850) y Louis Jacques Thenard (1777 – 1857) intentaron vanamente descomponer el ácido oximuriático resolverlo en ácido muriático y oxígeno. Sus conclusiones fueron que "no hay una evidencia directa que pueda inducir probar que el oxígeno es uno de sus constituyentes". De sus experimentos postularon que el ácido clorhídrico contenía agua como constituyente esencial. Para determinar el porcentaje de agua contenido, lo hicieron pasar sobre litargirio caliente, observando que se formaba una sal y agua. En rigor la reacción que ocurría era:

$$\mathbf{PbO + 2\ HCl \rightarrow PbCl_2 + H_2O}$$

Estos resultados experimentales, presentados por Gay Lussac y Thenard a la Academia de Ciencias el 27 de febrero de 1809, motivaron que Davy volviese a investigar las propiedades del cloruro de hidrógeno. Ya en 1808 había observado que al tratar potasio con cloruro de hidrógeno gaseoso se forma cloruro de potasio desprendiéndose una cantidad importante de hidrógeno, alrededor de un tercio del volumen del cloruro de hidrógeno empleado. También demostró que no puede obtenerse cloruro de hidrógeno a partir de cloro a menos que haya presente agua. Esta última conclusión fue corroborada por Gay Lussac y Thenard en 1810. Ese año, Davy fue incorporado como "Fellow" de la Royal Society y en julio de ese año presentó allí un trabajo probando que el llamado "ácido oximuriático" es una sustancia simple a la que bautizó con el nombre de "cloro" y que el ácido muriático es un compuesto formado por cloro e hidrógeno.

La conclusión de Davy implicaba una contradicción con la teoría química vigente de magnitud tan importante como fue la introducida por Lavoisier respecto de la acción del oxígeno en los procesos de combustión y calcinación. Davy refutaba la hipótesis de que el oxígeno es el principio acidificante a la vez que contradecía todas las opiniones vigentes acerca de que los cloruros eran compuestos oxigenados. Los llamados "muriatos" eran combinaciones de cloro con un combustible o un

---

[38] Mémoires de l'Académie Royal 1785, pp. 276 – 295.

metal y tenían un comportamiento análogo a los óxidos. De esta manera daba una interpretación diferente a la reacción estudiada por Gay Lussac y Thenard: "cuando el ácido muriático gaseoso reacciona con el litargirio en caliente, se produce una doble descomposición, el cloro se une al plomo y el hidrógeno del ácido muriático se une al oxígeno del litargirio formando agua, siendo esto la verdadera causa de la formación del agua".

No era fácil que los químicos aceptasen cambio en el paradigma vigente, pero la controversia que originó no fue tan encendida como durante la llamada "Revolución Química". Los químicos franceses no opusieron demasiada resistencia a admitir la nueva teoría que, de alguna manera, disminuía el prestigio de dos de sus representantes más eminentes, Lavoisier y Berthollet. Este último no participó de la controversia. Gay-Lussac y Thenard, en su *Recherches physico-chimiques* publicado en 1811, manifestaron sus razones para preferir la vieja hipótesis. Sin embargo, a menos de un año de esa publicación, ambos aceptaron la opinión de Davy, de que el cloro es una sustancia simple y que el "ácido muriático" es un compuesto de hidrógeno y cloro.

Los que sí se opusieron a la teoría de Davy fueron el Dr. John Murray, Profesor de la Universidad de Edimburgo y Jöns Jacob Berzelius. El Dr. Murray fue un excelente químico que se había especializado en análisis de aguas minerales. Publicó diversas críticas a la teoría de Davy en el *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts* dirigido por William Nicholson. La polémica fue contestada por el hermano de Humphry Davy. John Davy, quien demostró que los compuestos de flúor tenían propiedades químicas similares a los homólogos de cloro y su descubrimiento del fosgeno y del ácido clorocarbónico y sus propiedades inclinaron la balanza de la polémica a su favor.

Berzelius apoyó la vieja teoría del ácido oximuriático en un trabajo que publicó en los *Annals of Philosophy*. El posterior descubrimiento del yodo y la analogía de los compuestos de yodo con los de cloro lograron que los químicos se sintieran satisfechos con la teoría de Davy. Durante algunos años, Berzelius siguió negando que el cloro fuese una sustancia simple pero en 1820 terminó por aceptarlo convirtiéndose en un defensor de la teoría de Davy. Esta se vio ratificada en 1826 cuando el químico, Antoine-Jérôme Balard, (1802 – 1876) encontró sales de bromo en las cenizas de las algas marinas de Montpellier[39]. A partir de esas sales pudo obtener bromo y con ese resultado se ratificó la teoría de Davy.

1812 fue un año muy particular en la vida de Davy. Ese año fue ordenado Caballero del Imperio Británico, se casó con una viuda elegante y rica, Jane Apreece, publicó su primer tomo, y único, de su *Elements of Chemical Philosophy.* Tuvo también varios accidentes que le produjeron daños físicos. Ya en 1801 se había intoxicado con N_2O contaminado con NO que con el agua le formó HNO_2 en los pulmones. En 1812, una proyección de tricloramina salpicó sus ojos lo que le afectó la visión. Ese mismo año, perdió dos dedos y un ojo en dos explosiones que ocurrieron en su laboratorio. A partir de entonces, fue secundado continuamente por Michael Faraday.

[39] El bromo también había sido descubierto el año anterior por el Dr. Carl Jacob Löwig (1803 – 1890) de la Universidad de Heidelberg, por lo que se lo considera también el descubridor de ese elemento.

En 1812, Jean-Baptiste Biot había anunciado que la producción de la luz se debía al paso rápido de la electricidad a través del aire que, al ser fuertemente comprimido, se calentaba, desprendiendo suficiente calor para producir una emisión de luz. Davy quiso comprobar la exactitud de esta opinión. Para ello dispuso un aparato en el que había hecho el vacío sobre mercurio, sobre otros metales en fusión, y sobre diferentes disoluciones; verificando la descarga de una botella de Leyden o de una batería de Volta obtuvo los siguientes resultados: El vacío mercurial perfecto es permeable a la electricidad, y llega a ser luminoso, bien con la chispa ordinaria de la batería, como con la botella de Leyden. Cuando está el dispositivo está muy caliente, aparece la luz en el vapor mercurial con un color verde vivo y de gran intensidad; en cambio, a – 20ºF, la luz es excesivamente débil; durante la ebullición del mercurio la luz adquiere su mayor brillo.

De todos sus experimentos, Davy dedujo las siguientes consecuencias: la luz producida mediante descargas eléctricas depende principalmente de algunas propiedades de la materia ponderable a través de la que cual pasa la electricidad o que ésta arrastra consigo; el espacio en que no se halla cantidad apreciable de esta materia puede también presentar fenómenos luminosos que, probablemente, dependen de que las partículas superficiales de material arrastrado por la descarga eléctrica, alcancen la incandescencia, produciendo los fenómenos luminosos.

En 1813, Davy usó la pila de la Royal Institution, formada por 2000 pares que presentaban una superficie de 128.000 pulgadas cuadradas. Descargó esta enorme pila entre dos puntas de carbón colocadas a muy corta distancia entre sí una luz "cuyo brillo sólo era comparable con la del Sol" y que el calor desarrollado lograba fundir cualquier metal colocado entre las dos puntas de carbón. Como el experimento se había hecho en el vacío, el calor liberado y la luz producida no podían adjudicarse a la combustión del carbón, por lo que concluyó que ambos efectos debían ser el resultado de la reunión de la electricidad positiva y la negativa de la batería.

Aunque no pudo aislarlo, pudo demostrar que el flúor es un elemento. Recién en 1886 Henri Moissan (1852 – 1907) logró aislarlo por electrólisis de fluoruro de potasio en una solución de fluorhídrico. En octubre de 1813, Davy viajó a Francia acompañado por su esposa y Michael Faraday, que era su asistente y su valet. Allí recibió una medalla y 3000 francos con la que Napoleón Bonaparte lo premió por sus trabajos sobre electroquímica. Estando en París, fue nombrado Miembro En abril de 1813 comenzó a estudiar las propiedades y reacciones de los compuestos de flúor. Estando en París, fue nombrado Miembro del Institut de France. Gay-Lussac le pidió que investigue una misteriosa sustancia que en 1811 había aislado el químico francés Bernard Curtois (1777 – 1838). Curtois —que en 1802 había aislado el primer alcaloide del opio: la morfina— al agregar un poco de ácido sulfúrico a las cenizas de las algas marinas observó que se producían vapores de color violáceo. Al sublimar, los vapores producían un sólido de brillo casi metálico. Usando un pequeño laboratorio portátil que llevaba consigo, Davy preparó diversos compuestos de yodo y comprobó que esa sustancia tenía un comportamiento similar al del cloro, por lo que consideró que era una sustancia simple y a la que bautizó con el nombre de *iodine*.

En diciembre de 1813, se trasladaron a Italia. Estando en Florencia Davy, realizó varios experimentos con la ayuda de Faraday. Entre ellos el de quemar un diamante con una lente para determinar que es una sustancia formada exclusivamente por carbono. De Florencia se trasladaron a Roma y en junio de 1814 se encontraron en Milán con Alessandro Volta, luego de lo cual retornaron a Inglaterra. En 1815, se dedicó a desarrollar una lámpara para iluminar los túneles y excavaciones mineras que ofreciera seguridad ya que en los años anteriores se habían producido explosiones debido al gas grisú y al metano, gases abundantes en las minas. A Davy se le ocurrió revestir la lámpara con una malla cilíndrica de hierro que previniera que la llama salga fuera de la lámpara. Si bien la lámpara de seguridad había sido inventada en 1813 por el ingeniero irlandés William Reid Clanny (1770 – 1850), la lámpara de Davy lo hizo acreedor a un premio de 2000₤ y a la medalla Rumford otorgado por la Royal Society. Para la misma época, el ingeniero George Stephenson (1781 – 1848) presentó ante la Royal Society una lámpara basada en el mismo principio, pero que en vez de tener una malla metálica, estaba encerrada en un cilindro de vidrio que tenía pequeños agujeros para la entrada de aire. Davy siempre creyó que Stephenson le había robado la idea, lo cual no era cierto. La lámpara de Davy, y las modificaciones que se hicieron a partir de ella, se usaron en las minas del sur de Gran Bretaña, mientras que la de Stephenson se popularizó en las minas del norte del reino.

Como consecuencia de sus trabajos demostrando que había ácidos que carecían de oxígeno, en 1815 Davy propuso una modificación sustancial a la teoría ácido – base de Lavoisier. Sugirió que los ácidos son sustancias que contienen hidrógeno reemplazable, es decir, hidrógeno que puede ser reemplazado total o parcialmente por metales. Cuando los ácidos reaccionan con metales, liberan su hidrógeno como gas y forman sales. En cambio, las bases son sustancias que cuando reaccionan con ácidos forman sales y agua. Estas definiciones fueron aceptadas, casi sin modificaciones, a lo largo del siglo XIX.

En enero de 1819, Davy fue nombrado “Baronet” un título nobiliario intermedio entre Caballero y Barón, en esa época el honor más alto concedido jamás a un hombre de ciencia en Gran Bretaña[40]. Al año siguiente fue electo Presidente de la Royal Society cargo al cual renunció en 1827 debido a su estado de salud. Viajó a Italia para vivir en un clima más templado que en Inglaterra, pero en 1829, estando en Génova enfermó gravemente y el 29 de mayo falleció.

8 – 9.- Hans Christian Ørsted.

Hans Christian Ørsted nació el 14 de agosto de 1777 en la localidad de Rudkobing, en la isla de Langeland, Dinamarca. Fue hijo de Søren Christian Ørsted, un farmacéutico de la ciudad, y Karen Hermandsen. Con su hermano Anders Sandøe Ørsted (1778 – 1860), compartieron la educación y el gusto por el conocimiento. Siendo niño, Hans comenzó a estudiar Aritmética con un libro antiguo y le trasmitía los conocimientos al hermano. Ambos aprendieron a hablar en alemán con un vecino, latín con un tutor y griego por sus propios medios. Ambos concurrieron a una escuela elemental y, a los doce años, el mayor comenzó a trabajar, ayudando al padre en la farmacia. Allí aprendió a preparar los medicamentos y también a hacer algunos experimentos químicos. Además de su interés por los aspectos culturales y literarios, siempre le atrajeron las ciencias naturales. En 1794, ambos hermanos se trasladaron a Copenhague, donde recibieron una pequeña ayuda económica del go-

[40] En 1892, la Corona Británica le concedería el título de Barón a William Thomson (luego Lord Kelvin of Largs) pero no por su contribución a la Física o a la Termodinámica sino por su contribución al establecimiento de un cable telegráfico que unió London con New York.

bierno, e ingresaron a la Universidad. Allí forjaron una amistad con Adam Oehlenschläger (1779 – 1850) que luego sería reconocido como uno de los grandes poetas románticos de Dinamarca.

Cuando iba que cursar Física, tuvo la oportunidad de elegir entre las clases de Arendt Nicolai Aasheim y las de Ludvig Mantheim. Aasheim, se guiaba por Adam Wilhelm Hauch — un físico reconocido en toda Europa — cuyo libro *The Principles of Natural Philosophy* estaba en todo de acuerdo con la filosofía newtoniana. En cambio Mantheim daba sus clases siguiendo el texto del químico alemán Friedrich Albrecht Carl Gren, que estaba imbuido en la filosofía kantiana que, a diferencia del corpuscularismo newtoniano, interpretaba a la materia sólo como "sustancia" que evolucionaba por fuerzas de atracción o repulsión. Ørsted prefirió cursar con Manheim y comenzó a adherir a la filosofía natural de Kant.

Cuando la Universidad de Copenhague propuso un concurso sobre los límites entre la poesía y la prosa, Hans se presentó y obtuvo la medalla de oro. En 1797, poco después al aprobar sus estudios sobre Farmacia, se presentó a otro concurso referido a un tema médico, sobre el líquido amniótico, y ganó otra medalla. A principios de 1799, publicó un trabajo en la revista pro-kantiana *Philosophik Repertorium* cuyo título se refería a los "fundamentos de la Metafísica de la Naturaleza, parcialmente de acuerdo a un nuevo plan"[41]. Luego reformuló su trabajo y, ese mismo año, con el título "Disertación sobre la estructura de la metafísica de la naturaleza exterior", lo presentó — redactado en latín — como su tesis doctoral[42].


Fig. 8.14. H.C. Ørsted (1777-1851)

En 1800, Ørsted aceptó dirigir una farmacia en Copenhague y dedicó su tiempo libre en la lectura de libros de Química y de Física. Ese mismo año fue inventada la batería voltaica y Ørsted se interesó por sus aplicaciones, comenzando a comprobar experimentalmente las afirmaciones de Volta acerca de la acción de la electricidad galvánica sobre las soluciones de ácidos. Con esos experimentos Ørsted comprobó los efectos opuestos en ambos polos y la producción electrolítica de ácidos y bases que se neutralizaban mutuamente. Ese mismo año, trabajó "ad honorem" como adjunto a la cátedra de Física de la Universidad. Trabajando allí, la cátedra recibió un legado de 500 táleros y con un subsidio de otros 400 táleros del Fondo para usos públicos, le fue encomendado a Ørsted que viaje al exterior, Alemania, Francia y los Países Bajos, para interiorizarse de las últimas novedades en el campo de la Filosofía Natural.

En 1801, viajó a Alemania donde conoció y entrevistó, entre otros, a Friedrich Schelling, filósofo exponente del idealismo y de la tendencia romántica alemana, al lingüista, filósofo y poeta del Romanticismo, Friedrich von Schlegel y a su hermano August Wilhelm Schlegel, a Johann Gottlieb Fichte, continuador de la filosofía crítica de Kant, al Conde Rumford que, con su famosa experien-

[41] Hans Chrisitan Ørsted, "Grundtraekkene af Naturmetaphysikken. Tildees efter en nye Plan.

[42] En 1802, estando en Alemania, publicó una versión revisada, en alemán, Ideen zu einer neuen Architektonic der Naturmetaphysik¸ (D. W. H. Mendel, Berlin, 1802).

cia del taladrado de los cañones, había refutado la concepción del calor de Lavoisier, y a Johann Wilhelm Ritter, el inventor de la pila secundaria que, a diferencia de la pila voltaica no tenía discos de cinc sino sólo de cobre colocados, cada uno, ente dos placas de cartón, — que no era propiamente galvánica pero al conectarla a una pila galvánica colectaba el "galvanismo" y lo retenía cuando la voltaica se desconectaba. Su polaridad era opuesta a la pila de Volta y en la descomposición del agua liberaban oxígeno e hidrógeno en polos opuestos a los de la pila de Volta.[43] Con Ritter, Ørsted mantuvo una amistad e intercambios de información científica hasta la muerte del alemán, en 1810.

En 1802 llegó a Copenhague el filósofo y científico noruego Heinrich Steffens (1773 – 1845), quien dio nueve conferencias en el Elers Kollegium, introduciendo mediante ellas el romanticismo alemán en Dinamarca. Los hermanos Ørsted adhirieron plenamente a las ideas de Steffens. A través de Steffens, profundizaron sus conocimientos del romanticismo alemán del siglo XVIII. Sin descuidar sus gustos por las ciencias naturales, Hans se deleitaba con la poesía de Friedrich Schiller o la lectura de Goethe, mientras que su hermano profundizaba sus conocimientos sobre Kant y Fichte.

En diciembre de 1801, Hans viajó a Paris donde permaneció un año. Allí presenció conferencias de los más famosos exponentes de las ciencias, de Louis Nicolas Vauquelin, de Antoine François de Fourcroy, de Louis Jacques Thenard y de Claude Louis Berthollet sobre Química, de Jacques Charles y de Jean Baptiste Biot sobre física, de Georges Léopold Cuvier sobre Historia natural. También se puso al tanto de la literatura científica más moderna. En Paris tradujo al francés el libro de Ritter: *Neue Beyträge urnähern Kenntnißs des Galvanismus*. En la primavera de 1803 viajó a Bruselas, Leyden, Haarlem y Amsterdam, donde visitó instituciones científicas, para luego regresar a Copenhague.

En 1803, tradujo varios trabajos de Ritter que presentó en el *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts*[44, 45, 46]. Ese año se presentó en el concurso para la cátedra de Física de la Universidad. No fue aceptado ya que si bien le reconocieron su capacidad experimental en la investigación química, no acreditaba suficientes antecedentes en investigaciones sobre Física. Si bien siguió investigando temas de Química, continuó manteniéndose al día con las novedades en la enseñanza de las ciencias, en la "Filosofía de la Naturaleza" y en la Física. Ese año publicó un resumen de los últimos avances en Física[47] y el primer volumen de un libro sobre los materiales para

---

[43] En esa época, el acumulador más poderoso que se conocía era la botella de Leyden de Martinus van Marum (1750 – 1837), pero el de Ritter mostró ser más potente. A pesar de contar con unos pocos discos tenía la curiosa propiedad de que cuando llevaba pocos discos tenía un fuerte efecto químico pero el efecto fisiológico de la descarga era muy débil; en cambio, cuando llevaba muchos discos disminuía su potencia química pero aumentaba el efecto fisiológico.

[44] "Expériences sur un appareil à charger d'électricité par la colonne éléctrique de Volta"; par M. Ritter, à Jena. Présentées à l'Institut National par J. C. Ørsted, docteur à l'Université de Copenhague." *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* **57**: 345–368, 1803a (an XII de la République).

[45] "Expériences avec la pile électrique faites para M. Ritter, à Jéna; communiquées par M. Ørsted." *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* **57**: 401–405, 1803b (an XII de la République).

[46] "Expériences sur le magnétisme, par M. Riter, à Jéna, communiquées par Ørsted, docteur à l'université de Copenhagen." *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* **57**: 406–409, 1803c (an XII de la République).

[47] "Uebersicht der neuesten Fortschritte der Physik", *Europa, Eine Zeitschrift* Vol. I, (2), 1803, pp. 112 – 131.

la Química del siglo XIX[48]. Al año siguiente publicó un trabajo sobre los temas de fisicoquímica que serían centrales en los años siguientes[49] y unas reflexiones sobre la enseñanza de ciencias en Dinamarca[50]. También encontró una cierta "armonía" entre la electricidad y las formas orgánicas al observar la similitud de las figuras que adquieren las partículas de polvo sometidas a la acción de la electricidad con las formas que presentan algunos seres vivientes[51].

A raíz de que Thomas Beddoes fundara en Londres la *Pneumatic Institution*¸ dedicada a investigar la acción de los gases generados en la minas británicas sobre la salud y la posible acción de nuevos gases en la curación de enfermedades[52], Ørsted publicó una crítica, en la Sociedad Real de Medicina, remarcando los errores del método eudiométrico de Cavendish para el análisis cuantitativo de los gases y cómo esos errores podían incidir en la aplicación de gases para el tratamiento de enfermedades[53].

En 1806, publicó una crítica a la interpretación que había hecho Volta de las reacciones químicas que ocurrían en su pila y sobre el termómetro a par termoeléctrico que había desarrollado Urbano Jürgensen[54].

Ørsted había leído el libro *Prolusiones ad chemicam sæculi decimi noni*, que en 1800 había publicado el químico húngaro Jacob Joseph Winterl (1739 – 1809), en el que el autor sostenía una teoría dualista según la cual la materia está formada por elementos que difieren sólo en que sus átomos contienen uno de dos principios: ácido (*Andronia*) o básico (*Thelycke*). Ese químico sostenía que las diferentes proporciones en que esos dos tipos de átomos se encuentran en la materia son

---

[48] *Materialien zu einer Chemie des neunzehnten Jahrhunderts*. Vol. I. Montag und Weiß, 1803, 152 páginas. El volumen II, fue publicado en 1805.

[49] „Ueber vershiedene physikalisch-chemische Gegenstände“. *Neues allgemeines Journal der Chemie*, 3, 1804, 322 – 324.

[50] Indbydelse til pysiske og chemiske Forclæsninger”, Kjøbenhavnske lærde Efterreininger for Aar 1804, No. 39, 619 – 621 ("Invitación a la Alfabetización Física y Química", Reflexiones Educativas de Copenhague para el año 1804)

[51] "Om overenstemmelsen mellem de elektriske Figurer og de organiske Former" *Det skandinaviske Litteraturselskabs Skrifter*, I, (1805), 1 – 22 (Acerca de la consistencia entre las figuras eléctricas y las formas orgánicas. Escritos de la Sociedad de Literatura Escandinava). Chladni había publicado, en 1787, *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* ("Descubrimientos en la Teoría del sonido") donde describió el resultado de pasar el arco de un violín sobre una placa de metal ligeramente recubierta con arena. El arco se frotaba sobre el borde de la placa hasta que alcanzaba la resonancia, entonces la vibración hacía que la arena se moviese concentrándose lo largo de líneas llamadas líneas nodales. Los patrones formados por estas líneas se llaman actualmente "figuras de Chladni". Ørsted reemplazó el arco de violón por una corriente eléctrica obteniendo líneas nodales que semejaban formas orgánicas.

[52] Huphry Davy fue el primero en investigar los efectos de los óxidos de nitrógeno sobre la salud.

[53] "Kritik over den saakaldede Eudiometric, med Hensyn paa Lægekunsten", *Nyt Bibliothek for Physik, Medicin og Oeconomie* **8**, 52 – 59. Leido ante la Kongelige Medicinske Selskab en enero de 1805. (Crítica de la llamada Eudiométrica, con respecto a la práctica médica) Real Sociedad Médica.

[54] "Gegen Volta's chemische Erklärung der Ladungssäule und über Jürgensen's Thermomether", *Neues allgemeines Journal der Chemie*, **6**, 500 – 502. (Contra la explicación química de Volta de la columna de carga y sobre el termómetro de Jürgensen).

la causa de las diferencias de las propiedades de los elementos químicos. Esa teoría le gustó a Ørsted y en 1806 publicó un trabajo sobre sus posibles aplicaciones[55].

A principios del siglo XIX, algunos resultados experimentales, — por ejemplo, los de Humphry Davy — comenzaron a refutar la idea de Lavoisier de que todos los ácidos contienen oxígeno. Ørsted tomó conciencia que ni los ácidos ni las bases estaban bien organizados como grupos de sustancias y encaró la tarea de tratar de organizarlos sobre resultados empíricos y publicó un trabajo sobre el tema[56].

En 1806, volvió a quedar vacante la cátedra de Física de la Universidad de Copenhague. Ørsted se postuló y esta vez fue nombrado. El hecho de tomar esa cátedra no le impidió el desarrollo de múltiples actividades, organización de una colección de material filosófico, tomar a cargo un curso para cadetes militares, dictar conferencias sobre distintos temas. Así las conclusiones de las conferencias que dictó entre 1805 y 1806 sobre la historia de Química, las publicó en 1807[57].

En mayo de 1807, Ørsted envió un ensayo a la sección Física de la *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*[58] describiendo sus experimentos sobre "figuras acústicas"[59] basados sobre los experimentos que Ernst Chladni había publicado en 1802 en su libro, *Die Akustik*. El trabajo enviado por Ørsted demostraba que hay una correlación entre las vibraciones que daban lugar a la formación de las figuras simétricas de Chladni y los tonos musicales.[60] Este ensayo fue uno de los factores más importantes para que, en noviembre de 1808, la *KDVS* lo eligiera como miembro de esa institución.[61] La primera moción que presentó Ørsted como miembro fue la de establecer un premio al mejor ensayo que estableciese la relación entre la electricidad y el magnetismo[62].

En 1809, publicó su *Videnskaben om Naturens almindelige Love* (La ciencia de las leyes generales de la naturaleza) donde se ocupó, principalmente, con el desarrollo de la Mecánica.

En 1812, visitó nuevamente Alemania y Francia. Estuvo algunas semanas en Berlin, donde se contactó con el historiador Barthold Georg Niebuhr, — con quien compartía las concepciones filosóficas sobre la naturaleza. Niebuhr lo convenció para que escriba sobre la relación entre la Química y la naturaleza, por lo que Ørsted redactó y publicó *Ansicht der chemischen Naturgesetze durch*

---

[55] "Versuche veranlaßt durch einige Stellen in Winterl's Schriften", *Journal für die Chemie und Physik*, I, 1806, 276 – 294. (Investigaciones que sugieren algunos escritos de Winterl).

[56] "Die Reihe der Säuren und Basen", *Journal für die Chemie und Physik*, II, 1806, 509 – 547. (La serie de los ácidos y las bases).

[57] "Betragtninger over Chemiens Historie en Forelæsning" *Det skandinaviske Litteraturselskabs Skrifter*, 2, 1 – 54. (Reflexiones sobre la Historia de la Química. Una conferencia), publicada en alemán: "Betrachtungen über die Geschichte der Chemie; eine Vorlesung." *Journal für die Chemie und Physik*, **3**, 194 – 231.

[58] Real Academia Danesa de Ciencias y Letras.

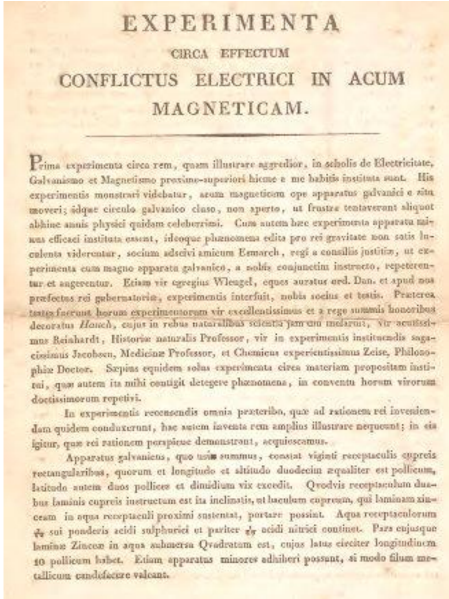
[59] *KDVS*: Mødeprotokol [Minutes] , 480/1807

[60] Este ensayo fue publicado por la *Det Skandinaviske Litteraturselskab* en 1808 y traducido al inglés como suplemento de dos de los capítulos de "*The Natural Philosophy of the Beautiful*" en "*The Soul in Nature*", traducidos al inglés por Leonora y Joanna Horner, Henry G. Bohn, London, 1852, pp. 372 – 424.

[61] *KDVS* 543, 612, 621/ 1808.

[62] *KDVS* 701 y 709, 1809.

die neueren Entdeckungen gewonnen[63] (Visión de las leyes químicas de la naturaleza obtenidas a través de descubrimientos recientes), donde analizó las ideas más modernas de esa época en lo que respecta a la *afinidad* y a la *atracción* químicas y presentó las bases para una Química dinámica basada en la teoría de la materia de Kant. En ese libro adelantó algunas hipótesis de reacciones dinámicas basadas sobre algunos resultados experimentales que sugerían que las transformaciones se debían a los efectos de las fuerzas de atracción y repulsión, tal como sostuvo Kant.


EXPERIMENTA
CIRCA EFFECTUM
CONFLICTUS ELECTRICI IN ACUM
MAGNETICAM.

Prima experimenta circa rem, quam illustrare aggredior, in scholis de Electricitate, Galvanismo et Magnetismo proxime-superiori hieme a me habitis instituta sunt. His experimentis monstrari videbatur, acum magneticam ope apparatus galvanici e situ moveri; idque circulo galvanico cluso, non aperto, ut frustra tentaverunt aliquot abhinc annis physici quidam celeberrimi. Cum autem hæc experimenta apparatu minus efficaci instituta essent, ideoque phænomena edita pro rei gravitate non satis luculenta viderentur, socium adscivi amicum Esmarch, regi a consiliis justitiæ, ut experimenta cum magno apparatu galvanico, a nobis conjunctim instructo, repeterentur et augerentur. Etiam vir egregius Wleugel, eques auratus ord. Dan. et apud nos præfectus rei gubernatoriæ, experimentis interfuit, nobis socius et testis. Præterea testes fuerunt horum experimentorum vir excellentissimus et a rege summis honoribus decoratus *Hauch*, cujus in rebus naturalibus scientia jam diu inclaruit, vir acutissimus Reinhardt, Historiæ naturalis Professor, vir in experimentis instituendis sagacissimus Jacobsen, Medicinæ Professor, et Chemicus experientissimus Zeise, Philosophiæ Doctor. Sæpius equidem solus experimenta circa materiam propositam institui, quæ autem ita mihi contigit detegere phænomena, in conventu horum virorum doctissimorum repetivi.

In experimentis recensendis omnia præteribo, quæ ad rationem rei inveniendam quidem conduxerunt, hac autem inventa rem amplius illustrare nequeunt; in eis igitur, quæ rei rationem perspicue demonstrant, acquiescamus.

Apparatus galvanicus, quo usi summus, constat viginti receptaculis cupreis rectangularibus, quorum et longitudo et altitudo duodecim æqualiter est pollicum, latitudo autem duos pollices et dimidium vix excedit. Quodvis receptaculum duabus laminis cupreis instructum est ita inclinatis, ut baculum cupreum, qui laminam zinceam in aqua receptaculi proximi sustentat, portare possint. Aqua receptaculorum $\frac{1}{60}$ sui ponderis acidi sulphurici et pariter $\frac{1}{60}$ acidi nitrici continet. Pars cujusque laminæ Zinceæ in aqua submersa Quadratum est, cujus latus circiter longitudinem 10 pollicum habet. Etiam apparatus minores adhiberi possunt, si modo filum metallicum candefacere valeant.

Fig. 8.15. *Experimenta...*

El 17 de mayo 1814 se casó con Inger Birgitte Ballum (1789 – 1875), hija de un Pastor del Kjeldby Moen. con quien tuvieron 7 hijos, 3 varones y 4 mujeres.

En 1815, fue nombrado *Ridder af Dannebrog* (Caballero de Dannebrog). Ese mismo año, fue electo Secretario de la *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*. Para esta Sociedad escribió informes anuales sobre los avances en la ciencia y sobre las actividades de la Academia.

En 1817, fue nombrado *Professor Ordinarius* de la Universidad de Copenhague y miembro del cuerpo directivo.

En su *Ansicht der chemischen Naturgesetze* Ørsted esbozó la idea que debe haber alguna conexión entre las diversas formas de las fuerzas imponderables, particularmente la electricidad, el galvanismo y el magnetismo. Pensó que si el galvanismo no es más que una forma oculta de electricidad, entonces podría ser que el magnetismo también fuera una forma oculta de electricidad. El hecho de que un rayo alterase los polos de una aguja magnética lo inducía a pensar que esa relación podía ser posible. No obstante, esa cuestión se mantuvo vagamente en su mente. En 1820, mientras estaba dando clase a sus estudiantes sobre las propiedades de las corrientes galvánicas al aplicar una fuerte descarga sobre un alambre de platino, observó que una aguja magnética pivotada que estaba en las cercanías, colocada en posición paralela al cable, se movía. Ørsted observó que la aguja se desviaba de una manera para una dirección de la corriente y en el sentido contrario para la otra dirección. Para analizar mejor el efecto hizo uso de una poderosa batería, de baja resistencia interna, que había construido con su amigo Lauritz Esmarch (1765 – 1842). El aparato era un variante de la pila de Volta, conocida como *batería de artesa*; consistía en veinte placas de cobre de doce pulgadas de largo, igual de alto y dos pulgadas y media de ancho. En cada celda, una placa de cinc estaba conectada a la placa de cobre de la celda contigua. Los espacios entre el cobre y el cinc se llenaban con agua que contenía 1/60 de su peso de ácido sulfúrico y un peso igual de ácido nítrico.

[63] Berlin, in der Realschulbuchhandlung.

La deflexión de la aguja magnética depende de la distancia entre la aguja y el cable y de la "potencia de la batería". En los experimentos de Ørsted, la declinación de la aguja formaba un ángulo de aproximadamente 45º.

En sus experimentos, Ørsted observó que no había diferencias en la deflexión si el alambre era de platino, de oro, de plata, de bronce, o si era una cinta de estaño y plomo o una masa de mercurio.

También comprobó que no había diferencias en la deflexión si entre la aguja y el alambre colocaba vidrio, madera, agua, resina, gres o piedras.

Una observación tan notable como la interacción de la corriente eléctrica y la aguja magnética, fue que la dirección de la fuerza actuante era perpendicular al plano que formaban el alambre y la aguja. Este descubrimiento, parecía contradecir la ley de Newton según la cual la fuerza de atracción gravitatoria actúa en la dirección que une a los cuerpos gravitantes.

La ley de Coulomb sobre los cuerpos cargados eléctricamente establece que la fuerza de interacción actúa en la dirección que une a los cuerpos. Lo mismo ocurre con la dirección de la fuerza entre dos cuerpos magnetizados, pero Ørsted encontró que la fuerza de interacción entre una corriente eléctrica y el polo de un imán en sus adyacencias actúa en *dirección perpendicular* a esa línea.

A primera vista, la explicación de Ørsted resultaba algo extraña. El trabajo original, en latín, fue publicado por el editor Johann Salomon Christoph Schweigger el 21 de julio. El título del trabajo fue *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, aludiendo a un "conflicto eléctrico" y no a una "corriente eléctrica".

En el lapso de varias semanas, después del experimento y antes de su publicación, Ørsted envió un detalle del mismo, resumido en cuatro carillas, a un grupo de conocidos y sociedades, de modo que, en diversas ciudades, aparecieron traducciones en alemán, francés, inglés, italiano y danés.

En las traducciones al italiano, al alemán y al francés figuraba la expresión "conflicto eléctrico". En la versión en inglés, decía "corriente de electricidad" mientras que en la versión danesa decía: "*de werking van het galvanismus op de magneetnaald*" (la acción del galvanismo sobre la aguja magnética). Aunque en la página 275 de su " *Electro-magnetische Wirkungen* "(1820) Ørsted escribió:

"Los extremos opuestos de la batería galvánica fueron unidos mediante un alambre metálico que, en aras de la brevedad, llamaremos el conductor de unión, o el cable de unión. Para el efecto que tiene lugar en este conductor y en el espacio circundante, daremos el nombre del *conflicto de electricidad*."

En la primera semana de septiembre, Biot y Arago[64] confirmaron plenamente los resultados de Ørsted. En octubre, Ampère[65] publicó su descripción teórica del efecto. El descubrimiento de Ørsted

[64] Arago enrrolló un alambre de hierro alrededor de un cilindro conectado a un aparato galvánico y comprobó la producción de un fuerte efecto magnético. Cuando Agustin Fresnel leyó la nota de Arago, en una artículo publicado en

fue recibido con una aceptación inmediata, y hubo un acuerdo generalizado respecto a su importancia.

Por la importancia de ese descubrimiento, ese mismo año la Royal Society de Londres le otorgó a Ørsted (en ausencia) la medalla Copley que, después de la Presidencia, es la máxima distinción que confiere esa Sociedad. Al año siguiente fue electo Miembro Correspondiente de la Académie des Sciences del Institut de France y miembro, de la clase Física, de la Königlichen Bayerischen Akademie der Wissenschaften. (Real Academia Bávara de Ciencias). En 1822, fue electo miembro extranjero de la *Kungliga Vetenskapsakademien* (Real Academia Sueca de Ciencias).

En 1822 – 1823, a instancias del Gobierno, Ørsted realizó una gira por Alemania, Francia e Inglaterra. En todos los lugares que estuvo, fue aclamado por su contribución a la Ciencia. La visita a Inglaterra fue de particular importancia, ya que allí Ørsted se enteró de que en casi todas las ciudades existían sociedades locales para el avance de la ciencia. En 1824, al regresar a Copenhague, Ørsted consiguió apoyo para la fundación de una Sociedad Danesa para el Avance de la Ciencia [*Selskab for Naturlærens Udbredelse* (*SNU*)] para "promover el bienestar general y despertar la atención general hacia la ciencia"; sociedad fundada y sostenida mediante aportes privados. Los objetivos de la *SNU* eran de dos clases: uno, dedicado a proveer educación científica básica en Química y Física; el otro, la realización de un número de actividades que incluyeron la fabricación de almidón, la fermentación alcohólica, la elaboración de cerveza, la destilación, la producción de vinagre y el curtido de cueros. La educación científica se daba mediante conferencias públicas y cursos, tanto en Copenhague como en las provincias. En la primera temporada, asistieron a esos cursos más de doscientos estudiantes. Además de los cursos y conferencias, la Sociedad daba subsidios a artesanos para el desarrollo de técnicas de cerámicas, de teñidos de telas, de plateado y dorados de metales, etc.

Estas actividades resintieron bastante la dedicación de Ørsted a la investigación. No obstante ello, efectuó investigaciones en electromagnetismo y sobre la compresibilidad del agua y otros fluidos. También efectuó experimentos químicos y, en 1825, pudo aislar aluminio metálico. Sir Humphry Davy, quien determinó que todas las "tierras" eran combinaciones de un metal con oxígeno había intentado obtenerlo por destilación de una amalgama de cloruro de aluminio y potasio metálico. No logró aislar el metal, a pesar de ello, propuso llamarlo *aluminum*. Ørsted perfeccionó la técnica de Davy y logró obtener pequeñas cantidades de aluminio haciendo reaccionar una amalgama diluida de potasio con cloruro de aluminio anhidro, para luego separar el mercurio de la amalgama por destilación. La reacción que se verificaba, estaba dada por la ecuación $\mathbf{3K(Hg) + AlCl_3 \rightarrow 3\,KCl + Al + Hg\uparrow}$. En 1827, Friedrich Wöhler mejoró el método de Ørsted logrando obtener aluminio en polvo de elevada pureza.

Annales de Chimie et de Physique [series 3] 15 (1820), pp. 219–222, preguntó si no podía darse el efecto inverso, quizás un imán podría producir una corriente voltaica en un alambre metálico enrollado alrededor de ese imán.

[65] Ampère, André-Marie, 1820. "Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans." *Annales de Chimie et de Physique*, **15**, 170–218, pl. 1–5 (October); errata on 223.

En 1828, Ørsted viajó a Noruega donde dio varias conferencias y luego a Berlin donde, el 18 de septiembre, pronunció un discurso en la inauguración de la *Versammlung deutscher Naturforshung und Ärtze* (Asamblea de las Fuerzas Naturales y Médicos Alemanes).

En 1829, se creó la Escuela Politécnica para brindar entrenamiento práctico a los artesanos y Ørsted fue su primer Director.

En 1830, Ørsted visitó Hamburgo donde fue incorporado a la Sociedad de Historia Natural de esa ciudad

En 1832, Ørsted recibió el Premio Montyon (10.000 fr) de la Académie des Sciences de Paris.

En 1834, Ørsted visitó a Carl Friedrich Gauß, en Göttingen, principalmente para conocer sus investigaciones e inventos magnéticos, Al retornar a Copenhague diseñó y puso en funcionamiento el observatorio magnético de esa ciudad.

Tomó parte activa en las reuniones de los naturalistas escandinavos, que tenían lugar cada tres años en alguno de los tres reinos. Las principales conferencias y trabajos con los que contribuyó a esa sociedad fueron publicados en *Der Geist in der Natur* (El alma en la Naturaleza) München, 1850.

En 1837 fue ordenado *Chevalier de la Légion d'Honneur*, en 1840 "*Conferenz-rath*", (con rango de Consejero de Estado) de Prusia, en 1842 Caballero de la Orden del Mérito de Prusia por "sus méritos en las Ciencias y en las Artes", en 1843, recibió de Erlangen ,el Diploma de Honor como Doctor en Medicina. En 1846, fue nombrado *Officier de la Légion d'Honneur* de Francia. En 1847, recibió la Gran Cruz de la orden de Dannebrog y en 1850, la Gran cruz de la *Nordstjärneorden* de Suecia (Orden de la Estrella polar).

Además de sus trabajos científicos, Ørsted escribió poesías y artículos literarios en prosa. Poco antes de su muerte publicó una serie de artículos bajo el título de *Der Geist in der Natur* una obra que expresa la esencia de su filosofía de vida. Además siempre mostró un gran interés por el lenguaje danés incorporando al mismo no sólo términos científicos — como "*brint*" e "*ilt*" para hidrógeno y oxígeno — sino expresiones más modernas para el lenguaje cotidiano.

A principios de marzo de 1851, contrajo lo que parecía un resfrío, pero la congestión fue aumentando hasta expresar, lo que se supone, una neumonía. Falleció el 9 de marzo a los 74 años.

La ciudad de Copenhague quedó muy conmocionada por su deceso y su familia recibió múltiples condolencias. Su prestigio había logrado que Dinamarca concitara la atención de los científicos europeos. Para graficarlo reproducimos las palabras que Sir John Frederick Willian Herschel pronunciara, en 1846, en un congreso científico llevado a cabo en Londres: "In science there was but one direction which the needle would take when pointed towards the European continent, and that was towards his esteemed friend, Professor Oersted."

Varios epistemólogos e historiadores de la Ciencia, han criticado como excesivo el mérito adjudicado a Ørsted como iniciador del electromagnetismo. Sin intención de participar en esas críticas, exponemos algunas de las objeciones formuladas[66].

Las similitudes entre los efectos eléctricos y magnéticos eran conocidas desde hacía mucho tiempo, ambos fenómenos se ejercen a distancia y ambos pueden provocar repulsión o atracción, por lo que era natural pensar que debía existir una relación mucho más completa entre ellos. Por eso, en 1774 y 1776, la *Königlichen Bayerischen Akademie der Wissenschaften* propuso otorgar un premio para quien, diera una respuesta científica a la pregunta ¿Hay una verdadera analogía física entre la fuerza eléctrica y la fuerza magnética? El resultado de la competencia fue publicado en el libro de Jan Hendrik van Swinden: *Recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme,* couronnés *et publiés par l'Académie de Bavière: avec des notes* & *des dissertations nouvelles.*(A Paris, chez la veuve Duchesne, 1785). La Academia juzgó que las memorias presentadas no habían tratado la cuestión con suficiente profundidad en todas sus partes, por lo que ella no pudo premiar a uno en su totalidad. Por eso, le otorgó una medalla de oro de valor de veinte ducados a van Swinden, una medalla de diez ducados al monje benedictino Cölestin Steiglehner y le agregó una tercera de igual valor al Profesor Lorenz Hübner. Estos trabajos muestran el interés que existía en esa época en encontrar una vinculación teórica entre la electricidad y el magnetismo.

En 1797, Alexander von Humboldt (1769 -1859) publicó *Über die gereitzte Muskel und Nervenfaser* (Sobre el músculo hidratado y la fibra nerviosa) donde presentó y discutió algunos fenómenos galvánicos. Entre ellos algunos referidos a experimentos realizados por Johann Wilhelm Ritter quien, a diferencia de Galvani, excitaba contracciones en ranas utilizando imanes.

En 1802 Giovanni Domenico Romagnosi observó, en su laboratorio de Trento, la desviación de una aguja magnética inducida por una corriente eléctrica. Sus resultados experimentales los publicó ese mismo año bajo el título "Articolo sul galvanismo" en el *Ristretto dei foglietti universali di Trento*, 62 (1802).

En 1803, Ritter retomó los experimentos con imanes y sus resultados fueron comunicados por Ørsted al *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts.* En diciembre de 1805, Ritter presentó ante la *Münchner Akademie der Wissenschaften* un trabajo donde confirmaba plenamente la equivalencia entre la electricidad y el magnetismo e informaba que había logrado producir una batería magnética que efectuaba las mismas operaciones que una batería eléctrica.

[66] Para un conocimiento más detallado de esas objeciones, puede consultarse: **deAndrade Martins, R**.: "Ørsted, Ritter, and Magnetochemistry", en *Hans Christian Ørsted And The Romantic Legacy In Science: Ideas, Disciplines, Practices* Brain, R. M., Cohen, R. S., Knudsen, O.,(Eds.). Spinger, Dordrecht, (2007), ISBN 978-1-4020-2979-0 (pp.339-385); Vaccaro, D., El descubrimiento de Ørsted que dio inicio al electromagnetismo en 1820, Universidad Austral (Argentina) Diciembre 2013, https://www.researchgate.net/publication/259443164; **deAndrade Martins, R**.,: *Romagnosi and Volta's Pile: Early Difficulties in the Interpretation of Voltaic Electricity*, en F. Bevilacqua – L. Fregonese (ed), *Nuova Voltiana: Studies on Volta and his Times*, Ulrico Hoepli, Pavia & Milan (2001) 3, pp. 81 – 102. **Davy, H.** (1821), "On the Magnetic Phænomena produced by Electricity; in a Letter from H. Davy, Bart. F.R.S. to W.H. Wollaston, M.D. P.R.S", *Philosophical Magazine and Journal of Natural Philosophy*, 58 (1821), pp. 43-50.

Por el contrario, en 1821 Humphry Davy, en una carta dirigida a William Hyde Wollaston, entonces Presidente de la Royal Society, le expresó que él había reproducido los experimentos de Ørsted y los había verificado con una batería mucho más potente, encontrando que las conclusiones de Ørsted seguían cumpliéndose, mientras que las expresadas por autores anteriores eran vagas e imprecisas.

8 – 10. André-Marie Ampère

Nació el 20 de enero de 1775 en Lyon y fue el segundo hijo de los tres que tuvieron Jean-Jacques Ampère y Jeanne-Antoinette Desutières-Sarcey. Su padre, burgués, liberal, fue un hombre de una gran cultura. Era admirador de Rousseau, por lo que decidió que André–Marie debía educarse a la manera de L'Emile. Su hijo nunca fue a la escuela y el padre nunca le exigió que estudie algún tema, pero sabía cómo despertar su interés por los conocimientos. Así André–Marie aprendió latín y tomó el gusto por la literatura y la historia natural. Pero a los trece años, conoció el libro *Éléments de mathématiques* de *Dominique Rivard* que le hizo inclinar su gusto por esa disciplina. Luego del libro de Rivard, estudió el libro de Alexis Clauraut *Elemens de Algebre*, los tratados de secciones cónicas de jean-Baptiste de la Chapelle y de Guillaume de l'Hôpital. Para algunos temas de Matemática, como el cálculo diferencial e integral, recibió la ayuda del Abad André R. P. Daburon, Profesor del Collège de la Trinité de Lyon. Este aprendizaje le permitió, el 8 de julio de 1788, presentar ante la Academia de Lyon su trabajo *Mémoire sur la rectification d'un arc de cercle*, resuelta mediante la aplicación del Cálculus. También asistió a algunas conferencias de Física dadas por Joseph Mollet, Profesor en el College de Lyon. Pero, esencialmente, Ampère fue un autodidacta, que estudió los temas que le interesaban por placer, sin la preocupación de prepararse para exámenes.

Fig. 8.16. A.M. Ampère (1775 – 1836)

Luego de retirarse de su actividad, Jean–Jacques Ampère, aceptó el cargo de Juez de Paz, en Lyon, en el cantón de Halle au blé. En 1793, la Convention Nationale que gobernaba la Primera República, consideró que en Lyon había una oposición girondina[67] que conspiraba contra la unidad de la República y envió a las tropas para tomar la ciudad. El sitio militar duró dos meses y la posterior toma, el 9 de octubre de 1793, provocó una masacre. Jean–Jacques Ampère, fue detenido y, el 24 de noviembre, fue guillotinado.

André–Marie Ampère quedó sumamente traumatizado por la muerte de su padre y durante más de un año perdió el gusto por la vida. Su familia quedó en la ruina, dado que el gobierno confiscó

[67] Los girondinos fueron un grupo de diputados de Gironda, que se oponían a la mayoría de los diputados *jacobinos* en la Convention Nationale que gobernó a Francia entre 1792 y 1795.

todos sus bienes. Recién en 1795, su madre logró el levantamiento de la orden de secuestro y pudo recuperar su casa en Poleymieux.

A partir de 1796, Ampère dio en Lyon clases particulares de matemáticas, química e idiomas. En 1799 se casó con Julie Carron, con quien tuvo un solo hijo, Jean–Jacques.

En 1800, fue admitido en el Athénée de Lyon, nombre que tomó la Academia de Ciencias de Lyon, y al año siguiente, obtuvo la cátedra de Física y Química en una escuela de Fue nombrado Bourg-en-Bresse. Pero tuvo que irse solo, porque a su esposa le detectaron un tumor abdominal y los médicos le prohibieron viajar. Durante más de un año, André Marie tuvo que viajar todas las semanas de Bourg a Lyon, para ver a su familia.

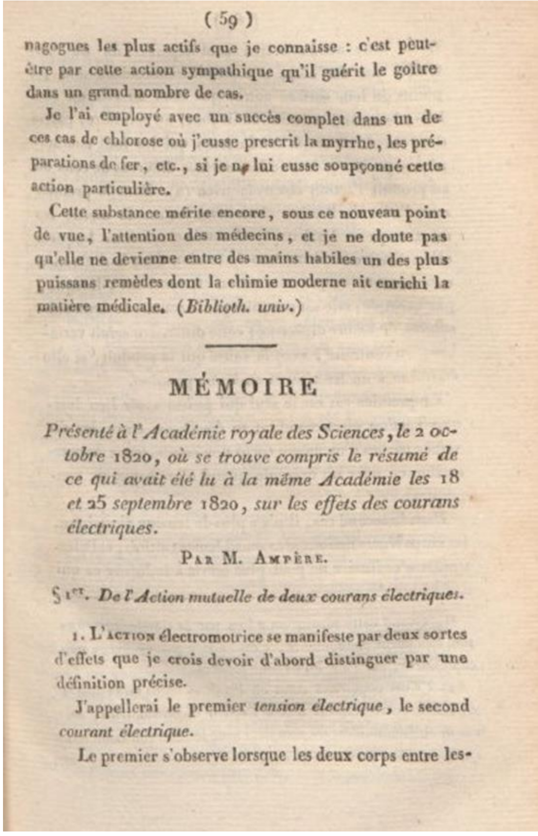
En Bourg-en-Bresse, Ampère no sólo daba clases en la escuela, sino que daba clases particulares para mejorar la situación económica de su familia. En el poco tiempo libre que le quedaba, se ocupó de resolver un problema de aplicación del Cálculo de Probabilidades a la Teoría del juego. Él pensó que la resolución le llevaría unos pocos días, pero le llevó diez meses y la presentó ante el Institut de France el 12 de enero de 1803. Tres meses más tarde presentó otra memoria sobre el cálculo de las variaciones. En esa época, se iba a llamar a concursos para profesores en los nuevos Liceos que reemplazarían a las Escuelas Centrales. Ampère se presentó para la Cátedra de Matemáticas del Liceo de Lyon. Los jurados eran dos académicos eminentes, miembros del Institut de France, Joseph-Jerôme Lefrançois de Lalande y Jean Baptiste Joseph Delambre quienes al leer las dos memorias recomendaron su nominación.

La nominación de Ampère quedó empañada por el fallecimiento de su esposa el 13 de julio de 1803. Él quedó tan conmocionado por la pérdida de su compañera, que dejó de lado el interés por la ciencia y buscó refugio y consuelo en la religión, inspirando e integrando un círculo que fue conocido como *Société chrétienne*. Tratando de alejarse de los recuerdos consiguió un cargo de *repetiteur* en la Ecole Polytechnique y se instaló en Paris en el otoño de 1804. En 1807, fue nombrado Profesor de Análisis Matemático y en 1808, Examinador en los concursos de ingreso a la École Polytechnique. Ese mismo año fue nombrado *Inspecteur général de l'Université*.

En 1806, se volvió a casar, con Jeanne Potot, con quien tuvo una hija, Albine. Pero las desavenencias conyugales los llevaron a la separación en 1809.

Dedicado a la investigación en Química, en 1809, al tomar conocimiento del trabajo de Gay-Lussac y Thenard sobre los llamados ácidos muriático y fluórico (ácidos clorhídrico y fluorhídrico), concluyó que sus fórmulas diferían sólo de la del agua en que el oxígeno era reemplazado por dos elementos, a los que le dio los nombres *cloro* y *phtore* (el flúor actual).

A fines de 1808, Gay-Lussac, colega de Ampère en la École Polytechnique, publicó su famosa memoria sobre "*la combinaisons des substances chimiques entre elles*", en la que comprobaba que cuando dos sustancias simples se combinan a la misma temperatura y presión, lo hacer en una relación de volúmenes sencilla y, cuando el producto de la reacción es una sustancia gaseosa, su volumen guarda una relación sencilla con los volúmenes de los gases reaccionantes, siempre que todos los volúmenes se midan a la misma temperatura y presión.


(59)

nagogues les plus actifs que je connaisse : c'est peut-être par cette action sympathique qu'il guérit le goître dans un grand nombre de cas.

Je l'ai employé avec un succès complet dans un de ces cas de chlorose où j'eusse prescrit la myrrhe, les préparations de fer, etc., si je ne lui eusse soupçonné cette action particulière.

Cette substance mérite encore, sous ce nouveau point de vue, l'attention des médecins, et je ne doute pas qu'elle ne devienne entre des mains habiles un des plus puissans remèdes dont la chimie moderne ait enrichi la matière médicale. (*Biblioth. univ.*)

MÉMOIRE

Présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 oc*tobre* 1820, *où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les* 18 *et* 25 *septembre* 1820, *sur les effets des courans électriques.*

PAR M. AMPÈRE.

§ 1er. *De l'Action mutuelle de deux courans électriques.*

1. L'ACTION électromotrice se manifeste par deux sortes d'effets que je crois devoir d'abord distinguer par une définition précise.

J'appellerai le premier *tension électrique*, le second *courant électrique*.

Le premier s'observe lorsque les deux corps entre les-

Fig. 8.17. Primera Memoria de Ampère *Ann. de Chim. et de Phys*., 1820, T. XV, pp. 59 – 76.

Ampère, que tenía una convicción absoluta en la teoría molecular, tuvo la idea de reunir los resultados destacados por Gay-Lussac con la ley de Mariotte, en un artículo leído en la Académie des Sciences el 24 de enero de 1814 En ese artículo, suponiendo que "en los gases las partículas se encuentran a una distancia suficientemente grande entre sí, de modo que las fuerzas de interacción ellas ya no tienen ninguna influencia en sus distancias mutuas y tres meses después, en una carta a Claude Louis Berthollet, expresa la tesis según la cual, en volúmenes iguales, el número de partículas para todos los gases es el mismo, siempre que los volúmenes se midan en las mismas condiciones de temperatura y presión.[68]

En 1814, los trabajos de Ampère no sólo eran conocidos en Francia, sino también en algunos centros científicos de otros países europeos. En noviembre de ese año fue electo miembro de la Sección Geometría de la Académie de Sciences y el 16 de enero, le fue conferida la orden de Chevalier de la Légion d'honneur.

En 1818 compró una casa en París, donde estableció un laboratorio que se hizo famoso y por donde pasó la mayoría de los físicos de su época. Sin embargo, para pagar los gastos involucrados en esta adquisición, tuvo que resignarse a vender el patrimonio familiar de Poleymieux.

En 1820 se inició una nueva etapa en su actividad científica, que lo haría famoso. El 4 de septiembre de ese año, Arago informó a la Académie des Sciences del experimento realizado algunos meses antes por el físico danés Jean-Christian Ørsted sobre la acción de la corriente "galvánica" sobre una aguja magnética, que colocada en posición paralela a un cable, cuando este era atravesado por una corriente eléctrica, la aguja tendió a ponerse perpendicular a la dirección origina. El 11 de septiembre, Arago repitió la experiencia de Oersted ante sus colegas. Ampère, que había asistido a las dos sesiones del Institut, inmediatamente intuyó que se trataba de un fenómeno fundamental; por lo que trabajó día y noche con una pasión que describió como "furiosa" y concibió en dos semanas una teoría que formaría la base de la electrodinámica.

El 18 de septiembre, presentó a la Academia de Ciencias una memoria en la que explicó la experiencia de Ørsted sobre la base de considerar a un imán como un "conjunto de corrientes eléctricas" y a la semana siguiente dio cuenta de un experimento confirmatorio que implica evidencia la acción

[68] Ampère no conocía el trabajo de Amedeo Avogadro de 1811, donde llegaba a la misma conclusión. No obstante ello, en Francia, esa hipótesis se sigue llamando "Ley de Avogadro – Ampère".

mutua de dos corrientes eléctricas. Con ese experimento dio las bases para una teoría que, a diferencia de otras teorías físicas que requirieron siglos para establecerse a partir de las observaciones, como la astronómica, o décadas como las mecánicas, en unos pocos años logró explicar no sólo los fenómenos descritos por las observaciones de Ørsted sino también cómo actúan las fuerzas en las interacciones electromagnéticas.

Desde esa memoria leída en la Académie, durante varios meses, en cada una de las sesiones de ese cuerpo presentó una nueva comunicación. Algunas tenían un carácter esencialmente teórico, como el cálculo de la fuerza actuando sobre dos elementos de la corriente, — una relación que ha servido como base para la definición de la unidad de intensidad de corriente eléctrica, — la equivalencia entre un circuito eléctrico y un imán extremadamente plano (llamado lámina magnética) o la teoría de corrientes particuladas, entre otras.

De esta manera, en poco tiempo logró la reducción de los extraños y complejos fenómenos del electromagnetismo a una teoría simple y general que casi inmediatamente fue aceptada por la comunidad científica internacional. Sin embargo, sería un error suponer que, por la celeridad con que se desarrolló, su establecimiento fue una tarea fácil; sino que se logró porque el autor tenía concepciones muy claras sobre las relaciones entre el espacio y las fuerzas que en él se ejercen, una idea concreta sobre los postulados de su teoría y de cómo diseñar los experimentos para lograr consecuencias observacionales que pudiesen corroborar dichos postulados y un excelente dominio de los métodos matemáticos para vincular a las variables involucradas en la misma.

Ampère estableció dos conceptos para describir dos estados que puede provocar la electricidad. Llamó *tensión* al estado que se observa cuando los dos cuerpos sometidos a una acción eléctrica están separados entre sí por cuerpos no conductores, que impiden el contacto de cualquiera de los puntos de sus superficies, lo que hoy llamaríamos *diferencia de potencial*. Cuando la acción eléctrica que se ejerce sobre ese sistema es constante la diferencia entre los dos estados de tensión es constante, siempre que no varíe la temperatura ni cambie la presión ejercida sobre ese sistema. Lo mismo ocurre cuando las terminales de una pila de Volta se colocan entre dos puntos de un cuerpo no conductor. Como ejemplo de la acción de la temperatura sobre la diferencia de tensiones, citó el calentamiento de la turmalina. Dado que no existe un aislante perfecto, puede producirse una pérdida de electricidad — por ejemplo, por el aire— entonces, la atracción mutua de las dos electricidades deja de equilibrarse con la acción electromotriz. Esta última fuerza, en el caso en que sea constante, nuevamente transporta electricidad positiva en un lado, y electricidad negativa en el otro, y las tensiones se vuelven a recuperar. Es este estado de un sistema electromotor y conductivo de cuerpos al que Ampère llamó *voltaje eléctrico*.

La teoría de Ampère sobre la acción mutua de las corrientes eléctricas, está basada sobre cuatro resultados experimentales y una hipótesis.

Uno de los experimentos que realizó, fue armar un dispositivo como el que se representa en la Fig. 8.18.

Sobre dos tubos de vidrio *ACD* y *BEF* enrolló alambre de bronce en forma de hélice. De su extremo *D* sale un alambre *DG* que desciende verticalmente. Del otro extremo, *F*, sale un cable que se dobla según *FHK*. Ambos cables terminan en puntas de acero que se sumergían en mercurio contenidos en dos pequeñas copas, *M* y *N* conectadas a los terminales de una pila de Volta. La punta de acero superior sólo se apoya contra la parte inferior de la copa *N*. Conectado el dispositivo a la pila, Ampère comprobó que se comportaba tal como la aguja de una brújula ante una barra magnetizada.

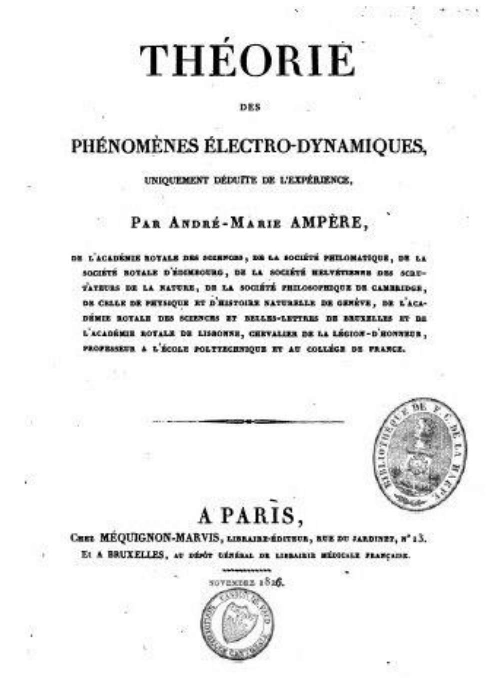

THÉORIE
DES
PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES,
UNIQUEMENT DÉDUITE DE L'EXPÉRIENCE,
PAR ANDRÉ-MARIE AMPÈRE,
DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES, DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATIQUE, DE LA SOCIÉTÉ ROYALE D'ÉDIMBOURG, DE LA SOCIÉTÉ HELVÉTIENNE DES SCRUTATEURS DE LA NATURE, DE LA SOCIÉTÉ PHILOSOPHIQUE DE CAMBRIDGE, DE CELLE DE PHYSIQUE ET D'HISTOIRE NATURELLE DE GENÈVE, DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES ET BELLES-LETTRES DE BRUXELLES ET DE L'ACADÉMIE ROYALE DE LISBONNE, CHEVALIER DE LA LÉGION-D'HONNEUR, PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE ET AU COLLÈGE DE FRANCE.
A PARIS,
CHEZ MÉQUIGNON-MARVIS, LIBRAIRE-ÉDITEUR, RUE DU JARDINET, n° 13.
ET A BRUXELLES, AU DÉPÔT GÉNÉRAL DE LIBRAIRIE MÉDICALE FRANÇAISE.
NOVEMBRE 1826.

Fig. 8.19. *Théorie des phénomènes...*

La hipótesis sobre la cual Ampère estableció su teoría, es que todos los fenómenos de magnetismo se deben a corrientes eléctricas y, si se pudiera hacer observaciones en el interior de una "molécula" magnética, debería encontrarse que su comportamiento está regido por las mismas leyes que gobiernan cualquier circuito eléctrico en el exterior del cuerpo magnetizado.

Ampère reunió la mayor parte de su trabajo sobre electricidad y magnetismo en un libro titulado *Théorie des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*. En esa obra explica cómo llegó a establecer su teoría sobre la relación entre las corrientes eléctricas y los imanes. Además de considerar que cada molécula magnética está atravesada por múltiples corrientes eléctrica que, sin embargo, no pasan a las moléculas vecinas sino que ante una acción electromagnética externa se orientan en el espacio, afirmó que comprobó, "por experiencia, que un conductor móvil permanece exactamente en equilibrio entre fuerzas iguales o momentos de igual rotación, estas fuerzas y momentos son producidos por partes fijas de conductores cuyas formas o tamaños pueden variar de cualquier manera, en condiciones que la experiencia determine, sin que se perturbe el equilibrio, y a partir de la conclusión directa, por cálculo, del valor de la acción mutua de dos porciones infinitamente pequeñas. De modo que el equilibrio es, de hecho, independiente de todos los cambios de forma o tamaño compatibles con estas

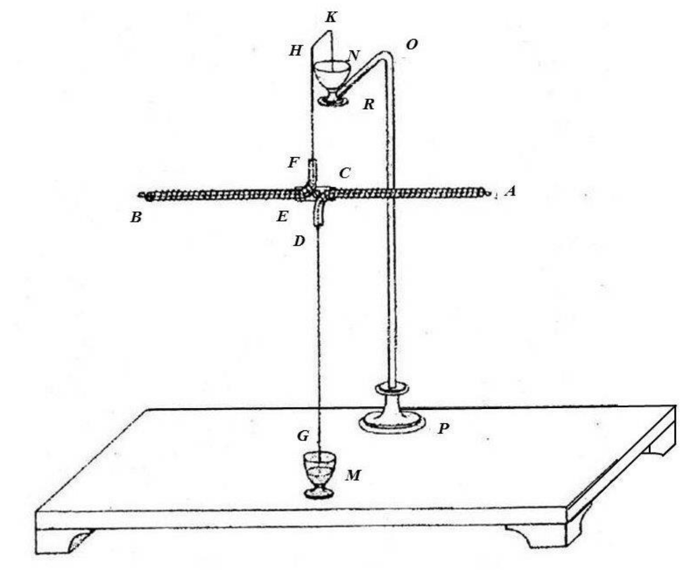


Fig. 8.18. Esquema de un dispositivo experimental de Ampère

condiciones."[69].

La fórmula a la que arribó Ampère no es la que habitualmente figura en los textos de Física, que vincula la circulación de un campo magnético a lo largo de una línea cerrada con la intensidad neta que atraviesa el área limitada por la trayectoria, sino que pudo establecer la atracción entre dos elementos *ds* y *ds'* de dos circuitos paralelos transportando dos corrientes eléctricas *i* e *i'* mediante la fórmula

$$\frac{i\,i'\,ds\,ds'}{r^2}\left(2\cos\varepsilon + 3\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}\right)$$

o

$$-\frac{i\,i'\,ds\,ds'}{r^2}\left(2r\frac{d^2r}{ds\,ds'} - \frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds'}\right)$$

donde *r* es la distancia que media entre las dos corrientes y ε es el ángulo que forman esos dos elementos.

James Clerk Maxwell, generalizó la ecuación de Ampére incorporando la corriente de desplazamiento y dándole la forma matemática con la que se conoce actualmente.

En 1824, quedó una vacante en la sección Física del College de France y Ampère presentó su candidatura. También la presentó Agustin Fresnel. Sin embargo, el cuerpo docente del Institut eligió al mineralogo François Sulpice Beudant, pero el Institut se opuso a la nominación de Beudant y eligió a Ampère. Este pensaba relegar sus tareas docentes en l'École Polytechnique, pero el Ministerio de Instrucción Pública lo obligó a dejar el cargo de Inspecteur Général, que era su mayor fuente de ingresos, cargo en que fue repuesto en 1828.

Sucesivas neumonías fueron deteriorando su salud y falleció, lejos de sus hijos, en Marsella el 10 de junio de 1836. Tenía 61 años.

8 – 11.- Las contribuciones de Gay – Lussac y Thenard a la electroquímica.

Joseph Louis Gay – Lussac (1778 – 1850) fue ayudante de Berthollet y de Fourcroy y Profesor de la *École Polytechnique* y del *Jardin des Plantes.*

Las conferencias de Gay - Lussac se publicaron en 1828[70], muchas en colaboración con Thenard. Encaró siempre los proyectos más variados, desde ascender en un globo aerostático a 7000 metros para tomar muestras de aire con el objeto de determinar cómo variaba su composición con la altura hasta probar la calidad de los explosivos que se usaban en las canteras, preparar textiles igní-

69 Théorie des phénomènes *électrodynamiques...* p. 10.

70 *Cours de Chimie,* 2 vols. Paris, 1828. Findlay: *Nature,* 1937, CXI. 22.

fugos hasta desarrollar pararrayos eficientes. Sus habilidades en el laboratorio y su ingenio para diseñar experimentos, lo convirtieron en uno de los mejores experimentadores de la primera mitad del siglo XIX.

Figura 8.20. J.L. Gay Lussac (1778 – 1850)

En 1829 fue nombrado ensayista en jefe del *Bureau de garantie à la Monnaie*, organismo público encargado de vigilar la calidad de la moneda acuñada. Allí desarrolló un nuevo método para determinar el título de la plata en una aleación, método que se usa aún en la actualidad.

Al igual que muchos científicos franceses, combinó su investigación y docencia con la política. En 1831, fue electo diputado por el Departamento de Haute-Vienne siendo reelegido en 1834 y 1837.

En 1832 ingresó en la *Compagnie Manufacture des Glaces de Saint-Gobain* donde, en 1843, llegó a ser presidente del consejo de administración. En 1839, el rey Louis Philippe lo nombro Par de Francia.

Louis Jacques Thenard (1777 – 1857) comenzó siendo peón de laboratorio de Vauquelin y en 1804 lo sucedió como profesor en el *Collège de France*. En 1809, al morir Antoine-François de Fourcroy, lo sucedió como titular de las cátedras de Química de la Facultad de las Ciencias de la Universidad de París y de la École Polytechnique. En 1810 fue elegido miembro de la Académie des Sciences y en 1821, miembro de la Real Academia Sueca de Ciencias. Cuatro años más tarde, Charles X, lo nombró Barón y en 1832 Louis Philippe lo nombró Par de Francia.

Figura 8.21. L.J. Thenard (1777 – 1857)

La difusión de los trabajos sobre electroquímica que Davy presentara ante la Royal Society y que fueron publicados en 1807 y 1808, concitó la atención de muchos investigadores en esta especialidad. La posibilidad, teórica, de que, mediante una batería lo suficientemente poderosa, podría resolverse cualquier sustancia compuesta y, de este modo obtener nuevos materiales, despertó el interés de Napoleón Bonaparte, a la sazón, Emperador de Francia. En 1808, Bonaparte consignó una suma muy importante de dinero para Jean-Girard Lacuée, Conde de Cessac (1752 - 1841), que era el Gobernador de la École Polytechnique, para construir una batería voltaica de gran potencia, a la vez que Joseph-Louis Gay – Lussac y Luis Jacques Thenard fueron designados para hacer los experimentos con esa batería. Estos químicos diseñaron un proyecto que incluía una enorme cantidad de experimentos electroquímicos. Los resultados de ese proyecto, fueron publicados en 1811 en dos volúmenes bajo el título "*Recherches Physico-chimiques, faites sur la Pile; sur la Preparation chimique et les Proprietes du Potassium et du Sodium; sur la Decomposition de l'Acide boracique; sur les Acides fluorique, muriatique, et muriatique oxygene; sur I'Action chimi-*

que de la lumière; sur I'Analyse vegetale et animale, &c" cuyos contenidos contribuyeron enormemente al desarrollo de la Química.

La primera parte de las *Recherches* contiene un estudio muy minucioso e interesante de la batería galvánica y de qué circunstancias depende su energía. En la puesta a punto del dispositivo calcularon el gasto energético de su funcionamiento.

La segunda parte está dedicada a los experimentos para obtener potasio y sodio. Davy había obtenido solamente cantidades minúsculas de potasio por la acción de su batería eléctrica sobre la potasa. Gay-Lussac y Thenard idearon un método que permitía descomponer potasa en cantidades importantes. El método consistía en colocar virutas de hierro limpias en un cañón de fusil doblado, cubierto externamente con arcilla y colocado en un horno. A un extremo del cañón de fusil se le ajustaba un tubo conteniendo una cantidad de potasa cáustica. Ese tubo, bien sellado, se sumergía bajo la superficie de mercurio. El otro extremo del cañón de fusil tenía ajustado otro tubo que también se sumergía en mercurio. Mediante el horno se elevaba la temperatura del cañón hasta el rojo blanco. La potasa entonces fundía y goteaba lentamente sobre las virutas de hierro. A una temperatura muy elevada se producía las reacciones:

$$\mathbf{2KOH \rightarrow K_2O + H_2O}$$

$$\mathbf{K_2O + Fe \rightarrow 2K + FeO}$$

El potasio, volátil, se recogía en el otro extremo del cañón y se extraía una vez que el sistema se enfriaba.

Mediante un procedimiento análogo, Gay-Lussac y Thenard obtuvieron cantidades apreciables de sodio, lo que les permitió estudiar sus propiedades físicas y químicas con más detalle con que lo había hecho Davy. Determinaron las densidades de ambos metales con gran precisión, su acción sobre el agua y midieron la relación entre las masas de los metales y las del hidrógeno desprendido. Descubrieron también que, calentando estos metales en oxígeno de alta pureza, son capaces de unirse a cantidades adicionales de oxígeno, formando los peróxidos de potasio (K_2O_2) y de sodio (Na_2O_2). Estos peróxidos, de color amarillento, al sumergirlos en agua, liberan oxígeno regenerando los respectivos óxidos. Expusieron una gran variedad de sustancias a la acción del potasio, descubriendo un gran número de reacciones curiosas e importantes, que arrojaron luz sobre las características y reactividad de esas sustancias metálicas. Calentando, en un tubo de cobre, potasio con ácido bórico anhidro lograron descomponer el ácido y demostrar que en su descomposición cede su oxígeno quedando un material de color negro, como el carbón de leña, al que dieron el nombre de *boro*. No pudieron determinar con exactitud las proporciones de los componentes del ácido bórico, pero los experimentos posteriores de Davy, lograron resultados más precisos.

Sus experimentos con el ácido fluorhídrico son sumamente valiosos. Obtuvieron ese ácido en estado de alta pureza y pudieron determinar sus propiedades físicas y su reactividad frente a varias sustancias. Sus tentativas de descomponerlo, así como las de Davy, terminaron en el fracaso. Sin embargo, a raíz del descubrimiento que el ácido fluorhídrico permite obtener ácido fluorbórico (HBF_4), André-Marie Ampère sugirió que, por su reactividad química similar al del ácido clorhídrico, ese ácido debía ser un compuesto de hidrógeno y un soporte desconocido de la combustión, al que le dieron el nombre de *flúor*. Esta opinión también fue adoptada por Davy, aunque sus experimentos no lo podían probar con certeza. Las investigaciones posteriores sobre la reactividad del ácido fluorhídrico que hizo Berzelius hicieron que la comunidad científica aceptara la teoría de que el ácido fluorhídrico es un hidrácido de naturaleza y reactividad similar a los otros hidrácidos halogenados. Recién en 1886, Henri Moissan obtuvo el flúor en estado de alta pureza, confirmando así todas las características predichas por Gay-Lussac, Thenard, Davy y Berzelius.

El otro trabajo importante de Gay-Lussac describe la naturaleza peculiar del yodo, las características de los ácidos yódico y yodhídrico, y de una gran variedad de compuestos en los cuales el yodo es componente.

A Thenard se debe, entre otros, el descubrimiento del agua oxigenada, (H_2O_2), en el que el hidrógeno es capaz de combinarse con el doble de oxígeno que el que existe en agua, y de determinar las características de este líquido curioso que él llamó deutóxido del hidrógeno. Encontró que posee características oxidantes y que es un excelente blanqueador.

8 – 12.- Berzelius y la naturaleza eléctrica de los átomos.

Jöns Jacob Berzelius nació en Wäfnersunda, Suecia el 20 de agosto de 1779. Su padre fue director de una escuela en el pueblo vecino de Linkoeping. En la escuela media, Berzelius no parecía prometer mucho ya que en su certificado de egreso consta "sólo justifica dudosas esperanzas" y sus examinadores en la Universidad de Upsala, donde estudió Medicina, no destacaron de él "habilidades en Filosofía natural". Su tesis doctoral versó sobre la acción de las descargas eléctricas sobre los tejidos orgánicos[71]. También, en 1802 publicó un trabajo con el título *Afhandling om Galvanismen* (Tratado sobre el galvanismo) que, a lo largo de sus 145 páginas, analizaba el efecto de la descarga eléctrica sobre diversas sales y minerales. En 1803 comenzó a hacer una serie de experimentos eléctricos con el físico sueco Wilhelm Hisinger (1766 – 1852). Hisinger y Johan Gottlieb Gahn (1745 – 1818) eran los líderes de la Sociedad galvánica de Estocolmo que poseía la batería eléctrica más poderosa de Suecia. En febrero de 1803, Hisinger y Berzelius publicaron sus investigaciones sobre la acción de la electricidad sobre sustancias inorgánicas con el título "Versuche betreffend die Wirkung der elektrischen Säule auf Salze und auf einigue von ihren Basen"[72], trabajo que volvieron a publicar en 1807 en los *Annalen der physik*[73]. En su *Bakerian*

Figura 8.22. J.J. Berzelius (1779 – 1850)

[71] Electricitatis galvanicæ apparatu cel. Volta excitæ in corpora organica effectu. (1º de mayo de 1802)

[72] "Experimentos sobre el efecto de la columna eléctrica en sales y en sus bases", *Neues allg. Journal der Chemie,* I. 115 – 149.

[73] **3,** 269 – 304, 1807.

Lecture de 1806[74], Davy describió numerosos experimentos con su propia batería voltaica, sobre la acción de la electricidad sobre soluciones diluidas de sulfato de calcio, sulfato de magnesio y tierras alcalinas, que fueron enteramente análogas a las descriptas por Hisinger y Berzelius.

Berzelius se destacó por la publicación de varias investigaciones químicas. Fue nombrado Profesor Asistente de Química y Farmacia en la Escuela Médica de Estocolmo, un cargo que fue creado especialmente para él. Cinco años más tarde fue nombrado Profesor Titular, cargo que retuvo durante un cuarto de siglo. En 1818, el Rey Karl de Suecia lo nombró miembro de la nobleza y en 1835, en ocasión de su boda, fue nombrado Barón.

En Estocolmo, el laboratorio privado de Berzelius se convirtió en la meta de muchos químicos jóvenes cuya ambición máxima era trabajar con el gran maestro. Entre ellos estuvo Friedrich Wöhler quien posteriormente sintetizaría la urea a partir de cianato de amonio, experimento que fue un golpe bastante fuerte contra la "teoría de vitalismo".

Las teorías acerca de la influencia de la electricidad sobre la naturaleza de la materia, llevaron a Berzelius a elaborar su teoría dualista de la materia. Ya antes de su tiempo, muchos compuestos habían sido considerados como consistentes de dos porciones. El desarrollo de la electroquímica debido, en gran parte, a los trabajos de Davy, Gay-Lussac, Thenard y el mismo Berzelius, logró un mayor consenso en la hipótesis "dualista" de Berzelius y ese es, quizás, el gran mérito de quien la propuso y fundamentó.

Para Berzelius, las sustancias compuestas se forman mediante una disposición de los átomos de lado a lado.[75] Los compuestos de primer orden se forman de esta manera a partir de las partículas más pequeñas de los elementos; a su vez, estos compuestos dan lugar a la formación de compuestos de segundo orden; y así sucesivamente. Berzelius, al igual que sus precursores, buscaba la razón de la combinación de los átomos en la afinidad, pero al igual que para Davy, la formación de un compuesto era una consecuencia de las características eléctricas de las partículas más pequeñas. Si bien Davy desarrolló ideas ingeniosas sobre el modo en que se correlacionan los fenómenos químicos y eléctricos y pudo explicar un gran número de hechos de manera excelente, no llegó a producir una teoría que sirviera de fundamento para un sistema químico. Berzelius fue el primero para hacer esto. Él tomó como tarea principal, establecer en Química un sistema uniforme que pudiera ser aplicable a todos los hechos conocidos y lo logró.

Según Berzelius, la electricidad no se genera cuando dos sustancias se ponen en contacto, sino que es una característica de la materia; y en cada átomo se suponen, dos polos eléctricos opuestos[76]. Sin embargo, estos polos no contienen cantidades iguales de electricidad. En consecuencia, los átomos tienen una polaridad neta, son unipolares: la electricidad de uno de los polos predomina sobre la del otro; y así cada átomo (y por lo tanto cada elemento) parece tener carga eléctrica positiva o

[74] *Phil Mag.* 28, 1, 1807.

[75] **Berzelius, J.J.**, (**1819**) : *Essai sur la theorie des proportions chimiques et sur I'influence chimique de I'electricite,* Mequignon-Marvis, Paris, p. 26. Ver también, **Berzelius, J.J.**, (**1827**): *Lehrbuch der Chemie,* Arnold, Dresden, Vol. 3, part I.

[76] **Berzelius, J.J.**, (**1819**) : *Essai* ... p. 85.

negativa. Sobre esta base, es posible ordenar las sustancias elementales en una serie, de modo que cada miembro sea siempre más electronegativo que el que le sigue en la serie. El oxígeno se encuentra en la cima, y — según Berzelius — es absolutamente electronegativo, mientras que las otras sustancias son positivas o negativas de acuerdo a cómo se las compare con el que le precede en la serie o el que le sigue. Esta serie no constituye una tabla de afinidades en el sentido de la tabla de Geoffroy-Bergmann; y no expresa la afinidad de las sustancias individuales para el oxígeno. Berzelius no se había olvidado de la enseñanza de Berthollet, de que la afinidad no es un carácter constante e independiente de las condiciones físicas y sabía perfectamente que el oxígeno se puede remover de los óxidos metálicos mediante el carbón o el azufre, o sea, por otras sustancias electronegativas. Para él, la afinidad dependía principalmente de la intensidad de la polaridad, es decir, de la cantidad de electricidad contenida en los dos polos. Pero esta intensidad es variable, especialmente ante los cambios de la temperatura. En general, Berzelius consideraba que esa afinidad aumenta con la temperatura, lo que explicaba por qué ciertas combinaciones ocurren solamente a una temperatura alta[77].

Durante la combinación de dos elementos, los átomos se disponen de manera de enfrentar sus polos opuestos, y descargan mutuamente sus electricidades libres, por lo que se producen los fenómenos del calor y de la luz. Además, Berzelius sostuvo que el movimiento de las partículas últimas sólo es posible si las sustancias están en estado líquido. En este aspecto coincidía con la vieja doctrina química que explicaba lo mismo mediante la frase "*Corpora non agunt nisi soluta*" (las sustancias no obran recíprocamente a menos que estén disueltas).

Cuando una sustancia es expuesta a la acción de una corriente eléctrica, esta restaura a los átomos su polaridad original, por lo que la sustancia se resuelve en sus componentes.

Un compuesto de primer orden —por ejemplo, la potasa— no es eléctricamente (ni tampoco químicamente) inactivo, puesto que, durante la combinación, sólo un polo de cada átomo se neutraliza. Al seguir siendo unipolar, puede entrar en otras combinaciones (de segundo orden) que están dotadas de fuerzas eléctricas —por ejemplo, combinándose con el ácido sulfúrico. Pero las intensidades de estas fuerzas disminuyen cuanto más alto se torna el orden de un compuesto, ya que, en general, los polos más fuertes son los que se neutralizan primero.

Según Berzelius, la unipolaridad específica de los óxidos depende solamente del radical o del elemento combinado con el oxígeno. Este último da lugar a las sustancias con mayor alcance posible electropositivo y electronegativo (los álcalis y los ácidos)[78].

Todas las reacciones químicas, y los fenómenos del calor y la luz que las acompañan, según Berzelius, son producidos por la electricidad, que "parece así ser la primera causa de la actividad de todo lo que nos rodea en la Naturaleza."[79].

[77] **Berzelius, J.J**., (**1827**): *Lehrbuch der Chemie*, Arnold, Dresden,, Vol. 3, part I., pp. 73-74.
[78] **Berzelius, J.J**., (**1827**): *Lehrbuch …* p. 76.
[79] *Ibid.* P. 77.

Si una sustancia C descompone a una sustancia compuesta AB de modo que B pueda llegar a ser libre, C debe poder neutralizar una mayor cantidad de la polaridad eléctrica de A que la que puede B. Además, un intercambio mutuo entre dos sustancias AB y CD solamente ocurre si las polaridades eléctricas están más equilibradas en AC y BD que lo que estaban previamente. En reacciones de esta clase, Berzelius, como Berthollet, supuso que las cantidades de las sustancias presentes y la cohesión influyen sobre los resultados de los fenómenos, pero a diferencia de Berthollet él consideraba a la afinidad como una función de la polaridad eléctrica, y que es independiente de la capacidad de saturación de la sustancia.

Estas ideas constituyen la base de la teoría dualista de la combinación química que Berzelius estableció como sigue:[80]

"Cada combinación química depende enteramente y solamente de dos fuerzas opuestas: las electricidades, a saber, positivas y negativas y cada compuesto está formado por dos porciones, unidas por los efectos de sus interacciones electroquímicas, ya que no hay ninguna tercera fuerza de interacción. De esto se sigue que cada sustancia compuesta, cualquiera sea el número de sus componentes puede ser dividida en dos partes, de las cuales una es eléctricamente positiva y otra es eléctricamente negativa. Así, por ejemplo, el sulfato de la soda no se compone de azufre, de oxígeno, y de sodio, sino de ácido sulfúrico y de soda, cada una de las cuales puede, a su vez, ser dividido en un componente electropositivo y otro electronegativo. De la misma forma, el alumbre no se puede considerar compuesto inmediatamente por sus componentes elementales, sino que debe ser mirado como el producto de la reacción del sulfato de alúmina, como elemento negativo, con el sulfato de la potasa, como elemento positivo."

El sistema dualista de Berzelius requería una nomenclatura y una notación adecuadas para no dar lugar a equívocos. El esquema de nomenclatura[81] fue un perfeccionamiento del introducido por Guyton, Lavoisier, Berthollet, y Fourcroy, y la notación es la base de la que se emplea actualmente.

Berzelius clasificó a las sustancias en ponderables e imponderables. En esta última clase incluyó a la electricidad, el magnetismo, el calor, y la luz. Las ponderables, a su vez, podían ser elementos (sustancias simples), compuestos, soluciones y mezclas. Entre las sustancias simples, Berzelius colocó a los metales y los "metaloides". El término "metaloides había sido empleado por Paul Erman (1764 – 1851) en 1812 para designar a los metales alcalinos y las "tierras"[82], pero Berzelius fue el primero en darle el significado de "todo elemento ponderable que no es un metal"[83].

En el esquema de Berzelius, los compuestos del oxígeno son llamados óxidos o ácidos. A las sustancias de esta clase que no poseen ni características básicas ni ácidas, y contienen relativamente poco de elemento negativo, las llamó subóxidos. Los compuestos oxigenados básicos formadores de sales se designan como óxidos; cuando un elemento o un radical forma dos de estos óxidos, se los distingue mediante las terminaciones del nombre específico. Esto es muy fácil en la nomenclatura

[80] **Berzelius, J. J.,** (**1825**) *Lehrbuch der Chemie*, vol. I, Part I, p. 79.
[81] *Journ. de Phys*. **73**, 253.
[82] *Gilbert's Annalen der Physik*, Vol. **42**, p. 45 (1812).
[83] *Kungliga Svenska Vetenskaps-Academiens Hardlingar*, Vol. **33**, pp. 28-74, (1812).

latina (que Berzelius propuso emplear); por ejemplo, oxidum ferrosum (con el porcentaje menor de oxígeno) y oxidum ferricum (con el porcentaje mayor de oxígeno). Finalmente, en el sistema de Berzelius también se distinguen los superóxidos. Éstos contienen una proporción relativamente grande de oxígeno, y deben ser reducidos antes de que formen las sales.

Respecto del agua, Berzelius consideró que podía intervenir en las sustancias de tres maneras distintas. Podría formar parte de un ácido, como en el ácido sulfúrico o de una base, como en el caso de los álcalis cáusticos, o podría formar parte del agua unida a las sales. En los primeros dos casos, la llamaba “agua de hidratación” mientras que en el último caso era “agua de cristalización” que podía ser separada sin modificar esencialmente la naturaleza de las sales.

El sistema de notación de Berzelius ha probado ser tan práctico que se ha conservado hasta el presente sin modificaciones sustanciales. En él, el átomo de un elemento se representa mediante la letra inicial del nombre latino del elemento y, si hay más de un elemento con la misma letra inicial se agrega una segunda para distinguirlos. En el caso de las sustancias compuestas se colocan los símbolos de cada elemento uno al lado del otro. Cuando en un compuesto hay varios átomos de un mismo elemento, su número se indica a continuación del símbolo por sobre (o debajo) de la línea de escritura, excepto cuando los átomos de un mismo elemento son 2. En este caso, la propuesta de Berzelius fue que el símbolo del elemento se tache mediante una barra[84]. Así, por ejemplo, para indicar lo que hoy escribimos H_2, en la notación de Berzelius se debía escribir $\cancel{H}$ y entonces, la fórmula del agua sería $\cancel{H}O$.

En el caso de compuestos más complicados, las diversas letras se debían separar mediante el símbolo + y la manera de disponerlos dependía del dualismo.

8 – 13.- Las contribuciones de Faraday al Magnetismo y a la Electroquímica.

Faraday nació en Newington, Butts, Surrey, en 1791, en el seno de una familia pobre. Su padre era herrero, pero no quería que su hijo también lo fuera y lo envió a trabajar como aprendiz de encuadernador. En su trabajo, Faraday leía muchos de los libros que llegaban para ser encuadernados, interesándose particularmente en los relativos a las ciencias naturales. En 1813, uno de los clientes del negocio, le regaló una entrada para asistir a una de las conferencias que Humphry Davy pronunciaba en la Royal Institution. Faraday asistió a la misma y tomó nota de la exposición de Davy. Luego redactó cuidadosamente un escrito sobre el tema y se lo envió al conferenciante conjuntamente con un pedido de empleo. Davy quedó gratamente sorprendido de la carta, lo citó y luego de

[84] **Berzelius, J.J**. *Lehrbuch* .... 3, part I, 108.

conversar extensamente sobre las inquietudes del joven, lo recomendó a la Royal Institution para que lo empleasen como asistente suyo.

Las excelentes condiciones experimentales de Faraday le valieron el reconocimiento de la Royal Institution y en 1825, por recomendación del propio Davy, fue nombrado Director de Laboratorio de esa institución. En 1833, la Royal Institution creó la Cátedra Fuller de Química para Faraday quien la detentó hasta su muerte en 1867.

Si bien Faraday se sintió en deuda con Davy, llegando a oficiarle de valet en su viaje al continente europeo, la amistad se enfrió debido a que en 1825 Davy lo acusó, injustamente, de haberle plagiado un trabajo[85]. Esto motivó que Faraday abandonase todo trabajo sobre Química hasta el fallecimiento de Davy en 1829.

Figura 8.23. M. Faraday (1791 – 1867).

La decisión de Faraday de no ocuparse de investigaciones químicas, lo llevó a investigar las propiedades magnéticas de ciertos cuerpos y la influencia de la actividad magnética sobre la corriente eléctrica.

Faraday ya había realizado su primer descubrimiento en el electromagnetismo en 1821, al repetir el experimento de Ørsted de 1819 de acercar una aguja imantada a un alambre por el que circulaba corriente. De ese experimento, estimó que debía existir un "campo de fuerzas" que se podía representar como un conjunto infinito de *líneas de fuerza* circulares y concéntricas. Para ese conjunto acuñó el nombre de *campo magnético de la corriente.*

Analizando los trabajos de Ampère, quien demostró que toda corriente eléctrica se comporta como un imán cuyas propiedades pueden deducirse de la configuración del circuito eléctrico y de la intensidad de corriente que por él circula, Faraday encaró el problema inverso. ¿Si la corriente eléctrica produce magnetismo, sería posible producir una corriente eléctrica a partir de un imán? Tratando de dar respuesta a esa cuestión, en 1824, inició una serie de experimentos sobre ese tema hasta que el 29 de agosto de 1831, logró el resultado que esperaba. El rasgo fundamental que descubrió Faraday fue que el campo magnético debía *moverse* o *variar* para generar una corriente eléctrica en un circuito cercano. A la propiedad de producir una corriente eléctrica a partir de una acción magnética, se la conoce como *inducción electromagnética*.

Al hacer circular una corriente eléctrica por una bobina, comprobó que en una bobina próxima se generaba otra corriente eléctrica, Pero a diferencia de los campos eléctricos generados por cuer-

[85] El encono de Davy fue tan grande que siendo Presidente de la Royal Society fue el único de todos los Fellows que votó en contra de la incorporación de Faraday a la entidad.

pos cargados eléctricamente, que son conservativos, los campos eléctricos creados por campos magnéticos tienen una circulación a lo largo de una línea cerrada distinta de cero.

Otro de los fenómenos descubiertos por Faraday, trata la influencia de un campo magnético sobre un haz de luz polarizada, fenómeno que luego se conocería como *efecto Faraday* o *efecto magneto*-óptico, con lo que demostró que los imanes podían afectar a los fenómenos ópticos**.** El 13 de septiembre de 1845 comprobó que cuando un haz de luz polarizada planarmente atraviesa una pieza de vidrio e interactúa con un campo magnético orientado en la dirección de propagación de la luz, se observa un giro en el plano de polarización de la luz.

Él creía en la unidad de todas las fuerzas de la naturaleza y en particular entre la luz, la electricidad y el magnetismo. El 13 de septiembre de 1845, Faraday escribió en la entrada #7504 de su diario de laboratorio:

"Hoy he trabajado con líneas de fuerza magnética, aplicadas a diferentes cuerpos (transparentes en distintas direcciones) y al mismo tiempo haciendo pasar un rayo de luz polarizada a través de ellas (...) se produjo un efecto sobre el rayo de luz polarizado, y por tanto la fuerza magnética y la luz se demuestra que están relacionadas entre sí".

La mayoría de los trabajos de Faraday pertenecen al campo de la Física, destacándose los que condujeron al descubrimiento de la inducción electromagnética y de la capacidad inductora específica. Sus trabajos sobre estos temas y sobre la electrólisis están compilados en su obra *Experimental Researches in Electricity*¸ publicada en 3 volúmenes en 1839 y sus investigaciones sobre temas de la Química están reunidas en su obra *Researches in Chemistry and Physics* también publicada en 1839.

8 – 14.- Las leyes de la electrólisis de Faraday.

La circulación de una corriente eléctrica a través de una solución de electrolito o de un electrolito fundido, suele provocar distintas transformaciones en ellos. En algunos casos se deposita sobre alguno o ambos electrodos una sustancia simple que se encontraba formando parte del compuesto electrolítico, en otros casos algún elemento presente en el electrolito se libera como sustancia simple gaseosa. Hay casos en que se disuelve el electrodo. También hay casos en que se descompone el solvente.

El conjunto de las transformaciones químicas originadas por la circulación de una corriente eléctrica a través de un electrolito fundido o una solución de electrolito se llama *electrólisis.*

En 1833, Michael Faraday, al estudiar los fenómenos de electrólisis encontró una relación entre la cantidad de electricidad que circula a través de la solución de electrolito y la masa de sustancia que reacciona en los electrodos por efecto de la corriente. Sean w_1, w_2, ... , w_n las masas que se depositan, liberan, disuelven, etc., por la acción de las respectivas cargas q_1, q_2, ... , q_n. Experimentalmente, Faraday encontró que

$$\frac{w_1}{q_1} = \frac{w_2}{q_2} = \cdots \frac{w_n}{q_n} = E_{EQ}$$

Esta ecuación constituye la expresión matemática de la llamada *Primera Ley de Faraday* cuyo enunciado es

La masa de sustancia que sufre una transformación química por el paso de una corriente eléctrica a través de un electrolito es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado.

E_{EQ} recibe el nombre de *equivalente electroquímico* del elemento que se transforma en el electrodo. Resulta evidente que el equivalente electroquímico de un elemento en un compuesto viene medido por la masa de dicho elemento que se transforma (en el electrodo) por la acción de la unidad de carga. Si bien en el Sistema Internacional se lo expresa en $kg\ C^{-1}$ usualmente se lo expresa en $g\ C^{-1}$.

Posteriormente, Faraday hizo circular una corriente eléctrica a través de varias cubas conectadas en serie, conteniendo cada cuba un electrolito distinto y encontró que las masas de las distintas sustancias simples que reaccionaban en los electrodos por el paso de esa corriente eran proporcionales a sus respectivos pesos equivalentes químicos[86]. Es decir, si por el paso de una corriente de q coulombs en la cuba 1 reacciona una masa w_1 de sustancia simple cuyo equivalente químico es Eq_1, y en la cuba 2 reacciona una masa w_2 de sustancia simple cuyo equivalente químico es Eq_2, ... , y en la cuba n reacciona una masa de sustancia simple w_n cuyo equivalente químico es Eq_n se verifica

$$\frac{w_1}{Eq_1} = \frac{w_2}{Eq_2} = \cdots \frac{w_n}{Eq_n}$$

Esta ecuación constituye la expresión matemática de la llamada *Segunda Ley de Faraday* cuyo enunciado es:

Las cantidades de sustancias distintas que se depositan, disuelven o liberan por el paso de la misma cantidad de electricidad son proporcionales a sus respectivos pesos equivalentes químicos.

En rigor, las dos leyes de Faraday se pueden compendiar en una sola. En efecto, si aplicamos la primera ley sucesivamente a dos elementos distintos cuando son producidos por dos cargas distintas q' y q'' tendremos

$$w_{E1} = E_{EQ1} \times q' \ \text{ y } \ w_{E2} = E_{EQ2} \times q''$$

y cuando en ambas electrólisis la cantidad de electricidad es la misma $q' = q'' = q$, la segunda ley nos autoriza a escribir

---

[86] El peso equivalente químico, también llamado “equivalente químico”, “masa de combinación” o “equivalente gramo” de un elemento en un compuesto es una magnitud que viene dada por la relación entre el átomogramo de dicho elemento y la valencia con la que actúa en el compuesto.

$$w_{E1} = E_{EQ1} \times q \text{ y } w_{E2} = E_{EQ2} \times q$$

de donde

$$\frac{Eq_1}{E_{EQ1}} = \frac{Eq_2}{E_{EQ2}} = constante$$

El equivalente químico de un elemento en un compuesto es una constante característica de ese elemento en ese compuesto. El equivalente electroquímico de un elemento, también lo es. Por lo tanto, el cociente entre ambos es una constante que tiene el mismo valor cualquiera sea el electrolito, es decir es una constante universal. Esa constante universal se ha determinado con bastante precisión, recibe el nombre de *constante de Faraday* y se la indica con la letra $\mathscr{F}$. Su valor es:

$$\mathscr{F} = \mathbf{96485.3365(21)}\ C/\ Eq$$

Las unidades surgen del hecho que el equivalente químico se expresa en gramos/equivalente químico y el equivalente electroquímico se expresa en gramos/coulomb.

Para los cálculos comunes, se suele aproximar el valor de $\mathscr{F}$ a 96500 *C/Eq*. En electricidad a 96500 coulomb se lo llama “faraday”.

Además de su valor práctico, las leyes de Faraday tienen un significado teórico de gran importancia. Por acción del campo eléctrico los cationes (iones con carga positiva) migran hacia el cátodo donde captan los electrones de la corriente eléctrica, mientras que los aniones (iones con carga negativa) se descargan en el ánodo. Si el proceso catódico o anódico de un equivalente gramo requiere el paso de un faraday de electricidad es razonable suponer que esta cantidad de electricidad representa la carga que lleva un equivalente gramo de cualquier ion. Si el ion tiene valencia z en un mol de iones habrá z equivalentes-gramo y, por lo tanto, su carga total será $z\,\mathscr{F}$ coulomb. Como en un mol de iones hay el número de Avogadro (N_A) iones, la carga que transporta cada ion será $z\mathscr{F}\,/N_A$.

La valencia z es un número entero: 1 para un ion monovalente, 2 para un ion divalente, 3 para un ion trivalente, etc. Esto implica que la carga que transporta cualquier ion es un múltiplo de una unidad de carga eléctrica fundamental cuyo valor es $\mathscr{F}\,/N_A$. Mediante un gran número de experimentos independientes se logró identificar esta unidad de carga eléctrica con el valor absoluto de la carga del electrón.

La determinación más precisa del número de Avogadro (en la escala de masas atómicas relativas que establece un valor 12,00000 para el ^{12}C) arroja un valor

$$N_A = \mathbf{6{,}022\ 141\ 29(27)} \times \mathbf{10^{23}}\ mol^{-1}$$

Por lo tanto, el valor absoluto de la carga del electrón es

$$\mathbf{96485.3365/6{,}022\ 141\ 29 \times 10^{23} = 1{,}602176565\ (35) \times 10^{-19}}\ C.$$

Faraday fue un excelente experimentador, que logró expresar sus ideas en un lenguaje claro y simple. Sus habilidades matemáticas, sin embargo, no abarcaban más allá del Álgebra elemental y la Trigonometría.

8 – 15.- Faraday y la inducción de corrientes eléctricas.

Faraday tenía ciertas falencias en los aspectos matemáticos de las teorías físicas, pero fue un extraordinario experimentador. Es particularmente interesante — y muestra su capacidad de diseñar experimentos — lo que, en 1832, publicó en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society, sobre las corrientes inducidas[87]:

1) El poder que tiene la tensión eléctrica, de generar en su vecindad un estado eléctrico opuesto, se expresa con el término general *Inducción*. Dado que este término fue bien recibido en el lenguaje científico, merece generalizarse en igual sentido, para expresar el poder que las corrientes eléctricas seguramente poseen, de producir un estado particular en los cuerpos de su vecindad inmediata que, de otra manera resultarían indiferentes. Con este significado es que propongo emplearlo en el presente trabajo.

2) Ciertos efectos de la inducción de corrientes eléctricas ya han sido examinados y descritos, como por ejemplo, los efectos de imantación, los experimentos de Ampère consistentes en acercar un disco de cobre a una espiral plana, su reproducción con electroimanes de los extraordinarios experimentos de Arago y algunos otros. Sin embargo, parecía improbable que estos pudieran ser todos los efectos que la inducción por corriente eléctrica es capaz de producir, especialmente si se tiene en cuenta que, exceptuando al hierro, en la mayoría de los cuerpos desaparecen, mientras que infinidad de cuerpos que muestran evidentes fenómenos de inducción por tensión eléctrica, no han sido aún estudiados respecto de la inducción por corrientes eléctricas.

3) Además, aunque adoptemos la hermosa teoría de Ampère, u otra, y a pesar de cualquier reserva mental que hagamos, resultaría muy extraño — estando cada corriente acompañada por la correspondiente intensidad de su acción magnética perpendicular a la dirección de la corriente— que, colocando dentro de la esfera de esta acción, buenos conductores de la electricidad, no se produjeran en ellos corrientes inducidas, o no revelaran algún efecto sensible, equivalente en su fuerza, a tal corriente.

4) Estas consideraciones con sus consecuencias y la esperanza de obtener electricidad a partir del magnetismo ordinario, me han estimulado continuamente para investigar experimentalmente el efecto inductor de las corrientes eléctricas. Últimamente he logrado resultados positivos que no sólo colmaron mis expectativas sino que también obtuve una clave que me permitió dar una explicación completa del fenómeno magnético de Arago y descubrir un nuevo estado que debe tener, probablemente, gran influencia sobre algunos de los efectos más importantes de las corrientes eléctricas.

5) Me propongo describir estos resultados, no como han sido obtenidos, sino de manera de proporcionar una reseña de conjunto lo más concisa posible.

---

[87] **Faraday, M.**, (**1832**):*On the induction of Electric Currents* Experimental Researches in Electricity, Vol. I. 1ª serie.

Inducción de corrientes eléctricas

6) Unos 26 pies de alambre de cobre de una vigésima de pulgada de diámetro fueron enrollados en forma de hélice alrededor de un cilindro de madera, estando las espiras del alambre impedidas de tomar contacto mediante la intercalación de hilos retorcidos. Esta hélice fue cubierta con tela de algodón colocando sobre ella un segundo alambre enrollado sobre ella de la misma manera que el anterior. De este modo, fueron superpuestas doce hélices de alrededor de 27 pies de alambre, estando enrolladas todas en la misma dirección. Las primera, tercera, quinta, séptima, novena y undécima de estás hélices fueron conectadas entre sí uniendo sus extremos de manera de formar una sola hélice. Las restantes fueron conectadas de manera similar, obteniéndose así dos hélices generales, estrechamente intercaladas y en la misma dirección, cada una de ellas de 155 pies de largo, sin tocarse en parte alguna.

7) Una de estas hélices fue conectada a un galvanómetro y la otra a una batería voltaica cargada con diez pares de placas cuadradas de cuatro pulgadas de lado, siendo dobles las de cobre. Sin embargo, no se pudo observar la más leve desviación de la aguja del galvanómetro.

8) Se construyó una hélice compuesta similar, que constaba de seis alambres de cobre y seis alambres de hierro dulce. La hélice de hierro un alambre de 214 pies y la de cobre de 208 pies. Pero al pasar la corriente a través de la hélice de cobre o la de hierro, en el galvanómetro no se podía observar efecto alguno.

9) En este, y muchos experimentos análogos, no hubo diferencia alguna en el efecto de cualquier índole entre el hierro y otros metales.

10) Un alambre de cobre de 203 pies fue enrolladlo alrededor de un gran bloque de madera, otro similar de 203 pies fue intercalado en forma de hélice entre las espiras de la primer alambre impidiendo el contacto metálico entre las partes mediante un cordel. Una de estas hélices fue conectada a un galvanómetro y la otra a una batería muy bien cargada con cien pares de cuadradas placas, cada una de cuatro pulgadas de lado, siendo dobles las de cobre. Al hacer el contacto, en el galvanómetro se produjo un efecto repentino y muy débil, produciéndose también un efecto leve similar cuando se interrumpió el contacto con la batería. Pero mientras la corriente voltaica continuaba atravesando la hélice, no se podía observar ningún fenómeno galvánico ni algún efecto de inducción sobre la otra hélice, a pesar de que la energía que suministraba la batería era muy grande, lo que fue comprobado por el calentamiento de la hélice por la que circulaba corriente y por el intenso brillo de la descarga en los terminales de carbón.

11) La repetición de estos ensayos con una batería de 120 pares de placas no produjo otros efectos, pero se observó, al igual que en el caso anterior, una leve desviación de la aguja en el momento de establecer la conexión que ocurría en la misma dirección y una leve deflexión igual en el momento de cortar el contacto, pero en la otra dirección. Estos efectos ocurrían al usar las primeras hélices (6, 8).

12) Los resultados que en esa época había obtenido con imanes, me indujeron a pensar que la corriente de la batería, en realidad producía, a través del alambre, otra corriente similar a través del otro alambre, pero que este efecto sólo duraba un instante y que se parecía más a la onda eléctrica provocada por la descarga de una botella de Leyden, que a la corriente de una batería voltaica y que, por lo tanto, debería ser capaz de imantar una aguja de acero, aunque ella afectara escasamente al galvanómetro.

13) Esta hipótesis fue corroborada, pues, al sustituir el galvanómetro por una pequeña hélice hueca que rodeaba a un tubo de vidrio en el que se introdujo una aguja de acero que, como antes, hacía contacto entre la batería y el alambre inductor (7,10) y retirando la aguja antes de interrumpir el contacto con la batería, la aguja se encontraba imantada.

14) Cuando primero se establecía el contacto con la batería y después se introducía una aguja no magnetizada en la pequeña hélice indicadora (13), al suprimir el contacto con la batería, la aguja de encontraba magnetizada en un grado aparentemente similar al anterior, pero con los polos invertidos.

15) Los mismos efectos ocurrieron cuando se usaron las grandes hélices compuestas descritas al principio (6,8).

16) Cuando la aguja no magnetizada fue colocada en la hélice indicadora, antes de establecer el contacto del alambre inductor con la batería, permaneciendo en esta posición hasta que el contacto era suprimido, se exhibía poco magnetismo o nada, el primer efecto había sido casi neutralizado por el segundo (11, 14). La fuerza de la corriente inducida al establecer el contacto se mostraba siempre superior a aquella de la corriente inducida al cortarlo; por consiguiente, si el contacto se cerraba y abría sucesivamente muchas veces mientras la aguja permanecía en la hélice indicadora, ella resultaba magnetizada como si sólo hubiese obrado sobre la misma la corriente inducida al establecer el contacto. Este efecto podría deberse a la acumulación (así se la llama) en los polos de la pila no conectada rindiendo, al hacer el primer contacto, una corriente más potente que la que circula cuando luego se interrumpe el contacto.

17) Si el circuito entre la hélice, o el alambre, bajo inducción y el galvanómetro o la espiral indicadora no se cerraba antes de establecer o interrumpir la conexión entre la batería y el alambre inductor, entonces no se percibía efecto alguno en el galvanómetro. De este modo, si primero se establecían las comunicaciones de la batería y luego se conectaba el alambre bajo inducción con la hélice indicadora, no se observaba fuerza magnética alguna. Pero manteniendo aún estos últimos contactos, si se interrumpían los contactos con la batería, se magnetizaba la hélice, pero formando un imán de segunda clase (14), vale decir, cuyos polos indican una corriente en la misma dirección que la corriente de la batería de la que siempre se induce por esta corriente al cesar.

18) En los experimentos precedentes, los alambres se colocaron muy cerca entre sí, y cuando se deseaba obtener el efecto inductivo, se establecía el contacto del alambre inductor con la batería, pero al suponer que el efecto particular sólo se produce en los momentos de cerrar o abrir el contacto, la inducción se realizó de otro modo. Un alambre de cobre de varios pies de largo, fue desplegado en forma de anchos zigzags, semejantes a la letra W, sobre la superficie de una tabla extensa; un segundo alambre se extendió en forma similar sobre una segunda tabla, de modo que al aproximarlos entre sí los alambres podían tocarse en todos lados a menos que entre ellos se interpusiera una hoja de papel grueso. Uno de estos alambres fue conectado a un galvanómetro y el otro a una batería voltaica. Entonces se movía el primer alambre hacia el segundo y, a medida que se aproximaba, la aguja del galvanómetro se deflectaba. Al alejarse, la aguja del galvanómetro se desviaba en sentido opuesto. Acercando y alejando los alambres al mismo ritmo que las oscilaciones de la aguja, estas se tornaban más amplias, pero cuando se dejaba de mover los alambres, es decir, dejaban de acercarse o alejarse, la aguja del galvanómetro volvía a su posición normal.

19) Cuando los alambres se aproximaban, la corriente inducida se producía en dirección *contraria* a la corriente inductora, mientras que cuando los alambres eran alejados, la corriente inducida tenía la

misma dirección que la corriente inductora. Cuando los alambres permanecían en posiciones fijas, no había corriente inducida.

20) Al introducir un pequeño dispositivo voltaico en el circuito, entre el galvanómetro (10) y su hélice, o alambre, como para producir una deflexión de 30 - 40º de la aguja, y conectar luego la batería de cien pares de placas al alambre inductor, ocurría una acción instantánea como antes (11) pero la aguja del galvanómetro volvía inmediatamente a ocupar su lugar y lo mantenía inalterado a pesar del continuo contacto del alambre inductor con la batería. Esto ocurría cualquiera fuese la forma en que se hicieran los contactos (33).

21) De esto, parecería que las corrientes colaterales, que circulan en la misma dirección o en la opuesta, no ejercen una sobre otra un poder permanente de inducción que afecte su cantidad o tensión.

22) No pude obtener ningún efecto sobre la punta de la lengua, ni chispa, ni calentamiento de un alambre muy fino o de carbón que pudiera indicar el pasaje de corriente eléctrica a través del alambre bajo inducción; tampoco pude obtener efecto químico alguno, a pesar de que los contactos con soluciones metálicas, y de otras clases, se abrieron y cerraron alternadamente con los de la batería de modo que el segundo efecto de la inducción no se opusiera o neutralizara al primero (13,16).

23) Esta deficiencia del efecto no se debe a que la corriente eléctrica inducida no puede atravesar los fluidos sino, quizás, a su corta duración y débil intensidad. Pues al introducir dos grandes placas de cobreen el lado inducido del circuito (20) estando las placas sumergidas en salmuera, pero impedidas de entrar en contacto entre sí mediante un paño interpuesto, el efecto en el galvanómetro indicador ocurrió como antes. La electricidad inducida pudo también pasar a través de una cubeta voltaica (20). Sin embargo, cuando la cantidad de fluido interpuesto se redujo a una gota, el galvanómetro no dio indicación alguna.

24) Los intentos de obtener efectos similares mediante el empleo de alambres portadores de electricidad ordinaria, dieron resultados dudosos. Se recurrió a una hélice compuesta parecida a la ya descrita, con ocho hélices elementales (6). Cuatro de esas hélices tenían sus extremos similares atados con alambre, y las dos terminales generales así obtenidas fueron conectadas con la pequeña hélice magnetizante, que contenía una aguja no imantada (13). Las otras cuatro hélices fueron reunidas en forma similar, pero sus extremos se conectaron a una botella de Leyden. Al pasar la descarga, la aguja mostró estar imantada, pero podía ser probable que una parte de la electricidad de la botella de Leyden hubiera pasado por la pequeña hélice magnetizando así a la aguja. En realidad, no había razón alguna para esperar que la electricidad de una botella, poseyendo una gran tensión no se difundiría a través de la materia metálica interpuesta entre los revestimientos.

25) Todavía no puede deducirse que la descarga de la electricidad ordinaria a través de un alambre, no produzca fenómenos análogos a aquellos que surgen de la electricidad voltaica; pero, como parece imposible separar los efectos producidos en el momento en que comienza a pasar la descarga, de los efectos iguales y de sentido contrario producidos cuando cesa el paso de la misma (16) dado que en el caso de la electricidad ordinaria estos períodos son simultáneos, puede ser escasa la esperanza de percibirlos en esta clase de experimentos.

26) Luego es evidente que las corrientes de electricidad voltaica presentan fenómenos de inducción bastante análogos a los producidos por la electricidad de tensión, a pesar de que, como se verá más ade-

lante, existen entre ellas muchas diferencias. El resultado es la producción de otras corrientes (pero que son sólo momentáneas) paralelas o tendientes al paralelismo con la corriente inductora. Con respecto a los polos de la aguja imantada en la hélice indicadora (13,14) y a las desviaciones de la aguja galvanométrica (11), se ha observado, en todos los casos, que la corriente inducida, producida por la primera acción de la corriente inductora tenía dirección contraria a la de esta última, pero que la corriente producida por la cesación de la corriente inductora tenía la misma dirección (19). A fin de evitar perífrasis, propongo llamar a esta acción de la corriente derivada de la batería voltaica, *inducción volta-eléctrica.*

(Los números entre paréntesis corresponden a las figuras incluidas en la Memoria)

8 – 16.- La contribución de Gauß a la teoría de la electricidad.

Johann Carl Friedrich Gauß nació en Braunschweig, en la Baja Sajonia, el 30 de abril de 1777. Era miembro de una familia muy pobre, cuyos padres sólo tenían instrucción rudimentaria. Desde pequeño mostró cualidades intelectuales muy desarrolladas, se dice que aprendió a leer y a efectuar las operaciones aritméticas elementales sin ayuda. Con un maestro rural pulió su gramática y ortografía y desarrolló sus conocimientos de aritmética. En la adolescencia, el Duque de Braunschweig, enterado de su capacidad intelectual, decidió solventar todos los gastos inherentes a su educación , por lo que Gauß, luego de completar los estudios secundarios, ingresó al Collegium Carolinum (que luego sería la Technische Universität Braunschweig) donde estudió matemáticas con ahínco, además de aprender latín y griego, lenguas que dominó perfectamente.

En 1799, presentó su tesis doctoral en la que desarrolló la demostración del teorema fundamental del álgebra. Dos años después, publicó *Disquisitiones arithmeticæ*[88] que había comenzado a escribir en 1798, donde recopiló los trabajos de Fermat, Euler, Lagrange y otros matemáticos sobre teoría de los números a los que agregó investigaciones propias.

Fig.8.24. J.C.F. Gauß (1777 –1855)

En 1809, fue nombrado Director del *Königliche Sternwarte Göttingen* (Observatorio Real de Göttingen) y poco después publicó *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis Solem ambientium*[89], libro en el que desarrolló la matemática para el cálculo de las orbitas planetarias.

En 1835, Gauß estableció la ley de Gauß, o teorema de Gauss, que es una de las contribuciones más importantes al electromagnetismo, y de ella derivan dos de las ecuaciones fundamentales de la teoría electromagnética de Maxwell. Esta ley establece que el flujo de un campo

[88] Apud Gerhard Fleischer, Jun. 1801. Lipsiæ.
[89] Perthei - Besser, 1809, Hamburg.

gravitatorio a través de un superficie cerrada es proporcional a la masa que atraviesa esa superficie y el flujo de un campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la cantidad de líneas de fuerza del campo eléctrico que atraviesa esa superficie. La superficie cerrada empleada para calcular el flujo del campo eléctrico se denomina superficie gaussiana. En términos matemáticos

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

En 1827, publicó *Disquisitiones generales circa superficies curvas*[90] y en 1844, *Untersuchungen über Gegenstände der Höheren Geodäsie.* dos tratados publicados en el segundo tomo de la *Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.

Fig.8.25. H.F.E. Lenz (1804 - 1865)

En 1805, Gauß se casó en con Elizabeth Rosina Osthoff, con quien tuvo tres hijos: en 1806 Carl Joseph, en 1808, Wilhelmina y en 1809, Louis que falleció prematuramente en 1810. Su esposa falleció en 1809 y al año siguiente volvió a casarse con la amiga de Elizabeth, Friedericka Wilhelmine Waldeck, que falleció en 1831. Con esta última tuvo tres hijos: Eugene en 1811, Wilhelm en 1813 - 1879) y Henriette en 1816.

Gauß falleció en Göttingen el 23 de febrero de 1855.

.

8 – 17.- Heinrich Friedrich Emil Lenz.

Nació el 12 de febrero de 1804, en Tartú[91], entonces parte del imperio ruso y, actualmente, Estonia. tras completar sus estudios secundarios, en 1820 ingresó a la Universidad de Tartu, donde estudió Física y Química. En 1823, participó como geofísico de la expedición del naturalista Otto von Kotzebue alrededor del mundo, para estudiar las condiciones climáticas del recorrido y las propiedades físicas del agua de mar. A su regreso, en 1826, fue nombrado profesor en la Universidad de San Petersburgo, donde entre 1840 y 1863, fue Decano del Departamento de Física y Matemáticas. También fue miembro de la Academia de Ciencias de esa ciudad.

En 1831 comenzó sus investigaciones sobre electricidad. Estudió el efecto del paso de una corriente eléctrica a través de un conductor con la liberación de calor vinculando el aumento de temperatura asociado a ese fenómeno con la resistencia eléctrica del conductor, que más tarde James Prescott Joule lo expresaría como una ley que lleva su nombre, según la cual, la potencia (P) disi-

[90] Typis Dieterichianis, 1828, Gottingae.
[91] En esa época, bajo el Imperio ruso, la ciudad se llamaba Dorpat. Hoy la ciudad está en la República de Estonia.

pada por el paso de una corriente es directamente proporcional a la resistencia (R) del conductor y al cuadrado de la intensidad de corriente (i) que circula: $P = Ri^2$.

Para generar una corriente eléctrica en un medio material, se requiere efectuar un trabajo mecánico o energía química adecuada. De modo que la corriente producida implica una resistencia del medio ante tal cambio. En virtud de ello, en 1833, Lenz postuló que *el sentido de una corriente inducida es tal que tiende a oponerse a la causa que la provoca*, expresión conocida como Ley de Lenz. Así, por ejemplo, al acercar un imán a una espira, la corriente inducida que en ella aparece tiene un sentido de circulación tendiente a repeler la acción del imán.

También trabajó sobre la ley de inducción de Faraday por lo que en algunos textos se la llama Ley de Faraday -Lenz. En 1864, publicó un Manual de Física en ruso.

Falleció en Roma, el 10 de febrero de 1865.

Bibliografía

Coulomb, C. A., *Théorie des machines simples* (**1821**), impr. Bachelier, Paris. Réimpr. facsimile éd. Blanchard, 2002,ISBN 978-2-85367-218-4

Coulomb, C.A., (**1776**) : *Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture*. Editorial: Paris: De l'Imprimerie Royale.

Stewart G., (**1971**): *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*, Princeton, Princeton University Press,

Provost, **S**. « Charles Coulomb. La précision de l'ingénieur », en *Aventures scientifiques. Savants en Poitou-Charentes du Plantilla:Sp-* (J. Dhombres, dir.), Les éditions de l'Actualité Poitou-Charentes, Poitiers, **1995**, Plantilla: P. ISBN 978-2-911320-00-2

Accademia delle Scienze dell'Instituto di Bologna, (**1841**): *Opere Edite e Inedite dell Professore Luigi Galvani*, Emilio Dall'Olmo, Bologna.

von Lamont, J., (**1855**): *Denkrede auf die Akademiker Dr. Thaddäus Siber und Dr. Georg Simon Ohm.* Verl. der Königliche Akademie, München.

IX EL DERROCAMIENTO DE LA TEORÍA CORPUSCULAR DE LA LUZ

9 – 1.- Thomas Young y su concepción ondulatoria de la luz.

Thomas Young, nació en Milverton, en Somersershire, el 13 de junio de 1773. Fue el hijo mayor de los diez que tuvieron Thomas y Sarah Young. Su madre, de apellido Davis fue la sobrina de un eminente médico londinense, el Dr. Richard Brocklesby. Los padres de Thomas eran miembros de la Society of Friends, y firmes observantes de los principios de esa sociedad cuáquera y, en esos principios educaron a sus hijos.

Fig. 9.1. T. Young (1773 – 1829)

La mayor parte de su infancia la pasó en Minihead, Somersetshire, en la casa de su abuelo materno y, según contó en su autobiografía, aprendió a leer a los dos años y leyó la Biblia dos veces antes de cumplir los cuatro años, (aunque también leyó libros para niños como Los viajes de Gulliver) y a los seis, comenzó a estudiar la gramática latina. Cursó sus estudios primarios en varias escuelas siendo un lector incansable de obras tan diversas como las de Virgilio, Cicerón, Introducción a la filosofía newtoniana de Ryland o la Westminster Greek Gramar. En esa época se interesó también en la Botánica, construyó un telescopio y estudió Óptica, fluxiones y la Química a través de las obras de Joseph Priestley. También se ocupó de estudiar idiomas, italiano, francés hebreo y las gramáticas caldea, siria y samaritana que, años más tarde le servirían para descifrar los jeroglíficos egipcios y, en la adolescencia, ya dominaba catorce idiomas. En esa época se interesó también por las Matemáticas "devorando" los seis libros de Euclides en menos de una semana y estudiando profundamente álgebra, trigonometría y fluxiones. También analizó en detalle los *Principia* de Newton.

En el otoño de 1792, se alojó en Westminster, para perfeccionar sus estudios sobre Anatomía y Medicina asistiendo a las clases del Dr. Baillie y a la Escuela de Anatomía del Dr. Hunter. Y al año siguiente ingresó como alumno al St. Bartholomew's Hospital. En el curso de sus estudios médicos se interesó especialmente por la estructura anatómica del ojo considerado como instrumento de la visión analizando como las imperfecciones anatómicas incidían en los defectos de la vista. En esa época decidió investigar la manera en que el ojo se adaptaba para ver objetos cercanos y lejanos sin ninguna confusión. En el siglo XVII, Anton van Leewenhoeck había descripto minuciosamente y delineado la estructura fibrosa observable en los ojos de varios animales y más tarde Henry Pemberton demostró que esas fibras eran músculos, y supuso que mediante su acción cambiaba la forma del ojo adaptándolo para la visión cercana o la lejana. Young, que conocía la hipótesis de Pemberton pero no había leído sus trabajos, analizó la anatomía del ojo de un buey recién faenado y describió con todos los detalles la estructura muscular de esas fibras, presentando una Memoria ante la Royal Society el 30 de mayo de 1793, la que fue publicada en las Transactions ese mismo año. Por ese trabajo, al año siguiente, fue elegido Fellow de la Royal Society.

En octubre de 1794, presentó ante la Linnæan Society una descripción de una nueva opercularia —una planta australiana — trabajo que fue publicado en las Transactions de esa sociedad en 1797 y por el cual fue electo Fellow de esa sociedad. También en 1794, publicó su *Calligraphia Græca* donde detalló la forma de expresar las letras del alfabeto griego en las distintas combinaciones gramaticales y la *Pœcilographia Græca*, analizando varios alfabetos y contracciones encontrados en manuscritos griegos de diversas épocas.

A fines de 1794 ingresó a la Edinburgh School of Medicine. Luego de un año de estudios de Medicina, a fines de 1795 viajó a Göttingen donde el 2 de noviembre comenzó nuevos cursos de Medicina y estudios sobre la historia de los estados europeos, un curso sobre Historia de las Artes antiguas, dictado por Christian Gottlob Heyne y un curso de Física dictado por Georg Christoph Lichtenberg.

El 30 de abril de 1796, luego de aprobar el examen de su cursada que incluía Física práctica, Cirugía, Anatomía, Química, Práctica Médica y Fisiología,[1] defendió su tesis "*De Corporis Humani viribus conservatricibus*" y expuso una monografía, con lo que, en julio, obtuvo su diploma de Doctor en Física, Cirugía y Obstetricia de la universidad de Göttingen.

En marzo de 1797, al regresar a Londres, se enteró que el diploma otorgado por la Edinburgh School of Medicine, carecía de validez para la práctica médica, ya que el Colegio de Médicos de Londres solo daba validez a los títulos de médico otorgados por las universidades de Oxford y de Cambridge, por lo que se matriculó en el Emmanuel College de la University of Cambridge donde obtuvo su Bachelor of Physics y en 1803 su Bachelor en Medicina. Dos años después obtuvo su doctorado en Medicina.

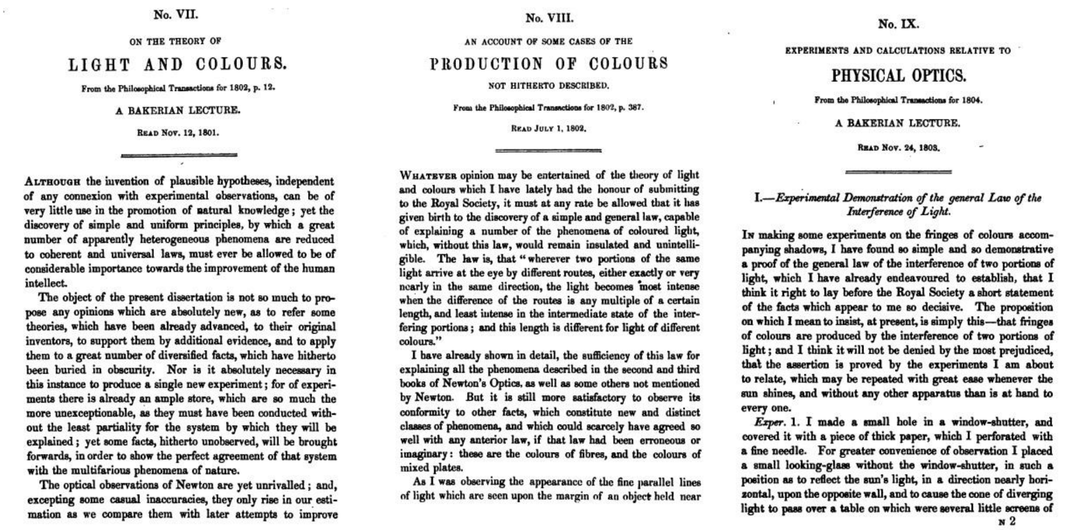
Estando en Cambridge, en el verano de 1799 realizó investigaciones experimentales que el 16 de enero de 1800 presentó ante la Royal Society bajo el título *Outlines and Experiments Respecting Sound and Light* en la que llegó a importantes conclusiones sobre la propagación del sonido y la interferencia de las ondas sonoras que lo llevarían después al principio de la interferencia de las ondas luminosas.

El 12 de noviembre de 1801, presentó ante la Royal Society su primera memoria "*On the Theory of Light and Colours*"[2] en donde expuso su teoría acerca de que la luz es una ondulación en un medio elástico, dado que 1) Su velocidad en el mismo medio es siempre igual, 2) todas la refracciones van acompañadas de una cierta reflexión, 3) No hay razón para esperar que ese tipo de vibración di-

[1] Young contó en sus memorias que, para matizar el examen que duraba más de 5 horas, le fueron servidos, dulces, tortas y vino.

[2] *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1802, **Vol. 92**, 12 – 48.

verja por igual en todas las direcciones y es probable que diverja en un pequeño grado en cada dirección, 4) La dispersión de rayos de diferentes colores no es más incompatible con este sistema que con la opinión común que sólo le asigna la causa nominal de “diferentes atracciones electivas”, 5) La refracción y la reflexión son igualmente explicables bajo las dos suposiciones, 6) La inflexión se puede explicar mejor mediante esta teoría, 7) Todos los fenómenos de la formación de distintos colores sobre películas delgadas que, en realidad, son ininteligibles según la hipótesis común, admiten una muy completa y simple explicación mediante esta suposición. La analogía que aquí se indica superficialmente, se hará pública, próximamente, con más detalle y se extenderá a los colores en placas de mayor espesor y las franjas producidas por la inflexión, ofrecen, a partir de los propios experimentos elaborados por Newton, un argumento muy convincente a favor de este sistema. A esta memoria le siguió otra: “*An Account of some Cases of the Production of Colours*”[3] que fue leída ante la Royal Society el 1º de julio de 1802 y una tercera titulada “*Experiments and Calculations relative to Physical Optics*”,[4] leída el 24 de noviembre de 1803. La primera y la última de estas memorias recibió del Council of the Royal Society, el honor de ser seleccionadas como *Bakerian Lectures* que le daban al autor el privilegio de recibir una retribución monetaria.


No. VII.

ON THE THEORY OF

LIGHT AND COLOURS.

From the Philosophical Transactions for 1802, p. 12.

A BAKERIAN LECTURE.

Read Nov. 12, 1801.

Although the invention of plausible hypotheses, independent of any connexion with experimental observations, can be of very little use in the promotion of natural knowledge; yet the discovery of simple and uniform principles, by which a great number of apparently heterogeneous phenomena are reduced to coherent and universal laws, must ever be allowed to be of considerable importance towards the improvement of the human intellect.

The object of the present dissertation is not so much to propose any opinions which are absolutely new, as to refer some theories, which have been already advanced, to their original inventors, to support them by additional evidence, and to apply them to a great number of diversified facts, which have hitherto been buried in obscurity. Nor is it absolutely necessary in this instance to produce a single new experiment; for of experiments there is already an ample store, which are so much the more unexceptionable, as they must have been conducted without the least partiality for the system by which they will be explained; yet some facts, hitherto unobserved, will be brought forwards, in order to show the perfect agreement of that system with the multifarious phenomena of nature.

The optical observations of Newton are yet unrivalled; and, excepting some casual inaccuracies, they only rise in our estimation as we compare them with later attempts to improve

No. VIII.

AN ACCOUNT OF SOME CASES OF THE

PRODUCTION OF COLOURS

NOT HITHERTO DESCRIBED.

From the Philosophical Transactions for 1802, p. 387.

Read July 1, 1802.

Whatever opinion may be entertained of the theory of light and colours which I have lately had the honour of submitting to the Royal Society, it must at any rate be allowed that it has given birth to the discovery of a simple and general law, capable of explaining a number of the phenomena of coloured light, which, without this law, would remain insulated and unintelligible. The law is, that “wherever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is different for light of different colours.”

I have already shown in detail, the sufficiency of this law for explaining all the phenomena described in the second and third books of Newton's Optics, as well as some others not mentioned by Newton. But it is still more satisfactory to observe its conformity to other facts, which constitute new and distinct classes of phenomena, and which could scarcely have agreed so well with any anterior law, if that law had been erroneous or imaginary: these are the colours of fibres, and the colours of mixed plates.

As I was observing the appearance of the fine parallel lines of light which are seen upon the margin of an object held near

No. IX.

EXPERIMENTS AND CALCULATIONS RELATIVE TO

PHYSICAL OPTICS.

From the Philosophical Transactions for 1804.

A BAKERIAN LECTURE.

Read Nov. 24, 1803.

I.—*Experimental Demonstration of the general Law of the Interference of Light.*

In making some experiments on the fringes of colours accompanying shadows, I have found so simple and so demonstrative a proof of the general law of the interference of two portions of light, which I have already endeavoured to establish, that I think it right to lay before the Royal Society a short statement of the facts which appear to me so decisive. The proposition on which I mean to insist, at present, is simply this—that fringes of colours are produced by the interference of two portions of light; and I think it will not be denied by the most prejudiced, that the assertion is proved by the experiments I am about to relate, which may be repeated with great ease whenever the sun shines, and without any other apparatus than is at hand to every one.

Exper. 1. I made a small hole in a window-shutter, and covered it with a piece of thick paper, which I perforated with a fine needle. For greater convenience of observation I placed a small looking-glass without the window-shutter, in such a position as to reflect the sun's light, in a direction nearly horizontal, upon the opposite wall, and to cause the cone of diverging light to pass over a table on which were several little screens of

N 2

Figura 9.2. Las tres principales publicaciones de T. Young sobre la teoría ondulatoria de la luz.

La publicación de estas tres memorias constituyó un jalón muy importante en la Historia de la Óptica.

En el año 1801, Thomas Young aceptó el cargo de Profesor de Filosofía Natural en la Royal Institution, que había sido establecida el año anterior y dirigida por Benjamin Thomson, el Conde Rumford. Las discrepancias de este con el Consejo de Administración lo llevaron a renunciar y la dirección del Journal de la institución fue encomendada conjuntamente a Thomas Young y Humphry Davy, a la sazón Profesor de Química.

[3] *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1802, **Vol. 92**, 387 – 397.

[4] *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1804, **Vol. 94**, 1 – 16.

Young dictó su primera conferencia el 20 de enero de 1802 y, a lo largo del año, completó treinta y una conferencias. Al año siguiente, al introducir nuevos temas, el número de conferencias aumentó a sesenta. Estas conferencia se publicaron cuatro años más tarde bajo el título "*A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*"[5], obra que está dividida en tres partes: la primera comprende Mecánica teórica y práctica, la segunda: Hidrostática, Hidrodinámica, Acústica y Óptica; y la tercera: Astronomía, Teoría de las mareas, Propiedades de la materia, Cohesión, Electricidad y Magnetismo, Teoría del Calor y Climatología. Fue el primer libro de Física publicado en Inglaterra.

En el año 1802, Thomas Young fue nombrado Foreign Secretary of the Royal Society, cargo que conservó hasta su muerte, a pesar que en 1812, al quedar vacante la Secretaría de la institución, Sir Joseph Banks se la ofreció pero él rechazó el ofrecimiento.

La objeción más seria que Newton presentó ante la teoría ondulatoria está dada en el Proposición XLII de la sección VIII del Libro II de los *Principia*: "*Todo movimiento propagado por un fluido diverge de un progreso rectilíneo en los espacios inmóviles*" por lo que un movimiento que parte desde un punto terminará propagándose en todas direcciones. Tal es el caso de una ondulación en un fluido incompresible, como el agua, cuando la fuerza que la impulsa es la de la gravedad o el caso de las ondas sonoras que se transmiten a través de un medio de moderada elasticidad. En el escolio siguiente concluye: *Dado que la luz se propaga en línea recta es evidente que no puede consistir en la acción expresada en las Proposiciones* XLI *y* XLII… En la *Cuestión* 28, del Libro III de su *Óptica*, Newton escribió: *¿No son erróneas todas las hipótesis en las cuales la luz se supone que consiste en presión o movimiento propagados en un medio fluido? Porque, hasta ahora, en todas esas hipótesis el fenómeno de la luz ha sido explicado mediante la suposición que ella surge de la modificación de los rayos; lo que es una suposición errónea.*

Si la luz consiste sólo en presión propagada sin un movimiento real, no sería capaz de agitar y calentar los cuerpos que la refractan y las reflejan. Si consistiera en movimiento que se propaga a todas las distancias en un instante, requeriría en cada momento una fuerza infinita en cada partícula luminosa para generar tal movimiento. Y si consistiera en presión o movimiento propagados o en un instante o en el tiempo, se curvaría en la sombra; ya que la presión o el movimiento no se puede propagar en línea recta en un fluido, más allá de un obstáculo que detiene parte del movimiento, pero se doblaría y expandiría en todas direcciones del quiescente medio que yace más allá del obstáculo. La gravedad impulsa hacia abajo, pero la presión del agua, que surge de la gravedad, impulsa hacia todas direcciones con igual fuerza, y se propaga tan rápidamente y con más fuerza hacia los costados que hacia abajo y tanto a través de pasos encorvados como estáticos. Las ondas sobre la superficie del agua estancada, al pasar por un obstáculo amplio que detiene parte de ellas, giran después y se dilatan gradualmente en el agua quieta detrás del obstáculo. Las ondas, pulsos o vibraciones del aire, que consisten en sonido, se desvían manifiestamente, aunque no tanto como las ondas del agua. Una campana o un cañón puede ser oído aunque estén detrás de una colina que intercepta la visión del cuerpo que emite el sonido, y el sonido se propaga tan rápi-

[5] **Young, T.**, (**1807**): *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, in two Volumes, Joseph Johnson, London.

damente a través de cañerías sinuosas como rectas. Pero nunca se ha conocido que la luz siga pasajes sinuosos ni que se doble en la sombra. Así las estrellas fijas dejan de verse por la interposición de alguno de los planetas."

Young combatió estas conclusiones mediante varios argumentos. Dudó de la validez de la demostración de la proposición XLII sobre la cual se basaba principalmente, la opinión de Newton. Pero sus objeciones se refirieron menos al razonamiento en el cual Newton se apoyó que a las consecuencias a las que ese razonamiento conduce. También, remarcó que el resultado de observaciones posteriores y más precisas demostraron que el sonido no tiene la misma intensidad cuando se difunde en espacios perfectamente homogéneos que al pasar por esquinas y obstáculos;[6] y que su fácil propagación a través de tubos curvados se debe más a reflexiones en sus superficies que a la facilidad perfecta de su difusión. Si, por lo tanto, cualquier reducción sensible de esta tendencia difusiva es observable en las ondulaciones de un medio como el aire, cuánto más debe ser en el éter, cuyas ondulaciones constituyen la luz, cuya elasticidad es incomparablemente mayor.

Esta fue la conclusión a la que arribó Christiaan Huygens en 1678, que volcó en su tratado sobre la luz[7] y que le permitió que Agustin-Jean Fresnel, — al relacionarla con el principio de interferencia de la luz—, dar una respuesta completa a la más potente de las objeciones que se le hicieron a la teoría ondulatoria de la luz.

En sus memorias, Young describió de la siguiente manera el razonamiento que lo llevó a reconocer su principio:

"*Fue en mayo de* 1801 *que, al reflexionar sobre los hermosos experimentos de Newton, descubrí una ley que me parece dar cuenta de una mayor variedad de fenómenos interesantes que cualquier otro principio óptico que se haya dado a conocer aún. Intentaré explicar esta ley mediante una comparación: Supongamos que varias ondas de agua iguales se mueven sobre la superficie de un lago estancado, con una cierta velocidad constante y que entran en un estrecho canal que sale del lago. Supongamos entonces que otra causa similar pudo haber excitado otra igual serie de ondas, que llegan al mismo canal, con la misma velocidad, y al mismo tiempo que la primera. Ninguna de las dos series destruirá a la otra, pero sus efectos se combinarán: si ingresan al canal de tal manera que si las elevaciones de una serie coinciden con las de la otra, deberán producir juntas una serie de elevaciones conjuntas mayores; pero si las elevaciones de una serie están situadas de manera que se corresponden a las depresiones de la otra, deberán llenar exactamente esas depresiones,*

---

[6] Young, T. *Works.* T. 1 p.74.

[7] "…De este modo, he mostrado cómo podemos concebir que la luz se propague sucesivamente por ondas esféricas, y cómo es posible que esta extensión se realice con una velocidad tan grande, que los experimentos y las observaciones celestiales muestran. Donde se debe señalar, además, que aunque las partes del éter se suponen en un movimiento continuo, (debido a que hay muchas razones para ello) la propagación sucesiva de las ondas no se puede evitar, porque no consisten en el transporte de estas partes, sino sólo en una ligera sacudida, que no pueden dejar de comunicar a quienes las rodean, sin obstruir todo el movimiento que las agita y las hace cambiar de lugar entre ellas…" **Huygens, Ch.**, (**1790**): *Traité de la lumiére*, Pierre Vander, Marchand, Libraire, Leyden, página 15.

y la superficie del agua deberá permanecer lisa; al menos no puedo descubrir ninguna alternativa, ya sea desde la teoría o desde el experimento."

"*Ahora, sostengo que efectos similares tienen lugar cada vez que dos porciones de luz se mezclan, y a esto lo llamo la ley general de la interferencia de la luz*."[8]

En la primera Memoria, Young aclaró que la disertación no se proponía tanto dar opiniones que fueran absolutamente novedosas como referirse a algunas teorías que ya han sido expuestas por sus creadores originales, apoyarlas mediante evidencia adicional y aplicarlas a un gran número de fenómenos que hasta ese momento carecían de una explicación adecuada y aclaró que fue el tratamiento de los colores en las placas delgadas que le dio Newton en el segundo libro de su Óptica, lo que lo convenció de la validez de la teoría ondulatoria de la luz. Incluso tomó, de diversos escritos de Newton, los pasajes que consideró los más favorables para justificar su propia teoría. Así adoptó las siguientes hipótesis formuladas por Newton.

HYPOTHESIS I

A luminiferous Ether pervades the Universe, rare and elastic in a high degree.[9]

HYPOTHESIS II

Undulations are excited in this Ether whenever a Body becomes luminous.[10]

HYPOTHESIS III

The Sensation of different Colours depends on the different frequency of Vibrations, *excited by Light in the Retina.*[11]

HYPOTHESIS IV

All material Bodies have an Attraction for the ethereal Medium by means of which it is accumulated within their Substance, and for a small Distance around them, in a State of greater Density, but not of greater Elasticity.[12]

Formuladas las hipótesis, planteó las siguientes proposiciones:

PROPOSITION I

[8] **Peacock, G**. (Editor), (**1855**): *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*, M.D. F.R.S., &c., John Murray, London, Vol. I, página 202.

[9] Un éter luminífero, raro y elástico en alto grado, impregna el Universo.

[10] En este éter, cada vez que un cuerpo se vuelve luminoso, se excitan ondulaciones.

[11] La sensación de diferentes colores depende de la diferente frecuencia de las vibraciones, excitadas por la luz en la retina.

[12] Todos los cuerpos materiales tienen una atracción para el medio etéreo, por la cual se acumula dentro de su Sustancia, y a una pequeña distancia alrededor de ellos, en un estado de mayor densidad, pero no de mayor elasticidad.

All Impulses are propagated in a homogeneous elastic Medium with an equable Velocity.[13]

PROPOSITION II

An Undulation conceived to originate from the Vibration of a single Particle, must expand through a homogeneous Medium in a spherical Form, but with different quantities of Motion in different Parts.[14]

PROPOSITION III

A Portion of a spherical Undulation admitted through an Aperture into a quiescent Medium, will proceed to he further propagated rectilinearly in concentric Superficies, terminated laterally by weak and irregular Portions of newly diverging Undulations.[15]

PROPOSITION IV

When an Undulation arrives at a Surface which is the Limit of Mediums of different Densities, a partial Reflection takes place, proportionate in Force to the Difference of the Densities.[16]

PROPOSITION V.

When an Undulation is transmitted through a Surface terminating different Mediums, it proceeds in such a Direction, that the sines of the Angles of Incidence and Refraction are in the constant Ratio of the Velocity of Propagation in the two Mediums.[17]

PROPOSITION VI.

When an Undulation falls on the Surface of a rarer Medium , so obliquely that it cannot be regularly refracted , it is totally reflected, at an Angle equal to that of its Incidence.

PROPOSITION VII.

If equidistant Undulations be supposed to pass through a Medium, of which the Parts are susceptible of permanent Vibrations somewhat slower than the Undulations, their Velocity will be

[13] Todos los impulsos se propagan en un medio elástico homogéneo con una velocidad uniforme.

[14] Una ondulación concebida para originarse a partir de la vibración de una sola partícula, debe expandirse a través de un medio homogéneo en forma esférica, pero con diferentes cantidades de movimiento en diferentes partes.

[15] Una porción de una ondulación esférica admitida a través de una abertura a un medio que la permite, procederá a propagarse rectilíneamente en superficies concéntricas, terminadas lateralmente en porciones débiles e irregulares de nuevas ondulaciones divergentes.

[16] Cuando una ondulación llega a una superficie que es el límite de dos medios de diferentes densidades, se produce una reflexión parcial, proporcional, en fuerza, a la diferencia de las densidades.

[17] Cuando una ondulación se transmite a través de una superficie que separa diferentes medios, procede en tal dirección, que los senos de los ángulos de incidencia y refracción están en la relación constante de la velocidad de propagación en los dos medios.

somewhat lessened by this vibratory Tendency; and in the same Medium, the more, as the Undulations are more frequent.

En esta proposición relaciona la ondulación de la luz con la vibración de las partículas del medio en que se propaga. La idea la tomó de la Cuestión 18 de la Óptica de Newton, quien supuso que el calor consiste en vibraciones de las partículas de los cuerpos, que es capaz de ser transmitido mediante ondulaciones a través del supuesto vacío, teoría que fue reflotada a fines del siglo XVIII, por el trabajo del Conde Rumford sobre el taladrado de los cañones y a principios del siglo XIX por los trabajos de Humphry Davy sobre el calor

PROPOSITION VIII.

When two Undulations, from different Origins, coincide either perfectly or very nearly in Direction, their joint effect is a Combination of the Motions belonging to each.

Esta proposición fue formulada por analogía con el comportamiento del sonido.

Con estas hipótesis pudo explicar, suponiendo comportamiento ondulatorio, la formación de bandas coloreadas cuando la luz incide con ciertos ángulos sobre una superficie pulida. También, sobre la base del comportamiento ondulatorio, pudo explicar los colores que se observan en películas delgadas, en superficies refractantes que no están perfectamente pulidas, el fenómeno de la difracción a través de rendijas estrechas y el color negro cuando la interferencia es total.

En la segunda Memoria, Young reiteró la aplicabilidad de la ley “"dondequiera que dos porciones de la misma luz lleguen al ojo por diferentes rutas, ya sea exactamente o casi en la misma dirección, la luz se vuelve más intensa cuando la diferencia de las rutas es cualquier múltiplo de una determinada longitud, y menos intensa en el estado intermedio de las partes interferentes; y esta longitud es diferente para la luz de diferentes colores.”

Cuando estaba observando la apariencia de las finas líneas paralelas de luz que se ven en el margen de un objeto sostenido cerca del ojo, para interceptar la mayor parte de la luz de un objeto luminoso distante, y que son producidos por las franjas causadas por la inflexión de luz ya conocida, notó que, a veces, estaban acompañaban de bandas de colores, mucho más amplias y más claras y descubrió que esas bandas más amplias se produjeron por la interposición accidental de uno de sus cabellos. Cuando quiso amplificar el efecto, empleando un pelo de caballo, encontró que el efecto no era visible. En cambio, con una delgada fibra de lana el efecto se ampliaba y mucho más cuando utilizó un hilo de gusano de seda. Pensó que la causa debía estar en que al impactar la luz sobre el hilo, se dividía en dos porciones, una que se reflejaba en él y la otra que se doblaba alrededor de su lado opuesto hasta coincidir con la dirección de la porción anterior y que al haber una diferencia en los recorridos si las ondulaciones se mantenían isócronas el efecto se potenciaba.

Para estudiar el fenómeno, hizo un agujero rectangular en una tarjeta y dobló sus extremos para sostener un cabello paralelo a los lados del agujero. Al aplicar el ojo cerca del agujero, el cabello se mostraba dilatado y acercando el cabello hacia la luz producida por una vela encendida, comenzó a visualizar bandas coloreadas y estimó la relación entre el ancho de las bandas y el diámetro del cabello. Encontró que seis de las bandas rojas más brillantes, prácticamente a las mismas distancias entre sí, ocupaban toda la imagen que permitía el agujero rectangular. A partir del ancho del agujero, de la estimación del diámetro del cabello, y de las distancias entre las bandas, calculó que la diferencia de caminos para la luz roja donde la intensidad era mayor era de 1/43636 de pulgada. De los resultados experimentales que Newton obtuvo, para las desviaciones de la luz, según su teoría corpuscular, dedujo que esa diferencia debía ser 1/39200 de pulgada, que dentro del margen de error experimental podía considerarse coincidente, lo que garantizaba completamente la explicación del fenómeno en términos de la teoría ondulatoria.

Al observar la luz de una vela encendida a través de un vellón de lana, notó que aparecían halos alrededor de la llama; pero el tamaño y el brillo de esos halos dependían del ordenamiento de las fibras y de sus espesores, cuanto más delgadas eran las fibras, tanto más grandes se veían los halos. Entonces consideró que la visión de esos halos era una consecuencia inmediata de la formación de un número de bandas de interferencia, todas del mismo tamaño las que, como las fibras del vellón estaban dispuestas en todas las direcciones imaginables, necesariamente debían rodear a la imagen luminosa a distancias iguales, en todos los lados constituyendo bandas circulares.

Al mirar una vela encendida a través de dos placas de vidrio adosadas con un poco de humedad entre ellas, observó una apariencia de bandas de refracción que se asemejaban a los colores comunes de las láminas delgadas y, al buscar las franjas por reflexión, descubrió que esas nuevas franjas siempre estaban en la misma dirección que las otras, pero que eran mucho más grandes. Al examinar las placas de vidrio con una lupa, notó que en cada lugar donde las franjas eran visibles, la humedad se entremezclaba con porciones de aire dando una apariencia similar al rocío. Entonces supuso que el origen de los colores era el mismo que los colores de los halos, pero un examen más minucioso le mostró que las magnitudes de las porciones de aire y de agua no eran en absoluto homogéneas, por lo que la explicación que había imaginado era inadmisible. Valiéndose de la lupa y espejos, analizó una porción de luz moviéndose a través del agua y encontró que su velocidad era diferente a la de la luz cuando atravesaba los intersticios cubiertos con aire, por lo que esos dos rayos luminosos interferían entre sí produciendo efectos de color tal como se deducía de la ley que él había enunciado. Estimó que las velocidades de la luz en el agua y en el aire están en una razón de 3 a 4 y calculó que para que aparezcan las bandas del mismo color que en el caso de placas delgadas adosadas, la relación de los espesores del agua y el aire debe ser de 6 a 1.

Luego hizo el experimento de adosar un cristal plano con una lente ligeramente convexa y hacer incidir la luz de una vela. Observó que, por interferencia, se formaban círculos oscuros.

Si entre el cristal y la lente colocaba un poco de aceite o de grasa, también se formaban anillos de interferencia. Si sustituía el lípido por agua, también se formaban anillos aunque más pequeños debido al mayor índice de refracción del primero, pero cuando mezclaba aceite con agua y lo colocaba entre el cristal y la lente, los anillos producidos por interferencia eran de tamaños mucho mayores. En este caso, la diferencia de velocidades de la luz en el agua y el aceite, es mucho menor que la diferencia entre las velocidades de la luz en el agua y el aire.

En todos estos experimentos, Young corroboró la ley de interferencia que había enunciado. Esos resultados lo llevaron también a suponer que *la velocidad de la luz es tanto mayor cuanto más enrarecido sea el medio.* Esa suposición lo llevó a predecir que si dos reflexiones fuesen de la misma clase, hechas sobre una placa delgada de densidad intermedia entre las densidades de los medios que la contienen, la mancha central producida por interferencia, en vez de ser de color negro sería de color blanco y lo comprobó experimentalmente colocando una gota de aceite de sasafrás entre un prisma de vidrio flint y una lente de vidrio crown. La mancha central, correspondiente a la luz reflejada se veía blanca y estaba rodeada por un anillo de color negro. Si la gota de aceite no se presionaba lo suficiente entre el prisma y la lente, el color blanco no era totalmente blanco y el negro no era completamente negro.

De sus experimentos, supuso que todo medio refractivo transmite las ondulaciones constituyentes de la luz en dos porciones separadas; una que pasa a través de sus partículas últimas y la otra a través de sus poros y que esas porciones se reúnen después de cada separación, precediendo siempre la primera a la segunda porción por un pequeñísimo pero constante intervalo, que depende del ordenamiento de las partículas en un medio (macroscópicamente) homogéneo.

En este trabajo, Young intentó aplicar el análisis de los colores de las placas delgadas para explicar los distintos colores que presenta la parte inferior de la luz de una vela encendida (hoy sabemos que esos colores se deben a las distintas temperaturas que existen en distintas partes de la llama).

El 24 de noviembre de 1803, Thomas Young leyó ante la Royal Society su tercer Memoria "*Experiments and calculations relative to Physical Optics*". En ella dice que al hacer algunos experimentos sobre las bandas de colores acompañadas de sombras, encontró una prueba simple y muy demostrativa de la interferencia de dos rayos de luz.

Hizo un pequeño agujero en el postigo de una ventana y lo cubrió con un trozo de papel grueso, que perforó con una aguja fina. Para una mejor observación, colocó un pequeño espejo en una posición tal que reflejaba la luz del sol, en una dirección casi horizontal, sobre la pared opuesta. En la trayectoria del rayo de luz divergente que pasaba a través del agujero que perforaba el papel grueso, colocó una tira de cartulina de aproximadamente treinta y cinco centímetros de ancho y observó su sombra sobre la pared. Además de las bandas de colores a cada lado, la sombra estaba dividida por franjas paralelas muy similares entre sí y de dimensiones más pequeñas, mientras que el centro de la sombra era de color blanco. Estimó que las franjas paralelas resultaban de la luz que pasaba por los bordes de la tira de cartulina que se difractaban hacia la sombra. Al colocar una pequeña pantalla detrás de la cartulina que tapara uno de los bordes de la misma, las franjas paralelas desaparecían de la pared.

Este experimento se conoce históricamente como "*el experimento de la doble rendija*", pero como hemos expuesto, los bordes de la cartulina sobre la que incidía el haz divergente, actuaron como dos rendijas dividiendo el haz en dos mitades y provocando las bandas de interferencia sobre la pared.

Recién en *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Art*, publicado en 1807, Young hizo referencia a la interferencia que produce un haz divergente de luz blanca al pasar por dos rendijas muy próximas (página 365).

Reprodujo el primer experimento de interferencia que se conoce, hecho por Francesco María Grimaldi[18] en 1645. Cuando un objeto que tiene forma rectangular produce una sombra, además de las usuales bandas externas, hay dos o tres bandas coloreadas alternadas dispuestas a cada lado y que son convexas y curvadas hacia el centro de la sombra. Esas bandas también son el efecto de la luz que es desviada desde cada uno de los bordes del objeto hacia la sombra, ya que al colocar una pequeña pantalla a una pequeña distancia del objeto rectangular de modo que tape uno de sus bordes, todas esas bandas desaparecen.

Young examinó las dimensiones de las bandas bajo diferentes circunstancias para poder calcular las diferencias en las longitudes de las trayectorias descriptas por las porciones de luz que han producido esas bandas de interferencia y encontró que cuando las longitudes son las mismas, la luz siempre se mantiene blanca. Pero cuando la luz más brillante, o la luz de un color dado, desaparece y reaparece varias veces, la diferencia en las longitudes de las distancias recorridas por la luz están en progresión aritmética. Luego, comparó las medidas deducidas de algunos experimentos de Newton con los suyos propios. Los datos necesarios para los cálculos los obtuvo de las observaciones octava y novena del tercer libro de la Óptica de Newton. Para comparar los datos de Newton con los suyos, también usó los de la tercera observación del libro tercero de la Óptica.

Colocó dos cuchillos con sus filos reunidos formando un ángulo muy agudo, que recibieron la luz del Sol, provenientes de una pequeña abertura y registró el punto de convergencia de las dos primeras líneas oscuras de interferencia que bordeaban las sombras de los respectivos cuchillos. Los resultados para distintas longitudes respecto del punto de emisión de la luz y distintas posiciones de la pantalla donde se captaban las sombras, los volcó en una Tabla que comparó con los de otra Tabla que contenía los resultados obtenidos por Newton sobre las sombras producida por la intersección de un rayo de luz con un cabello a diferentes distancias. Encontró que los resultados o coincidían exactamente o que sus valores medios diferían en 1/160.

También encontró que los resultados de su experimento tenían valores medios muy similares con los resultados obtenidos por Newton en sus experimentos sobre difracción de la luz por placas delgadas.

Por estas coincidencias se consideró autorizado a atribuir la misma causa a las dos clases de fenómenos.

También demostró que los colores en las placas delgadas desaparecen y reaparecen cuando la diferencia de caminos de dos rayos de luz, están en progresión aritmética; haciendo notar que la misma regularidad puede ser inferida del fenómeno de la difracción de la luz.

[18] **Grimaldi, F. G.**, (**1665**) : *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque adnexis libri duo: opus posthumum*, Hyeronimi Berniæ, Bolonia. (Young remarcó que Newton no conoció este trabajo)

Young también explicó mediante su concepción ondulatoria, la repetición de los colores que, a veces, se observa en el arcoíris y que había sido descripta por Benjamin Langwith[19] y Peter Daval[20] en la primera mitad del siglo XVIII.

Como resultado de los distintos experimentos, escribió:

"*From the experiments and calculations which have been premised, we may be allowed to infer, that homogeneous light, at certain equal distances in the direction of its motion, is possessed of opposite qualities, capable of neutralizing or destroying each other, and of extinguishing the light, where they happen to be united; that these qualities succeed each other alternately in successive concentric superficies, at distances which are constant for the same light, passing through the same medium.*"[21]

Y también refutó la opinión de Newton respecto de la refracción:

From the agreement of the measures, and from the similarity of the phenomena, we may conclude, that these intervals are the same as are concerned in the production of the colours of thin plates; but these are shown, by the experiments of Newton, to be the smaller, the denser the medium; and, since it may be presumed that their number must necessarily remain unaltered in a given quantity of light, it follows of course, that light moves more slowly in a denser, than in a rarer medium: and this being granted, it must be allowed, that refraction is not the effect of an attractive force directed to a denser medium. The advocates for the projectile hypothesis of light, must consider which link in this chain of reasoning they may judge to be the most feeble; for, hitherto, I have advanced in this Paper no general hypothesis whatever. But, since we know that sound diverges in concentric superficies, and that musical sounds consist of opposite qualities, capable of neutralizing each other, and succeeding at certain equal intervals, which are different according to the difference of the note, we are fully authorized to conclude, that there must be some strong resemblance between the nature of sound and that of light. [22]

---

[19] **Langwith, B.**,"Concerning the Appearance of several Arches of Colours contiguous to the inner Edge of the common Rainbow, observed at Petworth in Sussex", *Phil. Trans.* (1749), 375, 245.

[20] **Daval, P.,**"A description of an Extraordinary Rainbow observed July 17, 1748", *Phil. Trans.* (1749), 375, 241–245.

[21] De los experimentos y cálculos que se han presentado, se nos puede permitir inferir, que la luz homogénea, a ciertas distancias iguales en la dirección de su movimiento, posee cualidades opuestas, capaces de neutralizarse o destruirse mutuamente, y de extinguir la luz, donde se unen; que estas cualidades se suceden alternativamente en sucesivas superficies concéntricas, a distancias que son constantes para la misma luz, pasando por el mismo medio.

[22] De las concordancias entre las medidas, y de la similitud de los fenómenos, podemos concluir, que estos intervalos son los mismos que se refieren a la producción de los colores en las láminas delgadas; pero, según los experimentos de Newton, estos son más pequeños, cuanto más densos son los medios; y, dado que se puede suponer que su número debe permanecer inalterado en una cantidad dada de luz, se deduce, por supuesto, que la luz se mueve más lentamente en un medio más denso que en un medio más enrarecido: y si se acepta esto, debe aceptarse que la refracción no es el efecto de una fuerza atractiva dirigida hacia un medio más denso. Los defensores de la hipótesis de la luz como proyectil, deben considerar qué vínculo en esta cadena de razonamiento pueden juzgar como el más débil. Hasta ahora, he avanzado en este trabajo sin ninguna hipótesis general. Pero, dado que sabemos que el sonido diverge en superficies concéntricas, y que los sonidos musicales consisten en cualidades opuestas, capaces de neutralizarse

En el Volumen I de The Edinburgh Rewiew[23] se publicó una crítica al trabajo de Young, que, si bien no está firmada, todo hace suponer que fue redactada por el Barón Henry Brougham. El autor, que en el texto se declara admirador de Newton y, por ende, de la teoría corpuscular de la luz, llegó denostar la teoría de la luz y los colores al punto de perder todo el estilo requerido por una crítica objetiva al trabajo. Así, comenzó su diatriba:

Como este trabajo no contiene nada que merezca el nombre, ya sea de experimento o descubrimiento, y como de hecho carece de toda especie de mérito, deberíamos haber permitido que pasara entre la multitud de artículos que siempre deben ser admitidos en las colecciones de una sociedad, que se compromete a publicar dos o tres volúmenes cada año. Las dignidades del autor y el título de Conferencia Baker que precede a estas elucubraciones, no debería haberlo salvado de un lugar en la multitud de baja ralea, Pero últimamente hemos observado en el mundo físico la predilección más irresponsable por hipótesis vagas que gana terreno diariamente; y nos mortifica ver que la Royal Society, olvidándose de esas mejoras en la ciencia a las que debe su origen, y descuidando los preceptos de sus miembros más ilustres, ahora está, por la publicación de tales documentos, dando la apariencia de su alta autoridad a relajaciones peligrosas en los principios de la lógica física. Deseamos elevar nuestra débil voz contra las innovaciones, que no pueden tener otro efecto que el de verificar el progreso de la ciencia, y renovar todos esos salvajes fantasmas de la imaginación, que Bacon y Newton aventaron de su templo. […] *¿Ha degradado la Royal Society sus publicaciones a boletines de teorías nuevas y a la moda para las damas que asisten a la Royal Institution*? *¡proh pudor*![24] *Dejemos que el Profesor continúe divirtiendo a su audiencia con una variedad interminable de insignificancias inofensivas pero, en nombre de la Ciencia, no permitamos que entre en ese venerable recinto que contiene las obras de Newton, Boyle, Cavendish, Maskelyne y Herschell.*

También denostó la teoría ondulatoria de Leonard Euler:

Nuestros lectores conocen bien el nombre de Euler. Probablemente también saben cuán inadecuado fue su éxito como filósofo natural para mantener la gran fama que sus logros matemáticos le habían otorgado. Su hipótesis óptica de vibración ha sido universalmente rechazada desde el momento en que se publicó por primera vez. Pero en una mala hora, cayó en el camino del Dr. Young, en algún momento durante el año 1800; y, tenemos derecho a concluir, que no cayó en un terreno estéril, dado que el Doctor ya ha producido no menos de tres enormes documentos sobre el tema.

Luego de mencionar un pasaje del trabajo de Young escribió

Leemos este pasaje sin demasiada emoción, a menos que, tal vez, nos inclinemos por las actividades equivocadas de un hombre ingenioso, que parece haber sistematizado en una especie de teo-

mutuamente y de tener éxito en ciertos intervalos iguales, que son diferentes según la diferencia de las notas, estamos totalmente autorizados a concluir, que debe haber un gran parecido entre la naturaleza del sonido y la de la luz.

[23] XVI. The Bakerian Lecture on the Theory of Light and Colours. By Thomas Young, M. D. F. R, S. Professor of Nattural Philosophy of the Royal Institution. (From Philosophical Transactions for 1802, Part I.) Vol. I. Enero de 1803, (10ª edición, 1814), página 450.

[24] ¡Vergüenza!

ría el método de perder el tiempo. […] *El Dr. Young reclama la herencia y en vano imagina que cumple con este destino, haciendo sonar los cambios en estas hipótesis; argumentando de ellos, como si fueran experimentos o demostraciones; torciéndolos en una coincidencia parcial con las torpes imaginaciones de su propio cerebro; y alardeando pomposamente, lo que Newton dejó como pistas, en una serie de proposiciones, con toda la afectación del sistema.*

Como una de las críticas que se le efectuaron a Newton fue la de usar el éter como medio de transporte de las partículas luminosas, medio cuya existencia no tenía forma de comprobar, el crítico especuló con:

Después de todo, se puede decir que Newton se divertía con las hipótesis, y también el Dr. Young. Admitiendo que las relajaciones del Doctor eran las mismas que las de su predecesor, debe recordarse que las Cuestiones de Newton se le dieron al mundo al final de la más brillante carrera del descubrimiento sólido, que a cualquier mortal se le permitió correr alguna vez. Los deportes en los que puede permitirse que un veterano relaje su mente son la mera holgazanería del soldado en bruto que nunca ha esquivado su espada; y aunque el mundo miraría con interés a cada una de esas ocupaciones en la primera, se volverían con disgusto por los intentos directos e inactivos de la última para imponerles sus torpes retozos.

Añadiremos una observación sobre el absurdo de suponer que la idea de un éter, arrojada al azar por Sir Isaac Newton, tiene la menor afinidad con la torpe teoría de Euler y de su comentarista, el Dr. Young. Después de demostrar las propiedades de los rayos de luz considerados como cuerpos rígidos y diminutos, para explicar la teoría de la visión y los colores de las placas gruesas y delgadas, o para mostrar cómo la ley de la reflexión descubierta por inducción, podría ser de manera fantástica resuelto en una ley aún más general sin ninguna inducción --- él se divierte al conjeturar cómo los rayos de luz actuarían en consecuencial y adhirió a la idea de un medio etéreo y sutil donde la luz se propaga. Que la concesión de tal existencia nos permitiría resolver una variedad de hechos, aparentemente anómalos, en una ley general, uniforme y suficientemente simple, nadie puede albergar ninguna duda, ¿quién ha leído los pasajes en los que se basa esta suposición fantástica? perseguido por ese gran genio, genial incluso en sus relajaciones más lúdicas. Pero la torpe hipótesis de Euler y del Dr. Young es que el éter mismo constituye la luz[25]*; y su objeto de torcer los hechos en algún tipo de acuerdo con lo que conciben podrían ser las leyes de este fluido. De una invención tan aburrida, nada puede esperarse. Solo elimina todas las dificultades bajo las cuales trabajó la teoría de la luz, a la teoría de este nuevo medio, que asume su lugar. Es un cambio de nombre; no enseña ninguna verdad, no reconcilia contradicciones, no arregla hechos anómalos, no sugiere nuevos experimentos y no lleva a nuevas investigaciones. Ni siquiera tiene el lastimoso mérito de ofrecer un juego agradable a la fantasía. Es infinitamente más inútil y menos ingenioso que la teoría india del elefante y la tortuga. Puede clasificarse en la misma clase de esa estúpida invención de la teología metafísica que, para explicar la existencia de un mal, supone la existencia independiente de un espíritu maligno; o ese otro artilugio notable, que, para explicar el poder de la Deidad sobre la materia, ingenuamente suponía que toda la materia era la Deidad.*

[25] Ni Euler ni Young afirmaron que el éter *es* la luz.

En su exposición, reitera con frecuencia que lo que hizo Young fue repetir los experimentos de Newton.

Luego, el crítico se aboca al análisis de la Parte II del trabajo de Young[26]. Partidario de la teoría corpuscular, no puede aceptar el fenómeno de interferencia y adjudica las bandas oscuras a la refracción de la luz sin justificar el medio que produce la misma.

Lamentamos encontrar que el Dr. Young no tiene más éxito en hacer observaciones y experimentos que en formar sistemas. El nuevo caso de colores, que él dice haber descubierto, ha sido observado miles de veces, y solo tiene el mérito de dar una explicación absurda y contradictoria al respecto. Son las imágenes coloreadas que parecen rodear un cuerpo luminoso, cuando se interpone un cabello cerca del ojo. El Doctor dice que surgen de la interferencia de dos porciones de luz, una que se refleja de la fibra y la otra que se dobla alrededor de su lado opuesto. Cómo esto podría alguna vez producir color, no tenemos suficiente fantasía para descubrir; pero esto lo sabemos, es matemáticamente imposible que una porción de luz se doble alrededor de un lado del cabello, hasta el punto de cruzar la sombra e interferir o acercarse a la luz reflejada desde el otro lado. De hecho, es absurdo hablar de reflexión en este caso, ya que cualquier reflexión llevaría manifiestamente la luz a un cuarto diferente. Es igualmente ridículo hablar de flexión por si sucediera que, de acuerdo con la cuenta del Doctor (página 388), ¿el pelo negro no produjo la aparición? La explicación singular del Doctor debe aplicarse a esto, así como a cualquier otro cabello. De hecho, estas imágenes se producen por refracción; y, en consecuencia, cualquier cuerpo opaco es incapaz de formarlos. La observación en la página 389, tenemos razones para pensar con precisión, que las franjas o imágenes se extienden a través de la imagen del cabello, dilatadas por una visión indistinta. Esto es manifiestamente inconsistente con cualquier idea de reflexión o flexión; se aplicará a la refractación solamente. Ahora, el Dr. Young parece haber olvidado por completo que existe una operación como la refracción, ya que atribuye los halos en la inflexión de la atmósfera entre las partículas de agua. Es evidente que la luz debe ser refractada al pasar a través de estas partículas, y esto nunca ha sido cuestionado desde la época del famoso Arzobispo de Spalatro.[27]

También criticó la explicación de Young sobre los distintos colores de la llama de una vela (que en rigor no se deben a las distintas reflexiones o refracciones de la luz emitida durante la combustión sino a las distintas temperaturas que experimenta la llama). Pero para refutarla escribió:

No tenemos objeción en someternos al juicio de nuestros lectores, ya sea que la solución del Dr. Young o nuestra, sea la que tenga más derecho a recibir su favor; y concluiremos en este momento con la observación de que nuestra explicación se aplicará a los diferentes colores de la llama producidos por diferentes mezclas, las sales de bario, que tiñen a las llamas de rojo; las sales cuprosas, que dan su color verde y azul, los nitratos, que tiñen de amarillo y rojo; y también al predomi-

[26] XVI. XVIII. *An Account of some Cases of the Production of Colours not hitherto described*. By Thomas Young, M. D. F. R, S. Professor of Nattural Philosophy of the Royal Institution. (From Philosophical Transactions for 1802, Part II.) Vol. I. Enero de 1803, (10ª edición, 1814), página 457.

[27] Newton atribuyó la primera idea que intentaba explicar el arco iris a Antonio de Dominis, *arzobispo de Spalatro*, que la formuló a partir de observaciones hechas con una bola de vidrio llena de agua, y colocada en diferentes posiciones con respecto al sol y al observador.

nio de determinados matices permanentes en las llamas de ciertos cuerpos combustibles. Como los cuerpos de diferentes colores siempre reflejan —y transmiten, de la forma más copiosa — los rayos que producen estos colores; entonces, tal vez se pueda encontrar que la ley general de flexibilidad relativa recibe modificaciones por las afinidades particulares entre las partículas de luz y las de los cuerpos inflamables, ya que los poderes de gravitación y adhesión se ven afectados por la fuerza de la atracción electiva. Se puede abrir así un amplio campo de descubrimiento, y nuestro conocimiento infinitamente ampliado, de la naturaleza de las diminutas partículas de cuerpos y las propiedades químicas de la luz.

Esto es, intentó rebatir una explicación sobre los diversos colores que adquiere la llama de *un mismo cuerpo combustible* mostrando que *distintas sustancias* dan coloraciones distintas a la llama.

La crítica finaliza con una exhortación a la Royal Society a que no publique trabajos como el de Thomas Young, porque *degradan a la Institución.*

En el volumen V, (1814) página 97 del Edinburgh Review el mismo crítico se empeña en negar la interferencia, afirmando que la ley de interferencia es *absurda e ilógica,* por lo que sería una pérdida de tiempo describir sus argumentos.

En su contestación a una crítica fuera de estilo, refugiada en el anonimato, Young contestó en un folleto que él mismo mandó a imprimir[28] :

A fin de responder al cargo de inconsistencia de mis opiniones respecto de la naturaleza de la luz, debo comenzar por observar que hay dos métodos generales para comunicar conocimientos; uno analítico, donde procedemos del examen de los efectos para investigar las causas; el otro sintético, donde establecemos las causas y de ellas deducimos los efectos particulares. En la manera sintética de explicar una nueva teoría, necesariamente comenzamos por suponer principios que, en ese caso, llevan el modesto nombre de hipótesis y cuando hemos comparado sus consecuencias con todos los fenómenos y hemos demostrado que la concordancia es perfecta, podemos cambiar el término temporario hipótesis por el de teoría. Este modo de razonar es suficiente para agregar valor e importancia a nuestra teoría, pero no es completamente decisivo respecto a su verdad exclusiva, ya que no ha sido probado que ninguna otra hipótesis estará de acuerdo con los hechos.

Esta es exactamente la manera en que he procedido en mis investigaciones. Analizando los experimentos de Newton y comparándolos con los míos, arribé a principios, en mi trabajo sobre la Teoría de la luz, a los cuales les di el modesto título de hipótesis, después de comparar esos principios con todos los fenómenos de la luz y de mostrar sus perfectas consistencias. En mi novena proposición, me considero autorizado a efectuar una conclusión que convierte las hipótesis en una teoría. Considero justificado el hacerlo porque ninguna persona ha intentado alguna vez avanzar en una teoría que lleve a comparar matemáticamente esa teoría con los fenómenos que he enumerado. Pero, de acuerdo con la naturaleza del único modo de razonar que las circunstancias me permitieron, fue imposible inferir, de esta comparación sintética que ninguna otra suposición concordaría

[28] Peacock, G. (Editor): *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young, MD. FRS, &c.*, 1855, John Murray, London. pp. 192 – 215.

con los fenómenos y he remarcado expresamente, respecto a una de las cuatro hipótesis que he establecido que puede ser posible encontrar otras que puedan sustituirla. Es sólo en esta hipótesis y en sus consecuencias que he intentado efectuar algunas mejoras.

Y tales mejoras las admitiré siempre con placer, ya sea que surjan de mis propios experimentos o de los de otros. Una corrección inmaterial de este tipo me obligó a realizar como consecuencia de las observaciones más interesantes del Dr. Wollaston sobre la verdadera división del espectro prismático, que proporciona una prueba adicional de que incluso los experimentos de Newton, a menudo como han sido repetidos por otros, pueden a veces necesitar un examen cuidadoso. Y esta modificación, que tiene, de hecho, poca o ninguna conexión con las partes esenciales de mi teoría, ha sido aducida como una prueba de la "naturaleza voluble y vibratoria del medio que llena mi mente". En efecto, el revisor en otro lugar ha negado la precisión del experimento del Dr. Wollaston, pero sus objeciones son demasiado inútiles como para merecer expresarlas[*]*.*

Respetando otro pequeño cambio de sentimiento, al que el crítico ha considerado apropiado atribuir gran importancia, hasta ahora me he abstenido, por delicadeza, de dar explicaciones al caballero cuyas observaciones refiere. Deseo evitar insistir en su inexactitud en un cálculo muy fácil; y por la misma razón, no diré nada más sobre el tema en este momento.

Cuando el crítico afirma que "una hipótesis es una obra de fantasía inútil en la ciencia" debe suponerse que está hablando de hipótesis tales como las que no se han deducido originalmente de los experimentos, ni luego se las compara con ellas, sino cuando, en otro de sus artículos— que él condena como que han impedido el progreso del descubrimiento,— la hermosa hipótesis que ha sido aplicada, con el mayor éxito, por Æpinus, por el Sr. Cavendish, y por el Profesor Robison, a los fenómenos de la electricidad y el magnetismo. Sólo podemos lamentar que una persona tan carente de sentido de la elegancia física tenga la oportunidad de imponer opiniones como estas sobre el público; y nos gustaría esperar que diga, si se atreviera, que incluso la hipótesis de la gravitación

---

[*] *En el siguiente aviso en The Edinburgh Review de abril de 1803, de su artículo en las Philosophical Transactions de 1802, "Sobre la reflexión oblicua del Cristal de Islandia" dice — "Nos decepcionó mucho encontrar que un experimentalista tan agudo e ingenioso había adoptado la salvaje teoría óptica de las vibraciones. Sin embargo, después de declararla, principalmente como de Huygens, y aplicarla para explicar las propiedades del espato, pasa a examinar, mediante experimentos precisos, si el sistema ondulatorio está de acuerdo con los hechos. La hipótesis es que las diferentes ondulaciones del medio elástico son esféricas en casi todos los casos, pero que, en el cristal de Islandia, esas ondulaciones son esferoidales; y debe reconocerse, la casi coincidencia de los experimentos, que están extremadamente bien ideados, y parecen ser conducidos con precisión, dan a esta teoría una plausibilidad que antes no poseía. Sin embargo, observamos que la hipótesis del propio Æpinus, lejos la más consistente, simple y universalmente aplicable de cualquiera de las que hayan sido propuestas alguna vez, sigue siendo sólo una hipótesis gratuita; ha adquirido para su autor sólo la alabanza de ingenio fantasioso, y quizás haya hecho más daño que beneficio a la ciencia del magnetismo, al retirar la atención de los filósofos de la observación paciente y difícil pero provechosa de la naturaleza a la diversión más fácil pero vacía de complacer su fantasía.*

"La hipótesis de Huygens no es, como el Dr. Wollaston parece pensar, la misma que la de Euler y otras investigaciones no filosóficas. Se aproxima al nivel de Newton y supone la existencia de un medio elástico que actúa sobre los rayos de luz e influye en ellos. Estos autores, engañados por la naturaleza del sonido, no admiten la materialidad de la luz, sino que afirman que es una vibración propagada a través del medio. Pero, por cortas que sean estas observaciones, somos reacios a perder más tiempo en una defensa tan débil y mal conducida de una hipótesis insostenible e inútil ". Vol. ii. pag. 99 Nota del editor.

universal ha presentado una barrera insuperable para el avance del conocimiento experimental. Al menos, está determinado a mostrar que toda hipótesis debe ser obra de la infancia o de la dote; e insinúa que las especulaciones que he extraído de los escritos de Newton fueron simplemente las diversiones de algunas horas libres al final de su carrera científica. Es muy cierto que las preguntas de Newton fueron dadas "al mundo" en un momento en que sus brillantes y sólidos descubrimientos estaban plenamente establecidos; pero los documentos que explican todas sus hipótesis sobre la luz en general, y a los que he tenido la ocasión más frecuente de referirse, fueron leídos a la Royal Society más de diez años antes de que comenzara a escribir sus Principia; y la razón principal que retrasó su publicación, parece haber sido la aprehensión de disputas con el Dr. Hooke. Algunos fueron publicados en la Óptica, poco después de la muerte del Dr. Hooke; otros sólo se encuentran en la History of the Royal Society de Birch. Si no hubiera tenido cuidado de anexar las fechas a mis citas, el revisor podría haber alegado su ignorancia como una excusa por sus tergiversaciones.

La misma excusa de ignorancia sería una disculpa inadecuada para afirmar una falsedad positiva, donde me acusa de referirme a un trabajo mío inédito. La referencia solo podría estar destinada a los lectores del ensayo como un papel impreso; mi Syllabus fue publicado en enero de 1802; las Transacciones no hasta fines de la primavera; y si él hubiera preguntado al editor por este Syllabus, o lo había preguntado entre sus amigos literarios, incluso en Edimburgo, podría haber encontrado en él alguna información sobre temas que parece comprender de manera imperfecta.

En el primer párrafo de la revisión de mi artículo sobre la producción de colores, el escritor confiesa que no tiene "suficiente imaginación para descubrir" cómo la "interferencia de dos porciones de luz" podría alguna vez producir una apariencia de color. La pobreza de su fantasía puede fácilmente admitirse, pero es desafortunado que no tenga suficiente paciencia para leer, o intelecto suficiente para entender, los mismos documentos que critica; porque, si hubiera analizado con atención común mi conferencia Bakeriana sobre la luz, podría haber entendido tal producción de color sin ningún esfuerzo de su fantasía. Luego cita de mí la afirmación de que un "pelo negro" no produce la aparición de franjas, e incluso tiene la modestia de referirse a una determinada página de mi trabajo. He dicho que un "pelo de caballo" no produce esa apariencia; y he dejado que el crítico decida si el caballo debe ser blanco o negro; La verdad es que un alambre fino, o un cabello delgado, ya sea negro o blanco, exhiben igualmente bien los colores que he descrito. Si el hecho fuera diferente, sería completamente ininteligible; porque no hay absolutamente ninguna base para la insinuación del revisor, que De Dominis dedujo cualquier teoría de estos colores, o que cualquier otra persona puede deducirla de las leyes de la refracción. Él afirma que es matemáticamente imposible que la luz se doble alrededor de un cabello; Hace mucho Grimaldi ha demostrado experimentalmente esta flexión, y la ha llamado difracción; un efecto que proporciona la analogía más llamativa entre los movimientos de la luz y los de las olas de agua.

El crítico luego se queja de su total falta de comprensión de la diferencia entre los colores de las películas mixtas, y los de las películas que han sido descritas por Newton. Si hubiera estudiado suficientemente la Óptica de Newton, habría visto que el espesor de una simple placa de agua debe ser de sólo tres cuartos del espesor de una placa de aire, para producir efectos similares: en los colores que he descrito, el espesor de la placa mixta era seis veces mayor que el de la placa de aire: al inclinar las placas, una serie de anillos se expandió, mientras que la otra se contrajo. Estas dis-

tinciones son lo suficientemente claras para cualquier persona de comprensión ordinaria; y no sabía que era necesario prever casos extraordinarios.

Estamos inducidos a suponer, a partir de la página que sigue inmediatamente, que, para hablar sin una metáfora, ni la fantasía ni la comprensión del revisor podrían permitirle distinguir una mancha negra de una blanca. He dicho que cuando se ponen dos lentes en el contacto más íntimo posible, con la interposición de un cierto fluido, la mancha central de los anillos de colores es casi blanca: antes se sabía que, sin tal interposición, la central el spot, en circunstancias similares, sería casi negro: y el crítico declara sagazmente, que estos efectos son exactamente los mismos. Cita de Newton la expresión de la "mancha central translúcida", que significa la mancha que no reflejaba la luz, y luego la explica, como si fuera exactamente similar a la que, en mi experimento, reflejaba casi toda la luz que caía sobre ella, y por lo tanto, era blanco.

Que las líneas que se citan en la misma página, de mi trabajo, presentan, cuando están aisladas, una apariencia de confusión y de un razonamiento vago, es quizás innegable, y es perfectamente excusable. El revisor no ha entendido el documento en su totalidad, y él podría estar lo suficientemente seguro, que sus lectores nunca serían capaces de extraer un sentido inteligible de una cita arbitraria de unas pocas líneas, sacadas del medio de un párrafo de un razonamiento completo. Él malinterpreta y tergiversa por completo todo el tema de la explicación; él dice que su objetivo es explicar el color azul de la parte inferior de la llama de una vela. Nada más lejos de mis pensamientos que asignar alguna razón para este azul: lo que traté de ilustrar, fue una observación original e importante hecha por el Dr. Wollaston, que una porción de la llama azul de una vela apareció, cuando se ve a través de un prisma, para ser dividido en varias masas o imágenes distintas. Mi ilustración de este fenómeno no tiene la más mínima conexión con lo que el crítico llama su solución de la aparición de diferentes colores en diferentes llamas, lo que humildemente le pide a sus lectores que lo comparen. Por lo tanto, no estoy obligado a dar una opinión de ningún tipo respecto de esta explicación pretendida de un fenómeno ajeno al tema; si lo fuera, sería suficiente decir que no se puede suponer que tales leyes funcionen sobre los principios de las fuerzas mecánicas, sin producir velocidades diferentes a la luz de diferentes colores. Pero afortunadamente, el fragmento me proporciona una prueba muy convincente de la naturaleza de la fuente de la que se originó este torrente de invectivas. Aquí se nos dice que la doctrina de la diferente flexibilidad de la luz ahora se admite universalmente. He buscado en todas las obras que pude encontrar en las bibliotecas a las que he tenido acceso, opiniones que respetan la naturaleza de la luz y, hasta donde he descubierto, se admite la diferente flexibilidad de la luz, en el absurdo e injustificable sentido en el que aquí se emplea, solamente, por tres escritores. El primero es el Sr. Henry Brougham, el segundo el autor anónimo de un artículo en la Enciclopedia Británica, y el tercero, el atacante cuyos ataques injuriosos ahora estoy rechazando. Por una coincidencia tan notable, me creo autorizado a concluir que estos tres escritores son uno y el mismo. Antes he insinuado que las doctrinas del Sr. Brougham han sido suficientemente refutadas por el Profesor Prevost de Ginebra. El Sr. Prevost*

* En las *Philosophical Transactions* de 1798, vol. lxxxviii., p. 321, en un documento titulado “Algunos comentarios ópticos sobre todo en relación con la reflejos de los rayos de luz”. Nota del editor.

ha defendido satisfactoriamente los experimentos de Newton a partir de las imputaciones del Sr. Brougham; pero en otros aspectos quizás haya tratado al joven teórico con demasiada lenidad.

Hasta ahora he respondido todo lo que se pretendía como argumento, en los artículos publicados en el segundo número de la Review. Esto constituye, de hecho, sólo una pequeña parte de esos artículos: tienen mucho menos la apariencia de la discusión imparcial sobre una larga y disputada cuestión en la filosofía natural, que de la bufonada de un entretenimiento teatral, o de las bromas de un abogado irrespetuoso, esforzándose por colocar en una apariencia ridícula la evidencia de su adversario. Contestar semejante ataque en un lenguaje similar sería degradante; intentar oponerse por argumento sería inútil. Me abstendré, por lo tanto, de notar cualquiera de las groserías adicionales que han sido abundantemente entremezclados por el mismo escritor con sus comentarios sobre mi último trabajo. Digo lo mismo, porque no estoy dispuesto a suponer que en Gran Bretaña existan dos personas capaces de malinterpretar tan estúpidamente y tergiversar tan deliberadamente. Pero su identidad no tiene ninguna consecuencia para la discusión, y es innecesario solicitar pruebas de ello. Se podría suponer que todo el propósito del artículo insertado en el noveno número de la Review ha sido, no para refutar los principios que el escritor ataca, sino para mostrar que él es incapaz de comprender ni siquiera el más simple de ellos.

He afirmado que dos series de ondulaciones que interfieren entre sí a ciertos intervalos relativos producen necesariamente ciertas modificaciones en sus efectos conjuntos. Estos términos no solo pertenecen a la misma teoría, sino que son partes de la misma posición que ya he ilustrado mediante una comparación familiar en estas observaciones. El autor de la crítica ha observado sagazmente que "quienes se oponen a la teoría de la interferencia, solo tienen que pasar la página, y encontrar la teoría de los intervalos, y no necesitan más que ir a la sección siguiente y las vibraciones y ondulaciones estarán muy a su servicio."

Este espécimen es suficiente para explicar cuán naturalmente debe parecerle "inexplicable", que el proceso de interferencia debería producir ciertos efectos, algunos de los cuales nunca supuse que podrían producir, y otros que ninguno que entendiera correctamente mi teoría, alguna vez podría dudar que debe producir Él pregunta: "*¿sobre qué principio conocido, se puede explicar la producción de franjas de colores a partir de dos haces de luz blanca*?" *Respondo: sin duda, sobre ningún principio conocido anteriormente; pero al considerar la ley que he descubierto, el más simple e inevitable.*

En la observación siguiente, el revisor me ha dado una oportunidad para un triunfo tan gratificante como puede ser todo triunfo donde el enemigo es tan despreciable. Consciente de la incapacidad de explicar el experimento que he avanzado, demasiado mezquino para confesar esa incapacidad, y demasiado holgazán para repetir el experimento, se ve obligado a suponer que es incorrecto, y para insinuar que mi mano puede haber errado fácilmente a través de un espacio tan estrecho como un tercio de pulgada. Pero la verdad es que mi mano no estaba involucrada: la pantalla se colocó sobre una mesa y se movió mecánicamente hacia adelante con la máxima precaución; el experimento tuvo éxito en algunas circunstancias donde la amplitud del objeto se duplicó o triplicó; y afirmo que fue tan fácil para mí estimar un intervalo de un tercio de pulgada, como un intervalo cien o mil veces mayor. Permitamos que haga el experimento, y luego niegue el resultado, si puede.

Con la misma pertinacia de torpeza, ha remarcado que la interferencia de la luz, reflejada por dos bordes contiguos, debe, según mis principios, producir, no franjas continuas, sino solo "pequeñas zonas de bandas cuadrados o rectangulares". ¿No fue suficiente el haber demostrado la debilidad de sus capacidades respecto a las leyes físicas? ¿Era necesario inducir a sus lectores a suponer que era incapaz de efectuar un pequeño cálculo algebraico que condujera a las propiedades de la hipérbola?

Dejemos que líneas rectas curvadas hacia sus sombras por los bordes de un objeto rectangular corten porciones de las líneas opuestas, excediendo su propia longitud por un intervalo dado. Sostengo que las intersecciones formarán curvas continuas, y que aquellas curvas serán hipérbolas; por lo tanto, la forma de las bandas no debe ser la de puntos sueltos, sino de curvas hiperbólicas.

"*Es un absurdo metafísico afirmar que la cualidades pueden moverse en superficies concéntricas*", *dice el crítico. No he dicho que las cualidades de la luz* "*se muevan*" *en superficies concéntricas, sino que* "*se suceden unas a otras*" *en superficies concéntricas; y en esto ciertamente no hay absurdo metafísico. La condensación y la rara facción son cualidades del aire, y no se negará que, en cada sonido musical, la condensación y la rarefacción se suceden continuamente en superficies concéntricas.*

Sobre mi tren de argumentación respecto de la naturaleza de la luz, el crítico observa, en primer lugar, que una analogía se basa en una inferencia. Respondo, que cuando la analogía es suficientemente cercana, es una base de inferencia física muy satisfactoria. En segundo lugar, dice que se establece como una verdad necesaria una suposición gratuita. Yo respondo, que la suposición no es gratuita; que nadie, excepto por el argumento, lo negará o puede negarlo; si se lo niega, sería perfectamente fácil justificarlo mostrando las contradicciones inevitables que resultarían de cualquier alternativa que pueda ser sustituida por ella. La parte restante del párrafo es tan correctamente citada como la edición en que fue impresa la Biblia, en la que el único error fue la omisión de la palabra "no" en el séptimo mandamiento: aquí el monosílabo invierte por completo el sentido del pasaje, y quedaría destruida por completo la fuerza de la crítica, por lo tanto, la omite muy prudentemente.

He insertado una advertencia relativa a los engaños en el examen de los objetos microscópicos, no para atribuir ningún mérito adicional a mis propias explicaciones, sino como una sugerencia que surge naturalmente del tema. La misma precaución podría haber sido sugerida por los resultados de algunos experimentos anteriores, pero las apariencias particulares que producirían tales falacias nunca antes podrían haber sido tan minuciosamente indicadas. Que las imágenes de objetos muy pequeños en la retina posiblemente se vean afectadas por tales causas, es la inferencia natural de mis principios; y no tiene ninguna consecuencia para esta posición si el revisor puede o no puede explicarla por su cuenta.

Mi comparación de una arboleda penetrada por el viento, con las partículas de un cuerpo material,— como todos los filósofos modernos lo suelen suponer—, separadas por intervalos incomparablemente mayores que sus diámetros, y permitiendo que un medio inconcebiblemente raro penetre con perfecta libertad en cada intersticio, apenas podría haber parecido oscura o inaplicable para cualquier hombre no cegado por el prejuicio o imparcial sin malevolencia.

Ya he hablado lo suficiente de Newton para mostrar cómo he venerado a su carácter, como el primero de los matemáticos y el más grande de los filósofos. Tal vez, sin embargo, la mención de personas cuyos puntos de vista son "aún menos amplios" que los de él, pueda implicar en cierta medida lo que nunca quise expresar, y por lo tanto puede requerir algunas pequeñas disculpas, especialmente porque las expresiones se aplicarán a las objeciones lo cual ahora estoy tratando de refutar. De hecho, fue una falta de respeto a su ilustre memoria colocar las fantasías superficiales y dogmáticas de un escritor de la Edinburgh Review en algún tipo de comparación con los razonamientos profundos y refinados de un Newton. En lugar de "aún menos amplios" e iluminados, debería haberlos llamado estrechos y confusos, egoístas e interesados, pueriles y ostentosos.

La indignación contra el mismo tribunal, violento y arbitrario, ha sido excitada y provocada por una declaración de un hombre cuya aprobación es tanto más valiosa y otorgada con la consideración más cautelosa a la precisión experimental y a la inducción lógica. El Dr. Wollaston ha observado que "la teoría de Huygens ofrece, como ha demostrado recientemente el Dr. Young, una explicación simple de varios fenómenos aún no explicados por ninguna otra hipótesis. Sus propias observaciones sobre el cristal de Islandia, en todo de acuerdo con esta hipótesis de Huygens; las medidas que ha tomado, corresponden más con lo que bien podría ocurrir, que con una teoría falsa". Pero él se contenta con afirmar estos hechos innegables; y el crítico va demasiado lejos cuando afirma que el Dr. Wollaston "ha adoptado la salvaje teoría óptica de las vibraciones". Si el Dr. Wollaston hubiera estado familiarizado con los experimentos y cálculos que hice desde entonces, es posible que su asentimiento hubiera sido mucho más completo y sin reservas. Pero si bien le asigno a los experimentos del Dr. Wollaston todo el mérito que una concepción clara, una mente vigorosa, una mano firme y un ojo preciso pueden otorgarles, los Editores de Edimburgo no deben decir que sus experimentos han dado a la teoría "una plausibilidad que antes no poseía". Como experimentos, tienen todo el mérito de la originalidad, ya que el autor, cuando los creó, no conocía los de Huygens; y su invención más ingeniosa, la de un instrumento para medir los poderes de refracción, le permitió, en gran medida, mejorarlos y ampliarlos. Pero los experimentos de Huygens fueron elaborados y diversificados, y cada argumento que puede inferirse de las observaciones del Dr. Wollaston había sido anticipado por este gran filósofo sobre la base de las suyas propias. Es cierto que nuestro crítico no se habría molestado con el tratado de luz de Huygens; su negocio es censurar a los demás y no informarse a sí mismo; era más fácil para él llamar a esta doctrina "una hipótesis torpe" y "una invención aburrida" que investigar su verdad y admirar su elegancia. Efectivamente, ha hecho distinciones entre la doctrina de Huygens y la mía, que sirven para demostrar con mayor fuerza que él no estaba familiarizado con ninguna de las dos; Solo responderé a sus epítetos con una cita de un escritor cuyos méritos se saben, por el testimonio de Newton, se elevaron muy por encima del rango ordinario de sus contemporáneos. En las conferencias de Cotes sobre hidrostática, donde él habla de la velocidad de la luz, y aprovecha la ocasión para mencionar la hipótesis de Huygens, ocurre el siguiente pasaje: "Cuando tomamos una visión particular de las diversas partes de esta hipótesis, parece que él las ha ideado tan ingeniosamente, y armado tan bellamente, que difícilmente se puede evitar desear que fuera cierta".

En esa época, la evidencia era imperfecta pero la simetría era completa.

En varias instancias, el revisor ha considerado apropiado unir sus invectivas contra mí con algunos ridículos objetivos de la Royal Institution of Great Britain; una institución en la que sus di-

rectivos han estudiado como concentrar todo lo que es útil en la ciencia, o elegante en la literatura. Esta conexión le parece agregar tanto peso a sus argumentos, que ha elegido, sin mayor provocación, insinuar su existencia, a más de un año que la institución se disolviera. Acepté la designación de Profesor de Filosofía Natural en la Royal Institution como una ocupación que llenaría de manera agradable y ventajosa las horas de ocio que un joven practicante de fisiología debe esperar tener libre de cuidados profesionales. Me llevó a esperar que podría lograr una audiencia formada por los habitantes más respetables de la ciudad, con una parcialidad tal como los moderadamente bien informados están dispuestos a entretener, para aquellos que parecen. saber incluso un poco más que ellos mismos sobre cuestiones de ciencia; que podría ser de utilidad para el público al diseminar los verdaderos principios de la filosofía natural; y que en el futuro podría ser remunerado por el disfrute de una confianza más amplia en mis habilidades profesionales de la que podría haberle otorgado a una persona menos conocida. Mientras mantenía la situación, deseé que mis conferencias fueran tan inteligibles como la naturaleza de los temas lo permitiera; pero debo confesar que mi ambición no era sustituirlos por los de cualquier experimentador superficial, que solía impartir cursos de filosofía natural para la diversión de los cursantes. Cualesquiera que hayan sido las imperfecciones de mis conferencias, no se puede afirmar, excepto tal vez en el Edinburgh Review, que eran solamente adecuadas para un público de damas de la moda. Después de cumplir, durante dos años, los deberes de la Cátedra, los encontré tan incompatibles con las actividades de un médico práctico, que, de conformidad con el consejo de mis amigos, notifiqué mi deseo de renunciar al cargo. Sin embargo, creo que para la Institución, para el público y para mí mismo, el resultado de mis trabajos, a través de toda la extensión de la filosofía natural y las artes mecánicas, debería traducirse en alguna utilidad permanente; y desde entonces he recolectado tal cantidad de referencias adicionales a obras de todas las tiempos y de todas las naciones, acompañadas de muchas notas y extractos de ellas, que de ahí en adelante será fácil para cada estudiante y cada autor saber de inmediato qué ha sido hecho, y lo que queda por hacer, en el tema de sus investigaciones particulares; y a qué libros debe recurrir para la mejor información y dónde requerir y poder obtener información posterior.

Teniendo en cuenta cuán ampliamente dispersa esta información, confío en que haya prestado un servicio de cierta importancia a todos los departamentos de ciencias, y ahora estoy a punto de preparar mi libro para su publicación inmediata. Con este trabajo terminará mi búsqueda de la ciencia general: de ahí en adelante he resuelto confinar mis estudios y mi pluma a temas médicos solamente. No soy responsable por los talentos que Dios no me ha dado, pero los que poseo, hasta ahora los he cultivado y empleado tan diligentemente como mis oportunidades me han permitido hacer; y continuaré aplicándolos con asiduidad, y en tranquilidad, a esa profesión que ha sido siempre el objetivo último de todos mis esfuerzos ".

Welbeck Street, 30 de noviembre de 1804.

Unos años más tarde, el problema de la difracción fue tratado con más precisión por Augustin–Jean Fresnel (1788 – 1827) quien, en 1815, presentó ante el Institut de France una Memoria que fue publicada, con algunas modificaciones, en los *Annales de Chimie et de Physique.*[29]. Las distancias de las bandas hechas por un alambre colocado en un haz de luz divergente, desde el eje de los rayos, se determinaron mediante un método más preciso y completo que cualquiera que se hubiera aplicado anteriormente para su medición; y, al igual que Young, observó la desaparición de las bandas interiores cuando la luz que pasaba por un lado del alambre era interceptada antes de llegar a la pantalla.

Fue al reflexionar sobre esta última observación fundamental, que llegó a la conclusión de que los rayos de luz a ambos lados del alambre eran absolutamente necesarios para la formación de las bandas dentro de la sombra y que esa formación era producida por la interferencia, bajo ciertas condiciones, de esas corrientes luminosas, lo que lo llevó al redescubrimiento del principio de interferencia y muchas de sus aplicaciones, que Young había hecho trece años antes, pero que él no conocía al momento de presentar su memora en el Institut.

Con la ratificación del trabajo de Fresnel a la teoría ondulatoria de Young, ésta comenzó a ganar más adeptos entre los físicos de la época.

Después de cumplir los dos años como Profesor de Filosofía Natural en la Royal Institution, Thomas Young renunció porque consideró incompatible esa actividad con sus deseos de dedicarse a la Medicina práctica. A pesar de renunciar, se consideró en deuda con la Institution y pensó que sus clases podrían rendir una utilidad permanente, por lo que se dedicó a revisar todas sus clases para darlas a publicar con el agregado de una selección de trabajos y memorias publicadas sobre varios de los temas dados en clase. Esa obra, recién se publicó en dos volúmenes en 1807.

El 20 de diciembre de 1804, leyó ante la Royal Society su trabajo sobre la cohesión de los fluidos,[30] donde analizó las causas que mantienen curvadas las superficies de las gotas, el descenso capilar del mercurio y otros líquidos que no mojan, el ascenso capilar del agua y un conjunto de fenómenos vinculados a la tensión superficial y a otras características de los fluidos. Algunos de los resultados de este trabajo fueron publicados por La Place al año siguiente sin su consentimiento. En esa obra, formula la ecuación que da la diferencia de presión requerida para modificar la superficie curva de un fluido (por ejemplo en un tubo capilar) en función de coeficiente de tensión superficial γ y de los radios de curvatura inicial y final, $\Delta p = \gamma\ [1/R_i + 1/R_f]$, y que luego se conocería como "ecuación de Young–Laplace".

Tal como se había propuesto luego de la polémica con The Edinburgh Review, en ensayo sobre la cohesión de los fluidos fue su última publicación sobre temas de Física. Por pedidos especiales, participó de la revisión de algunos trabajos sobre estos temas, pero lo hizo en forma anónima. Entre ellos, un artículo en el Journal de Nicholson[31] sobre el descubrimiento de Étienne–Louis Malus que

[29] Fresnel, A.J. "Mémoire sur la diffraction de la lumière, où l'on examine particulièrement le phénomènes des franges colorées que présentent les ombres des corp éclaireés par un point lumineux", *Annales de Chimie et de Physique*, **1816**; Vol. I, pp. 239–281.

[30] Young, T., "An essay of the cohesion of fluids", *Phil. Trans.*, 1805, **95**, 65 – 87.

[31] "Popular Statement of the beautiful experiments of Malus, in which he has developed a new property of light", *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts*, 1812, **13**, 344 – 347.

la luz que incide sobre el espato de Islandia, además de ser polarizada por refracción, podía ser polarizada por reflexión haciéndola incidir con un ángulo de 35º 25’, en el que Young hizo notar que la luz polarizada por reflexión es independiente de la naturaleza de la superficie que la refleja.

Alrededor de 1810, fue propuesto un sistema que cambiaba toda la estructura de madera en el interior de las naves, con el objetivo de dar mayor rigidez y resistencia a todo el armazón de las embarcaciones. A su vez, esas modificaciones tendían a reducir el arqueo de un barco cuando es botado y, al cambiar la forma redondeada de las popas de los barcos por superficies planas que, en los barcos de guerra permitían la instalación de cañones para su mejor defensa. Estas modificaciones fueron rechazadas por muchos capitanes de navíos y oficiales de la Marina británica, por lo que el Almirantazgo decidió convocar a científicos para que den opiniones fundadas sobre la conveniencia o no de efectuar esas modificaciones. Young presentó un informe debidamente fundamentado desde la Mecánica, en forma de Memoria, que fue leída ante la Royal Society el 24 de marzo de 1814 y publicada en las Transactions[32]. Si bien no estuvo de acuerdo con varios detalles, aprobó el proyecto en general.

También contribuyó con otros nueve artículos científicos del *Quarterly Review*.

En 1816, fue nombrado Secretario de una comisión para determinar la longitud del péndulo de segundos (un péndulo cuyo período es, precisamente, de dos segundos, uno en cada dirección) y compararlo con el de Francia. Además, la Comisión debía dictaminar si era practicable establecer un sistema de pesas y medidas para todo el Imperio. La Comisión emitió tres informes redactados por Young, los que fueron publicados en el Supplement de la Enciclopedia Británica.

Young ya había sido nombrado miembro de una comisión de la Royal Society cuya tarea era investigar el grado de peligro existente en la introducción de gas en la ciudad de Londres y en la instalación de gasómetros en barrios densamente poblados. La parte química del estudio estuvo a cargo de Smithson Tennant y William Hyde Wollaston. El estudio fue favorable en tanto se tomaran todas las medidas de seguridad y de la demostración de que la llama del gas en un pequeño tubo no es transmisible, Humphry Davy diseñó su lámpara de seguridad para los mineros.

En noviembre de 1818, Young fue nombrado superintendente del Nautical Almanac[33] y secretario del Board of Longitude[34]

Todo el resto de su obra estuvo dedicada a la Medicina y a otros temas que no eran de la Física, entre ellos, la traducción, en 1814, de la inscripción en demótico en la piedra Rosetta, mientras que lo expresado mediante jeroglíficos fue descifrado en 1822 por Jean-François Chmpollion.[35]

---

[32] **Young, T.,**“Remarks on the employment of oblique Riders, and on other alterations in the constructions of Ships. Being the substance of a Report presented to the Board of Admiralty with additional demonstrations and illustrations, *Phil. Trans.*, 1814, **II**, 303 – 336.

[33] Una publicación que describe las posiciones de un conjunto de cuerpos celestes que les permite a los navegantes establecer su posición en el mar.

[34] Institución fundada en 1714, que establecía premios para aquellos investigadores que presentasen métodos verificables que permitiesen determinar longitudes en el mar.

Entre 1816 y 1823, contribuyó con sesenta y tres artículos a los Supplements de la Enciclopedia Británica Cuarenta y seis de ellos eran biografías.

Thomas Young se casó con Eliza Maxwell el 14 de junio de 1804. No tuvieron hijos y compartieron una vida apacible durante casi un cuarto de siglo.

En febrero de 1829, Young comenzó con una afección respiratoria, que los médicos dijeron que era asma. La enfermedad se fue agravando con pérdidas de sangre y dificultades respiratorias cada vez más frecuentes. Intuyendo su propio final, afirmaba que había cumplido con todas sus tareas, excepto la de completar el diccionario egipcio. Falleció el 10 de mayo de ese año. A pedido de su esposa, el Decano de la Abadía de Westminster, ordenó la erección de un monumento en esa Abadía.

9 – 2.- Étienne-Louis Malus y la polarización por reflexión.

Étienne Louis Malus nació en París el 23 de julio de 1775. Fue hijo de Anne-Louis Malus-de-Mitry, tesorero de Francia, y Louise-Charlotte Desboves. Su primera educación la recibió de sus padres y estaba orientada principalmente a la literatura. Desde niño solía recitar largos fragmentos de La Ilíada, de poemas de Virgilio o de Horacio. A los diecisiete años compuso un poema épico titulado *La Fondation de la France ou la Thémelie* una tragedia en cinco actos y versos, que tituló "*La mort de Catón*" y otra tragedia que tituló *Electra.* Esta inclinación no le impidió dedicar tiempo a los estudios de Matemática y Ciencias por lo que defendió con éxito el examen de admisión a la École Royale de Genie en Mézières, donde cursó la carrera de Ingeniería destacándose por su capacidad en Matemática. Esto motivó que el Profesor Gaspard Monge se ocupara personalmente de entrenarlo en esta disciplina. En 1793, los ataques de varios jefes militares al Ministro Jean-Baptiste Bouchotte, hizo que este iniciara una "caza de brujas" y Malus, al igual que varios estudiantes fue despedido, acusado de conspirar contra el Ministro. Expulsado de Genie, ingresó al XVº batallón de Paris como simple soldado. Allí trabajó en la reparación del puerto de Dunkerke, bajo las órdenes del Ingeniero en puentes y caminos Gratien Le Père, quien dirigía la obra. Le Père pronto se dio cuenta de la capacidad de Malus y con su recomendación y la de Monge, logró que lo admitieran en la École Polytechnique. En la École, Malus tuvo como docente a Jean-Baptiste Joseph Fourier y fue reconocido por éste como su mejor alumno.

Fig. 9.3.E.L. Malus (1775 – 1812)

[35] Una interesante descripción sobre los trabajos de Young para descifrar los jeroglíficos egipcios, que escapa por completo a los temas de este libro, puede consultarse en el Capítulo X, *Hyeroglyphical Researches* del libro *Life of Thomas Young, MD, FRS, &c.* de George Peacock, John Murray, London, 1855, páginas 258 – 344.

Al egresar de la École se le restableció el grado de subteniente y poco después fue ascendido a capitán y enviado a la École d'application et de l'Artillerie et du génie de Metz donde se hizo cargo de una cátedra de Matemáticas.

En 1797, comenzó su campaña militar integrando el Regimiento Sambre y Meuse y en el cruce del Rin tuvo su bautismo de fuego. Ese año, estando en la Guarnición de Giessen, conoció a Wilhelmina Louise Koch, hija del rector de la Universidad de Giessen, de quien se enamoró profundamente. Pero las obligaciones militares lo llevaron a embarcar en Toulón en una expedición al mando del General Louis Marie de Caffarelli que partía hacia Egipto para integrarse con el ejército de Napoleón. Allí combatió en las batallas de Chebreys y de "Las Pirámides" contra los mamelucos.

Durante su estadía en Egipto, fue nombrado miembro del Institut de El Cairo, creado por Napoleón, pero sus actividades para el ejército francés lo tenían muy ocupado para permitirse el gusto de ocuparse de las ciencias. Sin embargo, en una operación de reconocimiento del terreno, en una zona deshabitada, encontró una rama del Nilo, ignorada hasta entonces por los viajeros; por lo que presentó, ante el Institut, una memoria describiendo el curso de agua en un mapa de una zona donde ningún francés había penetrado desde las Cruzadas.

A las órdenes del General Jean-Baptiste Kléber, participó en el sitio de la ciudad de El Arish, en el norte del desierto de Sinaí y en el sito de Jaffa, sobre el Mediterráneo. En el sitio a San Juan de Acre, las tropas francesas fueron diezmadas por la peste bubónica. En sus memorias, Malus describió crudamente su enfermedad: disentería, supuraciones, alta fiebre que aumentaba a la noche. El 2 de floreal pudo embarcar para Egipto y, según él contó, el aire de mar le provocó una notable mejoría y las costras de los bubones en su ingle derecha empezaron a caer. Al llegar al puerto de Damiette, el barco fue declarado en cuarentena y al bajar fue encerrado en el lazareto de Lésbieh. Cuando fue dado de alta, lo trasladaron a la guarnición de Cathiéh.

En Cathieh escribió una memoria sobre la naturaleza de la luz. En ella, adaptó las concepciones de Lavoisier según las cuales el oxígeno gaseoso era una sustancia compuesta formada por tres elementos: el elemento oxígeno, el calórico y la luz y estimó que la luz estaba compuesta por calórico y oxígeno. De acuerdo con el porcentaje de calórico tal era el color de la luz. Así, la luz con mayor porcentaje de calórico tenía coloración rojiza mientras que la de menor contenido de calórico mostraba color violeta. Esa hipótesis lo llevó a deducir (erróneamente) que la velocidad de la luz en el agua era mayor que en el aire.

En 1799, Malus fue convocado a El Cairo por el General Kléber quien lo nombró Jefe de batallón. Poco después fue asignado a la división del General Louis Friant y el 2 de marzo de 1800 participó de la batalla de Heliópolis donde los 11.000 hombres del ejército francés derrotaron a los 60.000 del ejército británico-turco-mameluco.

Luego del asesinato del General Kléber, asumió el mando del ejército francés el General Jacques-François Menou quien, al capitular ante el General James Abercromby tuvo que enviar a la mayor parte del ejército a Francia. Así, el 14 de octubre de 1801, Malus llegó a Marseille en un barco británico.

Luego de una corta visita a sus padres, Malus partió para Giessen donde, luego de cuatro años, se reencontró con Wilhelmina Louise Koch, con quien se casó al poco tiempo.

Entre 1802 y 1803, fue destinado a Lille y en 1804 a Anvers para adecuar las instalaciones de una base naval. En 1805 fue destinado a la Armada del Norte y entre 1806 y 1808, fue subdirector de la fortificación de Strassbourg. En 1809, fue destinado a Paris.

Ya en 1807, Malus había presentado un tratado de Óptica analítica ante el Institut de France, el que fue auditado, y aprobado el 19 de octubre de 1807, por Joseph-Louis Lagrange, Pierre Simon de La Place, Gaspard Monge y Silvestre François Lacroix.

Este tratado comienza describiendo las propiedades generales de los haces luminosos:

« *Les rayons qui émanent d'un point lumineux dans un milieu de densité uniforme, peuvent être regardés comme un système de lignes droites passant par ce point. Lorsque ces rayons rencontrent la surface d'un corps qui les réfléchit ou les réfracte, leur disposition mutuelle éprouve différentes modifications d'où naissent tous les phénomènes de l'optique*.»[36]

A partir de estas consideraciones, elaboró las ecuaciones que representan a un sistema de líneas rectas que emanan de todos los puntos de una superficie curva, siguiendo una ley analítica cualquiera. Luego analizó dos sistemas de superficies desarrollables que siempre pueden reemplazar al sistema de líneas rectas y de dos superficies curvas que son el lugar de los puntos de encuentro de rectas consecutivas; los ángulos que, al cruzarse, forman esas superficies curvas; las soluciones particulares que determinan los límites de los resultados precedentes; de los haces de rayos curvos y, en general, de los sistemas de curvas contiguas y de formas variables.

A continuación se ocupó del tratamiento matemático de la *catóptrica*[37]. Analizó las ecuaciones que rigen para los rayos de luz que emanan de un punto luminoso y son reflejados por una superficie curva. Analizó el caso de aquellos rayos reflejados entre dos sistemas de superficies que se cortan en ángulo recto; cómo la intensidad de la luz reflejada se modifica por la forma de la superficie reflectante; cuáles son las funciones que entran en la expresión de los rayos doblemente reflejados y como se modifica la intensidad de la luz cuando es reflejada por más de una superficie reflectante. `Por último, analizó la forma aparente de los objetos cuando su imagen es reflejada por un número cualquiera de superficies curvas.

La parte final del tratado está dedicada a la *dióptrica*[38]. Estableció las ecuaciones que describen a los rayos que emanan de un punto luminoso y son refractados por una superficie curva; de aquellos casos en los que los rayos refractados vinculan a dos superficies que se cortan en ángulo recto; de cómo se modifica la intensidad de la luz refractada debido a la forma de las superficies refractan-

[36] Los rayos que emanan de un punto luminoso en un medio de densidad uniforme, pueden ser considerado como un sistema de líneas rectas que pasan por ese punto. Una vez que esos rayos se encuentran con la superficie de un cuerpo que los refleja o los refracta sus disposiciones mutuas sufren diferentes modificaciones de donde nacen todos los fenómenos de la Óptica.

[37] Así se llamaba entonces a la parte de la Óptica que se ocupa de los fenómenos de reflexión luminosa.

[38] Así se llamaba entonces a la parte de la Óptica que se ocupa de los fenómenos de refracción luminosa.

tes; de los rayos refractados por un número cualquiera de medios; de la intensidad, la claridad y la forma de las imágenes refractadas; de los límites a partir de los cuales la refracción se torna reflexión; de cómo se puede deducir la "fuerza refractiva" de cuerpos transparentes y cuerpos opacos; de la luz refractada por cuerpos no homogéneos; del caso en el que la refracción se produce a través de capas planas de distintos materiales: del caso en el que las distintas capas forman una serie de esferas concéntricas.

El Comité de evaluación, le otorgó a Malus el más alto grado de aprobación y decidió que la memoria se publique en el *Recueil des Savants étrangers* de la *Académie des Sciences*.

El 16 de noviembre de 1807, Malus presentó a la Academia una memoria en la que abordaba un punto de vista extremadamente importante y que podía inclinar la balanza entre la teoría ondulatoria y la corpuscular de la luz.

En el Libro X de su *Traité de Mécanique céleste*, Pierre Simon de La place, al analizar las refracciones de la luz a través de distintos medios, encontró la ecuación que da la relación entre el seno del ángulo de refracción (θ') y el seno del ángulo de incidencia (θ). Esa ecuación la expresó como

$$\sin\theta' = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1+\frac{4\rho K}{n^2}}}$$

En esta ecuación, ρ es la densidad del material que es penetrado por la luz, K es una integral que cuantifica la acción de una lámina muy delgada de ese material, paralela a la superficie sobre la que incide la luz y $4\rho K/n^2 = (i^2 - 1)$, siendo i el índice de refracción.

Razonó que para que los rayos de diferentes colores sean diferentemente "refrangibles", es necesario o que sus velocidades sean diferentes, o que la intensidad de la acción de los cuerpos sea diferente para cada uno de estos rayos. Consideró que la diferencia de velocidades no puede explicar por sí sola todos los fenómenos de refrangibilidad de los rayos; ya que entonces, la diferencia de las refracciones de los rayos extremos, es decir, la dispersión de la luz, sería la misma para todos los cuerpos, lo que estaba en contra de los resultados experimentales. Además, su concepción teórica de que todos los corpúsculos de luz eran exactamente iguales, le impedía considerar que esas "moléculas", como las llamaba, tuviesen distintas velocidades.

Además, encontró que la cantidad $4\rho K$ no es la misma para todos los cuerpos transparentes y supuso que la acción del cuerpo sobre la luz que lo atraviesa podría ser una función de la distancia recorrida. Entonces postuló que para que la acción de los cuerpos sobre la luz fuese la misma, debería multiplicarse su densidad por un coeficiente que dependiera de la naturaleza del material y de si el cuerpo es diáfano u opaco.

William Hyde Wollaston propuso un método para calcular el poder refractivo de los materiales transparentes y opacos. Este método se basaba en la aplicación de un cristal plano sobre la superficie del cuerpo y determinar el ángulo de la luz incidente sobre el cristal a partir del cual el cuerpo deja de ser visible. Pero, de acuerdo con la teoría de la reflexión expuesta en el décimo libro de la Mecánica celeste de La Place — y fundada sobre la hipótesis corpuscular,— las fórmulas debían ser diferentes para los cuerpos opacos y para los cuerpos diáfanos.

Malus, al analizar el trabajo de Wollaston, pensó que quizás podría encontrar ese coeficiente dependiente de la naturaleza del medio, que había mencionado La place. Para ello eligió un material, la cera de abejas, cuya refractividad se podía medir, por el método de Wollaston, tanto en el estado transparente como en el estado opaco.

El 16 de noviembre de 1807, Malus presentó ante el *Institut des Sciences* una Memoria[39] en la que aplicó las fórmulas de la Mecánica celeste a los ángulos de desaparición[40] correspondientes a estos dos estados y encontró que eran bastante diferentes entre sí, mientras que los poderes de refracción[41] eran perfectamente idénticos. Esta identidad de los poderes refractivos de la cera opaca y la cera diáfana, que parecía ser una verdad necesaria, le había parecido a La place, — como a todos los geómetras y físicos partidarios de la "teoría de la emisión",[42] — la prueba matemática de la verdad de la teoría newtoniana. Ciertamente, es una cosa singular que la identidad perfecta de los poderes refractivos se calcule desde diferentes ángulos de desaparición y de acuerdo con fórmulas bastante diferentes entre ellos.

El 4 de enero de 1808, la *Académie des Sciences* propuso para el Premio de Física, a discernir en 1810, el siguiente tema:

"Dar una teoría matemática para la doble refracción que experimenta la luz al atravesar varias sustancias cristalinas, que pueda ser verificada por la experiencia".

Sin esperar la fecha en que, según el programa, la competencia debía cerrarse, Malus comunicó las partes más esenciales de su trabajo a la Academia, el 12 de diciembre de 1808. La comisión responsable de evaluar los trabajos que competían, estuvo integrada por J.L. Lagrange, R. J. Haüy, L. J. Gay-Lussac y J. B. Biot; el informe fue presentado por Lagrange, y la recomendación unánime del jurado fue que se le otorgue el premio a Malus.

Uno de los primeros experimentos relativos a la doble refracción del "espato de Islandia (carbonato de calcio romboédrico) fue realizado por Érasme Bartholin (1625 -1698) quien en 1669 publicó su trabajo *Experimenta crystalli Islandici disdiaclastici quibus mira et insolita refractio detegitur*[43]. Huygens se ocupó también de este fenómeno y desarrolló una construcción geométrica muy simple y muy elegante, tomada de su teoría ondulatoria, mediante la cual establecía las posiciones del rayo extraordinario y el del ordinario y concluyó, según su teoría, que cada uno de los rayos vibra en un solo plano y que el plano de vibración de uno es perpendicular al plano de vibración del

---

[39] Malus,E,J., « Sur la mesure du pouvoir réfringent des corps opaques », *Mem. Inst. Sci. Arts Paris,* 1811, **2**, 509 – 517.

[40] Lo que hoy se llama "ángulo límite".

[41] Que resulta de dividir el índice de refracción por la densidad del material refractante.

[42] Nombre que le había dado Newton a su teoría, según la cual la luz consiste en partículas materiales y los fenómenos ópticos se deben a interacciones mecánicas, tales como atracciones, repulsiones, choques elásticos, etc.

[43] Danielis Paulli, Hafnia (Copenhaguen) 1669.

otro. Newton intentó sustituir la teoría de Huygens por su concepción corpuscular, pero las consecuencias no siempre se confirmaban por la realidad.

La memoria presentada por Malus el 12 de diciembre de 1808, llevaba por título « *Mémoire sur une propriété de la lumière réfléchie par les corps diaphanes* » En este trabajo tradujo la construcción de Huygens en fórmulas analíticas; y comparó la desviación de los rayos extraordinarios deducidos de estas fórmulas con los resultados de múltiples experimentos muy precisos, encontrando siempre un acuerdo perfecto. Así, la concepción geométrica de Huygens quedó plenamente establecida, aunque originalmente Malus había dirigido sus investigaciones por un punto de vista corpuscularista.

Cuando un rayo de luz atraviesa un cristal de espato de Islandia en la dirección de su eje óptico se desdobla en dos rayos de igual intensidad. Pero no ocurre lo mismo en el caso en que los rayos que salen de tal cristal son analizados con un segundo cristal de esa sustancia. Si ese segundo cristal se sitúa respecto del primero de manera que las caras homólogas sean paralelas, sólo el rayo ordinario se refracta siguiendo la ley de la refracción. Pero si ese segundo cristal se rota 90º manteniéndose paralelo al primero, el rayo ordinario se vuelve extraordinario y el extraordinario sufre una refracción ordinaria.

Otro de los descubrimientos importantes de Malus lo observó estando en su casa de Rue d'Enfer. Había comenzado a examinar con un cristal birrefringente los rayos solares que reflejaban los cristales de las ventanas del Palacio de Luxemburgo. En lugar de dos imágenes intensas que esperaba ver, solo vio una, o la de un rayo ordinario o la de un extraordinario, según la posición que ocupaba el cristal ante su ojo. Ese extraño fenómeno lo impactó mucho y trató de explicarlo adjudicándole alguna propiedad a la luz solar al atravesar la atmósfera. Cuando llegó la noche dejó que la luz de una vela incidiera sobre una superficie de agua. Cuando la luz incidía sobre el agua, con un ángulo de incidencia de 36º encontró, usando un cristal birrefringente, que la luz reflejada estaba polarizada, como si viniera de un cristal de espato de Islandia. Repitió el experimento haciendo incidir la luz de la vela, con un ángulo de 35º sobre la superficie de un espejo de vidrio plano y comprobó que no había una única forma de polarizar la luz sino que la polarización por reflexión, que no se producía sobre superficies metálicas pulidas, era prácticamente independiente de la naturaleza de la superficie reflectante. No contento con este resultado, hizo incidir, con un ángulo de 36º, ambos tipos de rayos provenientes de un cristal de espato de Islandia sobre una superficie diáfana y encontró que ambos rayos tenían comportamientos diferentes. Cuando el rayo ordinario experimentaba una reflexión parcial, el extraordinario no se reflejaba en absoluto sino que se refractaba totalmente. Si la posición del cristal, relativa al plano sobre el que operaba la reflexión, era tal que el rayo extraordinario se reflejaba parcialmente, el rayo ordinario se refractaba totalmente.

A partir de entonces, Malus comenzó a hablar de tres tipos de rayos luminosos: los "naturales", que al atravesar un cristal birrefringente dan siempre dos imágenes de igual intensidad; los "completamente polarizados", que cuando inciden en dos posiciones particulares de las caras de esos cristales dan siempre una sola imagen y los "parcialmente polarizados" que tienen propiedades intermedias de las dos clases de rayos mencionados.

Inicialmente, Malus creyó que los rayos reflejados por los metales no se polarizan, ni siquiera parcialmente; pero luego se rectificó de ese error.

Continuó sus investigaciones sobre la polarizaciones y a fines de 1809, ya había acumulado una vasta información experimental sobre el tema, por ejemplo, que la luz que pasa a través de un cubreobjetos ofrece, bajo inclinaciones adecuadas, rastros obvios de una polarización parcial, y que si se forma una pila de láminas delgadas, el rayo de luz natural que la atraviesa queda completamente polarizado; que cuando el rayo de luz natural se refleja sobre la superficie de acuerdo con el ángulo adecuado, queda "completamente polarizado" y nunca "parcialmente polarizado", etc.

Después de los experimentos de Huygens, sobre la doble refracción del espato de Islandia y del cristal de roca, los mineralogistas reconocieron que existe en la naturaleza una gran cantidad de cristales que producen birrefringencia. Los únicos cristales que no la producen son los que corresponden al sistema cúbico. Los de los sistemas tetragonal, rómbico y hexagonal muestran dos índices de refracción diferentes y los de los sistemas monoclínico, triclínico y ortorrómbico, que son cristales biáxicos, se caracterizan por tres índices de refracción.

En 1811, Arago, analizó la birrefringencia de un conjunto de láminas muy delgadas de mica encontrando que es enteramente análoga a la que se obtiene con el espato de Islandia. Malus generalizó, los resultados de Arago y otros científicos, en una Memoria titulada *Sur l'axe de réfraction des cristaux et des substances organisées*, leida ante la *Académie* el 19 de agosto de 1811[44].

El 22 de marzo de 1811, Thomas Young le escribió a Malus para comunicarle que el Consejo de la Royal Society le había otorgado la Medalla instituida por el Conde Rumford.

Con intención de mejorar sus resultados experimentales, Malus introdujo una modificación en el goniómetro de reflexión de Wollaston, y bautizó a su aparato como *goniomètre répétiteur* que intentaba corregir los errores producidos por observaciones sucesivas; aunque los cristales naturales sobre los cuales era posible aplicar el principio de repetición, eran muy escasos.

En 1809 enunció la ley que lleva su apellido. Según esta ley la intensidad de un rayo de luz polarizado (linealmente) que atraviesa un analizador perfecto y de eje óptico vertical puede expresarse mediante

$$\boldsymbol{I = I_0 \cos^2\theta_\iota}$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz antes de pasar por el polarizador, I la intensidad resultante de la polarización y θ_i el ángulo que forma el eje del analizador y el eje de polarización de la luz incidente.

[44] *Mémoires de la Classe des Sciences Mathématiques et Physiqyes,* Premiére Partie, 1811, Firmin Didot, Paris, pp. 142 – 148.

En 1809, Malus fue elegido miembro de la Société de Arcueil, una sociedad científica dirigida por Pierre Simon de La place y Claude Louis Berthollet[45].

En 1810, al producirse la muerte de Joseph-Michel Montgolfier quedó una vacante en la Sección de Física del Institut de France y Malus fue electo en su reemplazo.

En diciembre de ese año, Malus fue ascendido a mayor (en esa época, grado equivalente a teniente coronel) y se le confió la misión de ordenar por méritos a los oficiales de artillería egresados de la Escuela de Metz. Poco después fue nombrado examinador de Geometría Descriptiva de los alumnos de la *École polytechnique*. En 1811 fue nombrado director interino de estudios de la *École Polytechnique*. Conocido en Europa por su contribución a la Óptica, varias Academias se apresuraron a asociarse a la École.

Malus se había casado con Wilhermine-Louise Koch, pero no tuvieron hijos. A mediados de 1811, contrajo tuberculosis y falleció el 24 de febrero de 1812. Su esposa, que también contrajo esa enfermedad, falleció al año siguiente.

9 – 3.- Arago y la teoría ondulatoria.

Dominique François Jean Arago nació el 26 de febrero de l786 en la comuna de Estagel, antigua provincia de Roussillon (Departamento de los Pirineos Orientales). Su padre, Bonaventure Arago, licenciado en Derecho tenía pequeñas propiedades de tierras arables con viñedos y campos de olivares que les permitían vivir a su numerosa familia. Cuando Bonaventure fue a vivir a Perpignan, como tesorero de la comuna, toda su familia salió de Estagel para radicarse allí. François fue colocado como alumno externo en el colegio municipal de la ciudad, donde se dedicó, casi exclusivamente, a los estudios literarios. Los autores clásicos se convirtieron en el objeto de sus lecturas favoritas. Pero la dirección de sus intereses ideas cambió de repente, cuando conoció a un oficial ingeniero que hacía reparaciones en la muralla de la ciudad. Este militar era egresado de la École Polytechnique y Arago se interesó mucho por los contenidos que en esa institución se impartían. En la Biblioteca Central de la escuela donde asistía, leyó el programa de conocimiento requerido a los candidatos lo que lo llevó a abandonar las clases de la escuela central, donde estudiaba las obras de Corneille, Racine, La Fontaine, Moliere y otros, para asistir sólo a las clases de Matemáticas. El Profesor de esta asignatura era el Padre Verdier, si bien un hombre muy respetable, pero cuyos conocimientos no iban más allá del dictado de un curso elemental. Considerando que las lecciones de M. Verdier no serían suficientes para asegurarle el ingreso a la École, decidió estudiar trabajos más recientes y profundos que su padre le consiguió en Paris. Eran los “Elementos de Geometría” y la “Teoría de números” de Adrien-Marie Legendre, los tratados de cálculo diferencial y de cálculo integral de Sylvestre François Lacroix y el Curso de análisis algebraico para alumnos de la École Polytechnique de Jean-Guillaume Garnier.

[45] Los miembros de esta *Société* fueron P.S. de Laplace, C.L. Berthollet, J.B. Biot, L. J. Gay-Lussac, A. Humboldt, L. J. Thénard, A. P. de Candolle, H. V. Collet-Descostils, A.B. Berthollet, E. L. Malus, F. Arago, J. E. Bérard, J. A. Chaptal, P. L. y Dulong y S. D. Poisson.

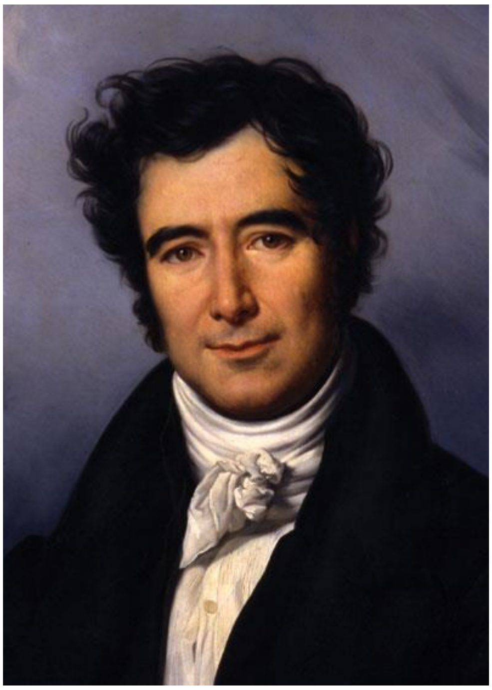


Fig.9.4. D. F. J. Arago (1786 – 1853)

En 1802, Arago consideró que estaba lo suficientemente capacitado para aprobar el ingreso a la École por lo que viajó a Montpellier para dar el examen de admisión. Pero el examinador, Gaspard Monge, tuvo una indisposición en Toulouse y les escribió a los postulantes proponiéndoles tomar el examen en Paris. Arago, no se sentía bien de salud, por lo que regresó a Perpignan. Allí, a pesar de las tentativas de disuasión familiar para quedarse, se dedicó a completar su formación matemática estudiando la Introducción al análisis infinitesimal de Leonard Euler, la Resolución de Ecuaciones Numéricas, la Teoría de las Funciones Analíticas y la Mecánica Analítica de Joseph Louis Lagrange y, finalmente, la Mecánica Celeste de Pierre Simon de La place.

En 1803, viajó a Toulouse para rendir examen. Gaspard Monge, quedó sorprendido e impresionado por los conocimientos matemáticos de Arago, desarrollado a lo largo de dos horas y cuarto de examen. Lo abrazó y le dijo que su nombre figuraría primero en la lista de ingresantes. Algo similar ocurrió cuando rindió examen de Matemáticas para pasar al segundo año de estudios. Esa vez fue Adrien-Marie Legendre quien, ante todo, le preguntó si era francés. — requisito indispensable para ingresar a la École.

— Si no fuera francés, — respondió Arago — no estaría delante suyo, porque no me enteré que alguien fuese recibido en la escuela sin haber demostrado su nacionalidad.

Más que la respuesta, fue el tono con el que Arago la formuló, lo que predispuso mal a Legendre. Lo hizo pasar al pizarrón y le fue planteando problemas matemáticos cada vez más complicados. Arago los respondió con una solvencia tan notable que diluyó la mala predisposición del examinador quien le dijo:

— "Veo que has usado bien tu tiempo; sigue así el segundo año, y quedaremos muy buenos amigos."

Al comienzo del segundo año, fue nombrado jefe de brigada. Allí conoció al profesor Jean Nicolas Pierre Hachette con quien estableció una gran amistad. En la casa de Hachette conoció y trabó amistad con Siméon Denis Poisson con quien solía mantener extensas conversaciones sobre Geometría.

El 20 de septiembre de 1804, falleció Pierre François Andre Mechain, un notable astrónomo quien como Director del Observatoire Imperial de Paris, se había encargado de determinar experimentalmente el arco de meridiano que va desde Dunkerque a Barcelona. Desde 1796, el Observatoire dependía del Bureau des longitudes y la determinación del meridiano era indispensable para establecer un parámetro que pudiese definir el metro como unidad de medida. A la muerte de Mechain, su hijo, que era Secretario del Observatoire, renunció inmediatamente y Poisson le ofreció a Arago esa posición. Inicialmente, Arago rechazó la oferta porque no quería renunciar a la carrera militar, que el objeto de todas sus predilecciones, y en la que tenía, prácticamente asegurada su carrera debido a la protección del mariscal Jean Lannes, que era amigo de su padre. Pero, después de una visita que hizo a Pierre Simon de La place, en compañía de Denis Poisson, aceptó el puesto a modo de prueba, con la condición expresa de que podía entrar a la Escuela de Artillería cuando él quisiera. Por esa razón, durante varios años, su nombre permaneció en la lista de estudiantes de la Escuela, ya que sólo fue agregado al Observatorio para un servicio especial.

Tan pronto como entró al Observatorio, se convirtió en el colaborador de Jean Baptiste Biot en la investigación sobre la refracción de los gases, que había comenzado Jean–Charles Borda utilizando un prisma hueco cuyo ángulo era de 145º 7’ 28” el que se llenaba con distintos gases para medir sus índices de refracción.

Durante este trabajo, Biot y Arago analizaron el interés que debería haber en España por la reanudación del proyecto interrumpido por la muerte de Méchain. Redactaron un proyecto que presentaron a La place quien mostró un gran interés, consiguió los fondos necesarios, y el gobierno les confió a los dos, esta importante misión.

A principios de 1806, Biot, Arago y el comisionado español Rodríguez, partieron desde Paris y, en el camino visitaron las estaciones indicadas por Mechain; hicieron algunas modificaciones importantes a la triangulación proyectada, y en España se pusimos a trabajar de inmediato.

Las determinaciones geodésicas eran muy difíciles y, a veces, imposibles por la inexactitud de las posiciones de la luces de referencias, por lo que el trabajo de Arago, quien debía permanecer durante horas en la cima de un pico montañoso, se tornaba muy ardua.

Su trabajo fue afectado por el estallido del conflicto bélico entre España y Francia. El odio de los españoles hacia los franceses fue creciendo en intensidad. No obstante, con los nuevos instrumentos que le trajo Biot, pudo determinar la latitud de Formentera y logró unir geodésicamente a la isla de Mallorca con Ibiza y Formentera, obteniendo así, con la ayuda de un solo triángulo, la medición de un arco paralelo de un grado y medio. Luego viajó a Mallorca para medir su latitud y el azimut.

En esa época, la fermentación política engendrada por la entrada de los franceses en España comenzó a invadir toda la Península, por lo que Arago temía sufrir alguna agresión por el mero hecho de ser francés. Su estación de trabajo en Mallorca, estaba en el Clop de Galazo, una montaña muy alta, situada precisamente sobre el puerto.

Entre la población se extendió el rumor que Arago se había establecido allí para favorecer la llegada del ejército francés, y que cada tarde, mediante las luces de su instrumental geodésico, daba señales a las tropas francesas. Esos rumores se incrementaron con la llegada a Palma, el 27 de mayo de 1808, de un ayudante de campo de Napoleón. Este oficial, de apellido Berthemie, trajo la orden de que la escuadra española en Mahon debía rendirse rápidamente en Toulón. La noticia se propagó como un reguero de pólvora por toda Palma y el jefe de la escuadra española apenas pudo salvar al oficial francés encerrándolo en el Castillo de Belver. La población, muy irritada fue en busca del astrónomo francés en el Clop de Galazo. El patrón de la pequeña nave que el gobierno español había puesto a disposición de Arago, tomó una iniciativa y le llevó un disfraz con el que fueron hacia Palma. En el trayecto se toparon con una multitud que buscaba a Arago, pero no lo reconocieron porque él hablaba con un perfecto acento mallorquino. Al llegar al puerto, se encontraron con otra cantidad de personas exaltadas que lo estaban buscando por lo que Arago le pidió al patrón de la embarcación que lo lleve al Castillo de Belver como prisionero. Así, mientras que cualquier preso quiere escapar de su encierro, Arago estaba contento de haber ido voluntariamente a prisión.

Los diarios de la época contaban sobre las masacres a residentes franceses. Incluso uno, "describió" como habían ahorcado a Arago y a Berthemie. Arago, enterado de esto y ante el temor de que la pueblada tomase el castillo de Belver arregló con el jefe de la escuadra española su huida de Mallorca. Para ello, iban a preparar una pequeña embarcación con la que el 3 de agosto de 1808 llegaron a Argel. En Argel se contactaron con el cónsul general de Francia, Charles François Dubois-Thainville quien se ocupó de procurarles el transporte sobre un barco de la Regencia que partiría hacia Marsella. También les consiguió dos pasaportes falsos que transformaron a Arago y a Berthemie en dos mercaderes ambulantes. El 13 de agosto, el barco zarpó rumbo a Marsella. Cinco días después, al entrar al Golfo de Lyon, la nave fue interceptada por un corsario español quien tomó prisionera a la nave y la condujo hacia el Puerto de Rosas en Gerona, donde pasajeros y tripulación fueron puestos en cuarentena en un molino de viento desmantelado en la carretera a Figueras. Allí fueron interrogados por un juez español que estaba convencido de que el pasaporte de Arago era falso y que éste era el verdadero dueño de la nave. En Rosas, los prisioneros eran trasladados de un lugar a otro según las necesidades de las tropas españolas. Durante ese tiempo, Arago le escribió una carta al Dey de Argel, contándole las penurias de los pasajeros y que había muerto uno de los leones que el Dey le enviaba como regalo a Napoleón. Cuando el Dey recibió la carta, llamó al Cónsul español en Argel y furioso le reclamó una indemnización por la muerte de su querido león y que liberase al barco capturado y a todas las personas que en él viajaban, so pena de declararle la guerra a España. La tripulación y los pasajeros fueron liberados y el barco zarpó para Marsella el 28 de noviembre de 1808. Pero estaba escrito que la nave no llegaría a esa ciudad. Cuando ya se avistaban los edificios sobre las colinas vecinas a Marsella se desató una tormenta de tal violencia que empujó al barco desde el norte hacia el sur. Durante un par de días la el barco navegó al garete y el 5 de diciembre, cuando la tormenta amainó, estaba sobre la costa de Bujía una pequeña villa situada al oeste de Argel. El barco tenía averías serias que le imposibilitaban navegar. En Bujía, sólo había pequeñas embarcaciones llamadas *sandalias* pero que no podían navegar hasta Argel durante un invierno tormentoso, Ante la alternativa de tener que pasar tres meses en Bujía, hasta la llegada de la primavera, Arago fue a ver al alcalde de esa ciudad y le manifestó que quería ir por tierra hasta Argel. El alcalde, bastante asustado, exclamó: "No lo puedo permitir; ustedes ciertamente serían asesinados en el camino; tu cónsul se quejaría ante el Dey, y yo sería decapitado". Ante esa respuesta, Arago escribió una nota en la que ratificaba su decisión de ir por tierra a Argel y eximía de toda responsabilidad al alcalde de Bujía.

En el camino, tuvieron que pasar a través de pequeñas villas que eran como países independientes que requerían permiso para ser atravesados. En la zona había leones que buscaban siempre alimentos, ladrones dispuestos a desvalijar a quienes pudieran. A medida que iban viajando se incorporaban lugareños que necesitaban ir a Argel y que se sentían más seguros estando en grupo. Recién el 25 de diciembre avistaron Argel.

Las revueltas políticas en Argel, incluyendo la decapitación del Dey, la falta de dinero y la carencia de naves que viajaran a Marsella retuvieron durante varios meses a Arago, quien finalmente pudo embarcar el 21 de junio para Marsella. En el viaje, fueron interceptados por una fragata inglesa pero el barco logró zafar del asedio entrando en el puerto de la pequeña isla de Pomègue donde la profundidad no era lo suficiente para que la fragata inglesa navegase.

El 2 de julio de 1809, Arago desembarcó en el lazareto de Marsella para cumplir la cuarentena El viaje de Argel a Marsella, que normalmente habría llevado cuatro días, le llevó once meses. Luego de cumplir la cuarentena pudo viajar a Perpignan para ver a su familia.

De Perpignan, Arago viajó a París y depositó en el Bureau of Longitudes y en la Academia de Ciencias las observaciones geodésicas que había logrado conservar, en medio de los peligros y las tribulaciones de su larga campaña.

El 18 de septiembre de 1809, fue electo Académico, reemplazando a Joseph Jerôme Lefrançois de Lalande, que había fallecido dos años antes. Sobre cincuenta y dos votantes obtuvo cuarenta y siete votos. Tenía entonces veintitrés años.

Entre los méritos para su nombramiento se contaba un trabajo muy extenso y delicado hecho con Biot sobre la determinación de los coeficientes de las tablas de refracción atmosférica; la determinación de los índices de refracción de distintos gases, mediante un prisma de Borda mejorado; La determinación, más exacta que se conocía en esa época, de la relación entre la densidad del aire y la del mercurio, lo que permitía conocer el valor directo del coeficiente de la fórmula barométrica para el cálculo de las alturas; los resultados de las observaciones astronómicas hechas día y noche durante dos años mediante el telescopio meridiano y el cuadrante mural del Observatorio de París; las observaciones hechas con Alexis Bouvard relativas a la verificación de las leyes de la libración de la luna; la observación de varios cometas y los cálculos de sus órbitas; la tabla de refracción, que se publicó en el Compendio de Tablas de Bureau des Longitudes y en el Knowledge of Times; un trabajo sobre la velocidad de la luz y la triangulación más precisa que se haya llevado a cabo, para prolongar el meridiano de Francia a la isla de Formentera.

El fallecimiento de Lalande había dejado, también, una vacante en el Bureau de Longitudes, por lo que Arago fue nombrado Astrónomo adjunto.

A fines de 1809, fue elegido por el Consejo de Perfeccionamiento de la École Polytechnique para suceder a Gaspard Monge en su cátedra de análisis aplicada a la geometría.

Jean Baptiste Joseph Delambre, que era Secretario Perpetuo de la Académie, murió el 19 de agosto de 1822. Después del tiempo requerido, hubo que elegir un reemplazante. La Académie nombró una comisión para presentar candidatos compuesta P. S. de La place, D. F. J. Arago, A. M. Legendre, E. P. E. de Rossel, G. de Prony y S. F. Lacroix. La comisión presentó una lista de candidatos integrada por J. B. Biot, J. B. Fourier y D. F. J. Arago. Arago aprovechó la primera oportunidad que tuvo para declarar públicamente que no tenía ni la pretensión ni el deseo de obtener un solo voto y que, además, acumulaba tantos trabajos que no iba a poder cumplir con el Secretariado. El resultado fue que Fourier reunió 38 votos y Biot 10. Fourier falleció el 16 de mayo de 1830 y los miembros de la Académie eligieron a Arago para reemplazarlo, quien para cumplir esa tarea renunció como Profesor de la École Polytechnique.

Durante su extensa carrera como investigador, Arago determinó la presión de vapor del agua a distintas temperaturas y calculó la velocidad del sonido. Entre 1820 y 1826 hizo múltiples experimentos sobre magnetismo, como la acción de la corriente eléctrica sobre las propiedades magnéticas del hierro y el acero[46], demostró que una aguja imantada suspendida sobre una superficie no ferrosa modifica sus oscilaciones según la distancia a esa superficie[47] y descubrió el llamado "magnetismo rotatorio"[48] que se conoció en su época, como "rotación de Arago" que fue posteriormente explicado por Michael Faraday.

Con Alexis Thérèse Petit, determinó los índices de refracción de diversos líquidos y vapores[49]. En cuando la naturaleza de la luz, a diferencia de La place y de Biot, que eran partidarios de la teoría de la emisión, Arago sostuvo el carácter ondulatorio de la luz. Con Jean Agustin Fresnel realizó múltiples experimentos sobre polarización de la luz y sostuvo que la mejor prueba del carácter ondulatorio estaba dada por el llamado "punto de Arago", el punto luminoso que aparece en el centro de la sombra de un objeto circular iluminado por una fuente "monocromática" puntual. Arago, demostró que la formación de ese punto no puede explicarse mediante la teoría corpuscular.

Arago inventó un polariscopio y descubrió la polarización rotatoria. Fue el primero en realizar una observación polarimétrica de un cometa cuando descubrió que de la cola del Gran Cometa de 1819 se emitía luz polarizada planarmente.

En 1838, propuso un método para la determinación de la velocidad de la luz que fue la base de los experimentos de Hippolyte Fizeau y Leon Foucault.

El 11 de septiembre de 1811, François Arago se casó con Lucie Carrier-Desombes con quien tuvo tres hijos.

En 1828, fue electo miembro extranjero de la Academia Real Sueca de Ciencias.

Tuvo una activa participación política. En 1830 fue electo como diputado y desde su banca propuso múltiples disposiciones referidas a mejoras en la educación pública, en las condiciones laborales, la instauración del sufragio universal, etc. Luego de la caída del rey Louis Philippe, fue nombrado Ministro de Guerra y adoptó medidas de avanzada como la jornada laboral, la supresión de los castigos corporales a la tropa, la abolición de la esclavitud, etc.

---

[46] Ver, por ejemplo, **Arago, D. F. J**., « Expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant voltaïque », *Annales de chimie et de physique*, 1820, vol. 15, p. 93-102.

[47] Por este trabajo, en 1825, obtuvo la Medalla Copley de la Royal Society que es la distinción máxima de esta sociedad después de la Presidencia.

[48] Arago descubrió que una placa rotatoria de cobre tiende a comunicar su movimiento a una aguja magnética suspendida sobre ella.

[49] **Arago, D. F. J. – Petit, A. T**. « Sur les Puissances réfractives et dispersives de certains liquides et des vapeurs que ils forment » *Annales de Chimie et de Physique*, 1816, Vol. 1, pp. 1 – 8.

Tras el golpe de Luis Napoleón de 1852, renunció al Observatorio para no jurar fidelidad al nuevo Emperador.

Falleció el 2 de octubre de 1853.

9 – 4.- Fresnel y la difracción de la luz.

Fig. 9.5.A.J. Fresnel (1788 – 1827)

Agustin–Jean Fresnel, nació el 10 de mayo de 1788, en Broglie, cerca de Bernay, en la antigua provincia de Normandía (hoy Departamento de Eure). Fue hijo del arquitecto Jacques Fresnel y de Augustine Mérimée y fue el menor de cuatro hermanos. El ejército había contratado al padre de Agustin para dirigir la construcción de un fuerte en Querqueville, pero los avatares políticos de la Revolución de 1789, lo obligaron a renunciar y a retirarse a una pequeña propiedad cerca de Caen, en Mathieu. A diferencia de sus hermanos cuyos progresos fueron rápidos, Agustin avanzaba muy lentamente en sus estudios al punto que a los ocho años apenas sabía leer. Su retraso era atribuido a su delicada salud y a los tratamientos médicos a los que era sometido. A eso debe agregarse su aversión a todo lo que fuera memorizar y a su carácter rebelde. En cambio, en la escuela mostró una notable inteligencia práctica, lo que hizo que sus compañeros de estudio lo apodaran “el ingeniero”.

En 1801, con trece años entró en la École Centrale de Caen con uno de sus hermanos. La escuela tenía un excelente plantel de docentes y Agustin tuvo una muy buena formación en Matemáticas, Lógica y Gramática. Esta formación le facilitó el ingreso, a los dieciséis años, a la École Polytechnique. Si bien su salud era extremadamente débil, lo que hacía pensar que no iba a poder soportar las fatigas de una carrera tan exigente, Agustin se sobrepuso con una férrea voluntad y logró completarla con honores. Durante sus estudios, se destacó sobre todos sus compañeros por su habilidad para las artes gráficas. En el año 1804, se les propuso a los estudiantes, como tema de concurso, un problema geométrico. Si bien muchos lo resolvieron, la solución dada por Fresnel, llamó la atención de los docentes e hizo que Legendre lo premiara.

Al egresar de la École Polytechnique, Fresnel comenzó a estudiar en la École nationale des ponts et chaussées, donde se graduó como ingeniero y fue enviado al Departamento de La Vendée y luego a los Departamentos de Drôme e Ile-et-Vilaine donde dirigió los trabajos de reparación y mejoras de los caminos y puentes.

En 1814, Fresnel manifestó públicamente su simpatía por el retorno de la familia de los Borbones a la monarquía francesa y por sus actividades pro-monárquicas perdió su cargo cuando Napoleón volvió al poder.

En la segunda restauración monárquica obtuvo un puesto como ingeniero en Paris, donde pasaría la mayor parte de su vida. Sus investigaciones en Óptica, que continuaría hasta su muerte, empezaron en el año 1814, cuando escribió el borrador de un ensayo sobre la aberración óptica de las estrellas que, no publicó.

El 30 de marzo de 1818, presentó ante la Académie su trabajo "Mémoire sur les couleurs développées dans des fluides homogènes par la lumière polarisée »[50].

El 29 de julio de 1818 presentó una memoria sobre la difracción de la luz por la que se le otorgó, al año siguiente, el premio que la Académie des Sciences, había instituido para el mejor trabajo que diera un desarrollo matemático a la teoría de la difracción de la luz. Este trabajo fue publicado inicialmente en 1819[51] donde expuso la teoría ondulatoria de la luz, la solución al problema de las interferencias y la aplicación de la teoría de las interferencias al Principio de Huygens, sobre bases experimentales y mediante un tratamiento matemático riguroso. Ese mismo año, se publicó una continuación del trabajo[52], con una abundante información tabulada sobre bandas de interferencia, intensidades y otras características de la difracción con gráficos explicativos.

El 15 de 1819, presentó ante la Académie otra memoria sobre la reflexión de la luz[53].

El 26 de noviembre de 1821, el 22 de enero de 1822 y el 26 de abril de 1822, Fresnel presentó tres trabajos ante la Académie, que se reunieron y se publicaron bajo el título de *Mémoire sur la double réfraction*. En este trabajo Fresnel, a pesar de la admiración que sentía por Newton y La place, rebatió con argumentos empíricos y matemáticos la teoría de la emisión. En el capítulo cuyo título es *Théorie Mécanique de la double réfraction* expuso una demostración de la existencia de vibraciones transversales en los rayos luminosos; dio una explicación teórica de las leyes de interferencia de los rayos polarizados, analizó la posibilidad de la propagación de las vibraciones transversales en un fluido elástico, cómo se puede hacer para que las moléculas del éter no experimenten ninguna modificación sensible en la dirección de la normal a la onda, cómo oscilan las vibraciones transversales al final de las ondas. También demostró dos teoremas que después aplicó al desplazamiento complejo de las ondas luminosas. Enunció dos principios: "*La elasticidad puesta en juego por los desplazamientos relativos de las ondas permanece igual en el mismo medio, siempre que la dirección de estos desplazamientos no cambie, y sea cual sea el plano de vibración de la onda*" y "*La elasticidad puesta en juego por las vibraciones luminosas depende sólo de su dirección y no de las de las ondas*". Luego aplicó estos principios a los medios donde los ejes de elasticidad conservan la misma dirección en todas sus extensiones. Analizó la velocidad de propagación de las ondas planas e indefinidas. También demostró la ley de la refracción para las ondas planas e indefinidas y demostró que un mismo medio no puede suministrar más de dos imágenes de un objeto.

---

[50] *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, 1818, Vol. 20, pp.163 – 194.

[51] **Fresnel, A. J.**, « Mémoire sur la diffraction de la lumière.» *Annales de chimie et de physique*, 1819, Vol. 11, pp. 246 – 295.

[52] **Fresnel, A. J.**, «Suite du mémoire sur la diffraction de la lumière.» *Annales de chimie et de physique*, 1819, Vol. 11, pp. 337 – 378.

[53] **Fresnel, A. J.**, « Mémoire sur la réflexion de la lumière.»

Estos trabajos fueron criticados por Jean Baptiste Biot y, muy duramente, por Simeon Denis Poisson — quien llegó a afirmar que los argumentos de Fresnel carecían de rigor matemático —, lo que llevó a Fresnel a contestarles mediante una nota[54] en la que explicó que sin buscar una causa mecánica de la interacción de la luz con un determinado medio, la consideró como una sucesión de modificaciones periódicas debidas a la acción ejercida por el medio refringente sobre cada molécula luminosa en virtud de la cual la molécula puede ser atraída o rechazada por el mismo cuerpo, de acuerdo con el estado físico donde se encuentra cuando se acerca a su superficie. Estimó que si las “moléculas luminosas” son a veces rechazadas, a veces atraídas por el medio, eso indica que la luz no llega bruscamente a la superficie sino que va arribando en forma continua con una velocidad que varía con la atracción que ejerce la superficie según las distancias que las separan. Esa velocidad, si bien es alta, hace que algunas de esas “moléculas” lleguen antes que otras y en los diferentes momentos en que se produce el contacto con una superficie la luz debe experimentar, sucesivamente, “todos los grados intermedios de su capacidad de ser reflejada o transmitida”. Esta característica, según Fresnel, influye sobre la trayectoria de la “molécula luminosa” y es muy difícil de conciliar con la uniformidad de la marcha de los rayos luminosos en la reflexión y en la refracción. Para poner en evidencia la contradicción entre las distintas velocidades con los que la luz alcanza una superficie y la uniformidad de los ángulos de reflexión y de refracción, formuló tres hipótesis sobre la relación entre el tamaño de la esfera de acción de la superficie a la cual llega la luz y la longitud de onda de la luz incidente, según que el tamaño de la primera fuese mucho mayor, mucho menor o del mismo orden de magnitud que la segunda. A partir de esas hipótesis dedujo la imposibilidad de demostrar, mediante la teoría de la emisión, la constancia de los ángulos de reflexión y de refracción, constancia que se podía deducir aplicando la teoría ondulatoria. Refutó la opinión de Biot[55] acerca de la existencia de otras causas físicas que compensarían exactamente los diferentes grados de acceso a la superficie con la que la luz interactúa, por ser una hipótesis *ad hoc*[56].

En esta nota, Fresnel volvió a invitar a Poisson a que demuestre que la difracción no está en clara contradicción con el sistema de emisión, aduciendo que, en tanto no lo demostrase, tenía derecho a argumentar que el sistema de emisión es inadmisible.

Biot, inicialmente, había afirmado que la teoría ondulatoria era “inadmisible” pero luego modificó su opinión afirmando que no estaba más inclinado a sostener una u otra teoría. Ese cambio se produjo, especialmente, a partir de tratar de encontrar una explicación teórica a los fenómenos de coloración que Arago había observado en láminas cristalinas, haciendo pasar luz polarizada a través de ellas. Biot, quien bautizó con el nombre de “polarización móvil” a ese fenómeno, señaló que los espesores de las láminas de una mismo material cristalino producen diversos tonos que están en la misma proporción que los espesores de las láminas de aire, mucho más delgadas, que reflejan tonalidades similares en los anillos coloreados, lo que era una mera analogía. Pero Fresnel resaltó que fue Thomas Young quien, sobre la base del principio de interferencia, que es una consecuencia in-

[54] Ver *Œuvres complètes de Augustin Fresnel*, Tome 2e. Note sur les accès de facile réflexion et de facile transmission des molécules lumineuses dans le système de L’émission, Imprimerie Impériale, Paris, (1866), pp. 147 – 165.

[55] **Biot, J.B**., (**1816**): *Traité de physique expérimentale et mathématique*, T. IV, Deterville, Paris, página 88.

[56] Una hipótesis *ad hoc* es un suposición que se introduce en un razonamiento para salvar la teoría que lo sostiene, pero que debe corroborarse en otros casos en los que se aplica esa misma teoría.

mediata de la teoría de la ondulaciones[57], descubrió fácilmente la relación entre las dos clases de fenómenos que se le había escapado al Sr. Biot y que casi imposible de establecer mediante el sistema de emisión[58].

Para privilegiar la teoría de la emisión sobre la ondulatoria, Poisson había acusado a Fresnel de falta de rigor matemático, a lo que éste le respondió que, usando el único principio de interferencia, Young había descubierto una gran cantidad de relaciones numéricas altamente importantes entre los fenómenos ópticos más diferentes y aparentemente los más independientes. Por un razonamiento muy breve, y con dos líneas de cálculo, encontró la expresión de la intensidad de las ondas reflejadas en la superficie de contacto de dos medios elásticos de diferentes densidades[59]. Fresnel reconoció que Poisson había llegado al mismo resultado por un método más erudito y riguroso[60], pero haciendo justicia al excelente trabajo del Poisson, no debía olvidarse que fue Thomas Young quien los encontró primero.

Poisson analizó en detalle el trabajo de Fresnel, — al que, en dos cartas, trató casi despectivamente, por ser un ingeniero en caminos,— y creyó encontrar la manera de refutarla. Llegó a la conclusión que según la teoría ondulatoria, si se bloqueaba un haz de luz mediante un objeto circular, en el centro de la sombra debía aparecer un punto brillante. En cambio, de acuerdo con la teoría de la emisión, la sombra debería ser completamente oscura, y eso era lo que se observaba con una fuente luminosa común. Dominique François Jean Arago, que era el Presidente de la Comisión encargada de adjudicar el premio de la Académie al mejor trabajo sobre la teoría de la difracción, decidió comprobar el experimento, pero cuidando todos los detalles[61]. Utilizó una fuente luminosa puntual y colocó un disco metálico de 2 mm de diámetro adherido con cera a una placa de vidrio. Su experimento mostró que en el centro de la sombra se formaba un punto brillante, que hasta hoy se conoce como "punto de Arago".

El 7 de enero de 1823, Fresnel leyó ante la Académie su trabajo «Mémoire sur la loi des modifications que la réflexion imprime a la lumière polarisée »[62]. En este trabajo presentó dos fórmulas generales para la intensidad de la luz reflejada por los cuerpos transparentes para todas las inclinaciones de los rayos incidentes. Una de esas fórmulas se refiere a los rayos polarizados que siguen en

[57] Review of Malus, Biot, Seebeck and Brewster on Ligth from the Quarterly Review for April l8l4. vol. XI. p. 42. (Miscellaneous Works of Th. Young, T. 1. p. 260.)

58 Este es otro ejemplo de la manera en que cambian las teorías. Una teoría es una especulación racional que intenta establecer la vinculación entre fenómenos observables del mismo tipo. Una vez establecida, si se produce algún fenómeno observable que contradice parte o toda la teoría, la misma debe modificarse o descartarse. Pero los científicos no descartan una teoría a menos que encuentren otra que consideren mejor. Por lo tanto, toda teoría nace provisoria y muere cuando se expone una nueva teoría que explica lo que la anterior no puede explicar y tiene mayor carácter predictivo.

59 Chromatics, from the Supplement to the Encyclopædia Britannica. Art. 6, (sect. V) (Miscellaneous Works of Th. Young, T. 1, p. 336)

60 Ver Œuvres complètes de Augustin Fresnel, Tome 1er. Note sur la polarisation circulaire, Imprimerie Impériale, Paris, (1866), pp. 763 – 766.

61 Ver Œuvres complètes de Augustin Fresnel, Tome 1er, Mémoire Coronné sur la diffraction. Note I. Calcul de la intensité de la lumière au centre de l'ombre d'un écran et d'une ouverture circulaire éclairé par un point radieux. Imprimerie Impériale, Paris, (1866), pp. 365 – 372.

[62] *Annales de chimie et de physique*, Vol. XLVI, p. 225. Mars 1831.

un "plano de incidencia" y la otra que corresponde a un plano perpendicular al plano de incidencia. Concluyó que las fórmulas son distintas porque la luz polarizada que sigue el plano de incidencia experimenta una reflexión en la que la intensidad crece siempre a medida que la oblicuidad de los rayos aumenta mientras que, para la luz polarizada perpendicularmente al plano de incidencia existe, entre las direcciones perpendiculares y paralelas a la superficie reflectante un cierto grado de oblicuidad que hace que la reflexión sea nula. A continuación formula un desarrollo matemático para probar que cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios homogéneos de distinta densidad, la polarización del haz se caracteriza porque sus movimientos vibratorios mantienen una dirección única y constante y que su plano de vibración es perpendicular a esa dirección constante. A partir de allí, hizo un desarrollo matemático que comparó con sus resultados experimentales para comprobar sus hipótesis.

Además de sus trabajos sobre la teoría ondulatoria de la luz, propuso un método para medir la velocidad de la luz que atraviesa un líquido en movimiento, que sería retomado varias décadas después por Hippolyte Louis Fizeau. Fue miembro de la Comisión de faros y desarrolló las llamadas lentes de Fresnel que sustituirían a los espejos en los faros.

Por su extensa obra, en 1823, fue elegido miembro de la Académie y en 1825, "fellow" de la Royal Society, institución que, en 1827, lo premió con la medalla Rumford. Fresnel es uno de los 72 científicos cuyo nombre figura grabado en la Torre Eiffel.

Su siempre delicada salud se agravó en 1825 al contraer tuberculosis. Falleció en Ville d'Avray, cerca de Paris, el 14 de julio de 1827.

9 – 5.- Otros partidarios de la teoría corpuscular de la luz.

Entre los físicos destacados que en el primer cuarto del siglo XIX sostuvieron la teoría newtoniana sobre la naturaleza de la luz, merecen destacarse Jean-Baptiste Biot y Simeon Denis Poisson.

Fig.9.6 J. B. Biot (1774 – 1862

Biot nació en París el 21 de abril de 1774, hijo de Joseph Biot, un funcionario de la Tesorería Real, y de Jeanne Decressy. Fue educado en el Collège Louis Le Grand de París y al terminar esos estudios, en 1794, aprobó el ingreso a la École de ponts et chaussées pero ese mismo año se pasó a la recién creada École Central des Travaux publics, que al año siguiente cambiaría su nombre por École Polytechnique, de donde egresó como ingeniero. En 1797, fue nombrado profesor de Matemáticas en la École Central del Departamento de L'Oise, en la ciudad de Beauvail. Durante los cuatro años que trabajó en esa escuela, redactó unos apuntes que luego fueron utilizados para preparar el ingreso a la École Polytechnique. Con Gaspard Monge y Pierre Simon de La place, estudió Astronomía matemática.

En 1802, publicó « *Essai de géométrie analytique; appliquée aux courbes et aux surfaces du second ordre* »[63]. Gracias al apoyo de La place, fue nombrado Profesor de Física-Matemática en el Collège de France y luego Profesor titular de Astronomía en la Facultad de Ciencias de Paris y el 19 de abril de 1809 se doctoró en Ciencias en esa Universidad. En la década de 1816 a 1826, compartió la cátedra de Física de la Facultad de Ciencias de Paris,, con Joseph-Louis Gay Lussac, que era el Profesor Titular. Biot dictaba Acústica, Magnetismo y Óptica, mientras que Gay Lussac estaba a cargo de los temas de Calor, Neumostática, Hidrostática, Electricidad y Galvanismo. En 1840, Biot fue nombrado Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Paris y en 1849, al retirarse como Profesor de Física, fue nombrado Profesor Honorario.

Además de la docencia, a lo largo de su carrera se dedicó a la investigación en temas de Astronomía, Electromagnetismo y Óptica. Además realizó actividades como geodesta, encargándose, conjuntamente con Dominique François Jean Arago, de determinar para el Bureau des longitudes, el meridiano de París y extender la medición del meridiano de Dunquerque a Barcelona, hecha por Pierre Mechain, hasta la isla de Mallorca.

En 1797, se casó con Françoise Gabrielle Brisson con quien tuvo un hijo.

En 1803, al analizar la estructura y composición de los meteoritos caídos en la zona de L'Aigle, corroboró la teoría de Ernst Chiadni, de que los meteoritos provenían del espacio exterior.

En 1803, fue elegido miembro de la Académie des Sciences. Ese mismo año, se integró al Institut de France.

El Bureau de Longitudes, en su proyecto de establecer unidades de medida lo envió a determinar la longitud del péndulo de segundos[64] a distintas latitudes.

En 1805, inició unos trabajos con Dominique François Jean Arago. Por sugerencia de La place, analizaron las propiedades ópticas de algunos gases y publicaron « Mémoire sur les affinités des corps pour la lumière et particulièrement sur les forces réfringentes des différents gaz »[65].

En 1812, publicó su primer trabajo sobre polarización circular, « Mémoire sur un nouveau genre de oscillations que les molécules de la lumière éprouvent en traversant certain cristaux »[66].

En este trabajo y en todas sus investigaciones posteriores sobre Óptica, trató de explicar los distintos fenómenos a partir de la teoría corpuscular de la luz. Por el contrario, Arago fue un firme defensor de la teoría ondulatoria y las controversias entre ambos científicos enfriaron notablemente su relación personal.

En 1805, publicó "Traité élémentaire d'astronomie physique"[67], dedicado a La place.

[63] Klostermann fils, Libraire, Paris, 1802.
[64] Péndulo cuyo período es dos segundos.
[65] *Mémoires de l'Institut National des Sciences et Arts*, **7**: 301-387, 1806
[66] *Mem. Inst.*, I, – 1 – 372, (1812).

En 1815 fue elegido miembro honorario extranjero de la Royal Society.

En 1815, confirmó experimentalmente la afirmación de David Brewster que, en el caso de la polarización por reflexión, el índice de refracción es la tangente del ángulo de polarización.

En 1815, descubrió que la polarización circular no sólo ocurre en materiales cristalino sino que también se evidencia en algunos fluidos y en diferentes direcciones para fluidos diferentes. Así observó la polarización circular en el aceite de trementina, en el aceite esencial de laurel, el plano de polarización rota en un sentido, mientras que en el aceite de pomelo o en una solución de alcanfor el plano de polarización rota en sentido contrario[68]. Dos años después, publicó « Sur les rotations que certaines substances impriment aux axes de polarisation des rayons lumineux »[69] y en 1832, leyó ante la Académie des Sciences su trabajo « Mémoire sur la polarisation circulaire et sur ses applications a la chimie organique »[70].

En 1816 publicó « Traite de Physique Experimentale et Mathematique »[71].

Descubrió que la turmalina, en vez de dar por doble refracción dos imágenes polarizadas en planos perpendiculares, transmite una única imagen polarizada[72].

En 1820, conjuntamente con Félix Savart encontraron la relación existente entre el campo magnético inducido por una corriente eléctrica estacionaria, y la densidad de corriente, relación que se conoce como Ley de Biot-Savart.[73]

En 1840, la Royal Society lo distinguió con la Medalla Rumford.

Biot falleció en París el 3 de febrero de 1862.

Siméon Denis Poisson (21 de junio de 1781 – 25 de abril de 1840), nació en Pithiviers, una localidad a 80 km de Paris. Su padre, también llamado Siméon, había desertado del ejército francés en el cual fue un simple soldado y, al tiempo del nacimiento de Siméon-Denis tenía un puesto administrativo de bajo rango en la Alcaldía de Pithivier. Su madre, Aimée-Marie Franchetere había perdido a varios hijos antes del nacimiento de Siméon-Denis. El padre, fue partidario entusiasta de la Revolución. Producida esta, fue elegido como Presidente del Distrito de Pithiviers.

Siméon-Denis recibió instrucción primaria de su padre y a los 14 años, fue puesto bajo la tutela de un tío que era médico militar en Fontainebleau, con la idea paterna de que se formara como mé-

---

[67] Editorial P. Bernard, Paris, 1805.

[68] « Phenomenes de polarisation successive, observes dans des fluides homogenes », *Bull. Soc. Philomatique*, **12** 190-192 (1815).

[69] *Mem. Acad. Sci.*, **2**, 41 – 136, (1817)

[70] *Mém. Acad.Sci.*, 13, 39-175. [5]

[71] Deterville Libraire, Paris, 1816.

[72] « Sur un mode particulier de polarisation qui s'observe dans la Tourmaline », *Bull. Soc. Philom*, 1815, pp. 26 – 27; *Annales de chimie et de physique*, XCIV, 1815, pp. 191 – 199; *Jour. des Mines,* XXXVII, 1815, pp. 387 – 388.

[73] *Ann. Chim. Phys.*, **15**, 1820, 220 – 222.

Fig. 9.7. S.D. Poisson (1781 – 1840)

dico. Inicialmente su tío lo instruyó en las técnicas quirúrgicas más sencillas, pero a la poca habilidad manual requerida para una actividad tan delicada se sumaba la falta de interés del joven por esa profesión, por lo que regresó a la casa paterna. En 1796, su padre lo envió nuevamente a Fontainebleau, esta vez para inscribirse en la École Centrale. Si bien Siméon-Denis tenía muy poca habilidad manual, esta vez demostró una gran predisposición para el aprendizaje y un extraordinario interés por las Matemáticas. Sus maestros quedaron impresionados por su facilidad por esta disciplina y lo alentaron para que diese en examen de ingreso a la École Polytechnique. A pesar de su educación primaria deficiente, Poisson se sobrepuso con férrea voluntad y logró superar sus fallas de formación, excepto su baja habilidad manual, que lo había imposibilitado para ser cirujano, pero que era requerida para los dibujos, especialmente de figuras y diagramas requeridos por Gaspard Monge en el curso de Geometría descriptiva. Sus docentes, La place y Lagrange, pronto advirtieron su talento para las Matemáticas y lo alentaron y apoyaron para alcanzar una formación sólida en Análisis matemático, Ecuaciones diferenciales, Probabilidad y Estadística y otras materias de contenido eminentemente teórico. Estando en la escuela redactó una memoria sobre diferencias finitas que causó la sorpresa y admiración de Adrien-Marie Legendre. En el último año de la carrera, escribió un trabajo sobre la teoría de las ecuaciones y sobre el teorema de Bézout, enunciado por ese autor en 1764 para el caso en el que sólo hay raíces simples. Este trabajo provocó la admiración de sus docentes al punto que en 1800 obtuvo la graduación sin rendir el examen final. La place lo recomendó para ser *répetiteur* de Matemáticas ayudando a los alumnos con dificultades en esas materias. Dos años después fue nombrado Profesor suplente, cargo en el que estuvo hasta 1806, en que fue nombrado Profesor reemplazando a Jean-Baptiste Joseph Fourier. En 1808, fue nombrado Astrónomo en el Bureau des Longitudes y, al año siguiente, Profesor en la cátedra de Mecánica de la Faculté des Sciences. En ese lapso, publicó dos trabajos de gran importancia, *Sur les inégalités séculaires des moyens mouvements des planètes*[74]y *Sur la variation des constantes arbitraires dans les questions de mécanique*[75], que fue complementado en 1816[76] . También publicó una versión revisada de la obra escrita por Alexis Claude Clairaut en 1743 bajo el título: *Théorie de la figure de la terre tirée des principes de l'hydrostatique, par Clairaut, de l'Académie des Sciences, et de la Société royale de Londres*[77].

En 1812, Poisson, presentó ante la Académie un trabajo sobre galvanismo, titulado *Sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs*[78]. La presentación de ese trabajo inclinó la balanza a su favor cuando se tuvo que cubrir la vacante en la Sección Física del Institut de France, debida a la muerte de Étienne-Louis Malus. Al año siguiente presentó una continuación de ese tra-

[74] Publicado en el *Journal de l'École Polytechnique*, Quinzième Cahier, Tome VIII, Décembre 1809, pp. 1 – 56.
[75] *Idem*., pp. 266 – 344.
[76] *Mém. Acad. Sci.*, (1816) Vol. 1, pp. 1 – 70.
[77] Paris : Courcier, 1808.
[78] *Mém. Acad. Sci.*, (1812) Vol. XII. Pp. 1 – 65.

bajo, con el título *Seconde mémoire Sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs*[79].

En 1815, fue nombrado *Examinateur* de la École Militaire y al año siguiente quedó cargo de los exámenes de egreso en la École Polytechnique.

En su polémica con Fresnel[80], Poisson usó como argumento contra la teoría ondulatoria que, como consecuencia de la misma, cuando un cuerpo circular interceptaba un haz de luz, en el centro de la sombra del cuerpo debería aparecer un punto luminoso. Ya hemos mencionado que el hecho fue demostrado por Arago cuando el haz luminoso es puntual, comprobación que inclinó la opinión de muchos físicos hacia la teoría ondulatoria.

En 1817, Poisson se casó con Nancy de Bardy con quien tuvo cuatro hijos.

Poisson publicó 325 escritos, en el *Journal de L'École Polytechnique*, en el *Bulletin de la Société Philomatique* en la *Correspondance de l'École Polytechnique*, en el *Bulletin Universel des Sciences* del Baron de Ferussac, en *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l' Académie des Sciences*, en el *Mémorial de l'Artillerie*, en el *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* (*Journal de Liouville*), en las *Mémoires de l'Académie des Sciences*, en los *Annales de Chimie et de Physique*, en las *Mémoires de la première classe de l'Institut*. Curiosamente, a pesar de ser considerado un matemático, sólo 85 de esos escritos corresponden a temas de Matemáticas[81].

Además del libro de Clairant ya mencionado, publicó:

(1811) *Traité de Mécanique*, 2 Vols., Courcier, Imprimeur, Libraire, París.

(1826) *Formules relatives aux effets du tir du Canon sur les différentes parties de son affût, et règles pour calculer la grandeur et la durée du recul*, Guirardet Libraire, Paris.

(1831) *Nouvelle théorie sur l'action capillaire*, Bachellier Père et fils, Paris.

(1835) *Théorie mathématique de la chaleur*, Bachellier Imprimeur – Libraire, Paris.

(1837) *Recherches sur la probabilité des jugements en matière criminelle et en matière civile, précédées des règles générales du calcul des probabilités*, Bachellier Imprimeur – Libraire, Paris.

(1839) *Recherches sur le mouvement des projectiles dans l'air, en ayant égard a leur figure et leur rotation, et a la influence du mouvement diurne de la Terre*, Bachellier Imprimeur – Libraire, Paris.

---

[79] Ver en M. Hachette « *Correspondance sur l'École Impériale Polytechnique* » Vo. III, Nº 1, janvier 1814, pp. 65 – 70.

[80] Ver Sección 9 – 4.

[81] El detalle completo de la obra publicada por Poisson, puede consultarse en el *Catalogue des ouvrages et mémoires scientifiques* de Siméon Denis Poisson, Bachellier, Paris. 1854.

Poisson también analizó la naturaleza de la electricidad. Consideraba que había dos tipos de electricidad, una positiva y otra negativa. Ambas eran fluidos imponderables. Las partículas de cada clase estaban dotadas de una perfecta movilidad y se rechazaban mutuamente atrayendo a las de la clase opuesta en razón inversa del cuadrado de las distancias. Admitiendo que a distancias iguales el poder atractivo era igual al poder repulsivo, buscó la consecuencia matemática que podía deducirse de esto. Los resultados que consiguió están perfectamente de acuerdo con los que obtuvo Coulomb mediante experimentos. También comprobó que el fluido eléctrico introducido en un cuerpo se trasporta por completo a su superficie, formando una capa sumamente delgada. Calculó el espesor de esa capa y su superficie exterior encontrando que era igual a la del cuerpo, por lo que concluyó que la presión del aire retenía a la electricidad; esa presión hacía al aire impermeable a los fluidos al impedir la tendencia natural de todo fluido a escaparse. La concepción de la electricidad como un fluido siguió vigente para muchos físicos aun cuando se aceptó que la electricidad era una sola y se suponía que las partículas de electricidad tenían dos extremos de carga opuesta.

Poisson también calculó que si la superficie electrizada era un cono, en su extremidad, la presión del aire no podría contrarrestar la presión de las partículas eléctricas acumuladas allí por lo que la electricidad se escaparía, lo que se conoce como "poder de las puntas".

9 – 6.- Fizeau y Foucault y la velocidad de la luz.

Armand *Hippolyte* Louis *Fizeau* (París, 23 de septiembre, 1819 - Venteuil, 18 de septiembre de 1896) fue un físico y astrónomo que conquistó fama internacional por sus experimentos para determinar la velocidad de la luz.

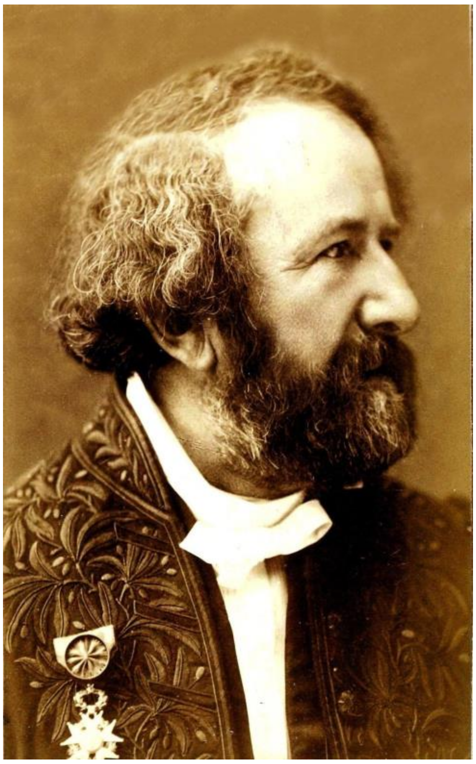


Fig. 9.8. A.H.L. Fizeau (1819 – 1896)

Fue el hijo mayor de Louis-Aimé Fizeau, Profesor de Patología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Paris y de Marie Béatrix Petel. Asistió al Collège Stanislas, un colegio privado católico de Paris donde se impartía desde la educación inicial hasta la preparatoria para la École Polytechnique. Allí trabó amistad con Jean-Bernard-Léon Foucault, amistad que duraría toda la vida. La excelente preparación en el Colegio, le permitió, en 1840, ingresar a la Facultad de Medicina de la Universidad de Paris, pero una continua migraña y la impresión que le causaba ver sangre lo obligaron a abandonar la carrera.

Tomó un curso de Astronomía dictado por Arago y un curso de Óptica, dado por Henri Victor Regnault, en el Collège de Francia.

En 1839, Fizeau había asistido, con su amigo Foucault, a un curso de fotografía que dictó Louis-Jacques Daguerre. Observaron que Daguerre expuso una placa en una cámara apuntando a una ventana y que luego de explicar el proceso de formación de la imagen durante unos 30 minutos, reveló la placa mediante una solución de productos químicos mostrando la imagen del Sol asomando por la ventana. El experimento fotográfico impresionó mucho a Fizeau y Foucault, pero pronto notaron las limitaciones del resultado ya que para retratar a una persona ella debería estar inmóvil durante media hora. Cuando finalizó el curso, ambos analizaron la posibilidad de acelerar el proceso y comenzaron a experimentar con diversas sustancias para el revelado. Al cabo de un par de semanas de probar con distintos reactivos, reemplazaron el cloruro de yodo por una solución acuosa de bromo, logrando reducir el tiempo de exposición de media hora a 20 segundos. Sin embargo, el descubrimiento no tuvo el impacto que podría esperarse. Arago, que estaba al tanto de los avances en fotografía, tomó conocimiento de los experimentos de Fizeau y Foucault y charlando con ellos, los alentó a perfeccionar aún más la técnica fotográfica y. en la conversación, les sugirió que probasen determinar la velocidad de la luz mediante un método basado en observaciones terrestres.

Los valores que, en esa época, se tomaban para la velocidad de la luz, estaban basados en el experimento del físico dinamarqués Ole Christensen Rømer quien, en 1676, la calculó a partir de los datos del período de rotación del satélite Io de Júpiter, pero cuyo valor estaba afectado por un dato erróneo sobre la distancia media entre la Tierra y el Sol. Las determinaciones astronómicas posteriores, hicieron estimar la velocidad de la luz en unos 310.000 *km/s.*

En 1838, Arago había diseñado un experimento para establecer si la luz tenía mayor velocidad en el aire o en el agua, experimento que era crucial para la teoría acerca de la naturaleza de la luz, ya que la teoría de emisión sostenía que la luz se propagaba a mayor velocidad en el agua que en el aire. El método de Arago era bastante complicado y consistía en hacer pasar un haz de luz que se formaba en el foco de un lente a través de un espejo giratorio y luego incidía sobre espejos planos y se reflejaba sobre un espejo esférico para volver al punto de donde se originaba. La puesta a punto del experimento requirió que el experimentador tuviese una aguda percepción visual, pero las múltiples observaciones del Sol, habían dañado tanto la visión de Arago, que tuvo que cancelar el experimento.

Fizeau y Foucault comenzaron a diseñar algunos experimentos en 1843. Pero, en 1847, Foucault abandonó la investigación, por lo que Fizeau continuó solo. En 1849, sobre la base de los experimentos de Galileo y de Fermat, realizó de múltiples ensayos y mejorando los detalles de sus experimentos pudo concretar un resultado, para él aceptable, y comunicarlo a la Académie[82]. Hizo pasar la luz de una lámpara muy potente a través de los intersticios de una rueda dentada. La luz que atravesaba la rueda incidía sobre un espejo plano colocado en Montmartre a 8633 metros de la casa donde Fizeau vivía y el rayo que reflejaba se podía observar con un anteojo. Cuando la rueda estaba en reposo, el rayo luminoso volvía a atravesar el mismo intersticio por el que había salido y el espejo se mostraba iluminado. Pero para una cierta velocidad v en el lapso en que la luz incidía sobre el espejo y regresaba a la rueda, impactaba en el diente vecino y no en el intersticio, por lo que en el

[82] **Fizeau, A.H.L.** : «Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière ». Paris. *Comptes Rendus*, XXIX 1849 pp. 90 – 92. *Poggend. Annal.*, LXXIX 1850, pp. 167 – 169; *Revue Scientifique* **V.**, 1849, pp. 393 – 397.

anteojo se detectaba oscuridad. Al aumentar la velocidad de giro de la rueda dentada se podía volver a observar la imagen reflejada por el espejo y la intensidad de la luz reflejada era máxima cuando la velocidad de la rueda alcanzaba el valor $2v$. Para una velocidad $3v$, el anteojo detectaba la oscuridad como si hubiera ocurrido "un eclipse", y así sucesivamente. La rueda que empleó Fizeau tenía 720 dientes y el primer "eclipse" ocurría cuando la velocidad de la rueda era de 12,6 vueltas por segundo. A partir de estos datos, Fizeau calculó que la velocidad de la luz era de 313.274 kilómetros por segundo. Fizeau aclaró que el resultado era aproximado pero que podía ser más preciso utilizando instrumental de mejor calidad.

La comunicación de Fizeau causó una gran sensación en el mundo científico. La comisión designada para el examen de su trabajo concluyó solicitando la autorización "para construir, a expensas de la Academia, un aparato por medio del cual se podría lograr la máxima precisión de las mediciones que podrían obtenerse mediante este ingenioso método"[83].

La contribución científica que realizó Fizeau con este experimento, hizo que ese mismo año lo nombraran Chevalier de la Légion d'Honneur. El 9 de julio de 1856, el Institut de France le otorgó el Grand Prix de Física con un monto de 10.000 francos. En 1960, al producirse una vacante en la Académie des Sciences por la muerte del Barón Charles Caignard de la Tour, fue elegido miembro de esa institución, en la Sección Física general. Entre 1864 y 1866 fue nombrado *Examinateur* en la École Polytechnique. En 1866 la Royal Society le otorgó la Medalla Rumford y en 1875 lo nombró miembro extranjero de la misma. En 1877, la Académie lo nombró Vicepresidente de la Sección Física y, al año siguiente, Presidente de la misma. En 1878, integró el Bureau des Longitudes.

Con la medición de la velocidad de la luz y las demostraciones de Foucault de que la velocidad de la luz depende del medio en el que se propaga, la teoría ondulatoria propuesta por Huygens y desarrollada por Young, Fresnel y Arago, a mediados del siglo XIX, entre los físicos, quedaban escasos adherentes a la teoría de la emisión.

Fizeau no sólo investigó temas de Óptica, como las características que debería tener el éter, sino de otros aspectos de la Física.

En 1848, comunicó a la Société Philomátique una breve Nota titulada "Sobre los fenómenos presentados por el sonido cuando el cuerpo está sonando y el observador está en movimiento, y sobre los fenómenos correspondientes que la luz debe presentar". En ella demostró que si un cuerpo sonoro emite un sonido continuo y siempre idéntico, las ondas de sonido no estarán dispuestas simétricamente a su alrededor, como sucede cuando está en reposo; pero estarán más cerca el uno del otro en la región hacia la cual se llevará a cabo el movimiento, y más lejos en la región opuesta. El

[83] Lamentablemente, la muerte de Arago, impulsor de este proyecto, y la muerte del ingeniero Paul-Gustave Froment, quien había sido seleccionado para la construcción de la rueda dentada, hizo que la mejora del método de Fizeau se demorase un cuarto de siglo. En 1874, Marie-Alfred Cornú reprodujo los experimentos de Fizeau, con mejoras en los instrumentos de observación, primero colocando el espejo en el monte Valerien y la rueda dentada en la École Polytechnique y después colocando la rueda dentada en el Observatorio de Paris y el espejo a 23 *km* al sudoeste, en la Torre de Montlhéry, encontró un valor de 300.400 *km/s* para la velocidad de la luz. Posteriormente, Cornú quiso repetir el experimento entre Mont-Mounier, cerca de Niza, y Córcega, pero la muerte lo sorprendió.

trabajo era correcto y los experimentos minuciosos, pero lo que Fizeau no sabía era que ese efecto había sido analizado y publicado por Christian Andreas Döppler en 1842.

Fizeau intentó medir la velocidad de una perturbación eléctrica en un cable, lo que entonces se llamaba "la velocidad de la electricidad", algo que en 1834, había tratado de determinar Charles Wheatstone encontrando un valor de 460.000 km/s. En 1849 Charles Vincent Walker[84] encontró que la velocidad de propagación de la "onda galvánica" a través de los cables telegráficos entre New York y Washington era 18.800 millas por segundo (unos 30.250 *km/s*) con un error experimental de 1000 millas/s. Fizeau, con la colaboración del ingeniero Eugène Gounelle[85], interrumpían, la corriente eléctrica a intervalos de tiempo muy próximos y en dos puntos muy alejados de un conductor para luego observar en un galvanómetro las variaciones producidas. Trabajaron con los cables telegráficos entre Paris y Amiens y entre Paris y Rouen, que eran de metales diferentes. Encontraron que, con el cable de acero, la velocidad era de 100.000 *km/s,* en cambio, con el cable de cobre la velocidad era de 180.000 *km/s*.[86]

Otra de las contribuciones de Fizeau a la electricidad fue de gran interés práctico: ya que proporcionó un medio, que luego se volvió clásico, para aumentar la energía en los fenómenos de inducción, que ocurren en la Máquina de Ruhmkorff, generador que permitía producir tensiones elevadísimas, del orden de decenas de miles de voltios, a partir de la corriente continua de una batería. La mejora consistió la colocación de un condensador entre los contactos del interruptor, lo que permitía reducir considerablemente las chispas producidas al conectar el carrete a una pila eléctrica y mejorar los resultados.[87]

Los trabajos de Fizeau sobre electricidad fueron sólo una distracción en su obra, y él siempre regresó a la óptica. La teoría de la aberración de la luz y fenómenos similares plantearon la cuestión seria y difícil de las relaciones entre el éter y la materia ponderable.

Una carta de Fresnel a Arago, de 1818, trató sobre la influencia del movimiento de la Tierra sobre algunos fenómenos ópticos. La carta había sido provocada por los experimentos de Arago sobre la luz de las estrellas, de cuyos resultados dedujo que el movimiento de la Tierra no tiene una influencia significativa en la refracción de los rayos que emanan de esas estrellas.

Si se admitía que la Tierra le imprimía su mismo movimiento al éter que la envolvía, se podía explicar fácilmente por qué el mismo prisma siempre refracta la luz de la misma manera, sea cual fuera el lado desde el que esto sucede. Pero con esa hipótesis resultaba imposible explicar la aberración de las estrellas.

[84] *Proceedings of the American Philosophical Society,* Vol. V, (1849), p. 76.

[85] «Recherches sur la vitesse de propagation de l'électricité» *Comptes Rendus,* 15 avril 1850, XXX, pp. 437 – 40.

[86] Los resultados obtenidos por los distintos investigadores son tan contradictorios, debido al fenómeno de la autoinducción, algo que luego aclaró Lord Kelvin.

[87] « Note sur les machines électriques inductives et sur un moyen facile d'accroître leurs effets » : *Comptes. Rendus de l'Académie des Sciences,* t. 36, 1853, pp. 418 – 421; *Poggend. Ann.,* t. 89, 1853, pp. 173 - 176).

Fresnel supuso que la cantidad total de éter contenido en la unidad de volumen de un cuerpo es proporcional al cuadrado del índice de refracción y que la cantidad de éter arrastrado por un cuerpo en su movimiento es proporcional al poder refringente de dicho cuerpo. Fresnel llegó así a proponer su famoso principio del arrastre de las ondas de luz por los cuerpos refringentes en movimiento, que comunican a las ondas luminosas una fracción de su propia velocidad, representada por $1 - {}^{1}/_{n^2}$, donde *n* designa al índice de refracción. En esta hipótesis, el éter se podía considerar inmóvil y solo las ondas eran arrastradas. El principio de Fresnel explicaba de manera sencilla el fenómeno de la aberración, concebido no solo bajo condiciones ordinarias, sino que también se estudiaba utilizando, como Rudjer Josip Boskovic[88], en 1758, había propuesto hacer las observaciones estelares con un anteojo lleno de agua, pensando que el ángulo de aberración sería mayor. Pero con la teoría de Fresnel, comprobada por los astrónomos de Greenwich, el líquido puesto en el anteojo no tiene ninguna influencia.

La propuesta de Fresnel parecía ser una respuesta a un caso singular. Fizeau la generalizó mediante un experimento[89] en el que produjo franjas de interferencia con dos rayos de luz, después de pasar a través de dos tubos paralelos, en los que el aire podía fluir a gran velocidad y en dos direcciones opuestas. Para una velocidad cero, se observaba un sistema de franjas. Con el aire en movimiento a una velocidad de 25 *m*/*s*, no encontró un desplazamiento sensible de las franjas de interferencia, pero con el agua, a una velocidad de 7 *m*/*s*, hubo un desplazamiento en concordancia muy satisfactoria con la fórmula propuesta por Fresnel. La experiencia de Fizeau fue “recuperada” por Albert Abraham Michelson y Edward William Morley quienes en la conclusión de su famoso trabajo escribieron :"La conclusión de nuestro trabajo es que el resultado anunciado por Fizeau es completamente correcto, y que el éter luminífero no se ve afectado de ninguna manera por el movimiento de la materia que penetra".

En 1860, luego de haber estudiado la influencia del movimiento de un fluido en la velocidad de propagación de la luz, Fizeau quiso averiguar si se daba un comportamiento similar con un cuerpo sólido como el vidrio. El modo de observación utilizado para el aire y el agua no podía usarse para un sólido, y tuvo que recurrir a otros principios. Fizeau partió de un resultado conocido, si un rayo de luz polarizada atraviesa una lámina inclinada de vidrio, el plano de polarización del rayo transmitido gira, y que, en igualdad de condiciones, el ángulo de rotación de este plano depende del índice de refracción del vidrio. Si, este índice varía dentro del vidrio, la rotación sufrirá una variación correspondiente; Como resultado, la velocidad de la luz en el vidrio dependiente del índice se puede deducir de la rotación del plano de polarización. En cuanto a la velocidad del sólido, es decir del vidrio, Fizeau la consideró como componente de la velocidad de traslación de la Tierra según la dirección luminosa. Cambiando la orientación del aparato, llevó a cabo experimentos en los que la velocidad del sólido tomaba diversos valores. Fizeau comprobó que las rotaciones, calculadas con la fórmula de Fresnel, coincidían con los números deducidos de la observación. Como resultado, el movimiento de la Tierra respecto al espacio tiene una influencia en la rotación producida en la luz

[88] Conocido en Europa como Roger Joseph Boscovich.

[89] « Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur»: *Comptes rendus de l’Académie des Sciences*, T. 33, 1851, pp. 349 — 355; *Annales de Chimie et de Physique*,. t. 57, 1859, pp. 385 – 391; *Poggend. Ann.*, 1853, pp. 457 – 463.

polarizada con el cristal, donde, para aumentar los efectos, una pila de cristales revelaría el movimiento de la Tierra en relación con el éter supuestamente inmóvil, una consecuencia singularmente importante y en desacuerdo con las ideas que habían prevalecido hasta entonces sobre este tema. Este nuevo experimento era extremadamente delicado, ya que el fenómeno estaba muy influenciado por los defectos aún más pequeños de la homogeneidad del vidrio. Fizeau mismo indicó la necesidad de repetirlo, pero nunca se volvió a hacer.

Fizeau fue nombrado en la Académie des Sciences el 2 de enero de1860 para reemplazar a Charles Cagniard-Latour, que había fallecido en 1859. Cuatro años antes, Fizeau había recibido un testimonio del gran aprecio por sus trabajos. El emperador Napoleón III acababa de crear un premio trienal de diez mil francos, que el Institut de France otorgaría bajo las siguientes condiciones: cada Academia daría a conocer el descubrimiento o el trabajo, que se hubiese publicado en los últimos cinco años, que considerara digno de Premio; una comisión compuesta por varios miembros de cada uno de estas Academias examinaría los méritos de los candidatos propuestos y propondría sus nombres al Institut, que reunido en sesión plenaria, decidiría definitivamente. La Académie des Sciences presentó como candidato a M. Fizeau, cuyos dos trabajos experimentales fundamentales tenían como objetivo discernir el comportamiento de la luz. La Comisión General del Institut se pronunció por trece votos sobre diecinueve a favor de Fizeau, lo que fue presentado así a la Asamblea General del Institut. En esa Asamblea — y luego de una discusión acalorada, — Fizeau recibió 61 votos y dos candidatos de otras academias recibieron, en conjunto, 46 votos.

En los años posteriores a su elección en la Academia, Fizeau presentó varias memorias dedicadas a la variación del índice de refracción[90] y a la expansión de varios sólidos bajo la influencia del calor[91]. Las bandas de interferencia le proporcionaron la idea de un método muy preciso para determinar la dilatación de los cuerpos; la variación de temperatura modifica el espesor de las capas de aire que producen estas franjas, por lo que concluyó que sus desplazamientos pueden servir para determinar los coeficientes de dilatación.

En 1864, Al publicar un trabajo sobre la dilatación del cristal de roca, Fizeau describió un método novedoso para cuantificar la dilatación de un sólido por calentamiento[92]. Las franjas de interferencia le proporcionaron la idea de un método muy preciso para determinar la dilatación de los

---

[90] Entre ellos, « Sur une méthode propre à rechercher si l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent »: *Comptes Rendus. Académie des Sciences,* t. 49, 1859, p. 717; *Annales de Chimie,* t. 58, 1860, p. 129; *Poggend. Ann.,* t. 109, 1860, pp. 160 – 554.

« Recherches sur plusieurs phénomenes relatifs à la polarisation de la lumière »: *Comptes Rendus. Académie des Sciences,* t. 52, 1861, p. 267, 1221; *Annales de Chimie,* t. 63, 1861, p. 385; *Phil. Mag.,* t. 21, 1861, p. 438; *Poggend. Ann.,* t.116, 1862, p. 478.

« Note sur la lumière émise par le sodium brulant dans l'air »: *Comptes Rendus. Académie des Sciences,* t. 54, 1862, p. 493; *Chemical News,* 1862, p. 150; *Poggend. Ann.,* t. 116, 1862, pp. 492 – 562.

[91] « Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumière dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur »: *Comptes Rendus. Académie des Sciences,* t. 54, 1862, p. 1237; *Annales de Chimie,* t. 66, 1862, p. 429; *Poggend. Ann.,* t. 1197 1863, pp. 87 – 297.

[92] « Recherches sur la dilatation et la double réfraction du cristal de roche échauffé»: *Comptes Rendus, Académie des Sciences,* t. 58, 1864, p. 923; *Annales de Chimie et de Physique,* 1864, pp. 143 – 185; *Annalen der Physik und Chemie,* t. 123, 1864, p. 515.

cuerpos ya que la variación de temperatura modifica el espesor de las capas de aire que producen estas franjas. Fizeau concluyó que sus desplazamientos pueden servir para determinar los coeficientes de dilatación. A partir de su trabajo se popularizó entre los físicos el llamado "dilatómetro de Fizeau".

Fizeau estudió las variaciones con la temperatura de los índices de refracción y, en particular, realizó un estudio muy detallado de los fenómenos ópticos que presenta el espato de Islandia[93], cuerpo para el cual el índice de refracción del rayo extraordinario aumenta rápidamente con la temperatura, mientras que el índice del rayo ordinario permanece sustancialmente constante.

En 1853, Fizeau se casó con Thérèse Valentine, la hija de Adrien Henri de Jussieu, — médico y botánico que en 1845 fue Presidente de la Académie des Sciences. Con ella tuvo tres hijos. La vida de Fizeau se entristeció cuando, en 1863, su esposa falleció a los 32 años. Desde entonces se aisló en su castillo de Venteuil, en el Marne, y solo viajaba a Paris una vez por semana para las reuniones en la Académie des Sciences y en el Bureau des Longitudes.

Fizeau continuó trabajando, y poco antes de su muerte todavía estaba haciendo una comunicación de carácter histórico sobre el brillo promedio de las estrellas principales[94]. Una enfermedad cruel lo separó en unas pocas semanas de su afecto y estima por la ciencia, el 18 de septiembre de 1896.

Jean-Bernard-Léon Foucault nació en París el 19 de septiembre de 1819. Fue hijo de Jean Léon Fortuna Foucault, un conocido editor y librero de esa ciudad, y de Aimée Nicole Repetir. Nada en su infancia anunciaba que algún día iba a ser considerado uno de los científicos más ilustres de Francia. Era de salud delicada, de carácter suave y tímido. La debilidad de su constitución, hizo que sus padres se encargaran de su educación inicial. En 1834, su madre lo inscribió en el prestigioso colegio católico Stanislas, donde Foucault conoció y se hizo amigo de Hippolyte Fizeau. No fue un alumno destacado y muchas veces su madre tenía que ayudarlo en sus tareas escolares, No obstante, en 1837 obtuvo su bachillerato en letras y dieciocho meses más tarde su bachillerato en ciencias físicas. Una de las virtudes que exhibió en su adolescencia fue una gran habilitad manual. A los trece años construyó un barco de miniatura y luego un telégrafo que imitaba el de Saint-Salpica y, más tarde, una pequeña máquina de vapor. Esa habilidad manual le sirvió, en su carrera profesional, para realizar todos los aparatos que sus investigaciones requerían.

Una vez obtenido su segundo bachillerato, su madre lo alentó para que estudiara Medicina. Su intención original era dedicarse a la Cirugía. Pero la visión de sangre y el espectáculo de los sufrimientos de los pacientes, lo impresionaron tanto que decidió renunciar. En cambio, le interesó hacer un curso de microscopía con el Dr. Alfred François Donné en la École de Medicine de la Universidad de Paris. Foucault fue primero un simple estudiante, pero su habilidad manual hizo que Donné

[93] « Recherches sur les modifications que subit la vitesse de la lumière dans le verre et plusieurs autres corps solides sous l'influence de la chaleur»: *Comptes Rendus,. Académie des Sciences,* t. 54, 1862, p. 1237; *Annales de Chimie,* t. 66, 1862, p. 429; *Poggend. Ann.*, t. 119, 1863, pp.87 – 297.

[94] « Remarques sur la constance moyenne d'éclat des principales étoiles»: *Comptes Rends Académie des Sciences* t. 121, 1895, p. 516.

lo nombrara su asistente y más tarde se convirtió en colaborador. En 1845, sucedió a Donné en el Journal des Debuts, como redactor de información científica

Fig.9.9. J.B.L. Foucault (1819 – 1868)

Luego de asistir al curso de fotografía que dictó Daguerre, colaboró con Fizeau en el proceso de obtener un líquido de revelado que acelerase el proceso fotográfico[95] y construyó una máquina fotográfica introduciendo algunas mejoras a la de Daguerre. En 1846, realizó un estudio con Fizeau, sobre la acción de los rayos rojos sobre las placas de Daguerre[96].

Las investigaciones para mejorar la fotografía habían llevado a Foucault y Fizeau a incursionar en la Óptica. Ya en 1843, aprovechando la experiencia que había recogido Foucault trabajando con Donné y su habilidad práctica, los amigos pudieron mejorar un microscopio para una mejor resolución de imágenes microscópicas, aunque su trabajo[97] no fue publicado. Ambos redactaron una memoria, que tampoco fue publicada[98], sobre la acción de las distintas radiaciones componentes de la luz visible sobre una placa fotográfica.

La pila de Grove, modificada por Robert Wilhelm Ebrard Bunsen en 1841, había logrado que fuera fácil producir luz eléctrica y a Foucault se le ocurrió reemplazar el microscopio de gas, que entonces no era seguro de usar, por un dispositivo que estuviera iluminado por la luz brillante y blanca de la pila. Luego, de muchas disposiciones y ensayos en 1844 perfeccionó su microscopio óptico. Los experimentos que llevó a cabo, los volcó en una memoria que no fue publicada[99]. En 1849 no sólo perfeccionó su aparato, sino que diseño un mecanismo para orientar la luz en el sentido que se quisiera. Este instrumento, imitando la Sol, se aplicó en la representación de la ópera de Giacomo Meyerbeer [100] "Le Prophète", estrenada ese año en París.

---

[95] « Méthode pour appliquer le brome a la production des épreuves daguerriennes », publicado en Chevalier Charles : *Nouvelles instructions sur l'usage du daguerréotype*, Paris, 1841, Noviembre 1841. Pp. 67 – 76.

[96] **Fizeau, H., Foucault, L**: «Observations concernant l'action des rayons rouges sur les plaques daguerriennes », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, T. XXIII, 1846 p. 679 – 682.

[97] « Notes sur quelques expériences tentées pour obtenir des épreuves d'objets microscopiques » 7 de octubre de 1843 – 3 de febrero de 1844. Ver **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 12 – 13.

[98] « Études sur l'action spéciale exercée par l'extrémité la moins réfrangible du spectre sur les substances impressionnables a la lumière ». Ver **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 19 – 50.

[99] *Idem, Observations sur la lumière électrique*, pp. 59 – 64.

[100] Jakob Liebmann Meyer Beer (1791 – 1864).

Con el fisiólogo y microscopista Donné, redactaron, en 1843, una memoria[101], que proponía el uso de la pila voltaica para los llamados "microscopios solares". Al año siguiente, publicaron un trabajo sobre el microscopio fotoeléctrico[102]. Con Donné también desarrollo un microscopio-daguerrotipo y, en 1845, publicaron un atlas conteniendo 86 fotografías tomadas con ese aparato[103], que fueron usadas como complemento del *Cours de microscopie* de Donné.

El trabajo con Fizeau fue muy fructífero, Fizeau formulaba hipótesis originales para explicar los fenómenos ópticos, eléctricos y caloríficos, y Foucault diseñaba y construía los dispositivos para poner esas hipótesis a prueba. Juntos presentaron trabajos empíricos con fundamentos teóricos sobre las radiaciones luminosas, las térmicas y sobre fenómenos eléctricos. Entre sus trabajos merecen destacarse un análisis del experimento de Humphry Davy sobre la luz que emite el carbón incandescente[104], análisis de la interferencia de radiaciones luminosas[105] y de radiaciones térmicas[106] estimando las longitudes de onda de estas radiaciones térmicas[107]

Sus trabajos en colaboración con Fizeau no duraron mucho tiempo, cada uno tenía un conjunto de ideas personales que lo llevaban a ponerlas en práctica en forma independiente, por lo que se separaron sin que eso dañara su amistad.

Foucault hizo algunas investigaciones con el médico Jules-Antoine Regnauld (1822 – 1895), destacándose una, de 1848, sobre la visión[108]. Pero los trabajos que le dieron relevancia internacional estuvieron referidos a la velocidad de la luz en distintos medios, los que terminaron de derrumbar los últimos apoyos a la teoría de la emisión ya que demostraron, al contrario de lo que sostuvo Newton, que la velocidad de la luz en el agua es menor que la que tiene en el aire.

---

[101] Memoria que tampoco fue publicada, aunque al igual que las otras no publicadas, su original se depositó en la Académie des Sciences. El título de esta memoria es « Application de la lumière voltaïque au microscope solaire » y cuyo contenido puede consultarse en **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 65 – 66.

[102] « Notice sur le microscope photo-électrique », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, T. XVIII, 1844, pp. 696 ; *Bulletin de la Société de encouragement pour l'industrie Nationale*, 1845, p. 388 – 392.

[103] *Atlas du cours de microscopie complémentaire des études medicales*, J. B. Baillière, Paris, 1845.

[104] « Recherches sur l'intensité de la lumière émise par le charbon dans l'expérience de Davy», *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, T. XVIII, pp.746 – 754 y 860 – 862.

[105] « Sur le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière dans le cas de grandes différences de marche et sur la polarisation chromatique produite par les lames épaisses cristallisées» : *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1848, T. XXVI, p. 680 – 682. Ver **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 105 – 127.

[106] « Recherches sur les interférences des rayons calorifiques », Ver **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 130 – 134 y 135 – 160 ; *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1848, T. XXV, p 447 – 450.

[107] « Longueurs d'ondes des rayons calorifiques » : *Procès-Verbaux de la Société Philomatique*, 1847, p. 108 ; **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 161 – 162.

[108] "Sur quelques phénomènes de la vision au moyen des deux yeux », *Procès-Verbaux de la Société Philomatique*, 1848, p. 72 ; **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 163 – 169.

Arago había formulado una primera idea acerca del método para comprobar que la velocidad de la luz en el agua es menor que la de la luz en el aire, pero la diabetes y el glaucoma le habían reducido la visión haciéndole imposible llevar a cabo experimentos que requerían cierta precisión.

Foucault le escribió a Arago solicitándole autorización para plasmar en el laboratorio las ideas que este había expresado y, con el asentimiento, comenzó a pergeñar un experimento que concretó exitosamente y que presentó ante la Académie el 6 de mayo de 1850, con el título *Méthode générale pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air et les milieux transparents. Vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau. Projet d'expérience sur la vitesse de propagation du calorique rayonnant*[109]. Posteriormente, Foucault completó su trabajo mediante la adición de un engranaje cronoelástico, construido, según sus indicaciones, por el ingeniero Paul Gustave Froment, que le permitió medir la velocidad absoluta de la luz en el interior de una habitación y aportar un elemento nuevo y cierto en la determinación de la distancia que separa la Tierra del Sol.

Luego de publicado su trabajo de 1850, sobre la velocidad de la luz en distintos medios, Foucault realizó una serie de experimentos para darle más solidez a la teoría subyacente en ese trabajo y en 1853, completó un informe ampliado sobre el tema, que presentó como tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias físicas en la Universidad de París. La tesis fue defendida el 25 de abril de 1853,[110] ante una comisión presidida por Jean–Baptiste Dumas e integrada por César Mansuète Despretz y Jérôme Balard. Las palabras finales de la tesis fueron: « *La conclusion dernière de ce travail consiste donc à déclarer le système de l'émission incompatible avec la réalité des faits.* » La tesis fue aprobada por el decano de la Facultad de Ciencias Henri Milne Edwards y su impresión fue autorizada.

En los años siguientes, Foucault produjo varios trabajos sobre Óptica de importancia. Así, en 1862, presentó ante la Académie, un estudio sobre la velocidad de la luz y el paralaje solar[111] a lo que agregó una descripción de los aparatos[112]que diseñó para ese trabajo.

Foucault también se ocupó de la construcción y el perfeccionamiento de los instrumentos utilizados en las observaciones astronómicas[113].

---

[109] *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. **30.** (24) 551 – 560 (1850) ; **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 164 – 174.

[110] « Sur les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau » *Annales de Chimie et de Physique*, [3] 1854 T. XLI, pp. 129 – 164.

[111] « Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière », *Comptes rendus de la Académie des Sciences*, 1862, T. LV, pp. 501 – 503.

[112] « Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière. Description des appareils », *Idem*, pp. 792 – 796.

[113] « Sur un nouveau télescope en verre argenté », *Idem.*, 1857, t. XLIV, pp. 339 – 342 ; « Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté », **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 232 – 284 ; « Sur la construction du plan optique » , *Comptes rendus de la Académie des Sciences*, 1869,T. LXIX, pp. 1102 – 1107 ; « Sur un moyen d'affaiblir les rayons du soleil au foyer des lunettes », *Idem.*, 1866, T. LXIII, pp. 413 – 415 ; « Application du procédé D'Argenture a un objectif de 0^{m},25 de diamètre. », *Idem.*, 1866, T. LXIII, pp. 547 – 550 ; « Du spectre secondaire et de son influence sur la vision dans les instruments d'Optique », **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp.296 – 300.

Al igual que Fizeau, en una época Foucault investigó sobre algunos aspectos de la electricidad. Su primer trabajo sobre este tema lo realizó en 1847 cuando se planteó la necesidad de tener valores precisos de la evolución del tiempo en las observaciones astronómicas. A ese trabajo lo tituló: « Sur un moyen de transmettre l'heure à distance avec le degré de précision nécessaire aux usages astronomiques »[114]. En 1849, inventó un dispositivo para mantener uniforme la intensidad de la luz mediante una pila voltaica[115]. En 1852, presentó ante la Académie un trabajo para regular el alumbrado público cuando se sustituya la iluminación a gas por alumbrado eléctrico[116]. En 1863, complementó este trabajo con otro en el que describió un aparato que puede mantener a la distancia deseada, y operando automáticamente, los carbones de los polos de las lámparas a electricidad[117]

A raíz de los experimentos de Michael Faraday sobre la electrólisis en medios líquidos, — con lo que se comprobó que había una restricción a la capacidad de ciertos líquidos para conducir la electricidad sin descomponerse —Foucault comenzó a investigar la conductibilidad eléctrica en medios líquidos. Sus experiencias las volcó en varias memorias[118], la primera de las cuales se publicó en 1853.

También efectuó investigaciones sobre el magnetismo y la inducción, resulta de las cuales publicó varios trabajos[119]

En 1858, presentó ante la Société Philomátique un trabajo describiendo un distribuidor de corriente eléctrica accionado por un reloj de péndulo[120].

En lo que respecta a la Mecánica, Foucault publicó su primer trabajo en 1847 en el que construyó un péndulo cónico[121] y comparó su funcionamiento con el de Huygens. Cuatro años más tarde

---

[114] **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 305 – 309.

[115] « Appareil destiné à rendre constante la lumière émanant d'un charbon placé entre les deux poles d'une pile », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1849, T. XXVIII, pp. 68 – 69 y 698. .

[116] « Sur les appareils fixateurs de la lumière électrique. » **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 317 – 321.

[117] « Appareil régulateur de la lumière électrique a recul et a détente équilibrée. », *Idem.*, pp. 322 – 326.

[118] « Sur la conductibilité propre des liquides.» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1853, T. XXXVII, pp. 580 – 583 ; *Bibl. universelle de Genève*, 1853, t. XXIV p. 263 – 268; «Sur la conductibilité physique des liquides. », *Bibl. universelle de Genève*, 1854, t. XXV p. 180 – 183. «Sur la conductibilité physique des liquides. Réponse à M. Buff », *Bibl. universelle de Genève*, 1856, p. 426 – 427. »

[119] Entre ellos: «De la chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement.» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1855, T. XLI, pp. 450 – 452; *Annales de chimie et de physique*, 1855, T. XLV, pp. 316 – 318; *Brit. Assoc. Rep.* 1855 (pt. 2), p. l l; *Poggend. Annal.* 1855, T. XCVI, pp. 622 – 625 ; « Sur l'emploi des appareils d'induction. Effets des machines multiples.»: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1856, T. XLII, pp.215 – 217; «Sur l'emploi des appareils d'induction; interrupteur à mercure.» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1856, T. XLIII, pp.44 – 47 ; « Machines d'induction multiples » : *Procès-verbaux de la Société philomátique*, 1856, p. 37 ; « Interrupteur a double effet pour les appareils d'induction » : *Procès-verbaux de la Société. Philomátique*, 1857, pp. 105 – 106.

[120] **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 310 – 312.

[121] «Sur une horloge a pendule conique.» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1847, T. XXV, pp. 154 – 160.

presentaría uno de los trabajos más relevantes de su carrera: «Démonstration physique de mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule.»[122]. Foucault inició los ensayos experimentales con el péndulo, en 1850, en su mansión. Luego el péndulo fue trasladado al Observatoire de Paris e instalado en la Salle de la Meridienne, ahora con un cable mucho más largo, que llevaba su longitud a 57 metros y cada una de sus oscilaciones duraba ocho segundos. Pequeños montículos de arena húmeda, instalados en una tableta circular alrededor del aparato, recibían, en cada oscilación, el choque de un punto fijo de la bola del péndulo, y las marcas que dejaba la bola se iban desplazando cada vez en unos pocos milímetros, a la izquierda del observador. Suponiendo que cuando el péndulo estaba en reposo, la caída desde su punto fijo coincidía con el eje de la Tierra, el desplazamiento de las marcas que dejaba la bola indicaba que el plano de oscilación del péndulo estaba rotando y que ese giro era de 11º 15' cada hora. Foucault escribió que "El Presidente de la República, en su alta consideración hacia la ciencia, quiso que esta experiencia fuera repetida en el Panthéon"[123]. Por eso, el experimento se volvió a hace allí, esta vez con un cable de acero de 67 y siendo la bola de 28 kg, una bala de cañón. El círculo en el que giraba el péndulo tenía 18 metros de circunferencia y cada oscilación doble la bala se desviaba 2,3 milímetros. El péndulo estuvo en el Pantheón hasta el año 2010, en que el cable se rompió.

Al año siguiente, presentó una memoria ampliando la demostración de la rotación de la Tierra pero el lugar de considerar la rotación del plano de oscilación del péndulo, analizó el movimiento rotatorio de los cuerpos[124]. Luego publicó una media docena de trabajos referidos a la rotación de la Tierra.

Uno de los inventos que realizó Foucault, a raíz, de sus investigaciones sobre la rotación de la Tierra fue su giróscopo (o giroscopio). Este dispositivo, que en definitiva tiende a comprobar la vigencia del principio de inercia, había sido construido por el astrónomo alemán Johann Gottlieb von Bohnemberger en 1817 y La place, lo utilizaba en sus clases en la École Polytechnique. Con la ayuda del Ingeniero Paul Gustave Froment, Foucault perfeccionó el dispositivo de modo que fuera capaz de conservar una velocidad de giro bastante alta, hasta unas 200 rpm, y durante un intervalo lo suficientemente apropiado para hacer mediciones. Encontró que al impedir ciertos movimientos del soporte, se produce una alineación con el meridiano, lo que permite establecer hacia dónde está el Norte[125].

Otro de los inventos de Foucault que muestran su habilidad experimental fue la construcción de un helióstato que, mediante movimientos apropiados, permitía que un conjunto de espejos monta-

[122] Presentado ante la Académie el 3 de febrero de 1851 y publicado en *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1851, T. XXXII, pp. 135 – 138; *Bibl. universelle de Genève*, 1851, T. XVI, pp. 204 – 209; *Edinburg New Philosophical Journal*, 1851, T. LI, pp. 101 – 105; *Edinburgh New Philosophical Journal*, 1851, T. LI, pp. 101 – 105; *Journal de Pharmacie et de Chimie*, 1851, T. XIX, pp. 362 – 365; *Poggend. Annal*, 1851, T. LXXXII, pp.458 - 462.

[123] Donde reposan los restos de los franceses que hicieron grandes contribuciones a las ciencias y a las artes.

[124] «Sur une nouvelle démonstration expérimentale du mouvement de la Terre fondée sur la fixité du plan de rotation» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1852, T. XXXV, pp. 421– 424.

[125] Ver: « Instruction sur les expériences du gyroscope.» **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 416 – 420.

dos sobre dos ejes, reflejasen siempre la luz solar sobre una misma superficie pequeña[126]. Posteriormente, agregó un segundo modelo y publicó los detalles e imágenes de los mismos[127].

En 1862, presentó un trabajo en el que trataba de establecer una manera rigurosa las condiciones de isocronismo del péndulo cónico para hacerlo un regulador natural de las máquinas motrices[128], para luego extender sus ideas a otros aparatos apropiados para regular la velocidad de los motores mecánicos[129].

En 1860, Foucault acompañó a Urbain Le verrier, — entonces, Director del Observatorio de Paris — a una expedición a España, para observar el eclipse del 18 de julio tomó fotografías y publicó un trabajo describiendo el fenómeno astronómico[130]. Napoleón III, que era un científico aficionado, lo nombró Físico Asociado al Observatorio y, en 1862, lo nombró Oficial de la Legión de Honor. Ese mismo año fue incorporado al Bureau des Longitudes y nombrado Fellow de la Royal Society y miembro de la Academia Naturæ Curiosorum, la entidad alemana equivalente a la Royal Society o a la Académie des Sciences. A la muerte de Paul Émile Benoit Clapeyron, fue incorporado a la Académie.

En octubre de 1867, comenzó a experimentar fuertes dolores en un brazo que se fue extendiendo a otras partes del cuerpo. Falleció de esclerosis múltiple en Paris, el 11 de febrero de 1868. Su nombre integra la lista de los 72 científicos que recuerda la inscripción en la Torre Eiffel.

Bibliografía:

Arago, F., (**1854**): *Œuvres Complètes*, T. I, II y III, Gide et Baudry Éditeurs, Paris.
Duffieux, P. M., (**1970**) *L'Intégrale de Fourier et ses applications a l' Optique*, Masson, Paris.

---

126 «Sur un héliostat nouveau.» : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1862, T. LIV, pp. 618 – 620.

127 «Description de l'héliostat.» : **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 427 – 431.

128 « Sur un régulateur isochrone du mouvement uniforme. »" **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 435 – 441

129 «Notes et mémoires sur les appareils régulateurs de vitesse.» : **Foucault, A. N.**, (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris, pp. 442 – 455. En las páginas siguientes se describen diversos reguladores de velocidad.

130 « Éclipse totale du 18 Julliet.» : *Idem*, pp. 534 – 541.

Foucault, A. N., (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris.

Métivier,M., Costabel,P., Dugac, P.,(**1981**): *Siméon-Denis Poisson et la science de son temps*, École polytechnique, Paris.

Peacock, G., (**1855**): *Miscellaneous Works of the Late Thomas Young, M.D., F.R.S. &*, Vols. I & II, John Murray, London.

Picard, E., (**1924**): *Les Théories de l'Optique et l'Œuvre d'Hippolyte Fizeau*, Conferencia en la sesión pública anual de la Académie des Sciences del 17 de diciembre de 1923, Paris..

Rosmorduc, J., Rosmorduc, V., Dutour, F., (**2004**); *Les révolutions de l'Optique* et *l'œuvre de Fresnel*, Collection Inflexión, Ed. Inflexion, Paris.

X. ELECTRICIDAD MAGNETISMO Y ÓPTICA EN UNA SOLA TEORÍA

10 – 1.- James Clerk Maxwell.

James Clerk Maxwell, nació en Edinburgh el 13 de junio de 1831, hijo de John Clerk Maxwell, un abogado prestigioso y Frances Cay. Maxwell pasó su infancia en los campos de Middleie, en Glenlair, donde su familia tenía una finca. Desde niño mostró una gran curiosidad por todo lo que lo rodeaba, al punto que su frase más común era "¿Cómo funciona?". A los diez años, su padre lo inscribió en la Edinburh Academy, en Edinburh, donde cursó sus estudios secundarios. Allí entabló una amistad que duraría toda la vida con Peter Guthrie Tait (1831 – 1901). A los catorce años redactó un trabajo sobre "Curvas ovaladas", un resumen del mismo se publicó en abril de 1846, en los *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*[1]. En 1847, a los dieciséis años ingresó a la University of Edinburgh para estudiar Matemática, Física, Química y Filosofía. Durante su estancia en esta Universidad publicó dos trabajos en las *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, uno sobre la teoría de las curvas rodantes[2], leído ante la Sociedad en febrero de 1849 y otro al año siguiente, sobre cuerpos elásticos[3]. En 1850, al culminar sus estudios, ingresó al St. Peter College de la Universidad de Cambridge y en 1854, fue elegido *Fellow* del Trinity College. Estando allí ganó el Premio Adams 1856 de la Universidad de Cambridge por un trabajo sobre los anillos de Saturno[4]. Sin embargo, en abril de 1856, abandonó el College para tomar la cátedra de Física en el Marischal College, en Aberdeen. En 1860, varios colegios de Aberdeen se fusionaron formando la Universidad de Aberdeen, por lo que la cátedra de Maxwell se eliminó y este aceptó la cátedra del King's College en London.

Fig.. 10.1. J. Clerk Maxwell (1831 – 1879)

[1] "On the description of oval curves and those having a plurality of foci and Radii of various Proportions" Proc Roy Soc Edinburgh, Vol. II (1846) pp. 89 – 91.

[2] "On the Theory of Rolling Curves": *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, Vol. XVI, 5 (1849) , pp. 519 – 540.

[3] "On the Equilibrium of Elastic Solids": *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, Vol XX, Part I, (**1850**), pp. 87 – 120.

[4] Maxwell, J. C., (1859): *Essay on the Stability of Saturn's rings*", MacMillan & Co. Cambridge.

El tema de la visión de los colores atrajo la atención de Maxwell desde su juventud. Estando en el Trinity College, leyó una traducción al inglés de un trabajo de Helmholtz, de 1852[5] en el que el autor adhería con entusiasmo a la teoría tricromática de Young sobre la visión de los colores y describía varios experimentos de mezclar los colores del espectro formando dos espectros a partir de rendijas en ángulos rectos entre sí.

En vez de experimentar con luces de colores, Maxwell utilizó discos de papel de distintos colores que tenían un pequeño agujero en el centro para poder atravesarlos con un eje. Los discos se recortaban según dos radios de modo que cada uno dejaba ver un determinado porcentaje del disco que estaba debajo. Modificando el ángulo de la abertura del corte se podía variar a voluntad las proporciones de los colores que se podían ver. Haciendo girar los discos a gran velocidad, la sensación visual era de un color único. Con sus experimentos, corroboró la teoría de Young, modificada por David Brewster, de que los conos del ojo normal tienen receptores para los colores rojo, verde y azul. Su trabajo fue leído ante la Royal Scottish Society el 19 de marzo de 1855[6]. Según sus experimentos, concluyó que los ojos de los daltónicos son sensibles a sólo dos colores. Inclusive diseñó un sistema de anteojos, para las personas que padecen daltonismo por superposición de colores. Esos anteojos tenían un cristal de color verde y el otro de color rojo. Ese mismo año, presentó ante la Royal Society de Edinburgh, una ampliación de esos trabajos.[7]

En 1855, se ocupó de darle formas matemáticas a las ideas cualitativas de Faraday sobre las líneas de fuerza y el estado electrotónico[8].

---

[5] Helmholtz, H. "On the Theory of Compound Colours", *Phil. Mag.* 4, 519 – 534 (***1852***)

[6]"On the Theory of Colours in relation to Colour-Blindness. In a letter to Dr. G. Wilson":*Transactions of the Royal Scottish Society of Arts*, (1856) Vol. iv. Part iii. Pp. 119 – 125.

[7]"*Experiments on Colours, as perceived by the Eye, with Remarks on Colour-Blindness", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, Vol. XXI, Part. II, (1855) pp. 275 – 298*

[8] En una carta enviada a Richard Phillips el 29 de noviembre de 1831, Faraday escribió: "Cuando una corriente eléctrica pasa a través de uno o dos alambres colocados de manera paralela, inicialmente provoca una corriente a través de la otra, en la misma dirección, pero esta corriente inducida no dura un momento, a pesar que la corriente inducida (de una batería voltaica) continúa; todo parece inalterado, excepto que la corriente principal continua su curso. Pero cuando la corriente es detenida, en el alambre bajo inducción ocurre una corriente en sentido contrario, esa corriente es de aproximadamente la misma intensidad y su duración es momentánea, pero en dirección opuesta a la que se había producido primero. Por lo tanto, la electricidad a través de las corrientes ejerce una acción inductiva al igual que la electricidad ordinaria, pero sujeta a leyes peculiares. Los efectos son, una corriente en la misma dirección cuando se establece la inducción, una corriente en sentido inverso cuando la inducción cesa y un *estado peculiar* en el ínterin. Probablemente, la electricidad común haga la misma cosa, pero como al presente es imposible separar el comienzo del final de un chispa o descarga, todos los efectos son simultáneos y se neutralizan entre sí.

Así encontré que los imanes pueden inducir tal como las corrientes voltaicas y acercando hélices, alambres y cubiertas metálicas hacia los polos de un imán, se producen en ellos corrientes eléctricas, corrientes que son capaces de deflectar la aguja del galvanómetro, o hacer , por medio de la hélice, agujas magnéticas o, en un caso, aun producir una chispa. De ahí la evolución de electricidad a partir del magnetismo. Estas corrientes no son permanentes. Cesan en el momento en que los alambres cesan de aproximarse al imán, porque se alcanzó un estado nuevo y aparentemente inactivo, tal como en el caso de la inducción de corrientes. Pero cuando se retira el imán y, por lo tanto, la inducción cesa, la corriente en sentido inverso aparece como antes. Esas dos clases de inducción las he distinguido mediante los términos inducción volta-eléctrica e inducción magneto-eléctrica. Sus identidades de acción y sus resultados, creo, que son una poderosa prueba de la teoría del magnetismo del Sr. Ampère.

Es particularmente interesante como Maxwell empleó la analogía con una teoría física ya establecida para encontrar las expresiones matemáticas que relacionan fenómenos novedosos. No fue el primero en emplear estos recursos, ya hemos mencionado en la Sección 8 – 6, que Ohm obtuvo la ecuación para el flujo de corriente eléctrica en régimen estacionario a partir de la ecuación de Fourier. También Adolf Fick empleó la ley de Fourier para establecer, en 1855, su ley de difusión en régimen estacionario, que establece que, en ese régimen, el flujo de partículas es proporcional al gradiente de concentración

$$\boldsymbol{\Phi_D = -D\frac{dc}{dx}}$$

donde *D* es el llamado "coeficiente de difusión" y *c* la concentración de las partículas que difunden.

La clásica experiencia de desparramar limaduras de hierro sobre un papel y colocar un imán debajo hizo que Faraday bautizase a las líneas en que se orientaban las limaduras como "Líneas de fuerza" (Figura 10.2). Para poder encontrar las expresiones matemáticas que regulan ese comportamiento, Maxwell supuso que esas líneas eran un conjunto compacto de tubos de diámetro infinitesimal por los cuales circulaba un fluido incompresible. Aplicando las leyes conocidas sobre la circulación de fluidos incompresibles a través de cañerías, pudo encontrar las relaciones matemáticas que regulan el comportamiento real ante la acción de un imán. El tratamiento es algo extenso pero es tan ingenioso e interesante que su traducción la incorporamos como Apéndice A al final de ese capítulo, conjuntamente con el tratamiento cuantitativo del estado electrotónico de Faraday.

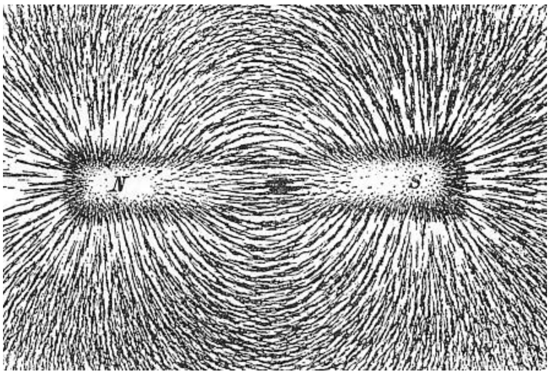


Fig. 10.2.Líneas de fuerza de un imán colocado debajo de una cartulina sobre la cual se esparcieron limaduras de hierro.

En 1857 participó de la competencia para obtener el "Adam Prize"[9], uno de los premios más importantes que otorga la Universidad de Cambridge. Ese año el tema para optar al premio era una explicación de los anillos de Saturno. El llamado para optar al premio establecía que "El problema puede ser tratado sobre la suposición que el sistema de anillos es exactamente, o muy aproximadamente, concéntrico con Saturno y dispuesto simétricamente sobre el plano de su ecuador y se pueden adoptar diversas hipótesis respecto de la composición física de los anillos. Se puede suponer (1) que son rígidos; (2) que son fluidos y en parte aeriformes; (3) que consisten en masas de materia no cohesionada. Se considerará que la cuestión ha sido resuelta correctamente al determinar a partir de estas hipótesis, en forma individual, si las condiciones de estabilidad mecánica se satisfacen por las atracciones y movimientos mutuos del Planeta y los Anillos. Es deseable que se intente determinar mediante cuál de las hipótesis anteriores se puede

La condición de la materia la he dignificado con el término Electrotónico. El estado electrotónico. ¿Qué piensa usted de eso? No soy un hombre audaz e, ignorante como soy para acuñar palabras, he consultado a los eruditos. **B. Jones,** (1870): *Life of Faraday*, Vol. II, Longmans, Green & Co., London, p. 6.

[9] En honor a John Couch Adams, uno de los descubridores del planeta Neptuno.

explicar satisfactoriamente las apariencias, tanto de los anillos brillantes como del anillo oscuro recientemente descubierto; e indicar cualquier causa a la cual se le pueda atribuir un cambio de forma tal como se supone a partir de una comparación de las observaciones modernas con las observaciones anteriores". Maxwell, empleando la Mecánica y la teoría ondulatoria desarrolló un método matemático de comparación y llegó a la conclusión de que " El único sistema de anillos que puede existir es uno compuesto por un número indefinido de partículas desconectadas que giran alrededor del planeta con diferentes velocidades de acuerdo con sus respectivas distancias. Estas partículas pueden estar dispuestas en una serie de anillos estrechos, o pueden moverse entre sí de forma irregular. En el primer caso, la destrucción del sistema será muy lenta, en el segundo caso será más rápida, pero puede haber una tendencia hacia un arreglo en anillos estrechos que puede retardar el proceso". Parte del trabajo que presentó, que trataba el comportamiento de las partículas de los anillos como movimientos oscilatorios, fue ilustrado con un dispositivo mecánico, que fue muy admirado al ser expuesto ante el Jurado. El Astrónomo Real, George Biddell Airy, caracterizó al trabajo de Maxwell como "la más remarcable aplicación de la Matemática a la Física que he visto en mi vida".

Este trabajo, además del premio, incrementó notablemente el prestigio que Maxwell gozaba en la comunidad científica. Además, la hipótesis de que los movimientos irregulares de las partículas que componen los anillos de Saturno resultan, en conjunto, en una aparente regularidad y uniformidad, le dio la idea de vincularlo con el movimiento caótico de las moléculas de los gases en reposo, que en conjunto muestran a sus variables de estado uniformemente distribuidas en todas las partes de sus masas y en 1859, en una reunión de la British Association celebrada en la Universidad de Aberdeen, presentó la primer parte de su trabajo "Illustration of the Dynamical Theory of Gases", que se publicó en el *Philosophical Magazine*[10] en enero de 1860. En este trabajo, sobre la base de la teoría de Bernoulli acerca del comportamiento de las partículas de un gas ideal y los aportes a ese modelo cinético hechos por Joule, Krönig, Clausius y otros científicos presentó un desarrollo matemático que permite conocer la velocidad media y la velocidad cuadrática media, de un conjunto de moléculas (esféricas, monoatómicas) cuyos choques son perfectamente elásticos, demostrando que esta última es distinta que el cuadrado de la velocidad media. Al año siguiente, en la reunión de la British Association celebrada en la Universidad de Oxford, presentó la segunda parte de este trabajo, cuyo título es "On the process of diffusion of two or more kinds of moving particles among one another"[11], donde presentó el tratamiento matemático para describir la mezcla de gases ideales y los procesos de difusión.

Por sus investigaciones acerca de la percepción de los colores, en 1860, Maxwell recibió la Medalla Rumford de la Royal Society.

También, durante su estancia en el Trinity College, a pedido de los libreros MacMillan, escribió una gran parte de un texto de Óptica geométrica, pero juzgando que iba a recibir muchas críticas, no lo terminó.

[10] *Phil. Mag.*, Vol 19, pp. 19 – 32, (1860).
[11] *Phil. Mag.* , Vol. 20, pp. 21 – 37.

En 1858, publicó una teoría sobre los instrumentos ópticos[12] y en 1866[13], otro sobre el mismo tema. En sus trabajos sobre Óptica, se esmeró por llevar al máximo de la perfección posible a los aparatos que desarrollaba. Su opinión era que "si un instrumento produce imágenes perfectas — por ejemplo, imágenes libres de astigmatismo o distorsión, —de un objeto ubicado en dos posiciones diferentes, dará imágenes perfectas a todas las distancias. Sobre esa base desarrolló el instrumental para encontrar la relación entre los focos de una lente y de otros objetos refractantes. Sus experimentos de refracción mediante combinaciones ópticas los compiló en tres trabajos que presentó ante la London Mathematical Society[14] y la Cambridge Philosophical Society[15].

Quizás la más notable contribución a la Óptica fue su propuesta de determinar la velocidad de la luz midiendo la atracción entre cuerpos que se mantienen a una diferencia de potencial dada, cuyo valor se puede conocer por medidas electromagnéticas.

En 1863, participó en la redacción de los Standards of Electrical Resistence donde presentó su opinión de que "... después de una consideración madura, el sistema llamado de 'Unidades eléctricas absolutas, basado puramente sobre mediciones mecánicas, no sólo es el mejor sistema hasta ahora propuesto, sino que es el único consistente con nuestro conocimiento actual tanto de las relaciones existentes entre los varios fenómenos eléctricos y de la conexión entre ellos con las mediciones fundamentales del tiempo, espacio y masa. El Apéndice C de ese informe, "On the Elementary Relations between Electrical Measurements" lleva los nombres de Maxwell y de Fleeming Jenkin fundamento de todo lo que se hizo a partir entonces en el establecimiento de las unidades eléctricas del Reino Unido. El Apéndice D de ese documento, muestra un resumen de los trabajos de esos dos investigadores con Balfour Stewart, para determinar la unidad absoluta de resistencia eléctrica, realizados en los Laboratorios del King's College.

En esa época Maxwell estaba desarrollando sus ideas sobre el electromagnetismo. Su trabajo "On Physical lines of force" se publicó en el Philosophical Magazine[16] en 1861 y 1862.

El 8 de diciembre de 1864, leyó ante la Royal Society su obra más importante sobre Electricidad, *A dynamical Theory of the Electromagnetic Field.*[17] En esta obra Maxwell modificó la ley de Ampère que predecía la existencia de ondas electromagnéticas que en cada medio material se propagan como la velocidad de la luz en dicho medio. El gran mérito de Maxwell fue que partiendo de modelos mecánicos y del comportamiento de fluidos incompresibles, en este trabajo pudo desarro-

[12] "On the General Law of Optical Instruments": Quarterly Journal of pure and Applied Mathematics, (1858) Vol. II, pp. 233 – 246.

[13] "On the Elementary Theory of Optical Instruments.", Proceeding of the Cambridge Philosophical Society, (1866) Vol. I, pp. 173 – 175.

[14] Proceedings of the London Mathematical Society: "On the focal lines of a refracted pencil,"(**1871 – 73**) Vol. S1–4, Issue 1, pp. 337 – 34; "On Hamilton's characteristic function for a narrow beam of light,", (**1874**) Vol. S1–6, pp. 182 – 190.

[15] "On the Relation of Geometrical Optics to other parts of Mathematics and Physics". Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, (1876) Vol. II, 338 – 340.

[16] *Philosophical Magazine and Jounal of Science*, 4th. Serie, Vol. 22, March 1861, Part. I, pp. 161 – 175; Part II, pp. 281 – 291, 338 – 348; 4th. Serie, Vol. 23, January 1862, Part. III, pp. 12 – 24, Part IV, pp. 85 – 95.

[17] Publicada el 1º de enero de 1865, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol. CLV,**1865**, pp.459 – 512**.**

llar una teoría que unifica la ley de Ampère, la ley de Faraday y la de Lenz, para lo cual, agregó un término adicional a la ley de Ampère: la corriente de desplazamiento.

Con las ideas expresadas en "A dynamica theory..." dio un fundamento para identificar a las ondas electromagnéticas con las luminosas, algo que unos años después demostraría Heinrich Hertz.

De acuerdo con el análisis de la obra de Maxwell realizado por Pierre Duhem, en la obra de Maxwell no hay una teoría electrostática, según adhirió a las concepciones de Poisson o de acuerdo con los signos de las ecuaciones que empleó. En lo que Duhem llama *la primera electrostática de Maxwell* éste, en vez de utilizar el tratamiento tradicional que comienza con los resultados experimentales de Coulomb y la teoría del magnetismo de Poisson, para luego desarrollar la teoría de la inducción de Faraday llega a establecer la teoría de la polarización de los dieléctricos a partir de la teoría de la conducción del calor, haciendo uso de la analogía física. En la época de Maxwell, ese uso no era novedad. Así, como ya hemos mencionado en el Capítulo VIII, las leyes del flujo de calor en régimen estacionario de Fourier, le sirvieron a Ohm, para establecer la del flujo de corriente eléctrica en régimen, estacionario y a Fick para enunciar su ley de difusión.[18]

En lo que Duhem llama la *segunda electrostática* de Maxwell que este autor expresó mediante: "Una fuerza electromotriz que actúa sobre un dieléctrico, produce un estado de polarización de sus partes similar, como distribución, a la polaridad de las partículas de hierro bajo la influencia de un imán y, como la polarización magnética, esa fuerza electromotriz puede ser representada bajo la forma de un estado en el que cada partícula tiene polos dotados de propiedades opuestas."

"En un dieléctrico sometido a inducción, uno puede concebir, en cada molécula, la electricidad desplazada de tal manera que una de las caras se electrifica positivamente y la otra negativamente, de modo que la electricidad permanece en su totalidad, unido a cada molécula y no puede moverse de una molécula a otra."

"El efecto de esta acción en el conjunto de toda la masa eléctrica es producir un desplazamiento de la electricidad en una determinada dirección... La magnitud de este desplazamiento depende de la naturaleza del cuerpo y la fuerza electromotriz, por lo que si h es el desplazamiento, R la fuerza electromotriz y E un coeficiente que depende de la naturaleza del dieléctrico,

$$\boldsymbol{R} = -4\pi \boldsymbol{E}^2 \boldsymbol{h}$$

... Estas relaciones *son independientes de toda teoría sobre el mecanismo interno de los dieléctricos*..." Esto es, Maxwell , aceptando las ideas de Coulomb y Poisson sobre magnetización por influencia, adhiere a la concepción de Mossotti sobre la polarización de los dieléctricos y cuantifica los resultados.

[18] Un método que no siempre funciona. Así Rudolf Clausius dedicó las últimas dos décadas de su vida a tratar de demostrar que los principios de la Termodinámica pueden encuadrarse en las leyes de la Mecánica y no pudo lograrlo.

La novedad que introdujo Maxwell fue suponer que cualquier dieléctrico puede considerarse como un ente formado por dos sustancias: un fluido incompresible, sin viscosidad, al que él llamó *éter*, y un sólido perfectamente elástico, al que él llamó *electricidad*.

Duhem puso en evidencia que la fórmula anterior es incorrecta, ya que el signo debe ser positivo. Ese error de signo, lo arrastró Maxwell en buena parte de los razonamientos matemáticos de sus primeros trabajos, pero los corrigió en *A dynamical Theory of the electromagnetic Field.*

La importancia de *A dynamical Theory of the electromagnetic Field*, es de tal magnitud en el campo de la Física que hemos decidido incorporar su traducción al castellano como Apéndice B, al final de este Capítulo.

La obra está dividida en seis partes. En la parte I, Maxwell explica que, debido a las dificultades que presentan las hipótesis de William Thomson, Wilhelm Eduard Weber, Carl Neumann y otros científicos acerca de la naturaleza de las fuerzas involucradas en los fenómenos magnéticos y eléctricos, él prefirió buscar una explicación de esos hechos en otra dirección, mediante la suposición que esos fenómenos son producidos por acciones que ocurren tanto en el medio circundante como en los cuerpos excitados, y tratando de explicar la acción entre cuerpos distantes sin asumir la existencia de fuerzas capaces de actuar directamente a distancias sensibles. Por eso sostuvo que su teoría puede llamarse *Teoría del campo electromagnético*, porque tiene que ver con el espacio en la vecindad de los cuerpos eléctricos o magnéticos, y que también puede llamarse *Teoría dinámica*, porque supone que en ese espacio hay materia en movimiento, mediante la cual se producen los fenómenos electromagnéticos observados.

Las concepciones de la época lo llevaron a creer en la existencia del éter como medio en el que se propaga la luz y el calor, que ocupa todo el espacio, aún en ausencia de materia "densa".

Según Maxwell, el medio en el que se producen los fenómenos electromagnéticos es capaz de recibir y almacenar dos tipos de energía, una energía "real", dependiente de los movimientos de sus partes y una energía "potencial", que consiste en el trabajo que hará el medio para recuperarse del desplazamiento en virtud de su elasticidad y supone que la propagación de ondulaciones en el medio consiste en la transformación continua y alternativa de una de estas formas de energía en la otra, y en algún momento la cantidad de energía en todo el medio se divide por igual, de modo que la mitad es energía de movimiento y la mitad es resiliencia elástica. Maxwell se basó en las observaciones de Faraday sobre la acción de un imán sobre la luz polarizada que atraviesa un medio diamagnético transparente, al provocar un giro en el plano de polarización, para establecer que el magnetismo utiliza un medio luminífero para producir tales efectos y que la rotación siempre va dirigida en la dirección en la que se debe llevar electricidad positiva alrededor del cuerpo diamagnético para producir la magnetización real del campo.

Desde el comienzo Maxwell afirma que se propone llegar a las expresiones matemáticas que reflejen los comportamientos en el campo electromagnético mediante ecuaciones que expresen

(A) La relación entre el desplazamiento eléctrico, la conducción verdadera y la corriente total, formada por ambos.

(B) La relación entre las líneas de fuerza magnética y los coeficientes inductivos de un circuito

(C) La relación entre la fuerza de una corriente y sus efectos magnéticos, de acuerdo con el sistema electromagnético de medición.

(D) El valor de la fuerza electromotriz en un cuerpo, como resultado del movimiento del cuerpo en el campo, la alteración del campo en sí, y la variación de la electricidad potencial de una parte del campo a otra.

(E) La relación entre el desplazamiento eléctrico y la fuerza electromotriz que lo produce.

(F) La relación entre una corriente eléctrica y la fuerza electromotriz que la produce.

(G) La relación entre la cantidad de electricidad libre en cualquier punto y los desplazamientos eléctricos en el vecindario.

(H) La relación entre el aumento o la disminución de la electricidad libre y las corrientes eléctricas en el vecindario.

Para cumplir esta tarea es que presentará un total de veinte ecuaciones, que implican veinte variables.

De esto determino la fuerza mecánica actuante, primero, en un conductor movible llevando una corriente eléctrica; 2º, en un polo magnético; En tercer lugar, en un cuerpo electrificado. El último resultado, a saber, la fuerza mecánica que actúa sobre un cuerpo electrificado, da lugar a un método independiente de medición eléctrica fundado en sus efectos electrostáticos. La relación entre las unidades empleadas en los dos métodos se muestra que depende de lo que he llamado "Elasticidad eléctrica" del medio, y para ser una velocidad, que ha sido determinada experimentalmente por los Sres. Weber y Kohlrausch.

Luego muestro cómo calcular la capacidad electrostática de un condensador, y la capacidad inductiva específica de un dieléctrico.

Se examina a continuación el caso de un condensador compuesto por capas paralelas de sustancias de diferentes resistencias eléctricas y capacidades inductivas, y se muestra que generalmente se producirá el fenómeno denominado absorción eléctrica, es decir, cuando el condensador se descarga repentinamente, al cabo de breve tiempo muestra signos de una carga residual.

20) Las ecuaciones generales se aplican seguidamente al caso de una perturbación magnética propagada a través de un campo no conductor, y se demuestra que las únicas perturbaciones que pueden propagarse son las que son transversales a la dirección de propagación, y que la velocidad de propagación es la velocidad, que se encuentra en experimentos como los de Weber, que expresa el número de unidades de electricidad electrostáticas que están contenidas en una unidad electromagnética.

Esta velocidad es tan cercana a la de la luz, que parece que tenemos una fuerte razón para concluir que la luz misma (incluido el calor radiante y otras radiaciones) es una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético según las leyes electromagnéticas. Si así es, la concordancia entre la elasticidad del medio calculada a partir de las rápidas alternancias de las vibraciones luminosas y la que se encuentra en los lentos procesos de experimentos eléctricos muestra cuán perfectas y regulares deben ser las propiedades elásticas del medio cuando no están cargadas, cualquier materia más densa que el aire. Si el mismo carácter de la elasticidad se retiene en cuerpos transparentes densos, parece que el cuadrado del índice de refracción es igual al producto de la capacidad dieléctrica específica y la capacidad magnética específica.

Esta velocidad es tan cercana a la de la luz, que parece que tenemos una fuerte razón para concluir que la luz misma (incluido el calor radiante y otras radiaciones) es una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético según las leyes electromagnéticas. Si así es, la concordancia entre la elasticidad del medio calculada a partir de las rápidas alternancias de las vibraciones luminosas y la que se encuentra en los lentos procesos de experimentos eléctricos muestra cuán perfectas y regulares deben ser las propiedades elásticas del medio cuando no están interactuando con cualquier materia más densa que el aire. Si el mismo carácter de la elasticidad se retiene en cuerpos transparentes densos, parece que el cuadrado del índice de refracción es igual al producto de la capacidad dieléctrica específica y la capacidad magnética específica. Se demuestra que los medios conductores absorben dichas radiaciones rápidamente y, por lo tanto, son generalmente opacos.

La concepción de la propagación de las perturbaciones magnéticas transversales excluyendo a las longitudinales fue claramente establecida por el Profesor Faraday* en sus "Pensamientos sobre las vibraciones de los rayos". La teoría electromagnética de la luz, como él la propuso, es la misma, en sustancia, que comencé a desarrollar en este documento, excepto que en 1846 no había datos para calcular la velocidad de propagación.

(21) Las ecuaciones generales se aplican luego al cálculo de los coeficientes de inducción mutua de dos corrientes circulares y el coeficiente de autoinducción en una bobina. Se investiga la falta de uniformidad de la corriente en las diferentes partes de la sección de un cable al comienzo de la corriente, creo por primera vez, y se encuentra la corrección consiguiente del coeficiente de autoinducción.

Estos resultados se aplican al cálculo de la autoinducción de la bobina utilizada en los experimentos del Comité de la Asociación Británica de Normas de Resistencia Eléctrica, y el valor se compara con el deducido de los experimentos.

La Parte II, trata sobre la inducción electromagnética. Allí se ocupa del momentum electromagnético de una corriente, la acción mutua de dos corrientes, establece las relaciones electromagnéticas entre dos circuitos conductores, analiza distintos casos de inducción, muestra cómo encontrar la relación entre el trabajo realizado y la energía producida y cómo calcular el calor producido por la

* *Philosophical Magazine*, Mayo de 1846, o *Experimental Researches*, iii. p. 447.

corriente y cómo se establece la *energía intrínseca* de una corriente. Analiza la acción mecánica entre conductores, tanto en el caso de un solo circuito como en el caso de dos circuitos. Muestra como determinar los coeficientes de inducción a partir del equilibrio eléctrico

La Parte III está dedicada a las ecuaciones generales del campo electromagnético. Allí define el *desplazamiento eléctrico* como la electrificación opuesta de los lados de una molécula o partícula de un cuerpo que puede o no estar acompañada de transmisión a través del cuerpo y como obtener el momentum electromagnético total de un circuito. Establece las ecuaciones de fuerza magnética y las ecuaciones de la corriente y de la fuerza electromotriz de un circuito, detalla cómo calcular la Fuerza electromotriz en un conductor en movimiento, da las ecuaciones de la elasticidad eléctrica, de la resistencia eléctrica y de la electricidad libre.

Las 20 ecuaciones de Maxwell que conforman su Teoría del campo electromagnético son

$$\left.\begin{aligned}\mu\alpha &= \frac{dH}{dy}-\frac{dG}{dz},\\ \mu\beta &= \frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx},\\ \mu\gamma &= \frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy},\end{aligned}\right\} \qquad (B)$$

Estas son las tres ecuaciones para la fuerza magnética. α, β, γ representan la fuerza que actúa sobre un polo magnético unitario colocado en el punto dado resuelto en las direcciones de *x, y* y *z*, μ es la relación entre la inducción magnética en un medio dado y la del aire bajo una fuerza de magnetización igual, mientras que *F, G, H* representan los componentes del momentum electromagnético en cualquier punto del campo, debido a cualquier sistema de imanes o corrientes y representan la fuerza que actúa sobre ese polo magnético unitario colocado en el punto dado resuelto en las direcciones de *x, y* y *z* ($\alpha dx+\beta dy+\gamma dz=d\varphi$ es una diferencial completa de φ, el potencial magnético).

Para obtener el movimiento total de la electricidad, que identifica con p', q', r', deben agregarse a las corrientes *p, q, r,* las variaciones del desplazamiento eléctrico. Esto le permite obtener las tres ecuaciones para las corrientes eléctricas

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\gamma}{dy}-\frac{d\beta}{dz} &= 4\pi p'\\ \frac{d\alpha}{dz}-\frac{d\gamma}{dx} &= 4\pi q'\\ \frac{d\beta}{dx}-\frac{d\alpha}{dy} &= 4\pi r'\end{aligned}\right\} \qquad (C)$$

La parte de la fuerza electromotriz que depende del movimiento de los imanes o las corrientes en el campo, o de la alteración de su intensidad, es $P=-\frac{dF}{dt}, Q=-\frac{dG}{dt}, R=-\frac{dH}{dt}$. Maxwell encuentra las tres ecuaciones de la fuerza electromotriz:

$$\left.\begin{aligned} P &= \mu\left(\gamma\frac{dy}{dt}-\beta\frac{dz}{dt}\right)-\frac{dF}{dt}-\frac{d\Psi}{dx} \\ Q &= \mu\left(\alpha\frac{dz}{dt}-\gamma\frac{dx}{dt}\right)-\frac{dG}{dt}-\frac{d\Psi}{dy} \\ R &= \mu\left(\beta\frac{dx}{dt}-\alpha\frac{dy}{dt}\right)-\frac{dH}{dt}-\frac{d\Psi}{dz} \end{aligned}\right\} \qquad (D)$$

dondeΨ es una función de *x, y, z* y *t*, que es indeterminada en cuanto a la solución de las ecuaciones anteriores, porque los términos que dependen de ella desaparecerán al integrarse alrededor del circuito. Sin embargo, la cantidad Ψ siempre puede determinarse en el caso particular cuando se conocen las condiciones reales del sistema. La interpretación física de Ψ es que representa el potencial eléctrico en cada punto del espacio.

Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un dieléctrico, pone cada parte del dieléctrico en una condición polarizada, en la que sus lados opuestos están electrizados opuestamente. La cantidad de esta electrificación depende de la fuerza electromotriz y de la naturaleza de la sustancia, y, en sólidos que tienen una estructura definida según sus ejes, en la dirección de la fuerza electromotriz con respecto a estos ejes. En sustancias isotrópicas, si *k* es la relación entre la fuerza electromotriz y el desplazamiento eléctrico, la *elasticidad* debida a estos efectos

$$\left.\begin{aligned} P &= kf \\ Q &= kg \\ R &= kh \end{aligned}\right\} \qquad (E)$$

Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un conductor, produce una corriente de electricidad a través de él. Este efecto es adicional al desplazamiento eléctrico. En sólidos de estructura compleja, la relación entre la fuerza electromotriz y la corriente depende de su dirección a través del sólido. En las sustancias isotrópicas, si ζ es la resistencia específica referida a la unidad de volumen, Maxwell presenta sus tres ecuaciones para la resistencia eléctrica

$$\left.\begin{aligned} P &= -\varsigma p \\ Q &= -\varsigma q \\ R &= -\varsigma r \end{aligned}\right\} \qquad (F)$$

Dado que en la electrificación de las diferentes partes del campo las partes no se neutralizan completamente entre sí, habrá una cierta cantidad de electricidad libre. A la cantidad de electricidad *positiva* libre contenida en la unidad de volumen en cualquier parte del campo, Maxwell la designa mediante la letra *e*, y escribe la ecuación para la energía libre.

$$e+\frac{df}{dx}+\frac{dg}{dy}+\frac{dh}{dz}=0 \qquad (G)$$

Si el medio es conductor de la electricidad, entonces Maxwell impone otra condición, que llama, como en hidrodinámica, la *ecuación de continuidad*.

$$\frac{de}{dt}+\frac{dp}{dx}+\frac{dq}{dy}+\frac{dr}{dz}=0 \qquad (H)$$

Estas son las 20 ecuaciones de Maxwell, con las que él resuelve todos los problemas del electromagnetismo[19]. Quizás no se perciba en ellas las leyes de Ampère, de Faraday o de Lenz. Las expresiones con notación vectorial tal como es corriente en los textos de Física, no se encuentran en este trabajo ni en *On Faraday's Lines of Force*", ni en la memoria "*On Physical Lines of Force*", ni en "*An Elementary treatise on Electricity*" ni en "*A Treatise on Electricity and Magnetism*".

En 1884, Josiah Williard Gibbs y Oliver Heaviside, agruparon las ecuaciones de "*A dynamical Theory ...*", y las reformularon en la notación vectorial actual.

En la Parte IV, Maxwell trata las acciones mecánicas que se desarrollan en un campo electromagnético.

A partir de la afirmación de que el trabajo realizado por las fuerzas electromagnéticas que intervienen en el movimiento de un conductor es igual al producto de la corriente en el conductor multiplicado por el incremento del momentum electromagnético debido a la movimiento, Maxwell encuentra que el incremento del momentum electromagnético de un conductor recto, de longitud corta *a*, que se mueve paralelo a sí mismo en la dirección de *x*, y que tiene sus extremos conectados con dos conductores paralelos será

$$a\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{ds}+\frac{dG}{dx}\frac{dy}{ds}+\frac{dH}{dx}\frac{dz}{ds}\right)\delta x$$

y el incremento debido al alargamiento del circuito al aumentar la longitud de los conductores paralelos será

$$-a\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{ds}+\frac{dF}{dy}\frac{dy}{ds}+\frac{dF}{dz}\frac{dz}{ds}\right)\delta x$$

por lo que el incremento total del momentum electromagnético será

$$a\delta x\left\{\frac{dy}{ds}\left(\frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy}\right)-\frac{dz}{ds}\left(\frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx}\right)\right\}$$

---

[19] Al respecto afirmó: Estas ecuaciones son suficientes para determinar todas las relaciones entre las cantidades que se dan entre ellas, siempre que sepamos las condiciones del problema. No obstante, en muchos casos, solo se requieren algunas de estas ecuaciones.

que, por las ecuaciones de la Fuerza Magnética (*B*)

$$a\delta x\left\{\frac{dy}{ds}\mu\gamma-\frac{dz}{ds}\mu\beta\right\}$$

Llamando *X* a la fuerza que por unidad de longitud del conductor actúa a lo largo de la dirección de *x*; el trabajo realizado es $Xa\delta x$ y si *C* es la corriente en el conductor y *p', q', r'* sus componentes,

$$Xa\delta x=Ca\delta xx\left(\frac{dy}{ds}\mu\gamma-\frac{dz}{ds}\mu\beta\right),$$

y para las tres direcciones

$$\left.\begin{aligned}X&=\mu\gamma q'-\mu\beta r'\\Y&=\mu\alpha r'-\mu\gamma p'\\Z&=\mu\beta p'-\mu\alpha q'\end{aligned}\right\}\qquad (J)$$

Estas son las ecuaciones que determinan la fuerza mecánica que actúa sobre un conductor que transporta una corriente. La dirección de la fuerza es perpendicular a la corriente y a las líneas de fuerza, y se mide por el área del paralelogramo formado por líneas paralelas a la corriente y las líneas de fuerza, y es proporcional a sus intensidades.

Si hay dos polos magnéticos, cuyas cargas magnéticas son m_1 y m_2 produciendo potenciales φ_1 y φ_2 en el campo, entonces, si m_2 se mueve una distancia *dx* y es enviada en esa dirección por una fuerza *X*, el trabajo realizado será *Xdx* y la disminución de la energía en el campo será

$$d\left(\frac{1}{2}(\varphi_1+\varphi_2)(m_1+m_2)\right)$$

Llamando α_1, β_1, γ_1 a las intensidades magnéticas en las tres direcciones del espacio debidas a m_1, Maxwell demuestra que

$$\left.\begin{aligned}X&=m_2\frac{d\varphi_1}{dx}=m_2\alpha_1\\Y&=m_2\beta_1\\Z&=m_2\gamma_1\end{aligned}\right\}\qquad (K)$$

de modo que un polo magnético es impulsado en la dirección de las líneas de fuerza magnética con una fuerza igual al producto de la fuerza del polo y la intensidad magnética.

A partir de la ecuación *D*, Maxwell encuentra que, si la electrificación del campo surge de la presencia de un pequeño cuerpo electrificado que contiene e_1 de electricidad libre, la única solución de Ψ_1 es

$$\Psi_1 = \frac{k}{4\pi}\frac{e_1}{r}$$

Por lo tanto, la repulsión entre dos cuerpos electrificados con cargas e_1 y e_2 será

$$e_2\frac{d\Psi_1}{dr} = \frac{k}{4\pi}\frac{e_1 e_2}{r^2}$$

Luego establece la conversión entre el sistema electrostático de unidades y el correspondiente sistema electromagnético. De esa conversión demuestra que

$$k = 4\pi v^2$$

Donde *k*, el coeficiente de "elasticidad eléctrica" en el medio en el cual se efectúan los experimentos— por ejemplo, aire común — y *v* es el número de unidades electrostáticas en una unidad electromagnética. La cantidad *v* se puede determinar experimentalmente de varias maneras. En 1856, Wilhelm Eduard Weber con la colaboración de Rudolph Hermann Kohlrausch [20], encontraron

$$v = 310.740\ km/s$$

La Parte V, lleva por título "Teoría de los condensadores", donde analiza los comportamientos de los capacitores en el campo electromagnético.

La Parte VI está dedicada a la Teoría electromagnética de la luz. En este capítulo demuestra que las propiedades de lo que constituye el campo electromagnético, deducidas sólo de los fenómenos electromagnéticos, son suficientes para explicar la propagación de la luz a través de la misma sustancia.

En este capítulo parte de la suposición de que una onda plana cuyos cosenos directores son, *l*, *m*, *n*, se propaga a través del campo con una velocidad *V*. Por lo que todas las funciones electromagnéticas serán funciones de

$$w = lx + my + + nz - Vt$$

Luego, a esta ecuación le aplica las ecuaciones de la Fuerza magnética *B*. Al multiplicarlas y sumarlas, obtiene

$$l\mu\alpha + m\mu\beta + n\mu\gamma = 0$$

que muestra que la dirección de la magnetización debe estar en el mismo plano de la onda.

[20] "Ueber die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließst" *Leipzig Trans.*, Vol. V, (1857) p. 260; o *Poggendorff Ann.*, Agosto 1856, p. 10.

Luego combina las ecuaciones de la Fuerza Magnética (B) con las de las Corrientes Eléctricas (C), y, el resultado lo abrevia mediante los símbolos J y ∇, y llega a la expresión

$$\left.\begin{aligned} 4\pi\mu p' &= \frac{dJ}{dx} - \nabla^2 F \\ 4\pi\mu q' &= \frac{dJ}{dy} - \nabla^2 G \\ 4\pi\mu r' &= \frac{dJ}{dz} - \nabla^2 H \end{aligned}\right\}$$

Si el medio en el que se estableció el campo es un dieléctrico perfecto, no hay una conducción verdadera, y las corrientes p', q', r' son solo variaciones en el desplazamiento eléctrico. Por las ecuaciones de las Corrientes Totales (A),

$$p' = \frac{df}{dt}, \qquad q' = \frac{dg}{dt}, \qquad r' = \frac{dh}{dt},$$

Pero estos desplazamientos eléctricos son causados por fuerzas electromotrices y, por las ecuaciones de la Elasticidad eléctrica (E)

$$P = kf, \quad Q = kg, \quad R = kh,$$

Estas fuerzas electromotrices se deben a las variaciones de las funciones electromagnéticas o electrostáticas, ya que no hay movimiento de conductores en el campo; de modo que las ecuaciones de la fuerza electromotriz (D) son

$$\left.\begin{aligned} P &= -\frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx} \\ Q &= -\frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy} \\ R &= -\frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz} \end{aligned}\right\}$$

Combinando estas ecuaciones, obtiene

$$\left.\begin{aligned} k\left(\frac{dJ}{dx} - \nabla^2 F\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2F}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dxdt}\right) = 0 \\ k\left(\frac{dJ}{dy} - \nabla^2 G\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2G}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dydt}\right) = 0 \\ k\left(\frac{dJ}{dz} - \nabla^2 H\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2H}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dzdt}\right) = 0 \end{aligned}\right\}$$

Luego deriva la tercera de estas ecuaciones con respecto de y, y la segunda respecto a z, y las resta. De este modo, J e Ψ desaparecen, y combinando el resultado con las ecuaciones (B) de la fuerza magnética, llega a

$$\left.\begin{aligned} k\nabla^2\mu\alpha &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\alpha \\ k\nabla^2\mu\beta &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\beta \\ k\nabla^2\mu\gamma &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\gamma \end{aligned}\right\}$$

Luego supone que α, β, γ, son funciones de $lx + my + nz - Vt = w$, en ese caso, la primera ecuación se vuelve

$$k\mu\frac{d^2\alpha}{dw^2} = 4\pi\mu^2V^2\frac{d^2\alpha}{dw^2}$$

o

$$V = \pm\sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}$$

Las otras dos ecuaciones dan el mismo valor para la velocidad de la onda *V*. de modo que la onda magnética se propaga en cualquier dirección con la misma velocidad *V*.

Resumiendo: esa onda consiste enteramente en perturbaciones magnéticas, la dirección de la magnetización está en el mismo plano de la onda. Ninguna perturbación magnética cuya dirección de magnetización no se encuentre en el plano de la onda se puede propagar como una onda plana.

Por lo tanto, las perturbaciones magnéticas propagadas a través del campo electromagnético concuerdan con la luz en esto: que la perturbación en cualquier punto es transversal a la dirección de propagación, y que tales ondas pueden tener todas las propiedades de la luz polarizada.

A la época de escribir su obra, el único medio en el cual se efectuaron experimentos para determinar el valor de k fue el aire, donde $\mu = 1$. De modo que a partir de la fórmula usada en la conversión de unidades del sistema electrostático al sistema electromagnético dada más arriba

$$k = 4\pi v^2$$

se llega a que $V = v$, la velocidad de la luz en el aire. Ya hemos mencionado que Weber y Kohlrausch encontraron experimentalmente que

$$v = 310.740 \text{ km/s}$$

Ese valor tomará también la velocidad V de propagación de una onda magnética en el aire.

Dentro de los márgenes de error experimental, los valores de Weber y Kohlrausch coinciden con los que, en 1849, había obtenido Foucalt por métodos ópticos[21], 298.000 *km/s.* la determinación de *v* fue hecha a partir de medidas de la fuerza electromotriz con la que se cargaba un capacitor de capacidad conocida y luego descargándolo a través de un galvanómetro, para medir su carga en unidades electromagnéticas.

La concordancia de los resultados hizo que Maxwell asumiera como hipótesis que la luz y el magnetismo son características de la misma naturaleza y que la luz es una perturbación electromagnética propagada a través del campo de acuerdo con leyes electromagnéticas.

El desarrollo completo del trabajo, puede consultarse en el Apéndice B.

La Parte VI se completa con el tratamiento de la propagación de perturbaciones electromagnéticas en un m lino, la relación entre el índice de refracción del medio y su carácter electromagnético, la relación entre la eléctrica y la transparencia.

La Parte VII está dedicada a los métodos para calcular los coeficientes de inducción electromagnética.

La lectura de esta Memoria nos muestra, en primer lugar, la enorme capacidad que tuvo Maxwell para vincular conceptos de teorías distintas y la prodigiosa habilidad para encarar desarrollos matemáticos que lo llevaran a los resultados deseados. Brillante científico, maestro en el arte de proponer hipótesis y ponerlas a prueba. Pero no todas son rosas, entre las espinas podemos mencionar el uso de algunas expresiones gramaticales, quizás debido a su gran velocidad para desarrollar pensamientos, pero que pueden provocar confusión en el lector. Otro de los detalles que pueden dificultar el análisis de sus ideas se debe a que, en varios desarrollos matemáticos, saltea etapas, que demoran la comprensión de su secuencia lógica y también que, muchas veces, al no revisar errores propios o del editor se llega, por ejemplo, a que una misma fórmula vaya precedida de un signo menos y en la página siguiente se exprese con signo positivo para iniciar un nuevo razonamiento. A lo largo de los años, en sus trabajos sobre electricidad y magnetismo fue cambiando de opinión respecto de la naturaleza de dichos fenómenos, lo que le quita un poco de coherencia teórica a su obra.

En 1902, Pierre Duhem publicó un estudio histórico y crítico de las ideas de Maxwell sobre la Electricidad y el Magnetismo en un libro cuyo título es "Les Théories Électriques de J. Clerk Maxwell"[22]. En ese libro analizó minuciosamente sus aciertos y sus errores, muchos de los cuales, para un lector común, suelen pasar desapercibidos. En particular, encontró que cierta compensación de errores matemáticos hizo llegar a Maxwell a resultados correctos. De esa misma opinión participó Heinrich Hertz.

El 31 de mayo de 1866, Maxwell leyó en la Royal Society memoria "A dynamical Theory of Gases"[23]. En este trabajo se propuso explicar, mediante la teoría cinética de los gases, algunas de sus

[21] *Comptes Rendus*, Vol. XXIX, (1849), p. 90.
[22] Librairie Scientifique A. Hermann, Paris, 1902.
[23] *Phil. Trans.,*Vol. 157, (1867), pp. 49 – 88.

propiedades macroscópicas y, además de las relaciones entre presión, densidad y temperatura, dar una explicación mecánica de las conocidas relaciones químicas entre la densidad de un gas y su peso equivalente, llamadas en esa época *Ley de los volúmenes equivalentes*. También pudo explicar en términos mecánicos la difusión de un gas en otro, las fricciones internas en los gases y la conducción del calor en medios gaseosos. Para sus desarrollo adoptó la hipótesis atomista, mencionada por Lucrecio en su "*De rerum Natura*¸ las modificaciones de Epicuro y, citando a Clausius, la teoría cinética producida por Daniel Bernoulli en la décima sección de su *Hydrodynamica*. También por recomendación de Rudolf Clausius, tomó como base de sus escritos, el libro *Deux Traités de Physique Mécanique*, de Pierre Prévost[24], publicados en Paris y Genève en 1818. En esa obra Géorge-Louis de La Sage, hizo un estudio bastante extenso sobre el comportamiento de los "corpúsculos ultramundanos", — como llamaba a los átomos,— que explicaba la gravedad como el impacto de esas partículas sobre los cuerpos macroscópicos, o sus efectos en la producción de luz. Su teoría es errónea pero su explicación sobre la fuerza expansiva de los gases es esencialmente la misma que la que utilizó Maxwell. Del trabajo de John Herapath[25] tomó las ideas sobre los efectos de la temperatura y la presión sobre los gases y sobre la teoría de la difusión. Del trabajo de Clausius, "Ueber die Art der Bewegung welche wir Wärme nennen[26]," —Sobre la clase de movimiento que llamamos calor,— tomó las ideas centrales de su teoría sobre el comportamiento de las partículas que constituyen los gases, pero en vez de considerarlos como esferas rígidas cuyos choques son perfectamente elásticos, analizó sus movimientos como si fueran pequeños cuerpos, o grupos de cuerpos, que se repelen entre sí con una fuerza cuya dirección para siempre cerca los centros de gravedad de las moléculas y cuya magnitud está representada, muy aproximadamente, por una función de las distancias entre los centros de gravedad. Tal modelo lo tomó a partir de sus resultados experimentales sobre la viscosidad del aire a diversas temperaturas, de los cuales dedujo que la repulsión es inversamente proporcional a la quinta potencia de la distancia.

Para estimar la velocidad media de las moléculas gaseosas, supuso la existencia de un plano imaginario en un recipiente conteniendo un gran número de moléculas, por lo que un gran número de esas moléculas cruzarán el plano en ambas direcciones. La masa del exceso de moléculas que atraviesan el plano en una dirección, que podría llamarse "positiva", respecto de la masa de las que lo atraviesan en sentido contrario, da una medida del flujo de gas hacia el lado positivo del plano. Si el plano tiene la propiedad de poder deslizarse, en forma paralela, con distintas velocidades, cuando en su movimiento no hay exceso de moléculas en ninguno de sus lados, su velocidad es una medida de la velocidad media de las moléculas en la dirección normal al plano. En ese estado, siguen habiendo moléculas que lo cruzan en ambas direcciones. El momentum total de las moléculas que, en la unidad de tiempo, cruzan en la dirección contraria a la del movimiento del plano es una medida de las fuerza que ejercen sobre el plano, que dividida por la superficie del plano será proporcional a la presión media del gas.

[24] En rigor, como autor, Prévost escribió sólo la segunda, la primera fue escrita por George-Louis Le Sage y Prévost fue el editor.

[25] **Herapath, J**., (**1847**): *Mathematical Physics,* 2 Vols., Whitaker & Co., London.

[26] *Annalen der Physik* **100**, 353-380 (1857)

A partir de esas suposiciones y de sus resultados experimentales sobre viscosidad de gases, desarrolla un modelo cinético del comportamiento gaseoso que, con algunas modificaciones sigue enseñándose en las universidades.

Los trabajos de Maxwell sobre Calor y sobre Termodinámica, serán comentados en el capítulo respectivo.

La obra de Maxwell es muy extensa e incluye una variedad de temas que comprenden diversos aspectos de la Física así como de su Filosofía y su Historia. La mayor parte de la misma fue compilada y editada, en 1890, por Willam Davidson Niven, en dos volúmenes[27].

En 1865, Maxwell renunció a su cátedra en el King's College y regresó a su casa familiar en Glenair, donde redactó el libro de texto *Theory of heat.*

En 1871, fue convocado para la cátedra Cavendish de Física en la Universidad de Cambridge. Allí además de las clases continuó con su producción científica entre la que se incluye un estudio de los trabajos de Henry Cavendish sobre electricidad.

En 1873, se publicó su *Treatise on Electricity and Magnetism*[28] y, en 1881, luego de su fallecimiento, *An Elementary treatise on Electricity*[29] .

Estando en Cambridge se le detectó un cáncer abdominal que le provocó la muerte el 5 de noviembre de 1879, a los 48 años.

El 2 de junio de 1858, se había casado con Katherine Mary Dewar, que era la hija del Reverendo Daniel Dewar quien luego sería Director del Marischal College de Aberdeen.

Sus amigos desde la juventud, Louis Campbell y William Garnet, publicaron su biografía en 1882, con el título *The life of James Clerk Maxwell*[30].

10 – 2.- Hertz y las ondas electromagnéticas.

Heinrich Rudolf Hertz, nació el 22 de febrero de 1857 en Hamburg, Alemania. Su padre fue un abogado de familia judía que se convirtió al luteranismo, que en 1887, llegó a ser electo Senador. Su madre, Anna Elisabeth Pfefferkorn, era la hija de un médico, de una tradicional familia de Frankfurt. Heinrich fue el mayor de los cinco hermanos y comenzó su educación formal a los seis años al ingresar a una escuela privada, bajo la atenta mirada de su madre, empeñada en que su hijo fuera siempre el primero de su clase.

---

[27] *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 2 Vols., Cambridge University Press, Cambridge, 1890.
[28] 2 Vols. Clarendon Press, Oxford.
[29] Clarendon Press, Oxford.
[30] Macmillan and Co, London.

Fig. 10.3. H.R. Hertz (1857 –1894)

Durante diez años estudió en esa escuela, donde desarrolló habilidades manuales, como el tallado de la madera y aprendió a operar un torno de madera, lo que le sirvió luego para armar sus dispositivos experimentales. Tenía mucha facilidad para el aprendizaje de idiomas por lo que llegó a dominar inglés, francés, latín, griego y árabe. En 1872 ingresó al Johanneum Gymnasium de Hamburg. Si bien durante la cursada en el Gymnasium le interesaron varios temas, en 1875 luego de rendir el "Abitur", el examen cuya aprobación capacitaba para ingresar a una universidad, decidió seguir la carrera de ingeniería. Con tal motivo viajó a Frankfurt donde a lo largo de un año, fue adquiriendo experiencia en ingeniería de construcciones. Sin embargo, sintió que esa carrera no lo satisfacía: No obstante, para no perder el tiempo que le había dedicado a la ingeniería, decidió continuar con esos estudios por lo que viajó a Dresden donde durante unos meses estudió en el Instituto Politécnico de esa ciudad. A fines de 1876, cumplió su servicio militar en Berlín. Luego de completar un año en un regimiento, viajó a Munich con intención de estudiar en la Technische Hochschule de esa ciudad. Sintiéndose cada vez más decepcionado de la ingeniería, consultó con su padre, que se hacía cargo de todos los gastos de su educación, y con su aprobación ingresó a la Universidad de Munich para estudiar ciencias naturales. Durante el primer semestre se dedicó a actualizar y profundizar sus conocimientos de Matemáticas bajo la tutela de Philipp von Jolly analizó varias obras de Lagrange, Laplace y Poisson. Durante el segundo semestre estudió, Física, Astronomía y Zoología, además de Matemáticas.

En esa época se estilaba que los estudiantes fueran cambiando de Universidad para conocer otras técnicas u opiniones, por lo que al cabo de un año en Munich, Hertz viajó a Berlin, donde estudió Matemáticas y Física con Hermann von Helmholtz y Gustav Kirchhoff[31]. Allí, tuvo en claro que no sólo quería estudiar ciencias sino, además hacer investigación científica. La posibilidad se le presentó cuando, a instancias de Helmholtz, la Facultad de Filosofía de la Universidad de Berlín instituyó un premio, a la resolución de un problema referido a la inercia eléctrica. Hertz participó de la competencia redactando una memoria explicativa de ese problema. Hertz ganó el premio y una medalla de oro. Helmholtz quedó tan impresionado que, a pesar de la poca experiencia que tenía Hertz, le ofreció un lugar, completamente equipado, en su laboratorio para que desarrollase investigaciones y, en 1879, se sugirió a Hertz que se postulase para un premio que iba a otorgar la *Berlin-Brandenburgische Akademie* der *Wissenschaften*. El tema a concursar fue, recomendado por Helmholtz, "Presentar evidencia experimental a favor o en contra de las suposiciones subyacentes a la Teoría electromagnética de Maxwell". Si bien el tema le interesó, Hertz pensó que el trabajo experimental para obtener un resultado experimental sobre esa cuestión, le iba a insumir más de tres

[31] Planck, que cursó con los mismos profesores en la misma época, escribió que Helmholz no preparaba las clases, por lo que se equivocaba con frecuencia t Kirchhoff las recitaba como si las hubiese aprendido de memoria. (**Plank, M.,** *Autobiografía científica*, en "Ensayos científicos" , Ed. Ciencia y Desarrollo, México 1980).

años. Por ello, declinó la sugerencia de Helmholtz y, en vez de ocuparse del tema propuesto por la Akademie, escribió una memoria teórica, *Über die Induktion in rotierenden Kugeln*[32] que la presentó como proyecto para su tesis doctoral. Su redacción le llevó sólo tres meses y la defendió en 1880 siendo calificada con *magna cum laude*.

Luego de obtener el doctorado, fue incorporado como asistente del von Helmholtz, donde trabajó entre 1880 y 1883. En ese tiempo, redactó quince trabajos sobre una variedad de temas, la mayoría relacionados con la electricidad. Dos trataban sobre las descargas en gases[33] y la producción de rayos catódicos[34], otros estaban dedicados a mejorar el instrumental físico, como el amperímetro[35] y el higrómetro[36].

Si bien el consideraba a von Helmholtz como el mejor físico del mundo, estimaba que, por sus escasos intendentes no podría competir con otros científicos para concursar el cargo de *privatdozent* en Berlin, por lo que buscó la posibilidad de conseguir un cargo de *privatdozent* en otra universidad donde no tendría demasiada competencia. Si bien su interés radicaba en la experimentación sobre fenómenos electromagnéticos, se postuló en la Universidad de Kiel para un cargo en matemática-Física y, gracias a la recomendación de von Helmholtz, fue aceptado.

La Universidad de Kiel, carecía de laboratorios de Física adecuados para la investigación experimental que le hubiese agradado hacer a Hertz, por lo que se dedicó al desarrollo teórico de varios aspectos de la Física. En los dos años que ejerció en esa Universidad, presentó tres trabajos, uno vinculado a la meteorología[37], otro sobre las unidades eléctricas y magnéticas[38] y el tercero fue su primer trabajo sobre la teoría electromagnética de Maxwell[39].

En 1885, le ofrecieron el cargo de Ordentlicher Professor für Experimentalphysik en la Technische Hochschule de Karlsruhe, donde conoció a Elisabeth, la hija de su colega, el Profesor de Geodesia Max Doll. Con Elisabeth Doll se casó e 31 de julio de 1886 y tuvieron dos hijas, Johanna und Mathilde.

Fue en esta institución donde, en 1888, Hertz hizo su descubrimiento más importante, el de las ondas electromagnéticas. En noviembre de 1886, comenzó a estudiar el problema que, en 1879, Helmholtz había planteado para el premio que otorgaría la la *Berlin-Brandenburgische Akademie* der *Wissenschaften*. Hertz comenzó a analizar el tema no como un problema de electromagnetismo

---

[32] *Sobre la inducción en esferas giratorias.*(*Wiedemanns Annalen*, 8, 1880, pp. 35 – 126; *Phil. Mag.*, 10, 1880, 451 et.ss)

[33] "Über eine die elektrische Entladung begleitende Erscheinung", *Wiedemann's Annalen*, 19, pp. 78-86, 1883

[34] "Versuche über die Glimmentladung",*Wiedemann's Annalen*, 19, pp. 782-816, 1883.

[35] "Dynamometrische Vorrichtung von geringem Widerstande und vershwindender Selbstinduktion" *Zeitschrift fur Instrummtenkunde*, 3, pp. 17-19, 1883.

[36] "Über ein neues Hygrometer", *Verhandlunyen der physikalischen Gesellschaft zu Berlin*, 20th January 1882.

[37] "Über die kontinuerlichen Ströme, welche die fluterregende Wirkung der Gestirne in Meere veranlassen muß", *Verhandlungen der physikalischen Gesellschaft zu Berlin*, 5th January 1883

[38] "Über die Dimensionen des magnetischen Poles in verscheidenen Maßsystemen". *Wiedemann's Annalen*, 24, 114 – 118, 1885.

[39] "Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik", *Wiedemann's Annalen*, 23, pp. 84-103, 1884.

sino como un tema del campo electromagnético. Por lo que diseñó sus experimentos dentro del marco teórico que había propuesto Helmholtz sobre campos electromagnéticos. Hertz tuvo un incentivo especial para emprender las investigaciones sobre ese tema. Entre la colección de instrumentos físicos de la Escuela Secundaria Técnica de Karlsruhe (donde se llevaron a cabo sus investigaciones), había encontrado un par de las denominadas espirales Riess o Knochenhauer. Se sorprendió descubrir que no era necesario descargar baterías grandes a través de una de estas espirales para obtener chispas en la otra; que las pequeñas botellas de Leyden eran suficientes para ese propósito, y que incluso la descarga de una pequeña bobina de inducción serviría, siempre que tuviese que atravesar una chispa. Estas chispas excitaban una oscilación sobre los conductores eléctricos, oscilaciones de carácter estacionario de las cuales el instrumental que disponía Hertz le permitía calcular sus longitudes de onda.

Al alterar las condiciones experimentales, Hertz se encontró con el fenómeno de las chispas laterales que constituyeron el punto de partida de su siguiente investigación. Al principio, pensó que las perturbaciones eléctricas serían demasiado turbulentas e irregulares como para que tuvieran otro uso; pero cuando descubrió la existencia de un punto neutral en el medio de un conductor lateral y que, por lo tanto, el fenómeno era bastante ordenado, se convenció de que podía obtener la solución al problema de la Academia de Berlín. Su convicción se fortaleció al encontrar que las oscilaciones con las que tenía que lidiar eran regulares. El primero de los documentos que publicó ("*Über sehr schnelle elektrische Schwingungen*[40] ") da, generalmente en el orden real del tiempo, el curso de la investigación en cuanto se llevó a cabo hasta el final del año 1886 y el comienzo de 1887.

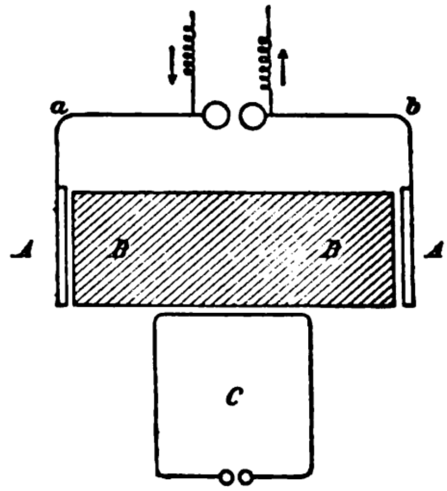


Fig. 1.

En abril de 1887, Hertz se dio cuenta que su trabajo no era original. Al celebrarse en Karlsruhe un Congreso geográfico tuvo la oportunidad de conocer a Wilhelm von Bezold, quien le comentó que, en 1870, había hecho una investigación similar a la suya [41] en la que la descarga de un condensador en un conductor primario generaba ondas y oscilaciones en un conductor secundario. Por eso, Hertz incluyó la memoria de von Bezold, como parte de su comunicación. También reconoció los trabajos de Oliver Lodge, sobre las oscilaciones y ondas en cables producidas por la descarga de pequeños condensadores y los de George Francis Fitgerald quien predijo la posibilidad de tales ondas y las condiciones experimentales para producirlas.

[40] (Sobre las oscilaciones eléctricas muy rápidas) Publicado en *Wiedemann's Annalen*, 31, p. 421, 1887.

[41] W. von Bezold: "Untersuchungen über die elektrische Entladung. Vorläufige Mitteilung", *Poggendorf Annalen*, Vol. CXL, pp. 541 – 552.

En el verano de 1887, Hertz dedicó esfuerzos infructuosos para establecer la influencia electromagnética de los aislantes en la producción de ondas y oscilaciones. Para ello armó un dispositivo como el que esquematizó en la Fig. 1. Entre las placas *A* y *A*' del conductor primario, colocó un bloque BB' de azufre o de parafina que luego se eliminó rápidamente. Colocó el conductor secundario en la misma posición, con respecto al primario esperando que mientras el bloque BB' estuviera en su lugar aparecerían chispas muy fuertes en el secundario, y que, cuando se quitara el bloque, solo habría chispas débiles, dado que las fuerzas electrostáticas, más débiles, no podrían inducir chispas en el circuito semicerrado C. Por lo tanto, en ausencia del aislante, solo se debería tener en cuenta el efecto inductivo del cable más distante *ab*. El experimento fracasó por la aparición invariable de fuertes chispas en el conductor secundario, que impedían estimar el efecto del material aislante. Además a medida que aumentaba la distancia del circuito C al inductor, se observaban cada vez más fenómenos de interferencia. Pero, en esa parte de la experimentación, lo sorprendió el continuo aumento de la distancia hasta la cual se podía percibir la acción. La opinión común era que las fuerzas eléctricas disminuían de acuerdo con la mecánica newtoniana, por lo que deberían tender rápidamente a cero a medida que aumentaba la distancia entre en inductor y el receptor.

Las ecuaciones de Maxwell, suponían que los cambios en la polarización dieléctrica de los no conductores, producen las mismas fuerzas electromagnéticas que las corrientes que son equivalentes a ellas. En segundo término, que tanto las fuerzas electromagnéticas como las electrostáticas pueden producir polarizaciones dieléctricas y, en tercer lugar, que en todos estos aspectos, el aire y el espacio vacío se comportan de una manera similar a los otros dieléctricos. Para Hertz, probar estas tres hipótesis, era equivalente a establecer la exactitud de toda la teoría de Maxwell. De estas tres hipótesis, Hertz consideró que la tercera era la más importante ya que al corroborarla, también se corroboraría la acción sobre cualquier conductor u dieléctrico. A distancias cortas entre el inductor y el receptor, sus experimentos fallaron, pero cuando los realizó a una distancia de 12 metros no sólo detectó la propagación de ondas sino que supuso que las fases se invertían a algunas distancias. Para comprobarlo diseñó un esquema que presentó en la reunión del 2 de febrero de 1888, de la Academia de Berlin, con el título *Ueber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der electrodynamischen Wirkungen*[42]. Inicialmente, para la propagación de ondas usó alambres rectos se produjeron ondas estacionarias sorprendentemente distintas con nodos y vientres, y por medio de estos le fue posible determinar la longitud de onda y el cambio de fase a lo largo del cable. Tampoco tuvo mayor dificultad para producir interferencia entre la onda que había viajado a lo largo del cable y la que había viajado por el aire, y así comparar sus fases. Pero, si ambas perturbaciones se propagaron, tal como él esperaba, con la misma velocidad finita, debían interferir en todas las distancias con la misma fase. Cuando instaló cuidadosamente el aparato y llevó a cabo el experimento, descubrió que la fase de la interferencia era, obviamente, diferente a diferentes distancias, y que la alternancia era tal que correspondería a una velocidad infinita de propagación en el aire. Descorazonado por este resultado, suspendió la investigación durante un par de semanas. Al retomarla, buscó las causas del resultado obtenidos. Encontró que, tal como le señaló Poincaré[43], había sobrestimado el tiempo de oscilación en la relación de $\sqrt{2}$: 1, pero lo que realmente le provocó tal resultado fue que el experimento lo ha-

[42] "Sobre la velocidad de propagación de los efectos electrodinámicos", *Wiedemann's Annalen*, Vol. 34, (1888), pp. 551 – 569.

[43] H. Poincaré, *Comptes Rendus* 111, p. 322.

bía realizado a un metro y medio de una estufa de hierro, que podía haber interferido con la propagación de las ondas.

Teniendo en vista el objetivo de comprobar que la velocidad de propagación de las oscilaciones era la misma en el aire que en un cable, cada resultado experimental adverso, le generaban un montón de interrogantes acerca de cuál podía ser la causa de las diferencias. Por ejemplo, razonó que si las ondas en el cable se propagan a la misma velocidad que las ondas en el aire, entonces las líneas de las fuerzas eléctricas deben ser perpendiculares al cable y que, en consecuencia, un cable recto atravesado por ondas no podía ejercer ninguna acción inductiva sobre un cable paralelo vecino. Sin embargo descubrió que tal interacción ocurría, aunque era muy débil. Esto lo llevó a pensar que si las líneas de fuerza no eran paralelas al cable, ambas ondulaciones no se propagaban con la misma velocidad. Pero después descubrió que se producía una especie de resonancia con las paredes del recinto. Los físicos suizos Edouard Sarasin y Lucien de la Rive, con quienes Hertz mantenía correspondencia, le confirmaron la influencia de las paredes del recinto en la velocidad de las ondas. Ellos inicialmente habían repetido los experimentos iniciales de Hertz en un recinto relativamente pequeño donde encontraron el problema de las paredes. De modo que luego repitieron los experimentos en el gran hall de la planta depuradora de agua del Rhône (Ródano) en Genève y las velocidades, dentro del margen de error, eran prácticamente iguales.

En las investigaciones que efectuó Hertz, el resultado de sus experimentos los interpretó desde el punto de vista que tomó analizando los trabajos de Hermann von Helmholtz[44]. von Helmholtz distinguía dos formas de fuerzas eléctrica: la electromagnética y la electrostática. En un caso límite especial, la teoría de Helmholtz se simplifica considerablemente, y sus ecuaciones, en este caso, se vuelven las mismas que las de la teoría de Maxwell y sólo queda una forma de la fuerza, y esta se propaga con la velocidad de la luz. Las suposiciones de von Helmholtz eran mucho más simples que las de Maxwell y Hertz se abocó a la prueba experimental de esas suposiciones. Los experimentos fueron exitosos y se publicaron en "*Die Kräfte electrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie*"[45].

Haciendo las correcciones debido a la interferencia con las ondas reflejadas en las paredes, Hertz encontró que las ondas muy cortas tenían una velocidad similar a la de la luz. Luego ensayó con ondas de unos 30 cm de longitud, encontrando que las mismas se desplazaban a lo largo de los cables con casi la misma velocidad que en el aire. Consiguió un reflector cóncavo, una superficie reflectora plana y un gran prisma con lo que realizó toda una serie exitosa de experimentos que se detallan en su trabajo "*Ueber Strahlen electrischer Kraft.*"[46].

A pesar del éxito de sus investigaciones, Hertz sintió que su investigación no estaba completa. Sus experimentos se relacionaban sólo con la propagación de fenómenos eléctricos, por lo que se dedicó a experimentar sobre la velocidad con la que se propagan los efectos magnéticos. Obviamente no era necesario producir ondas magnéticas especiales, sino detectar en las ondas la componente

[44] von Helmholtz, *Wiss. Abhandl*. 1, pp. 545 – 628.

[45] (Las fuerzas de las oscilaciones eléctricas tratadas según la teoría de Maxwell) publicado en *Wiedemann's Ann*. 36, pág. 1, 1889. La traducción al castellano se agrega como Apéndice C.

[46] (Sobre la radiación eléctrica) La traducción al castellano se agrega como Apéndice D.

magnética. Para su logró diseñó un conjunto de experimentos, aunque incompletos, que publicó en su trabajo "*Ueber die mechanischen Wirkungen electrischer Drahtwellen*".[47]

En lo referente a la obra de Maxwell, si bien admiró la capacidad del científico escocés y su ingenio para desarrollar una teoría por analogía con otra conocida, no estuvo muy de acuerdo con sus cambios de paradigma. Además criticó los errores en las ecuaciones, especialmente en los cambios de signo para la misma magnitud, con los cuales Maxwell llegó a resultados correctos por compensación de errores. En cierta oportunidad, Hertz, que coincidía más con el electromagnetismo de von Helmholtz, llegó a decir que la "teoría" de Maxwell, eran las ecuaciones de Maxwell.

Además de sus trabajos sobre electromagnetismo, escribió *Die Prinzipien der Mechanik*¸ que se publicó en 1899.

En 1889 comenzó a tener problemas de salud. Primero fueron dolores de muela insoportables, por lo que le extrajeron todos los dientes. Luego comenzaron los dolores de garganta y de nariz. Eran tan intensos que le impedían trabajar. Todos los tratamientos fueron infructuosos. Tenía una enfermedad autoinmune conocida como granulomatosis de Wegener, actualmente llamada poliangitis granulomatosa, que afecta los vasos sanguíneos en los pulmones, los riñones, la nariz, los senos paranasales y los oídos.

Falleció en Bonn, el 1º de enero de 1894, a los 36 años.

Bibliografía:

Niven, W.D., (Ed), (**1965**): *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 2 Vols. Dover, General Publishing Co. Ltd., Toronto.

Lenard, P.H., (1895): *Gesammelte Werke von Heinrich Hertz*, Band I, J. Barth, Leipzig.

Duhem, P., (**2015**). *The Electric Theories of J. Clerk Maxwell¸ a Critical Study* Springer, Heidelberg,

[47] (Sobre la acción mecánica de las ondas eléctricas en los alambres) Publicado en *Wiedemann's Ann*. 42, pág. 407, 1891.

APÉNDICE A

SOBRE LAS LÍNEAS DE FUERZA DE FARADAY

El estado actual de la ciencia eléctrica parece peculiarmente desfavorable a la especulación. Las leyes de la distribución de electricidad sobre la superficie de los conductores se han deducido analíticamente de los experimentos; algunas partes de la teoría matemática del magnetismo están establecidas, mientras que en otros aspectos los datos experimentales son insuficientes; la teoría de la conducción del galvanismo y la de la atracción mutua de los conductores se han reducido a fórmulas matemáticas, pero no han establecido una relación con las otras partes de la ciencia. Ahora no se puede plantear ninguna teoría eléctrica, a menos que muestre la conexión no solo entre la electricidad en reposo y la corriente eléctrica, sino entre las atracciones y los efectos inductivos de la electricidad en ambos estados. Tal teoría debe satisfacer con precisión aquellas leyes, cuya forma matemática es conocida, y debe proporcionar los medios para calcular los efectos en los casos límite en que las fórmulas conocidas son inaplicables. Para apreciar los requisitos de la ciencia, el estudiante debe familiarizarse con un conjunto considerable de las matemáticas más intrincadas, cuya mera retención en la memoria interfiere materialmente con el progreso posterior. Por lo tanto, el primer proceso en el estudio efectivo de la ciencia debe ser uno de simplificación y reducción de los resultados de la investigación previa a una forma en que la mente pueda captarlos. Los resultados de esta simplificación pueden tomar la forma de una fórmula puramente matemática o de una hipótesis física. En el primer caso perdemos completamente la visión de los fenómenos a ser explicados; y aunque podemos rastrear las consecuencias de leyes dadas, nunca podemos obtener una visión más amplia de las conexiones del tema. Si, por otro lado, adoptamos una hipótesis física, vemos los fenómenos sólo a través de un medio, y somos responsables de una ceguera ante ciertos hechos y somos temerarios en las suposiciones que adoptamos para una explicación. "Por lo tanto, debemos descubrir algún método de investigación que permita a la mente a cada paso aferrarse a una concepción física clara, sin comprometerse con ninguna teoría fundada en la ciencia física de la que se toma esa concepción, de modo que no se deje a un lado del sujeto en búsqueda de sutilezas analíticas, ni llevado más allá de la verdad por una hipótesis favorita.

Para obtener ideas físicas sin adoptar una teoría física, debemos familiarizarnos con la existencia de analogías físicas. Por analogía física me refiero a la similitud parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que cada una de ellas ilustre la otra. Así, todas las ciencias matemáticas se basan en las relaciones entre las leyes físicas y las leyes de los números, de modo que el objetivo de la ciencia exacta es reducir los problemas de la naturaleza a la determinación de cantidades mediante operaciones con números. Pasando de la más universal de todas las analogías a una muy parcial, encontramos la misma semejanza en forma matemática entre dos fenómenos diferentes que dan lugar a una teoría física de la luz.

Los cambios de dirección que sufre la luz al pasar de un medio a otro son idénticos a las desviaciones de la trayectoria de una partícula al moverse a través de un espacio estrecho en el que actúan las fuerzas intensas. Esta analogía, que se extiende solo a la dirección, y no a la velocidad del movimiento, durante mucho tiempo se creyó que era la verdadera explicación de la refracción de la luz; y todavía lo encontramos útil en la solución de ciertos problemas, en los cuales lo empleamos sin peligro, como un método artificial. La otra analogía, entre la luz y las vibraciones de un medio elástico, se extiende mucho más lejos, pero, aunque su importancia y fecundidad no pueden sobreestimarse, debemos recordar que se basa únicamente en un parecido en la forma entre las leyes de la luz y los de las vibraciones. Al despojarlo de su apariencia física y reducirlo a una teoría de "alternancias transversales", podríamos obtener un sistema de verdad estrictamente fundado en la observación, pero probablemente deficiente tanto en la intensidad de sus concepciones como en la fertilidad de su método. He dicho tanto sobre las cuestiones controvertidas de la Óptica como una preparación para la discusión de la teoría de la atracción a distancia, casi universalmente admitida.

Todos hemos adquirido la concepción matemática de estas atracciones. Podemos razonar sobre ellos y determinar sus formas o fórmulas apropiadas. Estas fórmulas tienen un significado matemático distinto, y se encuentra que sus resultados están de acuerdo con los fenómenos naturales. No hay una fórmula en las matemáticas aplicadas más consistente con la naturaleza que la fórmula de las atracciones, y ninguna teoría mejor establecida en la mente de los hombres que la de la acción de los cuerpos unos sobre otros a distancia. Las leyes de la conducción del calor en medios uniformes aparecen a primera vista entre las más diferentes en sus relaciones físicas de las relacionadas con las atracciones. Las cantidades que entran en ellos son temperatura, flujo de calor, conductividad. La palabra fuerza es extraña al tema. Sin embargo, encontramos que las leyes matemáticas del movimiento uniforme del calor en medios homogéneos son idénticas en su forma a las de las atracciones que varían inversamente al cuadrado de la distancia. Solo tenemos que sustituir la fuente de calor por el centro de atracción, el flujo de calor por efecto acelerante de atracción en cualquier punto y la temperatura por potencial, y la solución de un problema en las atracciones se transforma en un problema de calor.

Esta analogía entre las fórmulas de calor y la atracción, creo que fue señalada por primera vez por el profesor William Thomson en el *Camb. Math. Journal*, vol. III.

Actualmente se supone que la conducción del calor procede por una acción entre partes contiguas de un medio, mientras que la fuerza de atracción es una relación entre cuerpos distantes, y sin embargo, si no supiéramos nada más que lo expresado en las fórmulas matemáticas, no habría nada que permitiesen distinguir entre un conjunto de fenómenos y el otro.

Es verdad, que si introducimos otras consideraciones y observamos hechos adicionales, los dos temas asumirán aspectos muy diferentes, pero el parecido matemático de algunas de sus leyes permanecerá, y aún puede ser útil para excitar ideas matemáticas apropiadas.

Es mediante el uso de analogías de este tipo que he intentado traer a la mente, en una forma conveniente y manejable, aquellas ideas matemáticas que son necesarias para el estudio de los fenómenos de la electricidad. Los métodos son generalmente los sugeridos por los procesos de razonamiento que se encuentran en las investigaciones de Faraday*, y que, aunque han sido interpretados matemáticamente por el Prof. Thomson y otros, se supone generalmente que son de carácter indefinido e "no matemático", cuando se compara con aquellos empleados por los matemáticos profesionales. Por el método que adopto, espero dejar en claro que no estoy tratando de establecer ninguna teoría física de una ciencia en la que apenas haya hecho un solo experimento, y que el límite de mi diseño es mostrar cómo, mediante una aplicación estricta de las ideas y métodos de Faraday, la conexión de las clases de fenómenos muy diferentes que ha descubierto puede colocarse claramente ante la mente matemática. Por lo tanto, evitaré tanto como pueda la introducción de cualquier cosa que no sirva como una ilustración directa de los métodos de Faraday, o de las deducciones matemáticas que puedan hacerse de ellos. Al tratar las partes más simples del tema, usaré los métodos matemáticos de Faraday así como sus ideas. Cuando la complejidad del tema lo requiera, usaré la notación analítica, y me limitaré al desarrollo de ideas originadas por el mismo filósofo.

En primer lugar, debo explicar e ilustrar la idea de "líneas de fuerza".

Cuando un cuerpo está electrificado de alguna manera, un pequeño cuerpo cargado con electricidad positiva y colocado en cualquier posición dada, experimentará una fuerza que lo impulse en cierta dirección. Si el pequeño cuerpo ahora está electrificado negativamente, será impulsado por una fuerza igual en una dirección exactamente opuesta.

Las mismas relaciones se mantienen entre un cuerpo magnético y los polos norte o sur de un pequeño imán. Si el polo norte se impulsa en una dirección, el polo sur se impulsa en la dirección opuesta.

De esta forma, podríamos encontrar una línea que pasa por cualquier punto del espacio, de modo que represente la dirección de la fuerza que actúa sobre una partícula positivamente electrificada, o sobre un polo norte elemental, y la dirección inversa de la fuerza sobre una partícula negativamente electrificada o un polo sur elemental. Dado que en cada punto del espacio se puede encontrar tal dirección, si comenzamos en cualquier punto y trazamos una línea para que, a medida que avanzamos, su dirección en cualquier punto siempre coincida con la de la fuerza resultante en ese punto, esta curva indicará la dirección de esa fuerza para cada punto por el que pasa, y podría llamarse por esa razón una línea de fuerza. De la misma manera podríamos dibujar otras líneas de fuerza, hasta que hayamos llenado todo el espacio con curvas que indican por su dirección la de la fuerza en cualquier punto asignado.

Deberíamos obtener así un modelo geométrico de los fenómenos físicos, que nos diría la dirección de la fuerza, pero aún deberíamos requerir algún método para indicar la intensidad de la fuerza en cualquier punto.

Si consideramos estas curvas no como simples líneas, sino como tubos finos de sección variable que transportan un fluido incompresible, entonces, dado que la velocidad del fluido es inversamente proporcional a la sección del tubo, podemos hacer que la velocidad varíe de acuerdo con cualquier

* Ver especialmente Series xxxviii de las Experimental Researches y Phil. Mag. 1852.

ley dada, al regular la sección del tubo, y de esta manera podemos representar la intensidad de la fuerza así como su dirección por el movimiento del fluido en estos tubos. Este método de representar la intensidad de una fuerza por la velocidad de un fluido imaginario en un tubo es aplicable a cualquier sistema de fuerzas concebible, pero es capaz de una gran simplificación en el caso en que las fuerzas son tales que pueden ser explicadas por la hipótesis de atracciones que varían inversamente al cuadrado de la distancia, como los observados en fenómenos eléctricos y magnéticos. En el caso de un sistema de fuerzas perfectamente arbitrario, generalmente habrá intersticios entre los tubos; pero en el caso de las fuerzas eléctricas y magnéticas es posible organizar los tubos para no dejar intersticios. Los tubos serán entonces meras superficies, dirigiendo el movimiento de un fluido que llena todo el espacio. Ha sido usual comenzar la investigación de las leyes de estas fuerzas asumiendo de inmediato que los fenómenos se deben a fuerzas atractivas o repulsivas que actúan entre ciertos puntos. Sin embargo, podemos obtener una visión diferente del tema, y una más adecuada para nuestras investigaciones más difíciles, adoptando para la definición de las fuerzas que tratamos, que puedan ser representadas en la magnitud y dirección por el movimiento uniforme de un fluido incompresible.

Propongo, entonces, primero describir un método por el cual el movimiento de tal fluido puede ser claramente concebido; segundo, deducir las consecuencias de asumir ciertas condiciones de movimiento y señalar la aplicación del método a algunos de los fenómenos menos complejos de electricidad, magnetismo y galvanismo; y finalmente mostrar cómo mediante una extensión de estos métodos, y la introducción de otra idea debido a Faraday, las leyes de las atracciones y las acciones inductivas de los imanes y las corrientes pueden ser claramente concebidas, sin hacer ninguna suposición sobre la naturaleza física de la electricidad, o agregar algo a lo que ya ha sido probado por la experiencia.

Al referir todo a la idea puramente geométrica del movimiento de un fluido imaginario, espero alcanzar generalidad y precisión, y evitar los peligros que surgen de una teoría prematura que intenta explicar la causa de los fenómenos. Si se encuentra que los resultados de la mera especulación que he recopilado son de alguna utilidad para los filósofos experimentales, al organizar e interpretar sus resultados, se habrán cumplido sus propósitos, y una teoría madura, en la cual los hechos físicos se explicarán físicamente y que estará formada por aquellos conceptos que, al interrogar a la Naturaleza, permiten obtener la única solución verdadera de las preguntas que sugiere la teoría matemática.

I. *Teoría del movimiento de un fluido incompresible*

(1) No debe suponerse que la sustancia aquí tratada posee otras de las propiedades de los fluidos ordinarios, excepto las de libertad de movimiento y resistencia a la compresión. Ni siquiera es un fluido hipotético el que se introduce para explicar los fenómenos reales. Es simplemente una colección de propiedades imaginarias que pueden emplearse para establecer ciertos teoremas de matemática pura de manera más inteligible para muchas mentes y más aplicable a problemas físicos que aquellas en los que se usan solo símbolos algebraicos. El uso de la palabra "Fluido" no nos llevará al error, si recordamos que denota una sustancia puramente imaginaria con la siguiente propiedad:

La porción de fluido que en cualquier instante ocupa un volumen dado, ocupará en un instante sucesivo un volumen igual.

Esta ley expresa la incompresibilidad del fluido y nos proporciona una medida conveniente de su cantidad, es decir, su volumen. La unidad de cantidad del fluido será, por lo tanto, la unidad de volumen.

(2) En general, la dirección del movimiento del fluido será diferente en cada punto diferente del espacio que ocupa; dado que la dirección está determinada para cada punto, podemos concebir una línea comenzando en un punto cualquiera y continuar así de modo que cada elemento de la línea indique mediante su dirección, la dirección del movimiento en ese punto del espacio. Cada línea dibujada de tal manera que su dirección siempre indique la dirección del movimiento del fluido, se denomina *línea de movimiento de fluido*.

Si el movimiento del fluido es lo que se denomina *movimiento constante*, es decir, si la dirección y la velocidad del movimiento en cualquier punto fijo son independientes del tiempo. Las, curvas de este tipo representarán las trayectorias de las partículas individuales del fluido. Pero si el movimiento es variable, este generalmente no será el caso. Los casos de movimiento que serán tratados serán los de movimiento constante.

(3) Si sobre cualquier superficie que corta las líneas de movimiento del fluido dibujamos una curva cerrada, y si desde cada punto de esta curva dibujamos una línea de movimiento, estas líneas de movimiento generarán una superficie tubular que podemos llamar tubo del movimiento del fluido Como esta superficie es generada por líneas en la dirección del movimiento del fluido, ninguna parte del fluido puede fluir a través de ella, de modo que esta superficie imaginaria es tan impermeable al fluido como un tubo real.

(4) La cantidad de fluido que en una unidad de tiempo cruza cualquier sección fija del tubo es la misma en cualquier parte del tubo que se tome la sección. Siendo el fluido incompresible, y ninguna de sus partes se mueve a través de los laterales del tubo, por lo tanto, la cantidad que se sale a la segunda sección es igual a la que entra por la primera.

Si el tubo es tal que la unidad de volumen pasa a través de cualquier sección en una unidad de tiempo, se lo denomina *tubo unitario de movimiento de fluido*.

(5) En lo que sigue, se hará referencia a varias unidades, y se dibujará un número finito de líneas o superficies, representando en términos de esas unidades el movimiento del fluido. Ahora, para definir el movimiento en cada parte del fluido, habría que dibujar un número infinito de líneas a intervalos indefinidamente pequeños; pero como la descripción de tal sistema de líneas implicaría una referencia continua a la teoría de los límites, se ha pensado mejor suponer las líneas trazadas a intervalos que dependen de la unidad supuesta, y luego asumir la unidad tan pequeña como queramos por tomando un pequeño submúltiplo de la unidad estándar.

(6) Para definir el movimiento del fluido completo por medio de un sistema de tubos unitarios. Tome cualquier superficie fija que corte todas las líneas de movimiento de fluido, y dibuje sobre

ella cualquier sistema de curvas que no se crucen entre sí. Sobre la misma superficie dibuje un segundo sistema de curvas que intersectan el primer sistema, y dispuesto de tal manera que la cantidad de fluido que cruza la superficie dentro de cada uno de los cuadriláteros formados por la intersección de los dos sistemas de curvas sea unidad en unidad de tiempo. Desde cada punto en una curva del primer sistema, dibuje una línea de movimiento de fluido. Estas líneas formarán una superficie a través de la cual no pasa fluido. Se pueden dibujar superficies impermeables similares para todas las curvas del primer sistema. Las curvas del segundo sistema darán lugar a un segundo sistema de superficies impermeables que, por su intersección con el primer sistema, formarán tubos cuadrilaterales, que serán tubos de movimiento fluido. Como cada cuadrilátero de la superficie de corte transmite una unidad de fluido en la unidad de tiempo, cada tubo en el sistema transmitirá unidad de fluido a través de cualquiera de sus secciones en una unidad de tiempo. El movimiento del fluido en cada parte del espacio que ocupa está determinado por este sistema de tubos unitarios; porque la dirección del movimiento es la del tubo a través del punto en cuestión, y la velocidad es la recíproca del área de la sección del tubo unidad en ese punto.

(7) Ahora hemos obtenido una construcción geométrica que define completamente el movimiento del fluido al dividir el espacio que ocupa, en un sistema de tubos unitarios. A continuación, mostramos cómo mediante estos tubos podemos determinar varios aspectos relacionados con el movimiento del fluido.

Un tubo unitario puede retornar a sí mismo, o puede comenzar y terminar en diferentes puntos, y estos pueden estar en el límite del espacio en el que investigamos el movimiento o dentro de ese espacio. En el primer caso, hay una circulación continua de fluido en el tubo, en el segundo el fluido entra por un extremo y fluye por el otro. Si los extremos del tubo están en la superficie límite, se puede suponer que el fluido se suministra continuamente desde el exterior desde una fuente desconocida, y que fluye a través de la superficie del tubo hacia un reservorio desconocido; pero si el origen del tubo o su terminación está dentro del espacio considerado, entonces debemos concebir que el fluido sea suministrado por una fuente dentro de ese espacio, capaz de crear y emitir una unidad de fluido en una unidad de tiempo, y ser posterior tragado por un sumidero capaz de recibir y destruir la misma cantidad continuamente.

No hay nada autocontradictorio en la concepción de estas fuentes donde se crea el fluido, y se hunde donde es aniquilado. Las propiedades del fluido las disponemos a voluntad, lo hemos hecho incompresible, y ahora suponemos que, en cierto punto se produjo de la nada y que en otro punto se reduce a la nada. Los lugares de producción se denominarán fuentes, y su valor numérico será la cantidad de unidades de fluido que producen en una unidad de tiempo. Los lugares de reducción, a falta de un mejor nombre, se llamarán sumideros, y se estimarán por la cantidad de unidades de fluido absorbido en una unidad de tiempo. Ambos lugares se llaman, a veces, fuentes, entendiéndose que una fuente es un sumidero cuando su signo es negativo.

(8) Es evidente que la cantidad de fluido que pasa por una superficie fija se mide por el número de tubos unitarios que la cortan, y la dirección en que pasa el fluido está determinada por la de su movimiento en los tubos. Si la superficie es cerrada, entonces cualquier tubo cuyas terminaciones se encuentren en el mismo lado de la superficie debe cruzar la superficie tantas veces en una dirección como en la otra, y por lo tanto debe transportar tanta cantidad de fluido fuera de la superficie como

la que lleva hacia adentro. Un tubo que comienza dentro de la superficie y termina fuera de ella llevará una unidad de fluido; y uno que entra a través de la superficie y termina dentro de ella llevará la misma cantidad. Por lo tanto, para estimar la cantidad de fluido que sale de la superficie cerrada, debemos restar la cantidad de tubos que terminan dentro de la superficie del número de tubos que comienzan allí. Si el resultado es negativo, el fluido en general fluirá hacia adentro.

Si llamamos al inicio de un tubo unitario una fuente unitaria, y su terminación un sumidero unitario, entonces la cantidad de fluido producido dentro de la superficie se estima por el número de fuentes unitarias menos el número de sumideros unitarios, y esto debe fluir fuera de la superficie a causa de la incompresibilidad del fluido.

Al hablar de estos tubos unitarios, fuentes y sumideros, debemos recordar lo que se dijo en (5) en cuanto a la magnitud de la unidad, y cómo disminuyendo su tamaño y aumentando su número podemos distribuirlos de acuerdo con cualquier ley, por complicada que sea.

(9) Si conocemos la dirección y la velocidad del fluido en dos puntos diferentes, cualesquiera y si concebimos un tercer caso en el que la dirección y la velocidad del fluido en cualquier punto es la resultante de las velocidades en los dos anteriores casos en los puntos correspondientes, entonces la cantidad de fluido que pasa a través de una superficie fija dada en el tercer caso será la suma algebraica de las cantidades que pasan la misma superficie en los dos casos anteriores. La velocidad con la que el fluido cruza cualquier superficie es la componente normal de la velocidad a la superficie y la resultante de la velocidad de un sistema de dos fluidos es igual a la suma de las velocidades resultantes de los componentes.

Por lo tanto, el número de tubos unitarios que, en el tercer caso, cruzan la superficie hacia afuera, debe ser la suma algebraica de los números que lo cruzan en los dos casos anteriores, y el número de fuentes dentro de cualquier superficie cerrada será la suma de los números de fuentes en los dos casos anteriores. Dado que la superficie cerrada puede tomarse tan pequeña como queramos, es evidente que la distribución de fuentes y sumideros en el tercer caso surge de la simple superposición de las distribuciones en los dos casos anteriores.

II. *Teoría del movimiento uniforme de un fluido incompresible imponderable a través de un medio resistente*.

(10) Aquí se supone que el fluido no tiene inercia, y su movimiento se opone por la acción de una fuerza que podemos concebir que se debe a la resistencia de un medio a través del cual se supone que fluye el fluido. Esta resistencia depende de la naturaleza del medio y, en general, dependerá de la dirección en que se mueve el fluido, así como de su velocidad. Por el momento, podemos restringirnos al caso de un medio uniforme, cuya resistencia es la misma en todas las direcciones. La ley que asumimos es la siguiente.

Cualquier porción del fluido que se mueve a través del medio resistente se enfrenta directamente con una fuerza de retardo proporcional a su velocidad.

Si la velocidad se representa por v, entonces la resistencia será una fuerza igual a kv que actúa sobre la unidad de volumen del fluido en una dirección contraria a la del movimiento. Por lo tanto, para que la velocidad se mantenga constante, debe haber una mayor presión detrás de cualquier porción del fluido que la que hay delante de ella, de modo que la diferencia de presiones puede neutralizar el efecto de la resistencia. Concebimos una unidad cúbica de fluido (que podemos hacer tan pequeño como queramos, en virtud de (5)), y suponemos que se mueve en una dirección perpendicular a dos de sus caras. Entonces la resistencia será kv, y, por lo tanto, la diferencia de presiones entre la primera y la segunda cara es kv, de modo que la presión disminuye en la dirección del movimiento a la velocidad de kv para cada unidad de longitud medida a lo largo de la línea de movimiento; de modo que si medimos una longitud igual a h unidades, la diferencia de presión en sus extremos será kvh.

(11) Como se supone que la presión varía continuamente en el fluido, todos los puntos en los cuales la presión es igual a una presión dada p se encontrarán en una cierta superficie que podemos llamar la *superficie* (p) *de igual presión*. Si se construye una serie de estas superficies en el fluido correspondiente a las presiones 0, 1, 2, 3, etc., entonces, el número de la superficie indicará la presión que le pertenece, y la superficie puede denominarse *superficie* 0, 1, 2, 3, etc. La unidad de presión es aquella presión que se produce por unidad de fuerza que actúa sobre la unidad de superficie. Por lo tanto, para disminuir la unidad de presión como en (5) debemos disminuir la unidad de fuerza en la misma proporción.

(12) Es fácil ver que estas superficies de igual presión deben ser perpendiculares a las líneas de movimiento del fluido; porque si el fluido se moviera en cualquier otra dirección, habría una resistencia a su movimiento que no podría equilibrarse con ninguna diferencia de presiones. (Debemos recordar que el fluido aquí considerado no tiene inercia o masa, y que sus propiedades son las únicas que se le asignan formalmente, de modo que las resistencias y presiones son las únicas cosas que se deben considerar). Por lo tanto, hay dos conjuntos de superficies que por su intersección forman el sistema de tubos unitarios, y el sistema de superficies de igual presión corta las otras en ángulos rectos. Sea h la distancia entre dos superficies consecutivas de igual presión medida a lo largo de una línea de movimiento, entonces, dado que la diferencia de presiones es igual a 1,

$$\boldsymbol{kvh = 1},$$

que determina la relación entre v y h, de modo que se puede hallar una cuando la otra es conocida. Sea s el área de la sección de un tubo unitario medido en una superficie de igual presión, entonces, dada la definición de tubo unitario

$$\boldsymbol{vs = 1},$$

De la última ecuación encontramos

$$\boldsymbol{s = kh}$$

(13) Las superficies de igual presión cortan a los tubos unitarios en porciones cuya longitud es h y sección ess. Estas porciones elementales de los tubos unitarios se denominarán *celdas unitarias*. En cada una de estas celdas unitarias, la unidad de volumen de fluido pasa de una presión p a una

presión (*p*– 1) en una unidad de tiempo y, por lo tanto, supera la unidad de resistencia en ese momento. Por lo tanto, el trabajo dedicado a superar la resistencia es de una unidad en cada celda por cada unidad de tiempo.

(14) Si se conocen las superficies de igual presión, se puede encontrar la dirección y la magnitud de la velocidad del fluido en cualquier punto, después de lo cual se puede construir un sistema completo de tubos unitarios, y los comienzos y las terminaciones se indican como las fuentes de donde se deriva el fluido y los sumideros donde desaparece. Para poder demostrar lo contrario de esto, que si se da la distribución de las fuentes, se puede encontrar la presión en cada punto, debemos establecer ciertas proposiciones preliminares.

(15) Si conocemos las presiones en cada punto del fluido en dos casos diferentes, y si tomamos un tercer caso en el que la presión en cualquier punto es la suma de las presiones en los puntos correspondientes en los dos casos anteriores, entonces la velocidad en cualquier punto del tercer caso es la resultante de las velocidades en los otros dos, y la distribución de las fuentes es la debida a la simple superposición de las fuentes en los dos casos anteriores.

La velocidad en cualquier dirección es proporcional a la velocidad de disminución de la presión en esa dirección; de modo que si se suman dos sistemas de presiones, dado que la tasa de disminución de presión a lo largo de cualquier línea será la suma de las tasas combinadas, la velocidad en el nuevo sistema orientado en la misma dirección será la suma de las partes resueltas en los dos sistemas originales. Por lo tanto, la velocidad en el nuevo sistema será la resultante de las velocidades en los puntos correspondientes en los dos sistemas anteriores.

De esto se deduce, por (9) que, en el nuevo sistema, la cantidad de fluido que cruza cualquier superficie fija es la suma de las cantidades de fluido correspondientes en el sistema anterior, y que las fuentes de los dos sistemas originales simplemente se combinan para formar el nuevo.

Es evidente que en un sistema en que la presión es la diferencia de presiones entre dos sistemas dados, la distribución de las fuentes se obtendrá cambiando el signo de todas las fuentes en el segundo sistema y sumándolas a las del primero.

(16) Si la presión en cada punto de una superficie cerrada es la misma e igual a *p*, y si no hay fuentes o sumideros dentro de la superficie, entonces no habrá movimiento del fluido dentro de la superficie, y la presión dentro de ella será uniforme e igual a *p*.

Porque si hay movimiento del fluido dentro de la superficie habrá tubos de movimiento de fluido, y estos tubos deben retornar a sí mismos o terminarse dentro de la superficie o en su límite. Ahora bien, dado que el fluido siempre fluye desde lugares de mayor presión a lugares de menor presión, no puede fluir en una curva de reingreso; ya que no hay fuentes o sumideros dentro de la superficie, los tubos no pueden comenzar ni terminar excepto en la superficie; y dado que la presión en todos los puntos de la superficie es la misma, no puede haber movimiento en los tubos que tienen ambas extremidades en la superficie. Por lo tanto, no hay movimiento dentro de la superficie, y por lo tanto ninguna diferencia de presión que pueda causar movimiento, y dado que la presión en la superficie límite es *p*, la presión en cualquier punto dentro de ella también es *p*.

(17) Si se conoce la presión en cada punto de una superficie cerrada dada, y también se conoce la distribución de las fuentes dentro de la superficie, entonces solo puede existir una única distribución de presiones dentro de la superficie.

Porque si se pudieran encontrar dos distribuciones diferentes de presiones que satisfagan estas condiciones, se podría formar una tercera distribución en la cual la presión en cualquier punto debería ser la diferencia de las presiones en las dos distribuciones anteriores. En este caso, dado que las presiones en la superficie y las fuentes dentro de ella son las mismas en ambas distribuciones, la presión en la superficie en la tercera distribución sería cero, y todas las fuentes dentro de la superficie desaparecerían, por (15).

Luego, por (16) la presión en cada punto en la tercera distribución debe ser cero; pero esta es la diferencia de las presiones en los dos casos anteriores, y por lo tanto estos casos son los mismos, por lo que solo hay una distribución de presión posible.

18) Determinemos a continuación la presión en cualquier punto de un cuerpo infinito de fluido en el centro del cual se encuentra una fuente unitaria, suponiendo que la presión a una distancia infinita de la fuente es cero.

El fluido fluirá desde el centro simétricamente, y dado que la unidad de volumen fluye desde cada superficie esférica que rodea el punto en la unidad de tiempo, la velocidad a una distancia r de la fuente será

El fluido fluirá desde el centro simétricamente, y dado que la unidad de volumen fluye desde cada superficie esférica que rodea el punto en la unidad de tiempo, la velocidad a una distancia r de la fuente será

$$v = \frac{1}{4\pi r^2}$$

Por lo tanto, la velocidad de disminución de la presión es kvo $\frac{k}{4\pi r^2}$, y, dado que cuando r es infinito la presión es 0, la presión real en cada punto será

$$p = \frac{k}{4\pi r}$$

Esto implica que la presión es inversamente proporcional a la distancia a la fuente

Es evidente que la presión debida a un sumidero unitario será negativa e igual a $-\frac{k}{4\pi r}$.

Si tenemos una fuente formada por la asociación de S fuentes unitarias, la presión resultante será $p = \frac{ks}{4\pi r^2}$, de modo que la presión a una distancia dada varía según la resistencia y el número de fuentes asociadas.

(19) Si varias fuentes y sumideros coexisten en el fluido, entonces, para determinar la presión resultante, solo tenemos que sumar las presiones que produce cada fuente o sumidero. Por (15) esto será una solución del problema, y por (17) será el único. Mediante este método podemos determinar las presiones debidas a cualquier distribución de fuentes, ya que mediante el método de (14) podemos determinar la distribución de las fuentes a las que se debe una determinada distribución de presiones.

(20) Tenemos que demostrar que si concebimos una superficie imaginaria como fija en el espacio que intersecta las líneas de movimiento del fluido, podemos sustituir el fluido de un lado de esta superficie por una distribución de fuentes sobre la superficie misma sin alterar de alguna manera el movimiento del fluido en el otro lado de la superficie.

Porque si describimos el sistema de tubos unitarios que define el movimiento del fluido, y dondequiera que un tubo ingresa a través de la superficie, colocamos una fuente unitaria, y cada vez que un tubo sale a través de la superficie, colocamos un sumidero unitario, y al mismo tiempo la superficie permanece impermeable al fluido, el movimiento del fluido en los tubos continuará como antes.

(21) Si el sistema de presiones y la distribución de las fuentes que las producen se conocen en un medio cuya resistencia se mide por k, entonces para producir el mismo sistema de presiones en un medio cuya resistencia es la unidad, la tasa de producción en cada fuente debe multiplicarse por k. Porque la presión en cualquier punto debido a una fuente dada varía como la tasa de producción y la resistencia en conjunto; por lo tanto, si la presión es constante, la tasa de producción debe variar inversamente a la resistencia.

(22) *Sobre las condiciones que debe cumplir una superficie que separa dos medios cuyos coeficientes de resistencia son k y k'.*

Estas se obtienen a partir de la consideración de que la cantidad de fluido que, desde cualquier punto de un medio fluye hacia el otro y que la presión varía continuamente de un medio a otro. La velocidad normal a la superficie es la misma en ambos medios, y por lo tanto la velocidad de disminución de la presión es proporcional a la resistencia. La dirección de los tubos de movimiento y las superficies de igual presión se alterarán después de atravesar la superficie, y la ley de esta refracción que tiene lugar en el plano que pasa por la dirección de incidencia y la normal a la superficie, estará dada por la relación entre la tangente del ángulo de incidencia y la tangente del ángulo de refracción e igual a la relación entre k' y k.

(23) Sea que el espacio dentro de una dada superficie cerrada se llene con un medio diferente al que está en su exterior, y supongamos conocidas las presiones en cualquier punto de este sistema compuesto debido a una distribución dada de fuentes dentro y fuera de la superficie. Se requiere determinar una distribución de fuentes que produciría el mismo sistema de presiones en un medio cuyo coeficiente de resistencia es la unidad.

Construya los tubos de movimiento de fluido, y dondequiera que un tubo unitario entra, en cualquier medio, coloque una fuente unitaria y en todo lugar donde un tubo unitario sale, coloque un sumidero unitario. Entonces, si suponemos que la superficie es impermeable, todo continuará como antes.

Supongamos que la resistencia del medio exterior viene medida por k, y la del interior por V. Entonces, si multiplicamos la tasa de producción de todas las fuentes en el medio exterior (incluidas las de la superficie), por k, y hacemos unitario el coeficiente de resistencia, las presiones permanecerán como antes, y lo mismo ocurrirá en el medio interior si multiplicamos todas las fuentes en él por k', incluidas las de la superficie, y hacemos que su resistencia sea la unidad.

Dado que las presiones en ambos lados de la superficie son ahora iguales, podemos suponer, si queremos, que es permeable.

Ahora tenemos el sistema original de presiones producido en un medio uniforme por una combinación de tres sistemas de fuentes. El primero de ellos es el sistema externo dado multiplicado por k, el segundo es el sistema interno dado multiplicado por k', y el tercero es el sistema de fuentes y sumideros en la superficie misma. En el caso original, cada fuente en el medio externo tenía un sumidero igual en el medio interno del otro lado de la superficie, pero ahora la fuente se multiplica por k y el sumidero por k', de modo que el resultado es para cada fuente unitaria externa en la superficie, una fuente = $(k–k')$. Por medio de estos tres sistemas de fuentes, el sistema original de presiones puede producirse en un medio para el que $k = 1$.

(24) Supongamos que no hay resistencia en el medio dentro de la superficie cerrada, es decir sea $k' = 0$, entonces la presión dentro de la superficie cerrada es uniforme e igual a p, y la presión en la superficie misma también es p. Si al asumir cualquier distribución de pares de fuentes y sumideros dentro de la superficie además de las fuentes externas e internas dadas, y al suponer que el medio es el mismo dentro y fuera de la superficie, podemos hacer que la presión en la superficie sea uniforme, las presiones encontrado para el medio externo, junto con la presión uniforme p en el medio interno, será la única distribución verdadera de presiones que es posible.

Porque si se pudieran encontrar dos distribuciones de este tipo tomando diferentes distribuciones imaginarias de pares de fuentes y sumideros dentro del medio, entonces tomando la diferencia de los dos para una tercera distribución, deberíamos tener la presión de la superficie límite constante en el nuevo sistema y tantas fuentes como sumideros dentro de ella, y por lo tanto, para cualquier fluido que fluya hacia cualquier punto de la superficie, una cantidad igual debe fluir en algún otro punto hacia afuera.

En el medio externo, todas las fuentes se destruyen entre sí, y tenemos un medio infinito sin fuentes que rodean el medio interno. La presión en el infinito es cero, mientras que en la superficie es constante. Si la presión en la superficie es positiva, el movimiento del fluido debe ser hacia afuera desde cada punto de la superficie; si es negativo, debe fluir hacia la superficie. Pero se ha demostrado que ninguno de estos casos es posible, porque si algún fluido entra en la superficie, debe escapar una cantidad igual y, por lo tanto, la presión en la superficie es cero en el tercer sistema.

Por lo tanto, en el tercer caso, la presión en todos los puntos en el límite del medio interno es cero y no hay fuentes, y por consiguiente, por (16) la presión es cero en todas partes.

La presión en la superficie límite del medio interno también es cero, y no hay resistencia, por lo tanto, es cero en todo el medio; pero, en el tercer caso, la presión es la diferencia de presiones en los dos casos dados, por lo tanto, estos son iguales, y solo hay una distribución de presión que es posible, es decir, que se debe a la distribución imaginaria de fuentes y sumideros.

(25) Cuando en el medio interno la resistencia es infinita, no puede haber paso de fluido a través de ella o dentro de ella. Por lo tanto, la superficie delimitada puede considerarse como impermeable al fluido, y los tubos de movimiento de fluido correrán a lo largo de ella sin cortarla.

Si al asumir cualquier distribución arbitraria de fuentes dentro de la superficie además de las fuentes dadas en el medio externo, y al calcular las presiones y velocidades resultantes como en el caso de un medio uniforme, podemos cumplir la condición de que no haya velocidad en la superficie y el sistema de presiones en el medio externo será el verdadero. Puesto que ningún fluido pasa a través de la superficie, los tubos en el interior son independientes de los que están fuera y pueden retirarse sin alterar el movimiento externo.

(26) Si la extensión del medio interno es pequeña, y si la diferencia de resistencia en los dos medios también es pequeña, entonces la posición de los tubos de la unidad no se verá muy alterada por lo que ocurriría si el medio externo llenase el espacio completo.

Sobre la base de esta suposición podemos calcular fácilmente el tipo de alteración que producirá la introducción del medio interno; porque dondequiera que un tubo unitario entre en la superficie debemos concebir una fuente que produzca fluido a una velocidad $(k' - k)/k$, y donde un tubo lo deje debemos colocar un líquido que aniquila el sumidero a la velocidad $(k' - k)/k$, luego calculando las presiones sobre la suposición de que la resistencia en ambos medios es k, lo mismo que en el medio externo, obtendremos la verdadera distribución de presiones muy aproximadamente, y podemos obtener un mejor resultado repitiendo el proceso en el sistema de las presiones así obtenidas.

(27) Si en lugar de un cambio abrupto de un coeficiente de resistencia a otro tomamos un caso en el que la resistencia varía continuamente de un punto a otro, podemos tratar el medio como si estuviera compuesto de bandas delgadas, cada uno de los cuales tiene una resistencia uniforme. Suponiendo apropiadamente una distribución de las fuentes sobre las superficies de separación de las capas, podemos tratar el caso como si la resistencia fuera igual a la unidad, como en (23). Las fuentes se distribuirán de forma continua a lo largo de todo el medio y serán positivas siempre que el movimiento se realice desde lugares de menor a mayor resistencia y negativos cuando estén en dirección contraria.

(28) Hasta ahora hemos supuesto que la resistencia en un punto dado del medio es la misma en cualquier dirección en que se produzca el movimiento del fluido; pero podemos concebir un caso en el que la resistencia sea diferente en diferentes direcciones. En tales casos, las líneas de movimiento no serán, en general, perpendiculares a las superficies de igual presión. Si a, b, c son las componentes de la velocidad en cualquier punto, y α, β, γ las componentes de la resistencia en el mismo punto, estas cantidades estarán conectadas por el siguiente sistema de ecuaciones lineales, que se puede llamar “'ecuaciones de conducción” y se hará referencia a ese nombre.

$$a = P_1\alpha + Q_3\beta + R_2\gamma,$$

$$b = P_2\beta + Q_1\gamma + R_3\alpha$$

$$c = P_3\gamma + Q_2\alpha + R_1\beta.$$

En estas ecuaciones hay nueve coeficientes de conductividad independientes. Para simplificar las ecuaciones, hagamos

$$Q_1 + R_1 = 2S_1 Q_1 - R_1 = 2lT, \quad \text{etc.}$$

donde $$4T^2 = (Q_1 - R_1)^2 + (Q_2 - R_2)^2 (Q_3 - R_3)^2,$$

Y que l, m, n sean los cosenos directores respecto a una cierta línea fija en el espacio.

La ecuación se podrá escribir

$$a = P_1\alpha + S_3\beta + S_2\gamma + (n\beta - m\gamma)T,$$
$$b = P_2\beta + S_1\gamma + S_3\alpha + (l\gamma - n\alpha)T,$$
$$c = P_3\gamma + S_2\alpha + S_1\beta + (m\alpha - l\beta)T.$$

Mediante una transformación ordinaria de coordenadas podemos eliminar los coeficientes indicados con S, y la ecuación se transforma en

$$a = P'_1\alpha + (n'\beta - m'\gamma)T,$$
$$b = P'_2\beta + (l'\gamma - n'\alpha)T,$$
$$c = P'_3\gamma + (m'\alpha - l'\beta)T.$$

donde l', m', n' son los cosenos directores respecto a una línea fija referida a un nuevo sistema de ejes. Si hacemos

$$\alpha = \frac{dp}{dx}\ ; \beta = \frac{dp}{dy}; \gamma = \frac{dp}{dz}$$

la ecuación de continuidad

$$\frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} = 0$$

Se vuelve

$$P'_1 \frac{d^2 p}{dx^2} + P'_2 \frac{d^2 p}{dy^2} + P'_3 \frac{d^2 p}{dz^2} = 0$$

Por lo tanto, podemos hacer

$$x=\sqrt{P'_1}\,\xi\,,\quad y=\sqrt{P'_2}\,\eta\,,\quad z=\sqrt{P'_3}\,\zeta$$

Entonces

$$\frac{d^2p}{d\xi^2}+\frac{d^2p}{d\eta^2}+\frac{d^2p}{d\zeta^2}=0$$

que es la ecuación ordinaria de conducción.

Por lo tanto, parece que la distribución de presiones no se ve alterada por la existencia del coeficiente T. El profesor Thomson ha mostrado cómo concebir una sustancia en la que este coeficiente determina una propiedad que hace referencia a un eje que, a diferencia de los ejes de P_1, P_2, P_3 es dipolar.

Para mayor información sobre ecuaciones de conducción, ver Professor Stokes "On the Conduction of Heat in Cristal." (*Cambridge and Dublin Math. Journ.*), y Professor Thomson:"On the Dynamical Theory of Heat", Parte V. (*Transactions of Royal Society of Edinburgh*, Vol xxi. Parte i.).

Es evidente que todo lo que se ha probado en (14), (15), (16), (17) con respecto a la superposición de diferentes distribuciones de presión, y que solo hay una distribución de presiones correspondiente a una distribución dada de fuentes, será cierto también en los casos en que la resistencia varía de un punto a otro, y cuando la resistencia en el mismo punto es diferente en diferentes direcciones. Porque si examinamos la prueba, la encontraremos aplicable a tales casos, así como a la de un medio uniforme.

29) Ahora estamos preparados para probar ciertas proposiciones generales que son verdaderas en el caso más general de un medio cuya resistencia es diferente en diferentes direcciones y varía de un punto a otro.

Cuando se conoce la distribución de presiones, mediante el método de (28) podemos construir las superficies de igual presión, los tubos de movimiento de fluido, las fuentes y los sumideros. Es evidente que dado que en cada celda en la que un tubo unitario está dividido por las superficies de igual presión, la unidad de fluido pasa de la presión p a la presión (p– 1) en la unidad de tiempo y el trabajo que se realiza mediante el fluido en cada célula para superar la resistencia es la unidad.

La cantidad de celdas en cada tubo unitario está determinada por el número de superficies de igual presión a través de las cuales pasa. Si la presión al principio del tubo es p y al final p', entonces el número de celdas será $p – p'$. Ahora bien, si el tubo se hubiera extendido desde la fuente a un lugar donde la presión es cero, el número de células habría sido p, y si el tubo hubiera venido desde el sumidero a cero, el número habría sido p' y el número verdadero es la diferencia de estos.

Por lo tanto, si encontramos la presión en una fuente S de la cual los tubos S proceden, es p, Sp será el número de celdas debido a la fuente S; pero si S' de los tubos terminan en un sumidero a una presión p', entonces debemos descontar las células $S'p'$ del número previamente obtenido. Ahora, si denotamos la fuente de los S tubos mediante S, el sumidero de los S' tubos puede escribirse – S'; los sumideros siempre se consideran negativos, y la expresión general para el número de celdas en el sistema será $\Sigma\ (Sp)$.

(30) Puede llegarse a la misma conclusión observando que, en cada celda, se realiza la unidad de trabajo. Si en cada fuente S, son expulsadas S unidades de fluido contra una presión p, de modo que el trabajo realizado por el fluido en la superación de la resistencia sea Sp y en cada sumidero en el que terminan los tubos S', las S' unidades de fluido se hunden bajo la presión p'; el trabajo hecho sobre el fluido por la presión será, por lo tanto, $S'p'$. Todo el trabajo hecho por el fluido podrá expresarse por

$$W = \sum Sp - \sum S'\, p'$$

O, en forma más concisa, considerando a los sumideros como fuentes negativas

$$W = \sum (Sp).$$

(31) Supongamos que S representa la tasa de producción de una fuente en cualquier medio, y sea p la presión en cualquier punto dado debido a esa fuente. Entonces, si superponemos en esta, otra fuente igual, cada presión se duplicará, y así, por superposición sucesiva, encontraremos que una fuente nS produciría una presión np, o más generalmente, la presión en cualquier punto debido a una fuente dada varía según la tasa de producción de la fuente. Esto puede ser expresado por la ecuación

$$p = RS,$$

donde R es un coeficiente que depende de la naturaleza del medio y de la posición de la fuente en un punto dado. En un medio uniforme cuya resistencia se mide por k

$$p = \frac{kS}{4\pi r} \therefore R = \frac{k}{4\pi r}$$

R se puede llamar coeficiente de resistencia del medio entre la fuente y el punto dado. Al combinar cualquier cantidad de fuentes, generalmente tendremos

$$p = \Sigma(RS),$$

(32) En un medio uniforme, la presión debida a una fuente S, será

$$p = \frac{k}{4\pi}\frac{S}{r}$$

Con otra fuente S' a la distancia r tendremos

$$S'\,p = \frac{k}{4\pi}\frac{SS'}{r} = Sp'$$

sea p' la presión en S debido a S'. Si, por lo tanto, hay dos sistemas de fuentes $\Sigma(S)$ y $\Sigma(S')$, y si las presiones debidas a la primera son p y a la segunda p', entonces

$$\Sigma(S'p) = \Sigma(Sp').$$

Para cada término $S'p$ habrá un término Sp' igual a él.

(33) Suponga que en un medio uniforme el movimiento del fluido es en todas partes paralelo a un plano, entonces las superficies de igual presión serán perpendiculares a este plano. Si tomamos dos planos paralelos a una distancia igual a k uno del otro, podemos dividir el espacio entre estos planos en tubos unitarios por medio de superficies cilíndricas perpendiculares a los planos, y estos junto con las superficies de igual presión dividirán el espacio en celdas cuya longitud es igual a la anchura. Porque si h es la distancia entre superficies consecutivas de igual presión y s la sección del tubo de la unidad, tenemos por (13) $s = kh$.

Pero s es el producto de la amplitud y la profundidad; como la profundidad es k, por lo tanto, la anchura es h e igual a la longitud.

Si dos sistemas de curvas planas se cortan entre sí en ángulos rectos para dividir el plano en pequeñas áreas de las que la longitud y la anchura son iguales, entonces tomando otro plano a la distancia k de la primera y erigiendo superficies cilíndricas en las curvas del plano como bases, se formará un sistema de celdas que satisfará las condiciones ya sea que supongamos que el fluido corra a lo largo del primer conjunto de líneas de corte o del segundo*.

Aplicación de la idea de líneas de fuerza

Ahora debo mostrar cómo la idea de las líneas de movimiento de fluidos descritas anteriormente puede modificarse para que sea aplicable a las ciencias de la electricidad estática, el magnetismo permanente, el magnetismo de inducción y las corrientes galvánicas uniformes, reservando las leyes del electromagnetismo para una consideración especial.

Asumiré que los fenómenos de la electricidad estática ya han sido explicados por la acción mutua de dos tipos opuestos de materia. Si consideramos a uno de estos como electricidad positiva y el otro como negativa, entonces dos partículas de electricidad interactúan con una fuerza que se mide por el producto de las masas de las partículas divididas por el cuadrado de su distancia.

*Ver Cambridge and Dublin Mathematical Journal, Vol. iii, p. 286.

Ahora encontramos en (18) que la velocidad de nuestro fluido imaginario debido a una fuente S a una distancia r varía inversamente a r^2. Veamos cuál será el efecto de sustituir esa fuente por cada partícula de electricidad positiva. La velocidad debida a cada fuente sería proporcional a la atracción debida a la partícula correspondiente, y la velocidad resultante debida a todas las fuentes sería proporcional a la atracción resultante de todas las partículas. Ahora podemos encontrar la presión resultante en cualquier punto agregando las presiones debidas a las fuentes dadas, y por lo tanto podemos encontrar la velocidad resultante en una dirección dada a partir de la tasa de disminución de presión en esa dirección, y esto será proporcional a la atracción resultante de las partículas resueltas en esa dirección.

Dado que la atracción resultante en el problema eléctrico es proporcional a la disminución de presión en el problema imaginario, y dado que podemos seleccionar cualquier valor para las constantes en el problema imaginario, podemos suponer que la atracción resultante en una cierta dirección x es numéricamente igual a la disminución de la presión en esa dirección, o

$$X = -\frac{dp}{dx}$$

Mediante esta suposición encontramos que si V es el potencial

$$dV = Xdx + Ydy + Zdz = -dp,$$

y, como a una distancia infinita $V = 0$ y $p = 0$, $V = -p$

En el problema eléctrico tenemos

$$V = -\sum\left(\frac{dm}{r}\right)$$

En el fluido

$$p = \sum\left(\frac{k}{4\pi}\frac{S}{r}\right)$$

$$\therefore\ S = \frac{4\pi}{k}dm$$

Si se supone que k es muy grande, la cantidad de fluido producido por cada fuente para mantener las presiones será muy pequeña.

El potencial de cualquier sistema de electricidad en sí mismo será

$$\sum(pdm) = \frac{k}{4\pi},\quad \sum(pS) = \frac{k}{4\pi}W$$

Si Σ (dm), Σ (dm') son dos sistemas de partículas eléctricas y p, p' los potenciales debidos, respectivamente, a ellas, entonces por (32)

$$\sum(pdm') = \frac{k}{4\pi}\sum(pS') = \frac{k}{4\pi}\sum(p'S) = \sum(p'dm)$$

o que el potencial del primer sistema sobre el segundo es igual al potencial del segundo sistema sobre el primero.

Si la conducción del dieléctrico es perfecta o casi igual para las pequeñas cantidades de electricidad con las que tratamos, entonces tenemos el caso de (24). El dieléctrico se considera entonces como un conductor, su superficie es una superficie de igual potencial y la atracción resultante cerca de la superficie misma es perpendicular a ella.

Teoría de los imanes permanentes

Un imán se concibe como formado por partículas elementales magnetizadas, cada una de las cuales tiene sus propios polos norte y sur, cuya acción sobre otros polos norte y sur se rige por leyes matemáticamente idénticas a las de la electricidad. De ahí que la misma aplicación de la idea de líneas de fuerza se pueda hacer a este sujeto, y la misma analogía del movimiento del fluido se puede emplear para ilustrarlo.

Pero puede ser útil examinar la forma en que la polaridad de los elementos de un imán puede ser representada por las celdas unitarias en el movimiento del fluido. En cada celda unitaria, la unidad de fluido entra por una cara y fluye por la cara opuesta, de modo que la primera cara se convierte en un sumidero unidad y la segunda en una fuente unidad con respecto al resto del fluido. Por lo tanto, se puede comparar con un imán elemental, con una cantidad igual de materia magnética norte y sur distribuida en dos de sus caras. Si ahora consideramos que la celda forma parte de un sistema, el fluido que fluye de una celda fluirá hacia la siguiente, y así sucesivamente, de modo que la fuente se transferirá desde el extremo de la celda hasta el extremo del tubo unidad. Si todos los tubos de la unidad comienzan y terminan en la superficie límite, las fuentes y sumideros se distribuirán por completo en esa superficie, y en el caso de un imán que tiene lo que se ha denominado distribución solenoide o tubular de magnetismo, todo el imaginario magnético la materia estará en la superficie[*].

Teoría de la inducción paramagnética y diamagnética

Faraday[†] ha demostrado que los efectos de los cuerpos paramagnéticos y diamagnéticos en el campo magnético se pueden explicar suponiendo que los cuerpos paramagnéticos conducen mejor

[*]Ver Professor Thomson "On the Mathematical Theory of Magnetism", Capítulos iii y v. *Phil. Trans*. 1851.
[†]Experimental Researches (3292).

las líneas de fuerza y los cuerpos diamagnéticos, peor que el medio circundante. Al referirse a (23) y (26), y al suponer que las fuentes representan la materia magnética del norte, y los sumideros la materia magnética del sur, entonces si un cuerpo paramagnético se encuentra cerca de un polo norte, las líneas de fuerza al entrar producirán materia magnética sur, y al dejarlo producirán una cantidad igual de materia magnética norte. Como, en general, las cantidades de materia magnética son iguales, pero la materia del sur es más cercana al polo norte, el resultado será la atracción. Si, por otro lado, el cuerpo es diamagnético, o un conductor peor de líneas de fuerza que el medio circundante, habrá una distribución imaginaria de la materia magnética del norte donde las líneas pasan al peor conductor, y del sur donde se distribuyen de un modo que, en general, producen repulsión.

"De la consideración de que el potencial de todo el sistema es proporcional a la cantidad de trabajo realizado por el fluido en la superación de la resistencia, podemos obtener una ley más general. La introducción de un segundo medio aumenta o disminuye el trabajo realizado según que la resistencia sea mayor o menor que la del primer medio. La cantidad de este aumento o disminución variará según el cuadrado de la velocidad del fluido.

Ahora, según la teoría de los potenciales, la fuerza de movimiento en cualquier dirección se mide por la velocidad de disminución del potencial del sistema al pasar en esa dirección. Por lo tanto, cuando k', la resistencia dentro del segundo medio, es mayor que k, la resistencia en el medio circundante, hay una fuerza que se ejerce desde lugares donde la fuerza resultante v es mayor a donde es menor, de modo que un cuerpo diamagnético se mueve de mayor a menor valor de la fuerza resultante.[‡]

En cuerpos paramagnéticos k' es menor que k, de modo que la fuerza ahora está dirigida de puntos de menor a puntos de mayor fuerza magnética resultante. Dado que estos resultados dependen únicamente de los valores relativos de k y k', es evidente que cambiando el medio circundante, el comportamiento de un cuerpo puede cambiarse de paramagnético a diamagnético a voluntad.

Es evidente que deberíamos obtener los mismos resultados matemáticos si hubiéramos supuesto que la fuerza magnética tiene un poder de excitar una polaridad en cuerpos que está en la misma dirección que las líneas en cuerpos paramagnéticos, y en la dirección inversa en cuerpos diamagnéticos[*]. De hecho, todavía no hemos llegado a ningún hecho que nos lleve a elegir a cualquiera de estas tres teorías, la de las líneas de fuerza, la de la materia magnética imaginaria y la de la polaridad inducida. Como la teoría de las líneas de fuerza admite la afirmación más precisa y, al mismo tiempo, menos teórica, le permitiremos representar el presente.

Teoría de la inducción magnetocristalina.

[‡]Experimental Researches (2797), (2798).Ver Thomson, Cambridge and Dublin Mathematical Journal. Mayo 1847.

[*]Experimental Researches (2429), (3320).Ver Weber, Poggendorf, LXXXVII, p. 145; Prof. Tyndall, Phil. Trans, 1856, p. 237.

La teoría de Faraday[**] con respecto al comportamiento de los cristales en el campo magnético se puede establecer así. En ciertos cristales y otras sustancias, las líneas de fuerza magnética se dirigen con diferentes facilidades en diferentes direcciones. Un cuerpo cuando está suspendido en un campo magnético uniforme girará o tenderá a adoptar una posición tal, que las líneas de fuerza pasarán a través de él con la menor resistencia. No es difícil, mediante de los principios en (28) expresar las leyes que rigen para de este tipo de acción, e incluso reducirlas, en ciertos casos, a fórmulas numéricas. Los principios de la polaridad inducida y de la materia magnética imaginaria son aquí de poco uso; pero la teoría de las líneas de fuerza es capaz de la adaptación más perfecta a esta clase de fenómenos.

Teoría de la conducción de la corriente eléctrica

Es en el cálculo de las leyes de las corrientes eléctricas constantes que la teoría del movimiento fluido que hemos establecido admite la aplicación más directa. Además de las investigaciones de Ohm sobre este tema, tenemos las del Sr. Kirchhoff, *Ann. de Chim*. XLI. 496, y del Sr. Quincke, XLVII. 203, sobre la Conducción de Corrientes Eléctricas en Placas. De acuerdo con las opiniones recibidas, aquí tenemos una corriente de fluido que se mueve uniformemente en los circuitos conductores, que se oponen a una resistencia a la corriente que debe superarse mediante la aplicación de una fuerza electro-motriz en alguna parte del circuito. Debido a esta resistencia al movimiento del fluido, la presión debe ser diferente en diferentes puntos del circuito. Esta presión, que comúnmente se llama tensión eléctrica, se encuentra físicamente idéntica al potencial en electricidad estática, y así tenemos los medios para conectar los dos conjuntos de fenómenos.

Si supiéramos qué cantidad de electricidad, medida estáticamente, pasa a lo largo de esa corriente que asumimos como nuestra unidad de corriente, entonces la conexión entre la electricidad debida a la tensión y la electricidad actual se completaría[***]. Hasta ahora, esto se ha hecho sólo aproximadamente, pero sabemos lo suficiente como para estar seguros de que los poderes conductores de diferentes sustancias difieren solo en sus grados y que la diferencia entre el vidrio y el metal es que la resistencia es una cantidad grande, pero finita, en vidrio, y una cantidad muy pequeña, pero finita, en metal. Así, la analogía entre la electricidad estática y el movimiento del fluido resulta más perfecta de lo que podríamos haber supuesto, ya que allí la inducción continúa por conducción igual que en la electricidad actual, pero la cantidad conducida es insensible debido a la gran resistencia de los dieléctricos[††].

Sobre las fuerzas electromotrices

[**] *Exp. Res*. (2836), etc.
[***] Ver *Exp. Res*. (371).
[††] *Exp. Res*. Vol iii. p. 513.

Cuando existe una corriente uniforme en un circuito cerrado, es evidente que algunas otras fuerzas deben actuar sobre el fluido además de las presiones. Porque si la corriente se debiera a la diferencia de presiones, fluiría desde el punto de mayor presión en ambas direcciones hasta el punto de menor presión, mientras que en realidad circula en una dirección constantemente. Por lo tanto, debemos admitir la existencia de ciertas fuerzas capaces de mantener una corriente constante en un circuito cerrado. De estas, la más notable es la producida por la acción química. Una célula de una batería voltaica, o más bien la superficie de separación del fluido de la celda y el zinc, es el asiento de una fuerza electromotriz que puede mantener una corriente en oposición a la resistencia del circuito. Si adoptamos la convención usual al hablar de corrientes eléctricas, la corriente positiva es la que va desde el fluido a través del platino, el circuito conductor y el zinc y regresa al fluido nuevamente. Si la fuerza electromotriz actúa solo en la superficie de separación del fluido y el zinc, entonces la tensión de la electricidad en el fluido debe ser mayor que la del zinc en una cantidad que depende de la naturaleza y la longitud del circuito y de la potencia de la corriente en el conductor.

Para mantener esta diferencia de presión, debe existir una fuerza electromotriz cuya intensidad se mide por esa diferencia de presión. Si F es la fuerza electromotriz, I la cantidad de la corriente o el número de unidades eléctricas entregadas en una unidad de tiempo, y K una cantidad que depende de la longitud y la resistencia del circuito conductor, entonces

$$F = IK = p - p'$$

Donde *p* es la tensión eléctrica en el fluido y *p'* en el cinc.

Si el circuito se corta en algún punto, como no hay corriente, la tensión de la parte que permanece adherida al platino será *p*, y la del otro será *p*', *p* – *p*' o *F* brinda una medida de la intensidad de la corriente. Esta distinción de cantidad e intensidad es muy útil[*], pero debe entenderse claramente que significa nada más que esto: – La cantidad de una corriente es la cantidad de electricidad que transmite en una unidad de tiempo, y se mide por *I* el número de unidades de corriente que contiene. La intensidad de una corriente es su poder de superar la resistencia, y se mide mediante *F* o *IK*, donde *K* es la resistencia de todo el circuito.

La misma idea de cantidad e intensidad se puede aplicar al caso de magnetismo[†]. La cantidad de magnetización en cualquier sección de un cuerpo magnético se mide por el número de líneas de fuerzas magnéticas que lo atraviesan. La intensidad de la magnetización en la sección depende del poder de resistencia de la sección, así como del número de líneas que la atraviesan. Si h es el poder de resistencia del material, y S el área de la sección, e I el número de líneas de fuerza que pasan a través de él, entonces toda la intensidad a lo largo de la sección

$$= F = I\,\frac{k}{s}$$

[*] *Exp. Res*. Vol. iii. p. 519.

[†] *Exp. Res.* (2870) (3293)

Cuando la magnetización se produce por la influencia de otros imanes solamente, podemos poner p para la tensión magnética en cualquier punto, luego para todo el solenoide magnético

$$F = I\int \frac{k}{s}dx = IK = p - p'$$

Cuando un circuito magnético solenoidal retorna a sí mismo, la magnetización no depende sólo de la diferencia de tensiones, sino de alguna fuerza de magnetización cuya intensidad es *F*.

Si *i* es la cantidad de magnetización en cualquier punto, o el número de líneas de fuerza que pasan a través de la unidad de área en la sección del solenoide, entonces la cantidad total de magnetización en el circuito es el número de líneas que pasan a través de cualquier sección, $I = \Sigma idydz$, donde *dydz* es el elemento de la sección, y la suma se realiza en toda la sección.

La intensidad de la magnetización en cualquier punto, o la fuerza requerida para mantener la magnetización, se mide por $ki = f$, y la intensidad total de la magnetización en el circuito se mide por la suma de las intensidades locales en todo el circuito,

$$F = \Sigma(fdx),$$

donde *dx* es el elemento de longitud en el circuito y la suma se extiende alrededor de todo el circuito.

En el mismo circuito siempre tenemos $F = IK$, donde *K* es la resistencia total del circuito y depende de su forma y de la materia de la que está compuesto.

Sobre la acción a distancia de circuitos cerrados

Las leyes matemáticas de las atracciones y repulsiones de los conductores han sido investigadas hábilmente por Ampère, y sus resultados han resistido la prueba de experimentos posteriores.

Partiendo de la única suposición de que la acción de un elemento de una corriente sobre un elemento de otra corriente es una fuerza atractiva o repulsiva que actúa en la dirección de la línea que une los dos elementos, Ampère ha determinado mediante los experimentos más simples la forma matemática del ley de atracción, y ha puesto esta ley en varias formas más elegantes y útiles. Sin embargo, debemos recordar que no se han realizado experimentos sobre estos elementos de las corrientes, excepto bajo la forma de corrientes cerradas, ya sea en conductores rígidos o en fluidos, y que las leyes de las corrientes cerradas solo pueden deducirse de tales experimentos. Por lo tanto, si las fórmulas de Ampere aplicadas a las corrientes cerradas dan resultados verdaderos, su verdad no está probada para los elementos de las corrientes a menos que supongamos que la acción entre dos elementos debe estar a lo largo de la línea que los une. Aunque esta suposición es más justificable y filosófica en el estado actual de la ciencia, será más conducente a la libertad de investigación si nos esforzamos por prescindir de ella, y suponemos a las leyes de las corrientes cerradas como el último dato del experimento.

Ampère ha demostrado que cuando las corrientes se combinan de acuerdo con la ley del paralelogramo de fuerzas, la fuerza debida a la corriente resultante es la resultante de las fuerzas debidas a las corrientes componentes, y que las corrientes iguales y opuestas generan fuerzas iguales y opuestas, y cuando se combinan se neutralizan entre sí.

También ha demostrado que un circuito cerrado de cualquier forma no tiene tendencia a hacer girar circularmente a un conductor móvil alrededor de un eje fijo a través del centro del círculo, perpendicular a su plano y que, por lo tanto, las fuerzas en el caso de un circuito cerrado rinden $Xdx + Ydy + Zdz$ un diferencial completo.

Finalmente, ha demostrado que si hay dos sistemas de circuitos similares y situados de manera similar, la cantidad de corriente eléctrica en los conductores correspondientes es la misma, las fuerzas resultantes son iguales, cualesquiera que sean las dimensiones absolutas de los sistemas, lo que prueba que las fuerzas son, cæteris paribus, inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia.

De estos resultados se deduce que la acción mutua de dos corrientes cerradas, cuyas áreas son muy pequeñas, es la misma que la de dos barras magnéticas elementales magnetizadas perpendicularmente al plano de las corrientes.

La dirección de magnetización del imán equivalente puede predecirse recordando que una corriente que viaja alrededor de la Tierra de este a oeste, como parece hacer el Sol, sería equivalente a la magnetización que posee la Tierra, y por lo tanto en la dirección contraria a la de una aguja magnética cuando apunta libremente.

Si, en una superficie, existe una cantidad de corrientes unitarias cerradas en contacto, entonces en todos los puntos en que dos corrientes están en contacto habrá dos corrientes iguales y opuestas que no producirán ningún efecto, pero a lo largo del límite de la superficie ocupada por la las corrientes habrán una corriente residual no neutralizada por ninguna otra; y por lo tanto, el resultado será el mismo que el de una sola unidad de corriente alrededor del límite de todas las corrientes.

A partir de esto, parece que las atracciones externas de una capa uniformemente magnetizada perpendicular a su superficie son las mismas que las debidas a una corriente alrededor de su borde, ya que cada una de las corrientes elementales en el primer caso tiene el mismo efecto que un elemento magnético de la capa.

Si examinamos las líneas de fuerza magnética producidas por una corriente cerrada, veremos que forman curvas cerradas que pasan alrededor de la corriente y la abarcan, y que la intensidad total de la fuerza de magnetización a lo largo de la línea cerrada de fuerza depende, solamente, de la cantidad de la corriente eléctrica. El número de líneas unitarias[*] de fuerza magnética debido a una

[*]*Exp. Res*. (3122). Ver Art. (6) en este trabajo

corriente cerrada depende de la forma y de la cantidad de la corriente, pero el número de celdas unitarias[†] en cada línea de fuerza completa se mide simplemente por el número de corrientes unitarias que la abrazan. Las celdas unitarias en este caso son porciones de espacio en las cuales la unidad de la cantidad magnética es producida por la unidad de la fuerza de magnetización. Por lo tanto, la longitud de una celda es inversamente proporcional a la intensidad de la fuerza de magnetización, y su sección es inversamente proporcional a la cantidad de inducción magnética en ese punto.

Por lo tanto, el número total de celdas debidas a una corriente dada es proporcional a la intensidad de la corriente multiplicada por el número de líneas de fuerza que lo atraviesan. Si por algún cambio en la forma de los conductores se puede aumentar el número de celdas, habrá una fuerza que tiende a producir ese cambio, de modo que siempre hay una fuerza que impulsa a un conductor transversal a las líneas de fuerza magnética, a provocar que más líneas de fuerza pasen a través del circuito cerrado del cual el conductor forma parte.

El número de celdas debido a dos corrientes dadas se obtiene multiplicando el número de líneas de acción magnética inductiva que pasan a través de cada una por la cantidad de las corrientes, respectivamente. Ahora por (9) el número de líneas que pasan por la primera corriente es la suma de sus propias líneas y las de la segunda corriente que pasarían por la primera si la segunda corriente estuviera en acción. Por lo tanto, el número total de celdas aumentará con cualquier movimiento que provoque el paso de más líneas de fuerza a través de cualquiera de los circuitos y, por lo tanto, la fuerza resultante tenderá a producir dicho movimiento y el trabajo realizado por esta fuerza durante el movimiento, será medido por la cantidad de celdas nuevas producidas Todas las acciones de los conductores cerrados entre sí pueden deducirse de este principio.

Sobre las corrientes eléctricas producidas por inducción

Faraday ha demostrado[‡] que cuando un conductor se mueve transversalmente a las líneas de fuerza magnética, surge una fuerza electromotriz en el conductor, que tiende a producir una corriente en él. Si el conductor está cerrado, hay una corriente continua, si está abierto, el resultado es una tensión. Si un conductor cerrado se mueve transversalmente a las líneas de inducción magnética, entonces, si el número de líneas que lo atraviesan no cambia durante el movimiento, las fuerzas electromotrices en el circuito estarán en equilibrio, y no habrá corriente. Por lo tanto, las fuerzas electromotrices dependen del número de líneas que el conductor corta durante el movimiento. Si el movimiento es tal que un mayor número de líneas pasa a través del circuito formado por el conductor después que antes del movimiento, entonces la fuerza electromotriz se medirá por el aumento del número de líneas, y generará una corriente en sentido inverso al que habrían producido las líneas adicionales. Cuando aumenta el número de líneas de acción magnética inductiva a través del circuito, la corriente inducida tenderá a disminuir el número de líneas, y cuando el número disminuye, la corriente inducida tenderá a aumentarlas.

[††] Art. (13).
[‡] *Exp. Res*. (3077), etc.

Que esta es la verdadera expresión de la ley de las corrientes inducidas se desprende del hecho de que, de cualquier manera que se incremente el número de líneas de inducción magnética que pasan por el circuito, el efecto electro-motriz es el mismo, independientemente de si el aumento se produce o no. por el movimiento del propio conductor, o de otros conductores, o de imanes, o por el cambio de intensidad de otras corrientes, o por la magnetización o desmagnetización de cuerpos magnéticos vecinos o ,por último, por el cambio de intensidad de la corriente misma.

En todos estos casos, la fuerza electromotriz depende del cambio en el número de líneas de acción magnética inductiva que pasan por el circuito.[*]

Es natural suponer que una fuerza de este tipo, que depende de un cambio en el número de líneas, se debe a un cambio de estado que se mide por el número de estas líneas. Se puede suponer que un conductor cerrado en un campo magnético se encuentra en un cierto estado que surge de la acción magnética. Mientras este estado permanezca invariable, no se produce ningún efecto, pero, cuando el estado cambia, surgen fuerzas electromotrices, cuya intensidad y dirección dependen de cambio de estado. No puedo hacer nada mejor que citar un pasaje de la primera serie de Investigaciones Experimentales de Faraday, Arte. (60).

"Si bien el cable está sujeto a inducción electrovoltaica o magno-eléctrica, parece estar en un estado peculiar, ya que resiste la formación de una corriente eléctrica en él, mientras que, si en su condición común, dicha corriente se produjera, y cuando cesa su influencia tiene el poder de originar una corriente, una potencia que el cable no posee en circunstancias normales. Esta condición eléctrica de la materia no ha sido reconocida hasta ahora, pero probablemente ejerce una influencia muy importante en muchos, si no la mayoría, de los fenómenos producidos por las corrientes eléctricas. Por razones que aparecerán inmediatamente (7), después de haber aconsejado a varios amigos eruditos, me he aventurado a designarlo como el estado electrotónico". Al descubrir que todos los fenómenos podrían explicarse de otra manera sin referencia al estado electrotónico, Faraday en

---

[*] Las fuerzas electromagnéticas que tienden a producir el movimiento en el material conductor deben distinguirse cuidadosamente de las fuerzas electromotrices, que tienden a producir corrientes eléctricas.

Sea una corriente eléctrica que pasa a través de una masa de un metal de cualquier forma. La distribución de las corrientes dentro del metal estará determinada por las leyes de conducción. Ahora hagas pasar una corriente eléctrica constante a través de otro conductor cerca del primero. Si las dos corrientes están en la misma dirección, los dos conductores se atraerán y se acercarán si no se los mantiene en sus posiciones. Pero a pesar de que los materiales de los conductores son atraídos, las corrientes (que son libres de elegir cualquier camino dentro del metal) no alterarán su distribución original, ni se inclinarán entre sí. Porque, dado que no se produce ningún cambio en el sistema, no habrá fuerzas electromotrices para modificar la distribución original de las corrientes.

En este caso, tenemos fuerzas electromagnéticas que actúan sobre el material del conductor, sin que ninguna fuerza electromotriz tienda a modificar la corriente que transporta.

Tomemos como otro ejemplo el caso de un conductor lineal, que no forma un circuito cerrado, y hagamos que atraviese las líneas de fuerza magnética, ya sea por su propio movimiento o por cambios en el campo magnético. Una fuerza electromotriz actuará en la dirección del conductor y, como no puede producir una corriente, porque no hay circuito, producirá tensión eléctrica en las extremidades.

No habrá atracción electromagnética en el conductor del material, ya que esta atracción depende de la existencia de la corriente en su interior, y esto se evita porque el circuito no es cerrado.

Aquí tenemos el caso opuesto de una fuerza electromotriz que actúa sobre la electricidad en el conductor, pero no tiene atracción sobre sus partículas materiales.

su segunda serie lo rechazó como innecesario; pero en sus investigaciones recientes[**] parece que todavía piensa que puede haber alguna verdad física en su conjetura sobre este nuevo estado de los cuerpos.

La conjetura de un filósofo tan familiarizado con la naturaleza a veces puede estar más preñado de la verdad que la ley experimental mejor establecida descubierta por los investigadores empíricos, y aunque no está obligado a admitirla como una verdad física, podemos aceptarla como una nueva idea por la cual las concepciones matemáticas pueden hacerse más claras.

En este esquema de las teorías eléctricas de Faraday, tal como aparecen desde un punto de vista matemático, no puedo hacer más que simplemente exponer los métodos matemáticos mediante los cuales creo que los fenómenos eléctricos pueden comprenderse mejor y reducirse al cálculo, y mi objetivo ha sido presentar las ideas matemáticas a la mente en una forma encarnada, como sistemas de líneas o superficies, y no como meros símbolos, que no transmiten las mismas ideas, ni se adaptan fácilmente a los fenómenos que se van a explicar. La idea del estado electrotónico, sin embargo, aún no se me ha presentado de tal forma que su naturaleza y propiedades puedan explicarse claramente sin referencia a meros símbolos, y por lo tanto propongo en la siguiente investigación usar símbolos libremente y dar por sentado las operaciones matemáticas ordinarias.

Mediante un estudio cuidadoso de las leyes de los sólidos elásticos y de los movimientos de los fluidos viscosos, espero descubrir un método para formar una concepción mecánica de este estado electrotónico adaptado al razonamiento general.[***]

[**](3172) (3269).

[***]VerProf W. Thomson *On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic and Galvanic Forces, Camb. and Dub. Math. Jour*. Enero 1847.

PARTE II

Sobre el estado electrotónico de Faraday

Cuando un conductor se mueve cerca de una corriente de electricidad o de un imán, o cuando se mueve una corriente o un imán cerca del conductor, o se altera su intensidad, entonces una fuerza actúa sobre el conductor y produce tensión eléctrica, o una corriente continua, según el circuito esté abierto o cerrado. Esta corriente se produce solo por los cambios de los fenómenos eléctricos o magnéticos que rodean al conductor, y siempre que estos sean constantes no se observa ningún efecto sobre el conductor. Todavía el conductor está en diferentes estados cuando está cerca de una corriente o imán, y cuando está lejos de su influencia, ya que la eliminación o destrucción de la corriente o el imán ocasiona una corriente, que no habría existido si el imán o la corriente no hubieran estado previamente en acción.

Consideraciones de este tipo llevaron al profesor Faraday a conectar con su descubrimiento de la inducción de corrientes eléctricas la concepción de un estado en el que todos los cuerpos reaccionan por la presencia de imanes y corrientes. Este estado no se manifiesta por ningún fenómeno conocido mientras no se altere, pero cualquier cambio en este estado se indica por una corriente o tendencia hacia una corriente. A este estado le dio el nombre de "Estado Electro-tónico", y aunque después logró explicar los fenómenos que lo sugerían por medio de concepciones menos hipotéticas, en varias ocasiones ha insinuado la probabilidad de que algunos fenómenos puedan ser descubiertos, lo que convertiría al estado electrotónico en un objeto de inducción legítima.

Estas especulaciones, en las cuales Faraday había sido llevado por el estudio de leyes que él había establecido bien y que abandonó sólo por falta de datos experimentales para la prueba directa del estado desconocido, no han sido, creo, objeto de investigación matemática. Quizás se pueda pensar que las determinaciones cuantitativas de los diversos fenómenos no son lo suficientemente rigurosas como para constituir la base de una teoría matemática; sin embargo, Faraday no se contentó con establecer simplemente los resultados numéricos de sus experimentos y dejar que la ley sea descubierta mediante el cálculo. Donde él percibió una ley, la enunció de inmediato, en términos tan inequívocos como los de las matemáticas puras; y si el matemático, al recibir esto como una verdad física, deduce de ella otras leyes capaces de ser probadas experimentalmente, simplemente ha ayudado al físico a organizar sus propias ideas, lo cual es confesivamente un paso necesario en la inducción científica.

Por lo tanto, en la siguiente investigación las leyes establecidas por Faraday serán supuestas como verdaderas, y se demostrará que al seguir sus especulaciones se pueden deducir de ellas otras leyes más generales. Si parece que estas leyes, originalmente concebidas para incluir un conjunto de fenómenos, pueden generalizarse de modo que se extiendan a fenómenos de una clase diferente, estas conexiones matemáticas pueden sugerir a los físicos los medios para establecer conexiones físicas; y, por lo tanto, la mera especulación puede convertirse en una explicación mediante la ciencia experimental.

Sobre la cantidad y la intensidad como propiedades de las corrientes eléctricas

Se encuentra que ciertos efectos de una corriente eléctrica son iguales en cualquier parte del circuito que se estiman. Las cantidades de agua o de cualquier otro electrolito descompuesto en dos secciones diferentes del mismo circuito, siempre se encuentran iguales o equivalentes, por diferentes que sean el material y la forma del circuito en las dos secciones. El efecto magnético de un cable conductor también se encuentra independiente de la forma o material del cable en el mismo circuito. Por lo tanto, hay un efecto eléctrico que es igual en cada sección del circuito. Si concebimos al conductor como el canal a lo largo del cual un fluido se ve obligado a moverse, entonces la cantidad de fluido transmitida por cada sección será la misma, y podemos definir la cantidad de una corriente eléctrica como la cantidad de electricidad que pasa a través de una sección completa de la corriente en unidad de tiempo. Podemos, por el momento, medir la cantidad de electricidad por la cantidad de agua que se descompondría en una unidad de tiempo.

Para expresar matemáticamente las corrientes eléctricas en cualquier conductor, debemos tener una definición, no solo de todo el flujo a través de una sección completa, sino también del flujo en un punto dado en una dirección dada.

Definición: La cantidad de una corriente en un punto dado y en una dirección dada se mide, cuando es uniforme, por la cantidad de electricidad que fluye a través de la unidad de área tomada en ese punto perpendicular a la dirección dada, y cuando es variable por la cantidad que fluiría a través de esta área, suponiendo que el flujo es uniformemente el mismo que en el punto dado.

En la siguiente investigación, la cantidad de corriente eléctrica en el punto (xyz) estimado en las direcciones de los ejes x, y, z, respectivamente, se denotará por a_2, b_2, c_2.

La cantidad de electricidad que fluye en una unidad de tiempo a través del área elemental dS

$$= dS\,(la_2 + mb_2 + nc_2),$$

donde l, m, n son los cosenos directores de la normal a dS. Este flujo de electricidad en cualquier punto de un conductor se debe a las fuerzas electromotrices que actúan en ese punto. Estos pueden ser externos o internos.

Las fuerzas electromotrices externas surgen de los movimientos relativos de las corrientes y los imanes, o de los cambios en su intensidad, o de otras causas que actúan a distancia.

Las fuerzas electromotrices internas surgen principalmente de la diferencia de tensión eléctrica en los puntos del conductor en la vecindad inmediata del punto en cuestión. Las otras causas son variaciones de la composición química o de la temperatura en las partes contiguas del conductor.

Sea que p_2 represente la tensión eléctrica en cualquier punto, y X_2, Y_2, Z_2, las sumas de las partes de todas las fuerzas electromotrices que surgen de otras causas resueltas paralelamente a los ejes de coordenadas, entonces si α_2, β_2, γ_2 son las fuerzas electromotrices efectivas

$$\left.\begin{aligned}\alpha_2 &= X_2 - \frac{dp_2}{dx}\\ \beta_2 &= Y_2 - \frac{dp_2}{dy}\\ \gamma_2 &= Z_2 - \frac{dp_2}{dz}\end{aligned}\right\} \qquad (A)$$

Ahora, la cantidad de la corriente depende de la fuerza electromotriz y de la resistencia del medio. Si la resistencia del medio es uniforme en todas las direcciones e igual a k_2,

$$\alpha_2 = ka_2, \quad \beta_2 = kb_2, \gamma_2 = kc_2 \qquad (B)$$

pero si la resistencia es diferente en diferentes direcciones, la ley será más complicada.

Estas cantidades α_2, β_2, γ_2, se pueden considerar como representativas de la intensidad de la acción eléctrica en las direcciones de x, y, z.

La intensidad medida a lo largo de un elemento $d\sigma$ de una curva está dada por

$$\varepsilon = l\alpha + m\beta + n\gamma$$

donde l, m ,n son los cosenos directores de la tangente.

La integral $\int \varepsilon d\sigma$ tomada con respecto a una porción dada de una línea curva, representa la intensidad total a lo largo de esa línea. Si la curva es cerrada, representa la intensidad total de la fuerza electromotriz en la curva cerrada.

Sustituyendo los valores de α, β, γ de las ecuaciones (A)

$$\int \varepsilon d\sigma = \int (Xdx + Ydy + Zdz) - p + C$$

Por lo tanto, si $(Xdx + Ydy + Zdz)$ es un diferencial completo, el valor de $\int \varepsilon d\sigma$ para una curva cerrada se anulará, y en todas las curvas cerradas

$$\int \varepsilon d\sigma = \int (Xdx + Ydy + Zdz),$$

La integración se efectúa a lo largo de la curva, de modo que en una curva cerrada, la intensidad total de la fuerza electromotriz efectiva es igual a la intensidad total de la fuerza electromotriz impresa.

La cantidad total de conducción a través de cualquier superficie se expresa por

$$\int edS$$

donde

$$e = la + mb + nc,$$

l, m, n son los cosenos directores de la normal,

$$\therefore \int edS = \iint adydz + \iint bdzdx + \iint cdxdy$$

las integraciones se efectúan sobre la superficie dada. Cuando la superficie es cerrada, entonces, mediante la integración por partes podemos encontrar

$$\int edS = \iiint \left(\frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} \right) dxdydz$$

Si hacemos

$$\frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} = 4\pi\rho$$

$$\int edS = 4\pi \iiint \rho \, dxdydz \qquad (C)$$

donde la integración en el lado derecho de la ecuación se efectúa sobre cada parte del espacio dentro de la superficie. En una gran clase de fenómenos, incluidos todos los casos de corrientes uniformes, la cantidad ρ desaparece.

Cantidad magnética e intensidad

A partir de su estudio de las líneas de fuerza magnética, Faraday ha llegado a la conclusión de que en la superficie tubular[***] formada por un sistema de tales líneas, la cantidad de inducción magnética a través de cualquier sección del tubo es constante, y que la alteración del carácter de estas líneas al pasar de una sustancia a otra, se explica por una diferencia de capacidad inductiva en las dos sustancias, que es análoga a la potencia conductora en la teoría de las corrientes eléctricas.

En la siguiente investigación tendremos ocasión de tratar la cantidad e intensidad magnética en relación con la eléctrica. En tales casos, los símbolos magnéticos se distinguirán por el sufijo 1, y los eléctricos por el sufijo 2. Las ecuaciones que conectan *a, b, c, k,* α, β, γ, *p* y ρ son iguales en la forma que los que acabamos de dar, *a, b, c* son los símbolos de la inducción magnética con respecto a la cantidad; *k* denota la resistencia a la inducción magnética, y puede ser diferente en diferentes

[***]Exp. Res. 3271, definición de " Sphondyloid."

direcciones; α, β, γ, son las fuerzas de magnetización efectivas, conectadas con *a, b, c,* mediante las ecuaciones (B); *p* es la tensión o potencial magnético que luego se explicará; ρ denota la densidad de la materia magnética real y está conectada con *a, b, c* por ecuaciones (C). Como todos los detalles de los cálculos magnéticos serán más inteligibles después de la exposición de la conexión del magnetismo con la electricidad, será suficiente aquí decir todas las definiciones de cantidad total, con respecto a una superficie, la intensidad total de una curva, se aplican tanto al caso del magnetismo como a la electricidad.

Electromagnetismo

Ampère ha demostrado las siguientes leyes de las atracciones y repulsiones de las corrientes eléctricas:

I. Las corrientes iguales y opuestas generan fuerzas iguales y opuestas.

II. Una corriente sinuosa es equivalente a una recta, siempre que las dos corrientes casi coincidan en toda su longitud.

III. Las corrientes iguales que atraviesan curvas cerradas similares y situadas de manera similar actúan con las mismas fuerzas, cualesquiera que sean las dimensiones lineales de los circuitos.

IV. Una corriente cerrada no ejerce ninguna fuerza que tienda a girar un conductor circular alrededor de su centro.

Debe observarse que las corrientes con las que Ampére trabajaba eran constantes y, por lo tanto, volvían a entrar. Por lo tanto, todos sus resultados se deducen de experimentos sobre corrientes cerradas, y sus expresiones para la acción mutua de los elementos de una corriente implican la suposición de que esta acción se ejerce en la dirección de la línea que une esos elementos. Sin duda, esta suposición está garantizada por el consenso universal de los hombres de ciencia en el tratamiento de las fuerzas atractivas consideradas como debidas a la acción mutua de las partículas; pero al presente estamos procediendo con un principio diferente, y buscando la explicación de los fenómenos, no solo en las corrientes, sino también en el medio circundante. La primera y la segunda leyes muestran que las corrientes deben combinarse como velocidades o fuerzas. La tercera ley es la expresión de una propiedad de todas las atracciones que puede concebirse como dependiente de la inversa al cuadrado de la distancia de un sistema fijo de puntos; y la cuarta muestra que las fuerzas electromagnéticas siempre pueden reducirse a las atracciones y repulsiones de la materia imaginaria distribuidas adecuadamente.

De hecho, la acción de un circuito eléctrico muy pequeño en un punto de su vecindad es idéntica a la de un pequeño elemento magnético en un punto exterior. Si dividimos una porción determinada de una superficie en áreas elementales, y hacemos que corrientes iguales fluyan en la misma dirección alrededor de todas estas pequeñas áreas, el efecto en un punto que no está en la superficie será el mismo que el de una capa que coincide con el superficie, y uniformemente magnetizada normal a su superficie. Pero según la primera ley, todas las corrientes que forman los pequeños circuitos se destruirán entre sí, y dejarán una sola corriente corriendo alrededor de la línea divisoria. De modo que el efecto magnético de una capa uniformemente magnetizada es equivalente al de una corriente eléctrica que rodea el borde de la capa. Si la dirección de la corriente coincide con la del movimiento aparente del sol, entonces la dirección de la magnetización de la capa imaginaria será la misma que la de la magnetización real de la Tierra[*].

La intensidad total de la fuerza de magnetización en una curva cerrada que atraviesa y abraza la corriente cerrada es constante, y por lo tanto se puede obtener una medida de la cantidad de la corriente. Como esta intensidad es independiente de la forma de la curva cerrada y depende solo de la cantidad de corriente que pasa a través de ella, podemos considerar el caso elemental de la corriente que fluye a través del área primaria *dydz*.

Sea el eje x apuntando hacia el oeste, z hacia el sur, e y hacia arriba. Sean x, y, z las coordenadas de un punto en el medio del área $dydz$, luego la intensidad total medida alrededor de los cuatro lados del elemento es

$$+\left(\beta_1+\frac{d\beta_1}{dz}\frac{dz}{2}\right)dy,$$

$$-\left(\gamma_1+\frac{d\gamma_1}{dy}\frac{dy}{2}\right)dz$$

$$-\left(\beta_1-\frac{d\beta_1}{dz}\frac{dz}{2}\right)dy$$

$$+\left(\gamma_1-\frac{d\gamma_1}{dy}\frac{dy}{2}\right)dz$$

$$\textit{Intensidad total} = \left(\frac{d\beta_1}{dz}-\frac{d\gamma_1}{dy}\right)dydz$$

La cantidad de electricidad conducida a través del área primaria $dydz$ es a_2dydz, y por lo tanto, si definimos la medida de una corriente eléctrica como la intensidad total de la fuerza de magnetización en una curva cerrada que la abraza, tendremos

$$a_2 = \left(\frac{d\beta_1}{dz}-\frac{d\gamma_1}{dy}\right)$$

$$b_2 = \left(\frac{d\gamma_1}{dx}-\frac{d\alpha_1}{dz}\right)$$

$$c_2 = \left(\frac{d\alpha_1}{dy}-\frac{d\beta_1}{dx}\right)$$

[*] Ver *Esperimental Researches on Electricity* (3265) para las relaciones entre un circuito eléctrico y uno magnético considerados como curvas mutuamente abrazadas.

Estas ecuaciones nos permiten deducir la distribución de las corrientes de electricidad cada vez que conocemos los valores de α, β, γ, las intensidades magnéticas. Si α, β, γ son diferenciales exactos de una función de x, y, z con respecto a x, y y z respectivamente, entonces los valores de a_2, b_2, $c_2$se anulan; y sabemos que el magnetismo no es producido por las corrientes eléctricas en esa parte del campo que estamos investigando. Se debe a la presencia de magnetismo permanente dentro del campo o a fuerzas de magnetización debidas a causas externas.

Podemos observar que las ecuaciones anteriores dan, por diferenciación

$$\frac{da_2}{dx}+\frac{db_2}{dy}+\frac{dc_2}{dz}=0$$

que es la ecuación de continuidad para las corrientes cerradas. Por lo tanto, nuestras investigaciones se limitan actualmente a las corrientes cerradas; y sabemos poco de los efectos magnéticos de las corrientes que no están cerradas.

Antes de entrar en el cálculo de estos estados eléctricos y magnéticos, puede ser ventajoso establecer ciertos teoremas generales, cuya verdad puede establecerse analíticamente.

Teorema I

La ecuación

$$\frac{d^2V}{dx^2}+\frac{d^2V}{dy^2}+\frac{d^2V}{dz^2}+4\pi\rho=0$$

(donde V y ρ son funciones de x, y, z nunca infinitas, y se anulan para todos los puntos a una distancia infinita), pueden ser satisfechas por uno, y solo un valor de V. Véase el art. (17) más arriba.

Teorema II

El valor de V que satisface las condiciones anteriores se encuentra integrando la expresión

$$\iiint \frac{\rho\, dx\, dy\, dz}{\left[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2\right]^{1/2}}$$

donde los límites de x, y, z son tales que incluyen cada punto del espacio donde ρ es finito.

Las pruebas de estos teoremas se pueden encontrar en cualquier trabajo sobre atracciones o electricidad, y en particular en el Ensayo de Green sobre la Aplicación de las Matemáticas a la Electricidad. Ver Arts. 18, 19 de este documento. Ver también Gauss, en Atracciones traducidas en Taylor's Scientific Memoirs.

Teorema III

Sean U y V dos funciones de x, y, z, luego

$$\iiint U\left(\frac{d^2V}{dx^2}+\frac{d^2V}{dy^2}+\frac{d^2V}{dz^2}\right)dxdydz=-\iiint U\left(\frac{dU}{dx}\frac{dV}{dx}+\frac{dU}{dy}\frac{dV}{dy}+\frac{dU}{dz}\frac{dV}{dz}\right)dxdydz$$

$$=\iiint\left(\frac{d^2U}{dx^2}+\frac{d^2U}{dy^2}+\frac{d^2U}{dz^2}\right)Vdxdydz;$$

donde se supone que las integraciones se extienden a todo el espacio en el que U y V tienen valores que difieren de 0. (Green, p. 10.)

Este teorema muestra que si hay dos sistemas de atracción, las acciones entre ellos son iguales y opuestas. Y al hacer $U = V$ encontramos que el potencial de un sistema en sí mismo es proporcional a la integral del cuadrado de la atracción resultante a través de todo el espacio; un resultado deducible del art. (30), ya que el volumen de cada celda es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad (artículos 12, 13) y, por lo tanto, el número de celdas en un espacio dado es directamente el cuadrado de la velocidad.

Teorema IV

Sean α, β, γ, cantidades finitas a través de un cierto espacio que desaparecen fuera del espacio, y sea k todas las partes del espacio como una función continua o discontinua de x, y, z, luego la ecuación en p

$$\frac{d}{dx}\frac{1}{k}\left(\alpha-\frac{dp}{dx}\right)+\frac{d}{dy}\frac{1}{k}\left(\beta-\frac{dp}{dy}\right)+\frac{d}{dz}\frac{1}{k}\left(\gamma-\frac{dp}{dy}\right)+4\pi\rho=0$$

tiene una y solo una solución, en la que p siempre es finita y es nula a una distancia infinita.

La prueba de este teorema, por el Prof. W. Thomson, se puede encontrar en el Cambridge *and Dublin Mathematical Journal*, enero de 1848.

Si α, β, γ son las fuerzas electromotrices, p la tensión eléctrica y k el coeficiente de resistencia, entonces la ecuación anterior es idéntica a la ecuación de continuidad.

$$\frac{da_2}{dx}+\frac{db_2}{dy}+\frac{dc_2}{dz}+4\pi\rho=0$$

y el teorema muestra que cuando se dan las fuerzas electromotrices y la tasa de producción de electricidad en cada parte del espacio, el valor de la tensión eléctrica es determinado.

Dado que las leyes matemáticas del magnetismo son idénticas a las de la electricidad, por lo que ahora las consideramos, podemos considerar α, β,γ como fuerzas de magnetización, p como tensión magnética, y ρ como densidad magnética real, siendo k el coeficiente de resistencia a la inducción magnética.

La prueba de este teorema se basa sobre la determinación del valor mínimo de

$$Q = \iiint \left\{ \frac{1}{k}\left(\alpha - \frac{dp}{dx} - k\frac{dV}{dx}\right)^2 + \frac{1}{k}\left(\beta - \frac{dp}{dy} - k\frac{dV}{dy}\right)^2 + \frac{1}{k}\left(\gamma - \frac{dp}{dz} - k\frac{dV}{dz}\right)^2 \right\} dxdydz$$

donde V surge de la ecuación

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} + 4\pi\rho = 0$$

y p debe ser determinado.

El significado de esta integral en el lenguaje eléctrico se puede poner de manifiesto. Si la presencia de los medios en los que k tiene varios valores no afecta la distribución de las fuerzas, entonces la "cantidad" resuelta en x sería simplemente dV/dx y la intensidad kdV/dx. Pero la cantidad real y la intensidad son

$$\frac{1}{k}\left(\alpha - \frac{dp}{dx}\right) \text{y}\, \alpha - \frac{dp}{dx},$$

y las partes debidas a la distribución de los medios son, por lo tanto,

$$\frac{1}{k}\left(\alpha - \frac{dp}{dx}\right) - \frac{dV}{dx} \text{ y}\, \alpha - \frac{dp}{dx} - k\frac{dV}{dx}$$

Ahora, estos productos representan el trabajo realizado a causa de esta distribución de medios, siendo determinada la distribución de las fuentes, y tomando en los términos en y y en z obtenemos la expresión Q para el trabajo total realizado por esa parte del efecto total en cualquier punto que se deba a la distribución de medios conductores, y no directamente a la presencia de las fuentes.

Esta cantidad Q se convierte en un mínimo para uno y solo un valor de p, es decir, aquel que satisface la ecuación original.

Teorema V

Si a, b, c son tres funciones de x, y, z que satisfacen la ecuación

$$\frac{da}{dx}+\frac{db}{dy}+\frac{dc}{dz}=0$$

siempre es posible encontrar tres funciones α, β, γ que satisfagan las ecuaciones

$$\frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}=a$$

$$\frac{d\gamma}{dx}-\frac{d\alpha}{dz}=b$$

$$\frac{d\alpha}{dy}-\frac{d\beta}{dx}=c$$

Sea A = $\int c\,dy$, donde la integración debe realizarse sobre c considerada como una función de y, tratando a x y z como constantes. Sean $B = \int a\,dz$, $C = \int b\,dx$, $A' = \int b\,dz$, $B' = \int c\,dx$, $C' = \int a\,dy$, integrando de la misma manera.

Entonces

$$\alpha = A + A' + \frac{d\psi}{dx}$$

$$\beta = B + B' + \frac{d\psi}{dy}$$

$$\gamma = C + C' + \frac{d\psi}{dz}$$

Deben satisfacer las ecuaciones dadas por

$$\frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}=\int\frac{da}{dy}dz-\int\frac{dc}{dz}dx-\int\frac{db}{dy}dx+\int\frac{da}{dy}dy$$

y $$0=\int\frac{da}{dx}dx+\int\frac{db}{dy}dx+\int\frac{dc}{dz}dx$$

$$\therefore\ \frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}=\int\frac{da}{dx}dx+\int\frac{da}{dy}dy+\int\frac{da}{dz}dz$$

$$=a$$

De la misma manera, se puede demostrar que los valores de α, β, γ satisfacen las otras ecuaciones dadas. La función ψ se puede considerar actualmente como perfectamente indeterminada.

El método aquí dado está tomado de las memorias del Prof. W. Thomson sobre Magnetismo (*Phil Trans*. 1851, p 283).

Como no podemos realizar las integraciones requeridas cuando a, b, c son funciones discontinuas de $x, y, z,$ el siguiente método, que es perfectamente general aunque más complicado, puede indicar más claramente la verdad de la proposición.

Sean A, B, C determinadas a partir de las ecuaciones

$$\frac{d^2A}{dx^2}+\frac{d^2A}{dy^2}+\frac{d^2A}{dz^2}+a=0$$

$$\frac{d^2B}{dx^2}+\frac{d^2B}{dy^2}+\frac{d^2B}{dz^2}+b=0$$

$$\frac{d^2C}{dx^2}+\frac{d^2C}{dy^2}+\frac{d^2C}{dz^2}+c=0$$

Por los métodos de los Teoremas I y II, de modo que A, B, C nunca son infinitos, y desaparecen cuando x, y o z son infinitos.

También hagamos

$$\alpha=\frac{dB}{dz}-\frac{dC}{dy}+\frac{d\psi}{dx}$$

$$\beta=\frac{dC}{dx}-\frac{dA}{dz}+\frac{d\psi}{dy}$$

$$\gamma=\frac{dA}{dy}-\frac{dB}{dx}+\frac{d\psi}{dz}$$

Entonces

$$\frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}=\frac{d}{dx}\left(\frac{dA}{dx}+\frac{dB}{dy}+\frac{dC}{dz}\right)-\left(\frac{d^2A}{dx^2}+\frac{d^2A}{dy^2}+\frac{d^2A}{dz^2}\right)$$

$$=\frac{d}{dx}\left(\frac{dA}{dx}+\frac{dB}{dy}+\frac{dC}{dz}\right)+a$$

Si encontramos ecuaciones similares en y y en z, y diferenciamos la primera por x, la segunda por y y la tercera por z, recordando la ecuación entre a, b, c, tendremos

$$\left(\frac{d^2}{dx^2}+\frac{d^2}{dy^2}+\frac{d^2}{dz^2}\right)\left(\frac{dA}{dx}+\frac{dB}{dy}+\frac{dC}{dz}\right)=0$$

y dado que *A, B, C* son siempre finitos y desaparecen a una distancia infinita, la única solución de esta ecuación es

$$\left(\frac{dA}{dx}+\frac{dB}{dy}+\frac{dC}{dz}\right)=0$$

Y, finalmente, tenemos

$$\frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}=\alpha$$

con dos ecuaciones similares, demostrando que α, β, γ han sido correctamente determinadas.

La función ψ debe determinarse a partir de la condición

$$\left(\frac{d\alpha}{dx}+\frac{d\beta}{dy}+\frac{d\gamma}{dz}\right)=\left(\frac{d^2}{dx^2}+\frac{d^2}{dy^2}+\frac{d^2}{dz^2}\right)\psi$$

si el lado izquierdo de esta ecuación es siempre cero, ψ debe ser cero también.

Teorema VI

Sean *a, b, c* las tres funciones de *x, y, z,* es posible encontrar tres funciones α, β, γ y una cuarta *V*, de modo que

$$\frac{d\alpha}{dx}+\frac{d\beta}{dy}+\frac{d\gamma}{dz}=0$$

y

$$a=\frac{d\beta}{dz}-\frac{d\gamma}{dy}+\frac{dV}{dx}$$

$$b=\frac{d\gamma}{dx}-\frac{d\alpha}{dz}+\frac{dV}{dy}$$

$$c=\frac{d\alpha}{dy}-\frac{d\beta}{dx}+\frac{dV}{dz}$$

Sea

$$\frac{da}{dx}+\frac{db}{dy}+\frac{dc}{dz}=-4\pi\rho$$

Y sea que V se encuentre a partir de la ecuación

$$\frac{d^2V}{dx^2}+\frac{d^2V}{dy^2}+\frac{d^2V}{dz^2}=-4\pi\rho$$

Entonces

$$a'=a-\frac{dV}{dx},$$
$$b'=b-\frac{dV}{dy},$$
$$c'=c-\frac{dV}{dz},$$

Satisface la condición

$$\frac{da'}{dx}+\frac{db'}{dy}+\frac{dc'}{dz}=0$$

y, por lo tanto, podemos encontrar tres funciones A, B, C y de estas α, β, γ, a fin de satisfacer las ecuaciones dadas.

Teorema VII

La integral a lo largo del infinito*

$$Q=\iiint\left(\alpha_1 a_1+\beta_1 b_1+\gamma_1 c_1\right)dxdydz$$

dondea_1, b_1, c_1, α_1, β_1, γ_1 son funciones de cualquier tipo, es capaz de transformarse en

$$Q=+\iiint\left\{4\pi p\rho_1-\left(\alpha_0 a_2+\beta_0 b_2+\gamma_0 c_2\right)\right\}dxdydz$$

en que las cantidades se encuentran a partir de las ecuaciones

$$\frac{da_1}{dx}+\frac{db_1}{dy}+\frac{dc_1}{dz}+4\pi\rho_1=0$$
$$\frac{d\alpha_1}{dx}+\frac{d\beta_1}{dy}+\frac{d\gamma_1}{dz}+4\pi\rho'_1=0$$

α_0, β_0, γ_0, V se determinan a partir de a_1, b_1, c_1 por el último teorema, de modo que

* Entre 0 e ∞. (*N. del T.*)

$$a_1 = \frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} + \frac{dV}{dx}$$

a_2, b_2, c_2, se encuentran desde $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, por las ecuaciones

$$a_2 = \frac{d\beta_1}{dz} - \frac{d\gamma_1}{dy}\ etc.$$

y p se encuentra de la ecuación

$$\frac{d^2p}{dx^2} + \frac{d^2p}{dy^2} + \frac{d^2p}{dz^2} + 4\pi\rho'_1 = 0$$

Ya que si ponemos a_1 en la forma

$$\frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} + \frac{dV}{dx}$$

y tratamos b y c, de manera similar, entonces tenemos por integración por partes hasta el infinito, recordando que todas las funciones se desvanecen en los límites,

$$Q = -\iiint \left\{ V\left(\frac{d\alpha_1}{dx} + \frac{d\beta_1}{dx} + \frac{d\gamma_1}{dx}\right) + \alpha_0\left(\frac{d\beta_1}{dz} - \frac{d\gamma_1}{dy}\right) + \beta_0\left(\frac{d\gamma_1}{dx} - \frac{d\alpha_1}{dz}\right) + \gamma_0\left(\frac{d\alpha_1}{dy} - \frac{d\beta_1}{dx}\right)\right\} dxdydz$$

o

$$Q = +\iiint \{(4\pi V\rho') - (\alpha_0 a_2 + \beta_0 b_2 + \gamma_0 c_2)\} dxdydz$$

y, por el Teorema III.

$$\iiint V\rho'\, dxdydz = \iiint p\rho dxdydz$$

de modo que, finalmente

$$Q = \iiint \{4\pi p\rho - (\alpha_0 a_2 + \beta_0 b_2 + \gamma_0 c_2)\} dxdydz$$

Si $a_1 b_1 c_1$ representan los componentes de la cantidad magnética, y $\alpha_1\beta_1\gamma_1$ los de intensidad magnética, entonces ρ representará la densidad magnética real, y p el potencial o tensión magnética, $a_2 b_2 c_2$ serán los componentes de la cantidad de corrientes eléctricas, y $\alpha_0\beta_0\gamma_0$ serán tres funciones deducidas de $a_1 b_1 c_1$, que se encontrará que es la expresión matemática del estado electrotónico de Faraday.

Consideremos ahora la influencia de estos teoremas analíticos en la teoría del magnetismo. Siempre que tratemos cantidades relacionadas con el magnetismo, las distinguiremos por el sufijo (1). Así $a_1 b_1 c_1$, son las componentes resueltas en las direcciones de *x, y, z* de la cantidad de inducción magnética que actúa a través de un punto dado, y $\alpha_1\beta_1\gamma_1$ son las intensidades resueltas de la magnetización en el mismo punto, o lo que es lo mismo, los componentes de la fuerza que se ejercería sobre una unidad polo sur de un imán colocado en ese punto sin perturbar la distribución del magnetismo.

Las corrientes eléctricas se encuentran a partir de las intensidades magnéticas por medio de las ecuaciones

$$a_2 = \frac{d\beta_1}{dz} - \frac{d\gamma_1}{dy}\ etc.$$

Cuando no hay corrientes eléctricas, entonces

$$\alpha_1 dx + \beta_1 dy + \gamma_1 dz = dp_1$$

un diferencial perfecto de una función de *x, y, z*. Según el principio de analogía, podemos llamar p_1, la tensión magnética.

.Las fuerzas que actúan sobre una masa *m* de magnetismo sur en cualquier punto son:

$$-m\frac{dp_1}{dx},\ -m\frac{dp_1}{dy}\ \text{y}\ -m\frac{dp_1}{dz},$$

en la dirección de los ejes, y por lo tanto todo el trabajo realizado durante cualquier desplazamiento de un sistema magnético es igual a la disminución de la integral

$$Q = \iiint \rho_1 p_1 dxdydz$$

en todo el sistema.

Llamemos ahora a *Q* el potencial total del sistema en sí mismo. El aumento o disminución de *Q* medirá el trabajo perdido o ganado por cualquier desplazamiento de cualquier parte del sistema y, por lo tanto, nos permitirá determinar las fuerzas que actúan sobre esa parte del sistema.

Por el Teorema III. *Q* se puede poner bajo la forma

$$Q = +\frac{1}{4\pi}\iiint (a_1\alpha_1 + b_1\beta_1 + c_1\gamma_1)dxdydz$$

en el que $\alpha_1\beta_1\gamma_1$ son los coeficientes diferenciales de p_1 con respecto a *x, y, z* respectivamente.

Si ahora asumimos que esta expresión para Q es verdadera, cualesquiera que sean los valores de $\alpha_1\beta_1\gamma_1$, pasamos de la consideración del magnetismo de los imanes permanentes a la de los efectos magnéticos de las corrientes eléctricas y, entonces, tenemos por el teorema VII.

$$Q = \iiint \left\{ p_1\rho_1 - \frac{1}{4\pi}\left(\alpha_0 a_2 + \beta_0 b_2 + \gamma_0 c_2\right) \right\} dxdydz$$

De modo que en el caso de las corrientes eléctricas, los componentes de las corrientes tienen que multiplicarse por las funciones α_0, β_0, γ_0, respectivamente, y las sumas de todos esos productos en todo el sistema nos dan la parte de Q debida a esas corrientes.

Ahora hemos obtenido en las funciones α_0, β_0, γ_0, los medios para evitar la consideración de la cantidad de inducción magnética que pasa a través del circuito. En lugar de este método artificial, tenemos uno natural de considerar la corriente con referencia a las cantidades existentes en el mismo espacio con la corriente misma. A estos les doy el nombre de funciones Electrotónicas, o componentes de la intensidad Electrotónica.

Consideremos ahora las condiciones de la conducción de la corriente eléctrica dentro del medio durante los cambios en el estado electrotónico. El método que adoptaremos es una aplicación de la dada por Helmholtz en su memoria *Sobre la conservación de la Fuerza** .

Sea que haya alguna fuente externa de corriente eléctrica que genere en las masas conductoras corrientes cuya cantidad se mide por a_2, b_2, c_2, y su intensidad en α_2, β_2, γ_2.

Entonces la cantidad de trabajo debido a esta causa en el tiempo dt es

$$dt\iiint\left(a_2\alpha_2 + b_2\beta_2 + c_2\gamma_2\right)dxdydz$$

en forma de trabajo realizado mecánicamente por la acción electromagnética de estas corrientes. Si no hay causa externa que produzca corrientes, entonces la cantidad que representa todo el trabajo realizado por la causa externa debe desaparecer, y tenemos

$$dt\iiint\left(a_2\alpha_2 + b_2\beta_2 + c_2\gamma_2\right)dxdydz + \frac{dt}{4\pi}\frac{d}{dt}\iiint\left(a_2\alpha_0 + b_2\beta_0 + c_2\gamma_0\right)dxdydz$$

donde las integrales se toman a través de cualquier espacio arbitrario. Por lo tanto, debemos tener

$$a_2\alpha_2 + b_2\beta_2 + c_2\gamma_2 = \frac{1}{4\pi}\frac{d}{dt}\left(a_2\alpha_0 + b_2\beta_0 + c_2\gamma_0\right)$$

*Traducido en Taylor's New Scientific Memoirs, Parte II.

para cada punto del espacio; y debe recordarse que la variación de Q se debe a variaciones de α_0, β_0, γ_0 y no de a_2, b_2, c_2. Por lo tanto, debemos tratar a_2, b_2, $c_2$como constantes, y la ecuación se vuelve

$$a_2\left(\alpha_2+\frac{1}{4\pi}\frac{d\alpha_0}{dt}\right)+b_2\left(\beta_2+\frac{1}{4\pi}\frac{d\beta_0}{dt}\right)+c_2\left(\gamma_2+\frac{1}{4\pi}\frac{d\gamma_0}{dt}\right)=0$$

Para que esta ecuación pueda ser independiente de los valores de a_2, b_2, c_2, cada uno de estos coeficientes tener el mismo valor y, por lo tanto, tenemos las siguientes expresiones para las fuerzas electro-motrices debido a la acción de los imanes y las corrientes a una distancia en términos de las funciones electrotónicas, es

$$\alpha_2=-\frac{1}{4\pi}\frac{d\alpha_0}{dt},\quad \beta_2=-\frac{1}{4\pi}\frac{d\beta_0}{dt},\quad \gamma_2=-\frac{1}{4\pi}\frac{d\gamma_0}{dt}$$

Del experimento, parece que la expresión $d\alpha_0/dt$ se refiere al cambio del estado electrotónico de una partícula dada del conductor, ya sea debido al cambio en las funciones electrotónicas en sí o al movimiento de la partícula.

Si α_0 se expresa como una función de x, y, z y t, y si x, y, z son las coordenadas de una partícula en movimiento, entonces la fuerza electromotriz medida en la dirección de x es

$$\alpha_2=-\frac{1}{4\pi}\left(\frac{d\alpha_0}{dx}\frac{dx}{dt}+\frac{d\alpha_0}{dy}\frac{dy}{dt}+\frac{d\alpha_0}{dz}\frac{dz}{dt}+\frac{d\alpha_0}{dt}\right)$$

Las expresiones de las fuerzas electromotrices en y y z son similares. La distribución de las corrientes debido a estas fuerzas depende de la forma y disposición de los medios conductores y de la tensión eléctrica resultante en cualquier punto.

La discusión de estas funciones nos involucraría en fórmulas matemáticas, de las cuales este documento ya está demasiado lleno. Debido a su importancia física como la expresión matemática de una de las conjeturas de Faraday, me han inducido a exhibirlas en su forma actual. Por una consideración más paciente de sus relaciones, y con la ayuda de aquellos que están comprometidos en investigaciones físicas tanto en este tema como en otros que no están obviamente relacionados con él, espero exhibir la teoría del estado electrotónico de una forma en que todas sus relaciones pueden concebirse claramente sin referencia a cálculos analíticos.

Resumen de la teoría del estado electrotónico.

Podemos concebir el estado electrotónico en cualquier punto del espacio como una cantidad determinada en magnitud y dirección, y podemos representar la condición electrotónica de una parte del espacio mediante cualquier sistema mecánico que tenga en cada punto alguna cantidad, que puede ser una velocidad, un desplazamiento o una fuerza, cuya dirección y magnitud corresponden a las del supuesto estado electrotónico. Esta representación no implica teoría física, es solo un tipo de notación artificial. En investigaciones analíticas utilizamos los tres componentes del estado electrotónico y los llamamos funciones electro-tónicas.

Tomamos la parte resuelta de la intensidad electrotónica en cada punto de una curva cerrada, y encontramos por integración lo que podemos llamar la intensidad electrotónica completa alrededor de la curva.

Prop. I. Si en cualquier superficie se dibuja una curva cerrada, y si la superficie dentro de ella se divide en áreas pequeñas, entonces toda la intensidad alrededor de la curva cerrada es igual a la suma de las intensidades alrededor de cada una de las áreas pequeñas, todas estimadas en la misma dirección.

Porque, al recorrer las áreas pequeñas, cada línea límite entre dos de ellas se pasa dos veces en direcciones opuestas, y la intensidad ganada en un caso se pierde en el otro. Por lo tanto, todos los efectos de pasar a lo largo de las divisiones interiores se neutralizan, y todo el efecto es debido a la curva cerrada exterior.

Ley I. Toda la intensidad electrotónica alrededor del límite de un elemento de superficie mide la cantidad de inducción magnética que pasa a través de esa superficie o, en otras palabras, el número de líneas de fuerzas magnéticas que atraviesan esa superficie.

Según la Proposición I., parece que lo que es cierto para las superficies elementales también es verdadero para las superficies de magnitud finita, y, por lo tanto, dos superficies cualesquiera que estén limitadas por la misma curva cerrada tendrán la misma cantidad de inducción magnética a través de ellas.

Ley II. La intensidad magnética en cualquier punto, está conectada con la cantidad de inducción magnética por un conjunto de ecuaciones lineales, llamadas ecuaciones de conducción[**].

Ley III. La intensidad magnética completa alrededor del límite de cualquier superficie mide la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de esa superficie.

Ley IV. La cantidad y la intensidad de las corrientes eléctricas están conectadas por un sistema de ecuaciones de conducción.

Mediante estas cuatro leyes se pueden deducir las cantidades y las intensidades eléctricas a partir de las funciones electrotónicas. No he discutido los valores de las unidades, ya que eso se hará mejor con referencia a los experimentos reales. Llegamos ahora a la atracción de conductores de corrientes, y a la inducción de corrientes dentro de conductores.

[**] Ver Art. (28).

Ley V. El potencial electromagnético total de una corriente cerrada se mide por el producto de la cantidad de corriente y la intensidad electrotónica completa estimada en la misma dirección alrededor del circuito.

Cualquier desplazamiento de los conductores que causaría un aumento en el potencial será asistido por una fuerza medida por la tasa de aumento del potencial, de modo que el trabajo mecánico realizado durante el desplazamiento se medirá por el aumento del potencial.

Aunque en ciertos casos un desplazamiento en la dirección o la alteración de la intensidad de la corriente podría aumentar el potencial, dicha alteración no produciría trabajo por sí misma, y no habrá tendencia hacia este desplazamiento, ya que las alteraciones en la corriente se deben a fuerzas electromotrices, no a las atracciones electromagnéticas, que solo pueden actuar sobre el conductor.

Ley VI. *La fuerza electromotriz en cualquier elemento de un conductor se mide por la velocidad instantánea de cambio de la intensidad electrotónica en ese elemento, ya sea en magnitud o dirección.*

La fuerza electromotriz en un conductor cerrado se mide por la velocidad de cambio de toda la intensidad electrotónica alrededor del circuito referida a la unidad de tiempo. Es independiente de la naturaleza del conductor, aunque la corriente producida varía inversamente a la resistencia; y es la misma en cualquier forma que se haya producido el cambio de intensidad electrotónica, ya sea por movimiento del conductor o por alteraciones en las circunstancias externas.

En estas seis leyes, me he esforzado por expresar la idea, que creo que es la base matemática de los modos de pensamiento indicados en las *Experimental Researches*. No creo que contenga ni siquiera la sombra de una verdadera teoría física; de hecho, su principal mérito como instrumento temporal de investigación es que no representa, ni siquiera en apariencia, nada.

Existe, sin embargo, una teoría profesoralmente física de la electrodinámica, que es tan elegante, tan matemática, y tan completamente diferente de cualquier cosa en este documento, que debo expresar sus axiomas, a riesgo de repetir lo que debería ser bien conocido. Está contenido en las Medidas Electrodinámicas de M. W. Weber, y puede encontrarse en las Transacciones de la Sociedad Leibniz y de la Sociedad Real de Ciencias de Sajonia[*]. Las suposiciones son,

(1) Que dos partículas de electricidad cuando están en movimiento no se repelen entre sí con la misma fuerza que estando en reposo, pero que la fuerza se ve alterada por una cantidad que depende del movimiento relativo de las dos partículas, de modo que la expresión del repulsión a una distancia r es

[*]Cuando esto fue escrito, no sabía que parte de la Memoria del Sr. Weber se tradujo en Taylor's Scientific Memoirs, Vol v. Art. xiv. El valor de sus investigaciones, tanto experimentales como teóricas, hace que el estudio de su teoría sea necesario para todos los electricistas.

$$\frac{ee'}{r^2}\left(1+a\left(\frac{dr}{dt}\right)^2+br\frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

(2) Que cuando la electricidad se mueve en un conductor, la velocidad del fluido positivo con respecto a la materia del conductor es igual y opuesta a la del fluido negativo.

(3) La acción total de un elemento conductor sobre otro es la resultante de las acciones mutuas de las masas de electricidad de ambos tipos que están en cada uno.

(4) La fuerza electromotriz en cualquier punto es la diferencia de las fuerzas que actúan sobre los fluidos positivo y negativo.

De estos axiomas son deducibles las leyes de Ampère de la atracción de conductores, y las de Neumann y otros, para la inducción de corrientes. Aquí, pues, hay una teoría realmente física, que satisface mejor las condiciones requeridas que cualquier otra que haya sido inventada, y presentada por un filósofo cuyas investigaciones experimentales forman una base amplia para sus investigaciones matemáticas. ¿De qué sirve entonces imaginar un estado electrotónico del que no tenemos una concepción claramente física, en lugar de una fórmula de atracción que podamos comprender fácilmente? Yo respondería que es bueno tener dos formas de ver un tema y admitir que hay dos formas de verlo. Además, no creo que tengamos ningún derecho en este momento para entender la acción de la electricidad, y sostengo que el principal mérito de una teoría temporal es que guiará el experimento, sin impedir el progreso de la teoría verdadera cuando aparezca. También hay objeciones a hacer que las fuerzas últimas en la naturaleza dependan de la velocidad de los cuerpos entre los que actúan. Si las fuerzas en la naturaleza deben reducirse a fuerzas que actúan entre partículas, el principio de la Conservación de la Fuerza requiere que estas fuerzas estén en la línea que une las partículas y que sean solamente funciones de las distancias. Los experimentos del Sr. Weber sobre la polaridad inversa de los cuerpos diamagneticos, que han sido repetidos recientemente por el profesor Tyndall, establecen un hecho que es igualmente una consecuencia de la teoría del Sr. Weber de la electricidad y de la teoría de las líneas de fuerza.

Con respecto de la historia de la presente teoría puedo afirmar que el reconocimiento de ciertas funciones matemáticas como expresión del "estado electro-tónico" de Faraday, y el uso de ellas para determinar potenciales electro-dinámicos y fuerzas electro-motrices es, hasta donde yo sé, original; pero la concepción distinta de la posibilidad de las expresiones matemáticas surgió en mi mente del examen de los artículos del Prof. W. Thomson "On a Mechanical Representation of Electric, Magnetic and Galvanic Forces.", *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, enero de 1847, y su "On the Mathematical Theory of Magnetism", *Philosophical Transactions*, Part I. 1851, art. 78, y siguientes. Como ejemplo de la ayuda que puede derivarse de otras investigaciones físicas, puedo afirmar que después de haber investigado los teoremas de este documento, el profesor Stokes me señaló el uso que había hecho de expresiones similares en su "Dynamical Theory of Diffraction", "Sección 1, *Cambridge Transactions*, vol. ix. Parte 1. Queda por ver si la teoría de estas funciones, considerada con referencia a la electricidad, puede llevar a nuevas ideas matemáticas para ser empleadas en la investigación física. En el resto de este documento, propongo discutir algunos problemas eléctricos y magnéticos referidos a esferas. Estos están destinados meramente a servir como ejemplos concretos de los métodos de los cuales se ha dado la teoría; Me reservo la investigación detallada de casos elegidos con referencia especial a experimento hasta que tenga los medios para probar sus resultados.

Ejemplos

Teoría de las imágenes eléctricas

El método de Imágenes Eléctricas, debido al Prof. W. Thomson[†], por el cual la teoría de los conductores esféricos se ha reducido a una gran simplicidad geométrica, se vuelve aún más simple cuando vemos su conexión con los métodos de este documento. Hemos visto que la presión en cualquier punto en un medio uniforme, debido a un caparazón esférica (radio = α) produciendo fluido a la velocidad de $4\pi P\alpha^2$ unidades en unidad de tiempo, es $kP\alpha^2/r$ fuera de la capa externa, y $kP\alpha$ dentro de ella, donde r es la distancia punto desde el centro de la esfera al punto en cuestión.

Si hay dos superficies, uno que expulsa fluido a una velocidad de $4\pi P\alpha^2$ y otra que absorbe fluido a la velocidad de $4\pi P'\alpha'^2$, la expresión de la presión, fuera de las capas, será

$$p = 4\pi P\frac{\alpha^2}{r} - 4\pi P'\frac{\alpha'^2}{r'},$$

donde r y r' son las distancias desde los centros de las dos capas. Igualando esta expresión a cero tenemos, como una superficie sin presión, para la cual

$$\frac{r'}{r} = \frac{P'\alpha'^2}{P\alpha^2}$$

Ahora la superficie, para la cual las distancias a dos puntos fijos tienen una relación dada, es una esfera de la cual el centro O está en la línea que une los centros de las capas CC 'producidas, de modo que

$$C'O = CC'\frac{\left(P'\alpha'^2\right)^2}{\left(P\alpha^2\right)^2 - \left(P'\alpha'^2\right)^2}$$

y su radio

$$CC'\frac{P\alpha^2 \times P'\alpha'^2}{\left(P\alpha^2\right)^2 - \left(P'\alpha'^2\right)^2}$$

Si en el centro de esta esfera colocamos otra fuente del fluido, entonces la presión debida a esta fuente debe agregarse a la debida a las otras dos; y dado que esta presión adicional depende sólo de

[†] Ver la serie de trabajos "On the Mathematical Theory of Electricity," en el *Cambridge and Dublin Math. Jour.*, serie que comienza en marzo de 1848.

la distancia desde el centro, será constante en la superficie de la esfera, donde la presión debida a las otras dos fuentes es cero.

Ahora tenemos los medios para organizar un sistema de fuentes dentro de una esfera dada, de modo que cuando se combina con un sistema dado de fuentes fuera de la esfera, produzcan una presión constante dada en la superficie de la esfera.

Sea a el radio de la esfera, y *p* la presión dada, y sea que las fuentes dadas estén a las distancias $b_1 b_2$, etc. desde el centro, y que sus tasas de producción sean $4\pi P_1$, $4\pi P_2$ ..., etc.

Luego, si a distancias a_2/b_1, $a2/b_2$, etc., (medidas en la misma dirección que b_1,b_2, etc., desde el centro) colocamos fuentes negativas cuyas tasas de producción son

$$-4\pi P_1 \frac{a}{b_1},\ -4\pi P_2 \frac{a}{b_2}, \text{ etc.}$$

la presión en la superficie $r = a$ se reducirá a cero. Ahora colocando una fuente $4\pi pa/k$ en el centro, la presión en la superficie será uniforme e igual a *p*.

La cantidad total de fluido emitido por la superficie $r = a$ se puede encontrar agregando las tasas de producción de las fuentes dentro de ella. El resultado es

$$4\pi a\left\{\frac{p}{k}-\frac{P_1}{b_1}-\frac{P_2}{b_2}-etc.\right\}$$

Para aplicar este resultado al caso de una esfera conductora, supongamos que las fuentes externas $4\pi P_1$, $4\pi P_2$…son cuerpos electrificados pequeños, que contienen e_1,e_2, …, de electricidad positiva. Supongamos también que toda la carga de la esfera conductora anterior a la acción de los puntos externos es igual a *E*. Entonces, todo lo que se necesita para la solución completa del problema es que la superficie de la esfera sea una superficie de igual potencial y que la carga total de la superficie sea *E*.

Si por cualquier distribución de fuentes imaginarias dentro de la superficie esférica podemos efectuar esto, el valor del potencial correspondiente fuera de la esfera es el verdadero y único. El potencial dentro de la esfera debe ser realmente constante e igual al de la superficie.

Por lo tanto, debemos encontrar las imágenes de los puntos electrificados externos, es decir, para cada punto a la distancia *b* del centro debemos encontrar un punto en el mismo radio a una distancia a^2/b_1, y en ese punto debemos colocar una cantidad = $-ea/b_1$, de electricidad imaginaria.

En el centro debemos poner una cantidad *E*' tal que

$$E' = E + e_1 \frac{a}{b_1} + e_2 \frac{a}{b_2} + etc.$$

Luego, si R es la distancia desde el centro, r_1, r_2, …, las distancias desde los puntos electrificados, y r'_1, r'_2,…, las distancias de sus imágenes, en cualquier punto fuera de la esfera, el potencial en ese punto será

$$p=\frac{E'}{R}+e_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{a}{b_1}\frac{1}{r'_1}\right)+e_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{a}{b_2}\frac{1}{r'_2}\right)+etc.$$

$$=\frac{E}{R}+\frac{e_1}{b_1}\left(\frac{a}{R}+\frac{b_1}{r_1}-\frac{a}{r'_1}\right)+\frac{e_2}{b_2}\left(\frac{a}{R}+\frac{b_2}{r_2}-\frac{a}{r'_2}\right)+etc.$$

Este es el valor del potencial fuera de la esfera. En la superficie tenemos

$$R=a\ \mathrm{y}\ \frac{b_1}{r_1}=\frac{a}{r'_1}\,,\ \frac{b_2}{r_2}-\frac{a}{r'_2}\,, etc.$$

De modo que en la superficie

$$p=\frac{E}{a}+\frac{e_1}{b_1}+\frac{e_2}{b_2}+etc.$$

y este también debe ser el valor de p para cualquier punto dentro de la esfera.

Para la aplicación del principio de las imágenes eléctricas, el lector puede consultar los trabajos del Prof. Thomson en el *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*. El único caso que consideraremos es aquel en que $e_1/b_1^2 = I$, y b_1 es infinitamente distante a lo largo del eje de x, y $E = 0$.

El valor de p fuera de la esfera se convierte entonces

$$p = Ix\left(-\frac{a^3}{r^3}\right)$$

y, en el interior $p = 0$

II. Sobre el efecto de una esfera paramagnética o diamagnética en un campo uniforme de fuerzas magnéticas.*

*Ver Prof. Thomson, “On the Theory of Magnetic Induction”, *Phil Mag*. March, 1851.De acuerdo con este trabajo, la capacidad inductiva de la esfera es la relación entre la *cantidad* de inducción magnética (no la intensidad) dentro de la esfera y la exterior a ella. Por lo tanto, de acuerdo con nuestra notación, ella es igual a

$$\frac{1}{I}B\frac{k'}{k}=\frac{3k'}{2k+k'}$$

La expresión del potencial de un pequeño imán colocado en el origen de coordenadas, en la dirección del eje de x es

$$l\frac{d}{dx}\left(\frac{m}{r}\right)=-lm\frac{x}{r^3}$$

El efecto de la esfera en perturbar las líneas de fuerza puede suponerse, como una primera hipótesis, similar a la de un pequeño imán en el origen, cuya fuerza debe determinarse. (Encontraremos que esto es exactamente cierto).

Sea el valor del potencial no alterado por la presencia de la esfera sea

$$p = Ix.$$

Supongamos que la esfera produce un potencial adicional, que para los puntos externos es

$$p' = A\frac{a^3}{r^3}x_1$$

y sea el potencial en el interior de la esfera

$$p_1 = Bx.$$

Sea *k*' el coeficiente de resistencia exterior, y *k* dentro de la esfera, entonces las condiciones a cumplir son, que los potenciales interiores y exteriores deben coincidir en la superficie, y que la inducción a través de la superficie debe ser la misma según se deduzca del potencial externo o interno. Poniendo $x = r\cos\theta$, tenemos para el potencial externo

$$P = \left(Ir + A\frac{a^3}{r^3}\right)cos\theta$$

y para el potencial interno

$$p_1 = Br\cos\theta$$

y estos potenciales deben ser idénticos cuando $r = a$, o

$$I+A = B.$$

La inducción a través de la superficie en el medio externo es

$$\frac{1}{k'}\frac{dp}{dr_{r=a}}=\frac{1}{k'}(I-2A)cos\theta$$

y, a través de la superficie en el medio interno es

$$\frac{1}{k}\frac{dp_1}{dr_{r=a}} = \frac{1}{k}B\cos\theta$$

$$\therefore \frac{1}{k'}\left(I-2A\right) = \frac{1}{k}B$$

Estas ecuaciones dan

$$A = \frac{k-k'}{2k+k'}I\ , \quad B = \frac{3k}{2k+k'}I\ .$$

El efecto fuera de la esfera es igual al de un pequeño imán cuya longitud es l y el momento ml, siempre que

$$ml = \frac{k-k'}{2k+k'}a^3 I$$

Supongamos que este campo uniforme es el debido al magnetismo terrestre, entonces, si k es menor que k'como en cuerpos paramagnéticos, el extremo marcado del imán equivalente se girará hacia el norte. Si k es mayor que k', como en los cuerpos diamagnéticos, el extremo no marcado del imán equivalente giraría hacia el norte.

III *Campo magnético de intensidad variable*

Supongamos que este campo uniforme es el debido al magnetismo terrestre, entonces, si k es menor, supongamos ahora que la intensidad en el campo magnético no alterado varía en magnitud y dirección de un punto a otro, y que sus componentes en x, y, z son representado por α, β, γ, entonces, si como primera aproximación consideramos que la intensidad dentro de la esfera es sensiblemente igual a la del centro, el cambio de potencial fuera de la esfera que surge de la presencia de la esfera, perturba las líneas de fuerza, será el mismo que el debido a tres pequeños imanes en el centro, con sus ejes paralelos a x, y y z, y sus momentos iguales a

$$\frac{k-k'}{2k+k'}a^3\alpha\ , \quad \frac{k-k'}{2k+k'}a^3\beta\ , \quad \frac{k-k'}{2k+k'}a^3\gamma\ .$$

La distribución real del potencial dentro y fuera de la esfera puede concebirse como el resultado de una distribución de materia magnética imaginaria en la superficie de la esfera; pero dado que el efecto externo de este magnetismo superficial es exactamente el mismo que el de los tres pequeños imanes en el centro, el efecto mecánico de las atracciones externas será el mismo que si realmente existieran los tres imanes.

Ahora, sean tres pequeños imanes cuyas longitudes son l_1, l_2, l_3 y las resistencias m_1, m_2, m_3, existentes en el punto x, y, z con sus ejes paralelos a los ejes de x, y, z, entonces resolviendo las fuerzas que actúan sobre los tres imanes en la dirección de X, tenemos

$$X = m_1\left\{\begin{matrix} \alpha + \dfrac{d\alpha}{dx}\dfrac{l_1}{2} \\ -\alpha + \dfrac{d\alpha}{dx}\dfrac{l_1}{2}\end{matrix}\right\} + m_2\left\{\begin{matrix} \alpha + \dfrac{d\alpha}{dy}\dfrac{l_2}{2} \\ -\alpha + \dfrac{d\alpha}{dy}\dfrac{l_2}{2}\end{matrix}\right\} + m_3\left\{\begin{matrix} \alpha + \dfrac{d\alpha}{dz}\dfrac{l_3}{2} \\ -\alpha + \dfrac{d\alpha}{dz}\dfrac{l_3}{2}\end{matrix}\right\}$$

$$= m_1 l_1 \frac{d\alpha}{dx} + m_2 l_2 \frac{d\alpha}{dy} + m_3 l_3 \frac{d\alpha}{dz}$$

Sustituyendo los valores de los momentos de los tres imanes imaginarios

$$-X = \frac{k-k'}{2k+k'}\alpha^2\left(\alpha\frac{d\alpha}{dx} + \beta\frac{d\beta}{dx} + \gamma\frac{d\gamma}{dx}\right)$$

$$= \frac{k-k'}{2k+k'}\frac{\alpha^2}{2}\frac{d}{dx}\left(\alpha^2+\beta^2+\gamma^2\right)$$

La fuerza que impulsa la esfera en la dirección de x depende, por lo tanto, de la variación del cuadrado de la intensidad o $(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)$, a medida que avanzamos en la dirección de x, y lo mismo ocurre para y y para z, de modo que la ley es, que la fuerza que actúa sobre esferas diamagnéticas va dirigida desde lugares de mayor a lugares de menor intensidad de fuerza magnética, y que en distribuciones similares de fuerza magnética varía como la masa de la esfera y el cuadrado de la intensidad.

Con los coeficientes de Laplace es fácil llevar la aproximación al valor del potencial tanto como queramos, y calcular la atracción. Por ejemplo, si un polo magnético norte o sur cuya fuerza es M, se coloca a una distancia b de una esfera diamagnética, radio a, la repulsión será

$$R = M^2(k-k')\frac{a^3}{b^5}\left(\frac{2\times 1}{2k+k'} + \frac{3\times 2\times 1}{3k+2k'}\frac{a^2}{b^2} + \frac{4\times 3\times 2\times 1}{4k+3k'}\frac{a^4}{b^4} + etc.\right)$$

Cuando r es pequeño, el primer término da una aproximación suficiente. La repulsión es, entonces, directamente proporcional al cuadrado de la fuerza del polo, y la masa de la esfera e inversamente proporcional a la quinta potencia de la distancia, considerando al polo como un punto.

IV. *Dos esferas en un campo uniforme*

Sean dos esferas de radio *a* conectadas juntas de modo que sus centros se mantengan a una distancia *b*, y que están suspendidas en un campo magnético uniforme, luego, aunque cada esfera por sí misma habría estado en equilibrio en cualquier parte del campo, la perturbación del campo producirá fuerzas que tienden a hacer que las bolas se establezcan en una dirección particular.

Consideremos que el centro de una de las esferas se toma como origen, entonces el potencial inalterado es

$$p = Ir\cos\theta$$

y el potencial debido a la esfera es $p' = I\dfrac{k-k'}{2k+k'}\dfrac{a^3}{r^2}\cos\theta$

En conjunto, todo el potencial es igual a

$$I\left(r + \frac{k-k'}{2k+k'}\frac{a^3}{r^2}\right)\cos\theta = p$$

$$\frac{dp}{dr} = I\left(1 - 2\frac{k-k'}{2k+k'}\frac{a^3}{r^2}\right)\cos\theta$$

$$\frac{1}{r}\frac{dp}{d\theta} = -I\left(1 + \frac{k-k'}{2k+k'}\frac{a^3}{r^3}\right)\operatorname{sen}\theta\,, \qquad \frac{dp}{d\phi} = 0$$

$$\therefore i^2 = \left(\frac{dp}{dr}\right)^2 + \frac{1}{r^2}\left(\frac{dp}{d\theta}\right)^2 + \frac{1}{r\,\operatorname{sen}^2\theta}\left(\frac{dp}{d\phi}\right)^2$$

$$= I^2\left\{1 + \frac{k-k'}{2k+k'}\frac{a^3}{r^3}\left(1 - 3\cos^2\theta\right) + \left(\frac{k-k'}{2k+k'}\right)^2\frac{a^5}{r^5}\left(1 + 3\cos^2\theta\right)\right\}$$

Este es el valor del cuadrado de la intensidad en cualquier punto. El momentum de ambos cuerpos que tiende a retornar la combinación de esferas en la dirección de la fuerza original

$$L = \frac{1}{2}\frac{d}{d\theta}i^2\left(\frac{k-k'}{2k+k'}a^3\right) \text{ cuando } R = b$$

$$L = \frac{3}{2}I^2\left(\frac{k-k'}{2k+k'}\right)^2\frac{a^6}{b^3}\left(1 - \frac{k-k'}{2k+k'}\frac{a^3}{b^3}\right)\sin 2\theta$$

Esta expresión, — que debe ser positiva, ya que *b* es mayor que *a*,— da el momento de una fuerza que tiende a retornar la línea que une los centros de las esferas hacia las líneas de fuerza originales.

Si las esferas son magnéticas o diamagnéticas, tienden a establecerse en la dirección axial, y eso sin distinción de norte a sur. Sin embargo, si una esfera es magnética y la otra diamagnética, la línea de centros se establecerá de forma ecuatorial. La magnitud de la fuerza depende del cuadrado de (k - k'), y por lo tanto es bastante insensible excepto para el hierro*.

V. *Dos esferas entre los polos de un imán*

Tomemos ahora el caso de las mismas esferas colocadas no en un campo uniforme sino entre un polo norte y un polo sur, $\pm M$, distantes $2c$ uno del otro en la dirección de x.

La expresión del potencial, tomando como origen la mitad de la línea que une los polos, es

$$p=\left(\frac{1}{\sqrt{c^2+r^2-2cr\cos\theta}}-\frac{1}{\sqrt{c^2+r^2+2cr\cos\theta}}\right)$$

A partir de la cual, encontramos el valor de I^2

$$I^2=\frac{4M^2}{c^4}\left(1-3\frac{r^2}{c^2}+9\frac{r^2}{c^2}\cos^2\theta\right);$$

$$\therefore I\frac{dI}{d\theta}=-18\frac{M^2}{c^6}r^2\sin 2\theta\,.$$

y el momento para llevar el par de esferas (radio a, distancia $2b$) en la dirección en que θ aumenta es

$$-36\frac{k-k'}{2k+k'}\frac{M^2a^3b^2}{c^6}\sin 2\theta$$

Esta fuerza, que tiende a girar en sentido ecuatorial a la línea que une los centros de las esferas diamagnéticas y en sentido axial a los centros de las esferas magnéticas, varía directamente como el cuadrado de la fuerza del imán, el cubo del radio de las esferas y el cuadrado de la distancia de sus centros. e inversamente a la sexta potencia de la distancia de los polos del imán, considerados como puntos. Mientras estos polos estén cerca uno del otro, esta acción de los polos será mucho más fuerte que la acción mutua de las esferas, de modo que como regla general podemos decir que los cuerpos alargados se colocan axial o ecuatorialmente entre los polos de un imán según sean magnéticos o diamagnéticos

VI. *Sobre los fenómenos magnéticos de una esfera cortada de una sustancia cuyo coeficiente de resistencia es diferente en diferentes direcciones.*

*Ver Prof. Thomson in *Phil. Mag.* March, 1851.

Sean los ejes de la resistencia magnética paralelos en toda la esfera y sean *x, y, z* los ejes de la esfera. Sean k_1, k_2, k_3, los coeficientes de resistencia en estas tres direcciones, k' el coeficiente de resistencia del medio externo, y a el radio de la esfera. Sea que la intensidad magnética del campo en el que se introduce la esfera no es perturbada, y que sus cosenos directores sean *l, m, n*.

Tomemos ahora el caso de una esfera homogénea cuyo coeficiente es k_1, colocada en un campo magnético uniforme cuya intensidad es lI en la dirección de x.

El potencial resultante fuera de la esfera será

$$p' = lI\left(1 + \frac{k_1 - k'}{2k_1 + k'}\frac{a^3}{r^3}\right)x\,,$$

y, en los puntos internos

$$p_1 = lI\,\frac{3k_1}{2k_1 + k'}\,x\,.$$

De modo que en el interior de la esfera la magnetización está completamente en la dirección de x. Por lo tanto, es bastante independiente de los coeficientes de resistencia en las direcciones de x e y, que pueden cambiarse de k_1 a k_2 y k_3 sin perturbar esta distribución de magnetismo. Por lo tanto, podemos tratar la esfera como homogénea para cada uno de los tres componentes de I, pero debemos usar un coeficiente diferente para cada uno. Buscamos puntos externos

$$p' = I\left\{lx + my + nz + \left(\frac{k_1 - k'}{2k_1 + k'}lx + \frac{k_2 - k'}{2k_2 + k'}my + \frac{k_3 - k'}{2k_3 + k'}nz\,\frac{a^3}{r^3}\right)\right\}$$

Y, para puntos internos

$$p_1 = I\left(\frac{3k_1}{2k_1 + k'}lx + \frac{3k_2}{2k_2 + k'}my + \frac{3k_3}{2k_3 + k'}nz\right)$$

El efecto externo es el mismo que produciría un pequeño imán cuyos momentos fueran

$$\frac{k_1 - k'}{2k_1 + k'}lIa^3\,,\quad \frac{k_2 - k'}{2k_2 + k'}mIa^3\,,\quad \frac{k_3 - k'}{2k_3 + k'}nIa^3\,,$$

y hubiera sido colocado en el origen con sus direcciones coincidiendo con los ejes *x, y, z*. El efecto de la fuerza original I al girar la esfera sobre el eje de x se puede encontrar tomando los momentos de los componentes de esa fuerza en estos imanes equivalentes. El momento de la fuerza en la dirección de y que actúa sobre el tercer imán es

$$\frac{k_3 - k'}{2k_3 + k'}mnI^2a^3$$

y el momento de la fuerza sobre el segundo imán, en la dirección del eje *z*, es

$$-\frac{k_2 - k'}{2k_2 + k'} mnI^2a^3$$

Por lo tanto, como la pareja está sobre el eje de *a*,

$$\frac{3k'(k_3 - k_2)}{(2k_3 + k')(2k_2 + k')} mnI^2a^3$$

tenderá a girar a la esfera desde el eje *y* hacia el eje *z*. Supongamos que la esfera se suspende de modo que el eje de *x* sea vertical, y que *I* sea horizontal, entonces si θ es el ángulo que el eje *y* forma con la dirección de *I*, $m = \cos\theta$, $n = -\sin\theta$, y la expresión para el momento se convierte en

$$\frac{3}{2}\frac{k'(k_2 - k_3)}{(2k_2 + k')(2k_3 + k')} I^2a^3 \sin 2\theta,$$

tendiendo a aumentar θ. Por lo tanto, el eje de menor resistencia se establece axialmente, pero con cualquier extremo indiferentemente hacia el norte.

Como en todos los cuerpos, excepto el hierro, los valores de *k* son casi los mismos que en el vacío, el coeficiente de esta cantidad se modifica muy poco cambiando el valor de *k*' por *k*, el valor en el espacio. La expresión se convierte en

$$\frac{1}{6}\frac{k_2 - k_3}{k} I^2a^3 \sin 2\theta,$$

que es independiente del medio exterior*.

VII. *Imantación permanente en una capa esférica.*

El caso de una capa esférica homogénea de una sustancia diamagnética o paramagnética no presenta ninguna dificultad. La intensidad dentro de la capa en cuestión es menor de la que hubiera sido si la capa estuviera lejos, ya sea que la sustancia de esa capa sea diamagnética o paramagnética.

*Tomando el caso más general de inducción magnética al que se refiere el art. (28), encontramos, en la expresión para el momento de las fuerzas magnéticas, un término constante que depende de *T*, además de los términos que dependen de los senos y cosenos de θ. El resultado es que en cada revolución completa en la dirección negativa alrededor del eje de *T*, se gana una cierta cantidad positiva de trabajo; pero, dado que no existe una fuente de trabajo inagotable en la naturaleza, debemos admitir que $T = 0$ en todas las sustancias, con respecto a la inducción magnética. Este argumento no se aplica en el caso de la conducción eléctrica, o en el caso de un cuerpo a través del cual pasa el calor o la electricidad, ya que dichos estados se mantienen mediante el gasto continuo de trabajo. Ver Prof. Thomson, *Phil. Mag.* Marzo de 1851, p. 186.

Cuando la resistencia de la capa es infinita, y cuando desaparece, la intensidad en el interior la capa es cero.

En el caso de no resistencia, todo el efecto de la capa en cualquiera de sus puntos, internos o externos, puede representarse suponiendo un estrato superficial de materia magnética distribuido sobre la superficie exterior, la densidad está dada por la ecuación

$$\rho = 3I\cos\theta.$$

Supongamos que, ahora, la capa esférica se convierte en un imán permanente, de modo que la distribución de la materia magnética imaginaria sea invariable, entonces el potencial externo debido a la capa será,

$$p' = -I\frac{a^3}{r^2}\cos\theta$$

y el potencial interno

$$p_1 = -Ir\cos\theta.$$

Ahora investiguemos el efecto de llenar la capa esférica con alguna sustancia cuya resistencia es k, y que la resistencia en el medio externo es k'. El grosor de la capa magnetizada puede descuidarse. Sea que el momento magnético del magnetismo permanente es Ia^3, y que el de la distribución superficial imaginaria debido al medio $k = Aa^3$ Entonces los potenciales son

$$\textit{externo} \quad p' = (I + A)\frac{a^3}{r^2}\cos\theta, \quad \textit{interno} \quad p_1 = (I + A)r\cos\theta$$

La distribución del magnetismo real es la misma antes y después de la introducción del medio k, de modo que

$$\frac{1}{k'}I + \frac{2}{k}I = \frac{1}{k}(I + A) + \frac{2}{k'}(I + A)$$

o

$$A = \frac{k - k'}{2k + k'}L$$

El efecto externo de la cubierta magnetizada aumenta o disminuye de acuerdo con que A; sea mayor o menor que k'. Por lo tanto, se incrementa al llenar la capa esférica con materia diamagnética y disminuye al llenarlo con materia paramagnética, como el hierro.

VIII. *Capa esférica electromagnética*

Tomemos como ejemplo los efectos magnéticos de las corrientes eléctricas, un electroimán en forma de capa esférica delgada. Supongamos que su radio sea a, y su espesor t, y sea su efecto externo el de un imán cuyo momento es Ia^3. Tanto dentro como fuera de la capa, el efecto magnético puede ser representado por un potencial, pero dentro de la sustancia de la capa, donde hay corrientes eléctricas, los efectos magnéticos no pueden ser representados por un potencial. Sean *p*' y *p* los potenciales externos e internos,

$$p' = I\frac{a^3}{r^2}cos\theta\,, \qquad p_1 = Ar\,cos\theta$$

y, como no hay un magnetismo permanente

$$\frac{dp'}{dr} = \frac{dp_1}{dr}\,,$$

Cuando $r = a$

$$A = -2I$$

Si dibujamos cualquier curva cerrada cortando a la capa en el ecuador, y en algún otro punto conocido, entonces la intensidad magnética total alrededor de esta curva será $3Iacos\theta$, y como esta es una medida de la corriente eléctrica total que fluye a través de él, la cantidad de la corriente en cualquier punto se puede encontrar por diferenciación. La cantidad que fluye a través del elemento $td\theta$ es $-3Iasin\theta d\theta$, de modo que la cantidad de la corriente referida a la unidad del área de sección es

$$-3I\frac{a}{t}sin\,\theta$$

Si la capa se compone de un alambre enrollado alrededor de la esfera de modo que el número de espirales por pulgada varíe según el seno de θ, entonces el efecto externo será casi el mismo que si la capa estuviera hecha de una sustancia conductora uniforme, y las corrientes se habían distribuido de acuerdo con la ley que acabamos de dar.

Si un cable que conduce una corriente de intensidad *I*, se enrolla alrededor de una esfera de radio *a*, de modo que la distancia entre las espirales sucesivas medidas a lo largo del eje de *x* sea $2a/n$, entonces habrá *n* espirales en total, y el valor de *I*, para el electroimán resultante será

$$I_1 = \frac{n}{6a}I_r$$

Los potenciales interno y externo serán

$$p' = I_2\frac{n}{6}\frac{a^3}{r^2}cos\theta \qquad p_1 = -2I_2\frac{n}{6}\frac{r}{a}cos\theta\,,$$

Por lo tanto, el interior de la capa esférica es un campo magnético uniforme

IX. *Efecto del núcleo del electroimán*.

Supongamos ahora una esfera de materia diamagnética o paramagnética introducida en la bobina electromagnética. El resultado se puede obtener como en el último caso, y los potenciales se vuelven

$$p' = I_2 \frac{n}{6} \frac{3k'}{2k+k'} \frac{a^3}{r^2} \cos\theta \qquad p_1 = -2I_2 \frac{n}{6} \frac{3k'}{2k+k'} \frac{r}{a} \cos\theta .$$

El efecto externo es mayor o menor que antes, de acuerdo con que *k*' sea mayor o menor que *k*, es decir, según que el interior de la esfera sea magnética o diamagnética con respecto al medio externo, y el efecto interno se altera en el dirección opuesta, siendo el más grande para un medio diamagnético.

Esta investigación explica el efecto de introducir un núcleo de hierro en un electroimán. Si el valor de *k* para el núcleo desapareciera por completo, el efecto del electroimán sería tres veces mayor que el que tiene sin el núcleo. Como *k* tiene siempre un valor finito, el efecto del núcleo es menor que esto.

En el interior del electroimán tenemos un campo uniforme de fuerza magnética, cuya intensidad puede aumentarse rodeando la bobina con una capa de hierro. Si *k*'= 0, y la capa infinitamente gruesa, el efecto sobre los puntos internos se triplicaría.

El efecto del núcleo es mayor en el caso de un imán cilíndrico, y el más grande de todos cuando el núcleo es un anillo de hierro dulce.

X. *Funciones electrotónicas en electroimán esférico*.

Tratemos, ahora, de encontrar las funciones electrotónicas debido a este electroimán.

Ellas serán de la forma

$$\alpha_0 = 0, \quad \beta_0 = \omega z, \gamma_0 = -\omega y$$

donde ω es alguna función de *r*. Donde no hay corrientes eléctricas, debemos tener a_2, b_2, c_2, cada uno = 0, y esto implica

$$\frac{d}{dr}\left(3\omega + r\frac{d\omega}{dr}\right) = 0 ,$$

cuya solución es

$$\omega = C_1 + \frac{C_2}{r^3}\,.$$

Dentro de la capa ω no puede ser infinito; por lo tanto $\omega = C_1$ es la solución, y fuera de la capa debe desaparecer a una distancia infinita, por lo que

$$\omega = \frac{C_2}{r^3}$$

es la solución fuera de la capa. La cantidad magnética dentro de la capa se encuentra, a partir del último artículo como

$$-2I_2\frac{n}{6a}\frac{3}{2k+k'} = a_1 = \frac{d\beta_0}{dz} - \frac{d\gamma_0}{dy} = 2C_1\,;$$

Por lo tanto, dentro de la esfera

$$\omega_0 = -\frac{I_2 n}{2a}\frac{1}{3k+k'}\,.$$

Fuera de la esfera debemos determinar ω para que coincida en la superficie con el valor interno. El valor externo es, por lo tanto

$$\omega = -\frac{I_2 n}{2a}\frac{1}{3k+k'}\frac{a^3}{r^3}\,,$$

donde la capa que contiene las corrientes está compuesta de n bobinas de alambre, que conducen una corriente de cantidad total I_2.

Sea otro cable enrollado alrededor de la capa de acuerdo con la misma ley, y supongamos que el número total de bobinas sea n'; entonces la intensidad electrotónica total, EI_2, alrededor de la segunda bobina se encuentra integrando

$$EI_2 = \int_0^{2\pi}\omega a \sin\theta ds\,,$$

a lo largo de todo el cable. La ecuación para ese cable es

$$\cos\theta = \frac{\phi}{n'\pi}$$

donde *n'* es un número grande. Por ello,

$$\begin{aligned} ds &= a \sin\theta d\phi \\ &= -an'\pi \sin^2\theta d\theta \end{aligned}$$

$$\therefore EI_2 = \frac{4\pi}{3}\omega a^2 n' = -\frac{2\pi}{3} ann' I \frac{1}{3k+k'}$$

E puede llamarse coeficiente electrotónico para el cable en particular.

XI. *Máquina electromagnética esférica a bobina*.

Ahora hemos obtenido la función electrotónica que define la acción de una bobina en la otra. La acción de cada bobina sobre sí misma se encuentra poniendo n^2 o n'^2 por nn'. Supongamos que la primera bobina se conecta con un aparato que produce una fuerza electromotriz variable *F*. Busquemos los efectos en ambos cables, suponiendo que sus resistencias totales sean *R* y *R'*, y la cantidad de las corrientes *I* e *I'*.

Reemplazando $\frac{2\pi}{3}\frac{a}{(3k+k')}$ por *N*, la fuerza electromotriz de la primera bobina sobre la segunda es

$$-Nnn'\frac{dI}{dt}.$$

La de la segunda sobre sí misma es

$$-Nn'^2\frac{dI'}{dt}.$$

La ecuación que da la intensidad de corriente en la segunda bobina es

$$-Nnn'\frac{dI}{dt} - Nn'^2\frac{dI'}{dt} = R'I' \tag{1}$$

Y la ecuación que da la intensidad de corriente en la primer bobina es

$$-Nn^2\frac{dI}{dt} - Nnn'\frac{dI'}{dt} + F = RI \tag{2}$$

Eliminando los coeficientes diferenciales, tenemos

$$\frac{R}{n}I-\frac{R'}{n'}I'=\frac{F}{n},$$

y
$$N\left(\frac{n^2}{R}+\frac{n'^2}{R'}\right)\frac{dI}{dt}+I=\frac{F}{R}+N\frac{n'^2}{R'}\frac{dF}{dt} \qquad (3)$$

de donde se pueden encontrar I y I'. Para este propósito, necesitamos conocer el valor de F en términos de t.

Consideremos primero el caso en el que F es constante e I e I' son, inicialmente, cero. Este es el caso de una máquina electromagnética a bobina en el momento en que la conexión se realiza con el canal galvánico.

Poniendo ½ τ en vez de $N\left(\frac{n^2}{R}+\frac{n'^2}{R'}\right)$ encontramos

$$I=\frac{F}{R}\left(1-\varepsilon^{-\frac{2t}{\tau}}\right)$$

$$I'=-F\frac{n'}{R'n}\varepsilon^{-\frac{2t}{\tau}}$$

La corriente primaria aumenta muy rápidamente de 0 a F/R, y la secundaria comienza en $-Fn'/R'n$ y desaparece rápidamente, debido a que el valor de τ es generalmente muy pequeño.

Todo el trabajo realizado ya sea por la corriente en el calentamiento del cable o en cualquier otro tipo de acción se encuentra a partir de la expresión

$$\int_0^\infty I^2 R\,dt$$

La cantidad total de corriente es

$$\int_0^\infty I\,dt$$

Para la corriente secundaria encontramos

$$\int_0^\infty I^2 R'\,dt=\frac{F^2 n'^2}{R'n^2}\frac{\tau}{4}, \qquad \int_0^\infty I'dt=\frac{Fn'}{R'n}\frac{\tau}{2}.$$

El trabajo realizado y la cantidad de corriente son, por lo tanto, los mismos que si una cantidad de corriente $I'=\frac{Fn'}{2R'n}$ hubiera pasado a través del cable durante un tiempo τ, donde

$$\tau = 2N\left(\frac{n^2}{R} + \frac{n'^2}{R'}\right)$$

Este método de considerar una corriente variable de corta duración se debe a Weber, cuyos métodos experimentales hacen que la determinación de la corriente equivalente sea una cuestión de gran precisión.

Ahora supongamos que la fuerza electromotriz *F* cesa repentinamente mientras que la corriente en el cable primario es I_0, y en el secundario = 0. Entonces tendremos para el tiempo subsiguiente

$$I = I_0 \varepsilon^{-\frac{2t}{\tau}}, \qquad I' = \frac{I_0}{R'} \frac{Rn'}{n} \varepsilon^{-\frac{2t}{\tau}}.$$

Las corrientes equivalentes son $\frac{1}{2}I_0$ y $\frac{1}{2} I_0 \frac{Rn'}{R'n}$ y su duración es τ.

Cuando se corta la comunicación con la fuente de la corriente, habrá un cambio en *R*. Esto producirá un cambio en el valor de τ, de modo que si *R* aumenta de repente, la intensidad de la corriente secundaria aumentará, y su duración disminuirá. Este es el caso en las máquinas a bobina ordinarias. La cantidad *N* depende de la forma de la máquina y puede determinarse experimentalmente para una máquina de cualquier forma.

XII. ***Capa esférica girando en un campo magnético***.

Tomemos ahora el caso de una capa giratoria de materia conductora bajo la influencia de un campo de fuerza magnética uniforme. Los fenómenos son explicados por Faraday en sus *Experimental Researches*, Serie II., y se dan referencias a experimentos previos.

Sea el eje *z* el eje de revolución, y que la velocidad angular sea ω. Supongamos que el magnetismo del campo se represente en cantidad por *I*, inclinado en un ángulo θ en la dirección de *z*, en el plano de *zx*.

Sea *R* el radio de la capa esférica, y *T* el espesor. Sean las cantidades α_0, β_0, γ_0, las funciones electrotónicas en cualquier punto del espacio; a_1, b_1, c_1, α_1, β_1, γ_1, símbolos de cantidad e intensidad magnética; a_2, b_2, c_2, α_2, β_2, γ_2, de cantidad e intensidad eléctrica. Sea p_2 la tensión eléctrica en cualquier punto,

$$\left.\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{dp_2}{dx} + ka_2 \\ \beta_2 &= \frac{dp_2}{dy} + kb_2 \\ \gamma_2 &= \frac{dp_2}{dz} + kc_2\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

$$\frac{da_2}{dx} + \frac{db_2}{dy} + \frac{dc_2}{dz} = 0 \tag{2}$$

$$\therefore \quad \frac{d\alpha_2}{dx} + \frac{d\beta_2}{dy} + \frac{d\gamma_2}{dz} = \nabla^2 p$$

Las expresiones para α_0, β_0, γ_0, debidas al magnetismo del campo son

$$\alpha_0 = A_0 + \frac{I}{2} y \cos\theta$$

$$\beta_0 = B_0 + \frac{I}{2}(z \sin\theta - x \cos\theta)$$

$$\gamma_0 = C_0 \frac{I}{2} y \sin\theta$$

A_0, B_0, C_0 son constantes; y las velocidades de las partículas en la esfera giratoria son

$$\frac{dx}{dt} = -\omega y\,, \qquad \frac{dy}{dt} = \omega x\,, \quad \frac{dz}{dt} = 0\,.$$

Por lo tanto, las fuerzas electromotrices son

$$\alpha_2 = -\frac{1}{4\pi}\frac{d\alpha_0}{dt} = -\frac{1}{4\pi}\frac{I}{2}\cos\theta\,\omega x\,,$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{4\pi}\frac{d\beta_0}{dt} = -\frac{1}{4\pi}\frac{I}{2}\cos\theta\,\omega y\,,$$

$$\gamma_2 = -\frac{1}{4\pi}\frac{d\gamma_0}{dt} = \frac{1}{4\pi}\frac{I}{2}\sin\theta\,\omega x\,.$$

Volviendo a las ecuaciones (1) tenemos

$$k\left(\frac{db_2}{dz} - \frac{dc_2}{dy}\right) = \frac{d\beta_2}{dz} - \frac{d\gamma_2}{dy} = 0\,,$$

$$k\left(\frac{dc_2}{dx}-\frac{da_2}{dz}\right)=\frac{d\gamma_2}{dx}-\frac{d\alpha_2}{dz}=\frac{1}{4\pi}\frac{I}{2}\sin\theta\,\omega,$$

$$k\left(\frac{da_2}{dy}-\frac{db_2}{dx}\right)=\frac{d\alpha_2}{dy}-\frac{d\beta_2}{dx}=0.$$

de donde, con la ecuación (2), encontramos

$$a_2=-\frac{1}{k}\frac{1}{4\pi}\frac{I}{4}\sin\theta\,\omega z,$$

$$b_2=0,$$

$$c_2=-\frac{1}{k}\frac{1}{4\pi}\frac{I}{4}\sin\theta\,\omega x$$

$$p_2=-\frac{1}{16\pi}I\omega\left\{\left(x^2+y^2\right)\cos\theta-xz\sin\theta\right\}$$

Estas expresiones determinarían completamente el movimiento de la electricidad en una esfera giratoria si despreciamos la acción de estas corrientes entre sí. Expresan un sistema de corrientes circulares alrededor del eje y, la cantidad de corriente en cualquier punto es proporcional a la distancia desde ese eje. El efecto magnético externo será el de un pequeño imán cuyo momento es $\frac{TR^3}{48\pi k}$ con su dirección a lo largo del eje y, de modo que el magnetismo del campo tenderá a volverlo al eje de x*.

La existencia de estas corrientes, por supuesto, alterará la distribución de las funciones electrotónicas, por lo que reaccionarán sobre sí mismas. Sea el resultado final de esta acción un sistema de corrientes sobre un eje en el plano xy inclinado al eje de x en un ángulo ϕ y produciendo un efecto externo igual al de un imán cuyo momento es $I'R^3$.

Los componentes inductivos magnéticos dentro de la capa son

$$\begin{aligned} I_1\sin\theta-2I'\cos\phi \quad & en\ x, \\ -2I'\sin\phi \quad & en\ y, \\ I_1\cos\phi \quad & en\ z. \end{aligned}$$

*La expresión para p_2 indica una tensión eléctrica variable en la capa, de modo que las corrientes pueden ser recogidas por cables que lo tocan en el ecuador y los polos.

Cada uno de estos produciría su propio sistema de corrientes cuando la esfera está en movimiento, y esto daría lugar a nuevas distribuciones de magnetismo, que, cuando la velocidad es uniforme, debe ser la misma que la distribución original,

$$\left(I_1\, sin\,\theta - 2I'\, cos\phi\right) en\ x\ \ produce\, 2\frac{T}{48\pi k}\omega\left(I_1\, sin\,\theta - 2I'\, cos\phi\right) en\ y\ \ ,$$

$$\left(-2I'\, sin\,\phi\right) en\ y\ \ produce\, 2\frac{T}{48\pi k}\omega\left(2I'\, sin\,\phi\right) en\ x\ \ ,$$

$$I_1\, cos\theta\ en\ z\ no\ \ produce\, corrientes$$

Por lo tanto, debemos tener las siguientes ecuaciones, ya que el estado de la capa es el mismo en cada instante,

$$I_1\, sin\,\theta - 2I'\, cos\phi = I_1\, sin\,\theta + \frac{T}{24\pi k}\omega 2I'\, sin\,\phi$$
$$-2I'\, sin\,\theta = \frac{T}{24\pi k}\omega\left(I_1\, sin\,\theta - 2I'\, cos\phi\right)$$

donde $$cot\phi = -\frac{TR^2}{24\pi k}\omega\,, \qquad I' = \frac{1}{2}\frac{\frac{T}{4\pi k}}{\sqrt{1+\left(\frac{T}{4\pi k}\omega\right)^2}} I_1\, sin\,\theta\,.$$

Para entender el significado de estas expresiones, consideremos un caso particular. Supongamos que el eje de la cubierta giratoria sea vertical, y permita que la revolución sea de norte a oeste. Supongamos que la intensidad total es la del magnetismo terrestre, y que la inclinación sea θ, entonces I cosθ es la componente horizontal en la dirección del norte magnético.

El resultado de la rotación es producir corrientes en la capa alrededor de un eje inclinado en un ángulo pequeño $= tan^{-1}\frac{T}{4\pi k}$ al sur del oeste magnético, y el efecto externo de estas corrientes es el mismo que el de un imán cuyo momento es

$$\frac{1}{2}\frac{T\omega}{\sqrt{\left(24\pi k\right)^2 + T^2\omega^2}} R^3 I\, cos\theta$$

El momento del par debido al magnetismo terrestre que tiende a detener la rotación es

$$\frac{24\pi k}{2}\frac{T\omega}{\sqrt{\left(24\pi k\right)^2 + T^2\omega^2}} R^3 I^2\, cos^2\,\theta$$

y la pérdida de trabajo debido a esto en una unidad de tiempo es

$$\frac{24\pi k}{2}\frac{T\omega}{\sqrt{(24\pi k)^2+T^2\omega^2}}R^3 I^2 \cos^2\theta$$

Esta pérdida de trabajo está compuesta por una evolución del calor en la sustancia de la capa, como lo demuestra un experimento reciente del Sr. Foucault (véase *Comptes Rendus*, XLI, p. 450)

TABLA DE MATERIAS

APÉNDICE B

A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. By J. Clerk Maxwell, *F.R.S.*

Recibida el 27 de octubre — Leída el 8 de diciembre de 1864.

PARTE I .— INTRODUCCIÓN.

(1) El fenómeno mecánico más obvio en experimentos eléctricos y magnéticos es la acción mutua mediante la cual los cuerpos en ciertos estados se ponen en movimiento mientras se encuentran a una distancia razonable entre sí. El primer paso, por lo tanto, en la reducción de estos fenómenos a la forma científica, es determinar la magnitud y la dirección de la fuerza que actúa entre los cuerpos, y cuando se encuentra que esta fuerza depende de cierta manera de la posición relativa de los cuerpos y en su condición eléctrica o magnética, parece a primera vista natural explicar los hechos al asumir la existencia de algo, ya sea en reposo o en movimiento en cada cuerpo, constituyendo su estado eléctrico o magnético, y capaz de actuar a distancia de acuerdo con las leyes matemáticas.

De esta forma se han elaborado teorías matemáticas de la electricidad estática, del magnetismo, de la acción mecánica entre conductores que transportan corrientes y de la inducción de corrientes. En estas teorías, la fuerza que actúa entre los dos cuerpos se trata con referencia solo a las condiciones de los cuerpos y a sus posiciones relativas y sin ninguna consideración expresa del medio circundante.

Estas teorías suponen, más o menos explícitamente, la existencia de sustancias, cuyas partículas tienen la propiedad de actuar unas sobre otras a distancia por atracción o repulsión. El desarrollo más completo de una teoría de este tipo es el de M. W. Weber[*], que ha hecho que la misma teoría incluya fenómenos electrostáticos y electromagnéticos.

Sin embargo, al hacerlo, ha encontrado necesario suponer que la fuerza entre dos partículas eléctricas depende de sus velocidades relativas, así como la distancia que media entre ellas.

Esta teoría, tal como fue desarrollada por los Sres. W. Weber y C. Neumann[†], es extremadamente ingeniosa y maravillosamente completa en su aplicación a los fenómenos de electricidad estática, atracciones electromagnéticas, inducción de corrientes y fenómenos diamagnéticos; y nos llega con más autoridad, ya que ha servido para guiar las especulaciones de alguien que ha hecho un gran avance en la parte práctica de la ciencia eléctrica, tanto al introducir un sistema consistente de unidades en la medición eléctrica, como por la realidad de determinar cantidades eléctricas con una precisión hasta ahora desconocida.

---

[*] "Electrodynamische Maassbestimmungen*", Leipzic Trans*, vol. i. 1849, y Taylor's Scientific Memoirs, vol. v. art. xiv.

[†] " Explicare tentatur quomodo fiat ut lucis planum polarizationis per vires electricas vel magneticas declinetur."— Halis Saxonum, 1858.

(2) Sin embargo, las dificultades mecánicas que están involucradas en la suposición de que las partículas actúan a distancia con fuerzas que dependen de sus velocidades, son tales que me impiden considerar esta teoría como la última, aunque pudo haber sido, y puede ser útil para conducir a la coordinación de fenómenos.

Por lo tanto, he preferido buscar una explicación del hecho en otra dirección, mediante la suposición que sean producidos por acciones que ocurren tanto en el medio circundante como en los cuerpos excitados, y tratando de explicar la acción entre cuerpos distantes sin asumir la existencia de fuerzas capaces de actuar directamente a distancias sensibles.

(3) Por lo tanto, la teoría que propongo puede llamarse teoría del campo electromagnético, porque tiene que ver con el espacio en la vecindad de los cuerpos eléctricos o magnéticos, y también puede llamarse Teoría Dinámica, porque supone que en ese espacio hay materia en movimiento, mediante la cual se producen los fenómenos electromagnéticos observados.

(4) El campo electromagnético es la parte del espacio que contiene y rodea cuerpos en condiciones eléctricas o magnéticas.

Puede llenarse con cualquier tipo de materia, o podemos tratar de mantenerlo vacío de toda la materia densa, como en el caso de los tubos de Geissler u otros llamados vacua.

Sin embargo, siempre queda suficiente materia para recibir y transmitir las ondulaciones de la luz y el calor, y es porque la transmisión de estas radiaciones no se altera mucho cuando se sustituyen los cuerpos transparentes de densidad medible por el llamado vacío, por lo que estamos obligados a admitir que las ondulaciones son las de una sustancia etérea, y no de la materia densa, cuya presencia simplemente modifica de algún modo el movimiento del éter.

Por lo tanto, tenemos alguna razón para creer, a partir de los fenómenos de la luz y el calor, que hay un medio fijo que llena el espacio y que atraviesa los cuerpos, que puede ponerse en movimiento y transmitir ese movimiento de una parte a otra y comunicar ese movimiento a la materia densa para calentarla y afectarla de varias maneras.

(5) Ahora, la energía comunicada al cuerpo al calentarlo debió haber existido anteriormente en el medio móvil, ya que las ondulaciones habían dejado la fuente de calor algún tiempo antes de llegar al cuerpo, y durante ese tiempo la energía debe haber sido la mitad en forma de movimiento del medio y la mitad en forma de resiliencia elástica. De estas consideraciones el Profesor W. Thomson ha argumentado[*] que el medio debe tener una densidad capaz de compararse con la materia densa e incluso ha asignado un límite inferior a esa densidad.

6) Por lo tanto, podemos recibir, como un dato derivado de una rama de la ciencia independiente de la que tenemos que tratar, la existencia de un medio penetrante, de densidad pequeña pero real,

[*] "On the Possible Density of the Luminiferous Medium, and on the Mechanical Value of a Cubic Mile of Sunlight," *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* (1854), p. 57.

capaz de ponerse en movimiento, y de transmitir movimiento de una parte a otra con gran velocidad, pero no infinita.

Por lo tanto, las partes de este medio deben estar tan conectadas que el movimiento de una parte dependa de algún modo del movimiento del resto; y al mismo tiempo estas conexiones deben ser capaces de un cierto tipo de elasticidad, ya que la comunicación del movimiento no es instantánea, sino que ocupa tiempo.

Por lo tanto, el medio es capaz de recibir y almacenar dos tipos de energía, a saber, la energía "real", dependiente de los movimientos de sus partes y la energía "potencial", que consiste en el trabajo que hará el medio para recuperarse del desplazamiento en virtud de su elasticidad.

La propagación de ondulaciones consiste en la transformación continua de una de estas formas de energía, alternativamente en la otra, y en cualquier momento la cantidad de energía en todo el medio se divide por igual, de modo que la mitad es energía de movimiento y la mitad es resiliencia elástica.

(7) Un medio que tiene tal constitución puede ser capaz de otros tipos de movimiento y desplazamiento que aquellos que producen los fenómenos de luz y calor, y algunos de estos pueden ser de tal naturaleza que puedan ser evidenciados a nuestros sentidos por los fenómenos que producen.

(8) Ahora sabemos que el medio luminífero es, en algunos casos, utilizado por el magnetismo; ya que Faraday[*] descubrió que cuando un rayo de luz polarizada planarmente atraviesa un medio diamagnético transparente en la dirección de las líneas de fuerza magnética producidas por imanes o corrientes en la vecindad, se produce un giro en el plano de polarización.

Esta rotación es dirigida siempre en la dirección en la que se debe llevar electricidad positiva alrededor del cuerpo diamagnético para producir la magnetización real del campo.

Desde entonces, Verdet[†] ha descubierto que si un cuerpo paramagnético, como la solución de percloruro de hierro en éter, se sustituye por el cuerpo diamagnético, la rotación ocurre en la dirección opuesta.

Últimamente, el Profesor W. Thomson[‡] ha señalado que ninguna distribución de fuerzas que actúe entre las partes de un medio cuyo único movimiento es el de las vibraciones luminosas, es suficiente para dar cuenta de los fenómenos, pero que debemos admitir la existencia de un movimiento en el medio que depende de la magnetización, además del movimiento vibratorio que constituye la luz.

Es cierto que la rotación del plano de polarización por el magnetismo ha sido observada sólo en medios de densidad considerable; pero las propiedades del campo magnético no se alteran tanto por

[*]Experimental Researches in Electricity, Series 19.
[†]ComptesRendus (1856, segunda mitad del año, p. 529, y 1857, primera mitad del año, p. 1209).
[‡]Proceedings of the Royal Society, junio de 1856 y junio de 1861.

la sustitución de un medio por otro, o por el vacío, como para permitirnos suponer que el medio denso hace algo más que simplemente modificar el movimiento del éter. Por lo tanto, tenemos motivos justificables para indagar si no puede haber un movimiento del medio etéreo dondequiera que se observen efectos magnéticos, y tenemos alguna razón para suponer que este movimiento es uno de rotación, teniendo a la dirección de la fuerza magnética como su eje.´

(9) Ahora podemos considerar otro fenómeno observado en el campo electromagnético. Cuando un cuerpo se mueve a través de las líneas de fuerza magnética, experimenta lo que se llama una fuerza electromotriz; las dos extremidades del cuerpo tienden a electrificarse opuestamente, y una corriente eléctrica tiende a fluir a través del cuerpo. Cuando la fuerza electromotriz es lo suficientemente potente y está hecha para actuar sobre ciertos cuerpos compuestos, los descompone y hace que uno de sus componentes pase hacia un extremo del cuerpo y el otro en la dirección opuesta.

Aquí tenemos evidencia de una fuerza que causa una corriente eléctrica a pesar de la resistencia; electrificando las extremidades de un cuerpo con cargas opuestas, una condición que se sostiene únicamente por la acción de la fuerza electromotriz, y que, tan pronto como se elimina esa fuerza, tiende, con una fuerza igual y opuesta, a producir una contracorriente a través del cuerpo y restaurar el estado eléctrico original del cuerpo; y finalmente, si es lo suficientemente fuerte, descompone sustancias químicas y llevando a sus componentes en direcciones opuestas, mientras que su tendencia natural es combinarlas, y hacerlo con una fuerza que puede generar una fuerza electromotriz en la dirección inversa.

Entonces, esta es una fuerza que actúa sobre un cuerpo debida a su movimiento a través del campo electromagnético, o por cambios que ocurren en ese campo en sí mismo; y el efecto de la fuerza es producir una corriente y calentar el cuerpo, o descomponer el cuerpo, o, cuando no puede hacer ninguna de las dos cosas, poner el cuerpo en un estado de polarización eléctrica, un estado de coacción en el cual las extremidades opuestas están electrificadas opuestamente, y del cual el cuerpo tiende a aliviarse tan pronto como se elimina la fuerza perturbadora.

(10) De acuerdo con la teoría que propongo explicar, esta "fuerza electromotriz" Es la fuerza que se pone en juego durante la comunicación del movimiento de una parte del medio a otra, y es mediante esta fuerza que el movimiento de una parte causa el movimiento en otra parte. Cuando la fuerza electromotriz actúa sobre un circuito conductor, produce una corriente que, al encontrar resistencia, ocasiona una transformación continua de energía eléctrica en calor, que es incapaz de ser restaurada nuevamente a la forma de energía eléctrica por cualquier reversión del proceso.

(11) Pero cuando la fuerza electromotriz actúa sobre un dieléctrico produce un estado de polarización de sus partes, similar en distribución a la polaridad de las partes de una masa de hierro bajo la influencia de un imán, y como la polarización magnética, capaz de ser descrito como un estado en el que cada partícula tiene sus polos opuestos en condiciones opuestas[*].

[*] Faraday, *Exp. Res*. Series XI; Mossotti, *Mem. della Soc. Italiana* (Modena), vol. xxiv. parte*2*. p. 49.

En un dieléctrico bajo la acción de la fuerza electromotriz, podemos concebir que ella electricidad en cada molécula está tan desplazada que un lado se representa de manera positiva y el otro eléctricamente negativo, pero que la electricidad permanece completamente conectada con la molécula, y no pasa de una molécula a otra. El efecto de esta acción en toda la masa dieléctrica es producir un desplazamiento general de electricidad en una determinada dirección. Este desplazamiento no equivale a una corriente, porque cuando ha alcanzado un cierto valor permanece constante, pero es el comienzo de una corriente, y sus variaciones constituyen corrientes en la dirección positiva o negativa según que el desplazamiento aumenta o decrece. En el interior del dieléctrico no hay indicios de electrificación, porque la electrificación de la superficie de cualquier molécula se neutraliza por la electrificación opuesta de las superficies de las moléculas en contacto con ella; pero en la superficie límite del dieléctrico, donde la electrificación no se neutraliza, encontramos los fenómenos que indican la electrificación positiva o negativa.

La relación entre la fuerza electromotriz y la cantidad de desplazamiento eléctrico que produce depende de la naturaleza del dieléctrico, la misma fuerza electromotriz produce generalmente un mayor desplazamiento eléctrico en dieléctricos sólidos, como vidrio o azufre, que en el aire.

(12) Aquí, entonces, percibimos otro efecto de la fuerza electromotriz, a saber, el desplazamiento eléctrico, que según nuestra teoría es una especie de elasticidad que cede a la acción de la fuerza, similar a la que tiene lugar en las estructuras y máquinas debido a la falta de rigidez perfecta de las conexiones.

(13) La investigación práctica de la capacidad inductiva de los dieléctricos se vuelve difícil a causa de dos fenómenos perturbadores. El primero es la conductividad del dieléctrico, que, aunque en muchos casos es excesivamente pequeño, no es del todo insensible. El segundo es el fenómeno llamado absorción eléctrica[*], en virtud del cual, cuando el dieléctrico está expuesto a la fuerza electromotriz, el desplazamiento eléctrico aumenta gradualmente, y cuando se elimina la fuerza electromotriz, el dieléctrico no vuelve instantáneamente a su estado primitivo, sino solo descarga una parte de su electrificación, y cuando se deja solo adquiere gradualmente electrificación en su superficie, a medida que el interior se despolariza gradualmente. Casi todos los dieléctricos sólidos exhiben este fenómeno, que da lugar a la carga residual en el frasco de Leyden, y a varios fenómenos de cables eléctricos descritos por el Sr. F. Jenkin[†].

(14) Tenemos aquí otros dos tipos de rendimiento además del rendimiento del dieléctrico perfecto, que hemos comparado con un cuerpo perfectamente elástico. El rendimiento debido a la conductividad puede compararse con el de un fluido viscoso (es decir, un fluido que tiene una gran fricción interna), o un sólido blando en el que la fuerza más pequeña produce una alteración permanente de la figura que aumenta con el tiempo durante el cual el actos de fuerza. El rendimiento debido a la absorción eléctrica se puede comparar con el de un cuerpo elástico celular que contiene un fluido espeso en sus cavidades. Tal cuerpo, cuando se somete a presión, se comprime gradualmente en función del rendimiento gradual del fluido espeso; y cuando se elimina la presión no recupera de

[*]Faraday, *Exp. Res*, 1233 -1250.

[†]*Reports of British Association*, 1859, p. 248 ;y *Report of Committee of Board of Trade on Submarine Cables*, pp. 136 *y* 464.

inmediato su figura, porque la elasticidad de la sustancia del cuerpo ha ido superando gradualmente la tenacidad del fluido antes de que pueda recuperar el equilibrio completo.

Varios cuerpos sólidos en los que no se puede encontrar ninguna estructura como la que hemos supuesto, parecen poseer una propiedad mecánica de este tipo[‡]; y parece probable que las mismas sustancias, si dieléctricas, pueden poseer la propiedad eléctrica análoga, y si son magnéticas, pueden tener propiedades correspondientes relacionadas con la adquisición, retención y pérdida de polaridad magnética.

(15) Por lo tanto, parece que ciertos fenómenos de la electricidad y el magnetismo conducen a la misma conclusión que los de la óptica, a saber, que hay un medio etéreo que impregna todos los cuerpos, y modificado solo en grado por su presencia; que las partes de este medio pueden ser puestas en movimiento por corrientes eléctricas e imanes; que este movimiento se comunica de una parte del medio a otra por fuerzas que surgen de las conexiones de esas partes; que bajo la acción de estas fuerzas hay un cierto rendimiento dependiendo de la elasticidad de estas conexiones; y que, por lo tanto, la energía en dos formas diferentes puede existir en el medio, siendo la única forma la energía real de movimiento de sus partes, y la otra es la energía potencial almacenada en las conexiones, en virtud de su elasticidad.

(16) Entonces, nos conducen a la concepción de un mecanismo complicado capaz de una gran variedad de movimientos, pero al mismo tiempo conectado de tal modo que el movimiento de una parte depende, de acuerdo con las relaciones definidas, del movimiento de otra partes, estos movimientos son comunicados por fuerzas que surgen del desplazamiento relativo de las partes conectadas, en virtud de su elasticidad. Tal mecanismo debe estar sujeto a las leyes generales de la Dinámica, y debemos ser capaces de resolver todas las consecuencias de su movimiento, siempre que conozcamos la forma de la relación entre los movimientos de las partes.

(17) Sabemos que cuando se establece una corriente eléctrica en un circuito conductor, la parte vecina del campo se caracteriza por ciertas propiedades magnéticas, y que si dos circuitos están en el campo, las propiedades magnéticas del campo debido a los dos las corrientes se combinan. Por lo tanto, cada parte del campo está en conexión con ambas corrientes, y las dos corrientes se ponen en conexión entre sí en virtud de su conexión con la magnetización del campo. El primer resultado de esta conexión que propongo examinar, es la inducción de una corriente por otra y el movimiento de los conductores en el campo.

El segundo resultado, que se deduce de esto, es la acción mecánica entre los conductores que llevan corrientes. El fenómeno de la inducción de corrientes ha sido deducido de su acción mecánica por Helmholtz[*] y Thomson[†]. He seguido el orden inverso, y deduje la acción mecánica de las leyes de inducción. Luego describí métodos experimentales para determinar las cantidades L, M, N de las que dependen estos fenómenos.

[‡] Como, por ejemplo, la composición de pegamento, melaza, etc., De los cuales se hacen pequeñas figuras de plástico, que después de ser distorsionadas recuperan gradualmente su forma.

[*] "Conservation of Force," *Physical Society of Berlin*, 1847; y Taylor's Scientific Memoirs, 1853,p. 114.

[†] Reports of the British Association, 1848; Philosophical Magazine, Dic. 1851.

(18) Luego aplico los fenómenos de inducción y atracción de corrientes a la exploración del campo electromagnético y el establecimiento de sistemas de líneas de fuerza magnética que indican sus propiedades magnéticas. Al explorar el mismo campo con un imán, muestro la distribución de sus superficies magnéticas equipotenciales, cortando las líneas de fuerza en ángulos rectos.

A fin de usar estos resultados dentro del poder del cálculo simbólico, voy a expresarlos en la forma de las Ecuaciones Generales del Campo Electromagnético.

Estas ecuaciones expresan:

(A) La relación entre el desplazamiento eléctrico, la conducción verdadera y la corriente total, formada por ambos.

(B) La relación entre las líneas de fuerza magnética y los coeficientes inductivos de un circuito, como ya se dedujo de las leyes de inducción.

(C) La relación entre la fuerza de una corriente y sus efectos magnéticos, de acuerdo con el sistema electromagnético de medición.

(D) El valor de la fuerza electromotriz en un cuerpo, como resultado del movimiento del cuerpo en el campo, la alteración del campo en sí, y la variación de la electricidad potencial de una parte del campo a otra.

(E) La relación entre el desplazamiento eléctrico y la fuerza electromotriz que lo produce.

(F) La relación entre una corriente eléctrica y la fuerza electromotriz que la produce.

(G) La relación entre la cantidad de electricidad libre en cualquier punto y los desplazamientos eléctricos en el vecindario.

(H) La relación entre el aumento o la disminución de la electricidad libre y las corrientes eléctricas en el vecindario. Hay veinte de estas ecuaciones en total, que implican veinte cantidades variables.

(19) Luego expreso en términos de estas cantidades la energía intrínseca de la Electromagnética. En cada punto, el campo depende en parte de su polarización eléctrica y en parte de su polarización magnética.

De esto determino la fuerza mecánica actuante, primero, en un conductor movible llevando una corriente eléctrica; 2º, en un polo magnético; En tercer lugar, en un cuerpo electrificado. El último resultado, a saber, la fuerza mecánica que actúa sobre un cuerpo electrificado, da lugar a un método independiente de medición eléctrica fundado en sus efectos electrostáticos. La relación entre las unidades empleadas en los dos métodos se muestra que depende de lo que he llamado "Elasticidad eléctrica" del medio, y para ser una velocidad, que ha sido determinada experimentalmente por MM. Weber y Kohlrausch.

Luego muestro cómo calcular la capacidad electrostática de un condensador, y la capacidad inductiva específica de un dieléctrico.

Se examina a continuación el caso de un condensador compuesto por capas paralelas de sustancias de diferentes resistencias eléctricas y capacidades inductivas, y se muestra que generalmente se producirá el fenómeno denominado absorción eléctrica, es decir, cuando el condensador se descarga repentinamente, al cabo de breve tiempo muestra signos de una carga residual.

20) Las ecuaciones generales se aplican seguidamente al caso de una perturbación magnética propagada a través de un campo no conductor, y se demuestra que las únicas perturbaciones que pueden propagarse son las que son transversales a la dirección de propagación, y que la velocidad de propagación es la velocidad, que se encuentra en experimentos como los de Weber, que expresa el número de unidades de electricidad electrostáticas que están contenidas en una unidad electromagnética.

Esta velocidad es tan cercana a la de la luz, que parece que tenemos una fuerte razón para concluir que la luz misma (incluido el calor radiante y otras radiaciones) es una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético según las leyes electromagnéticas. Si así es, la concordancia entre la elasticidad del medio calculada a partir de las rápidas alternancias de las vibraciones luminosas y la que se encuentra en los lentos procesos de experimentos eléctricos muestra cuán perfectas y regulares deben ser las propiedades elásticas del medio cuando no están cargadas, cualquier materia más densa que el aire. Si el mismo carácter de la elasticidad se retiene en cuerpos transparentes densos, parece que el cuadrado del índice de refracción es igual al producto de la capacidad dieléctrica específica y la capacidad magnética específica.

Esta velocidad es tan cercana a la de la luz, que parece que tenemos una fuerte razón para concluir que la luz misma (incluido el calor radiante y otras radiaciones) es una perturbación electromagnética en forma de ondas propagadas a través del campo electromagnético según las leyes electromagnéticas. Si así es, la concordancia entre la elasticidad del medio calculada a partir de las rápidas alternancias de las vibraciones luminosas y la que se encuentra en los lentos procesos de experimentos eléctricos muestra cuán perfectas y regulares deben ser las propiedades elásticas del medio cuando no están interactuando con cualquier materia más densa que el aire. Si el mismo carácter de la elasticidad se retiene en cuerpos transparentes densos, parece que el cuadrado del índice de refracción es igual al producto de la capacidad dieléctrica específica y la capacidad magnética específica. Se demuestra que los medios conductores absorben dichas radiaciones rápidamente y, por lo tanto, son generalmente opacos.

La concepción de la propagación de las perturbaciones magnéticas transversales excluyendo a las longitudinales fue claramente establecida por el Profesor Faraday[*] en sus "Pensamientos sobre las vibraciones de los rayos". La teoría electromagnética de la luz, como él la propuso, es la misma, en sustancia, que comencé a desarrollar en este documento, excepto que en 1846 no había datos para calcular la velocidad de propagación.

[*] Philosophical Magazine, Mayo de 1846, o Experimental Researches, iii. p. 447.

(21) Las ecuaciones generales se aplican luego al cálculo de los coeficientes de inducción mutua de dos corrientes circulares y el coeficiente de autoinducción en una bobina. Se investiga la falta de uniformidad de la corriente en las diferentes partes de la sección de un cable al comienzo de la corriente, creo por primera vez, y se encuentra la corrección consiguiente del coeficiente de autoinducción.

Estos resultados se aplican al cálculo de la autoinducción de la bobina utilizada en los experimentos del Comité de la Asociación Británica de Normas de Resistencia Eléctrica, y el valor se compara con el deducido de los experimentos.

PARTE II – SOBRE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Momentum electromagnético de una corriente

(22) Podemos comenzar considerando el estado del campo en las vecindades de una corriente eléctrica. Sabemos que las fuerzas magnéticas se excitan en el campo, su dirección y magnitud dependen de las leyes conocidas sobre la forma del conductor que transporta la corriente. Cuando aumenta la intensidad de la corriente, todos los efectos magnéticos aumentan en la misma proporción. Ahora, si el estado magnético del campo depende de los movimientos del medio, se debe ejercer una cierta fuerza para aumentar o disminuir estos movimientos, y cuando los movimientos se excitan, continúan, de modo que el efecto de la conexión entre la corriente y el campo electromagnético que lo rodea, es dotar a la corriente de una especie de momentum, al igual que la conexión entre el punto de conducción de una máquina y un volante dota al punto de conducción con un momentum adicional, que se puede llamar momentum del volante reducido al punto de conducción. La fuerza desequilibrada que actúa en el punto de conducción aumenta este momentum, y se mide por la tasa de su aumento.

En el caso de las corrientes eléctricas, la resistencia al aumento o disminución repentina de la intensidad produce efectos exactamente iguales a los del momentum, pero la cantidad de este momentum depende de la forma del conductor y la posición relativa de sus diferentes partes.

Acción mutua de dos corrientes

(23) Si hay dos corrientes eléctricas en el campo, la fuerza magnética en cualquier punto es la compuesta de las fuerzas debidas a cada corriente por separado, y ya que las dos corrientes están en conexión con cada punto del campo, estarán en conexión entre sí, de modo que cualquier aumento o disminución de uno producirá una fuerza que actúa con el otro o contrario al otro.

Ilustración dinámica del momentum reducido

(24) Como ilustración dinámica, supongamos que un cuerpo C está tan conectado con dos puntos de conducción independientes A y B que su velocidad es p veces la de A y q veces la de B. Sea u la velocidad de A, v la de B, y w la de C, y sean δr, δy, δz, sus desplazamientos simultáneos, luego por la ecuación general de la Dinámica[*]

$$C\frac{dw}{dt}\delta z = X\delta x + Y\delta y$$

[*] Lagrange, *Mec. Anal.* ii. 2. § *5.*

donde X e Y son las fuerzas que actúan en A y en B.

Pero $$\frac{dw}{dt} = p\frac{du}{dt} + q\frac{dv}{dt}$$

y $$\delta z = p\delta x + q\delta y$$

Sustituyendo y recordando que δx y δy son independientes

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{d}{dt}\left(Cp^2u + Cpqv\right) \\ Y &= \frac{d}{dt}\left(Cpqu + Cq^2v\right) \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Podemos llamar a $Cp^2u + Cpqv$ el momentum de *C* referido a *A* y a $Cpqu + Cq^2v$ el momentum de *C* referido a *B*; entonces podemos decir que el efecto de la fuerza *X* es incrementar el momentum de *C* referido a *A* y el de *Y* de incrementar su momentum referido a *B*. Si hay varios cuerpos conectados a *A* y *B* de manera similar pero con diferentes valores de *p* y *q*, podemos tratar la cuestión de la misma manera, suponiendo

$$L = \sum\left(Cp^2\right) \quad M = \sum\left(Cpq\right) \quad N = \sum\left(Cq^2\right)$$

Donde las sumatorias están extendidas a todos los cuerpos con sus valores propios de *C*, *p* y *q*. Luego, el momentum del sistema referido a *A* es:

$$Lu + Mv$$

y el referido a *B* es

$$Mu + Nv$$

Por lo que tendremos

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{d}{dt}\left(Lu + Mv\right) \\ Y &= \frac{d}{dt}\left(Mu + Nv\right) \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Donde *X* e *Y* son las fuerzas externas que actúan sobre *A* y *B*.

(25) Para hacer la ilustración más completa, solo tenemos que suponer que el movimiento de *A* es resistido por una fuerza proporcional a su velocidad, que podemos llamar *Ru*, y la de *B* por una fuerza similar, que podemos llamar *Sv*, *R* y *S* son coeficientes de resistencia. Entonces siξ y η son las fuerzas en *A* y *B*

$$\left.\begin{aligned}\xi = X + Ru = Ru + \frac{d}{dt}(Lu + Mv)\\ \eta = Y + Sv = Sv + \frac{d}{dt}(Mu + Nv)\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Si la velocidad de A aumenta a la velocidad, $\frac{du}{dt}$ entonces para evitar que B se mueva se le debe aplicar una fuerza, $\eta\,\frac{d}{dt}(Mu)$

Este efecto en *B*, debido a un aumento de la velocidad de *A*, corresponde a la fuerza electromotriz en un circuito que surge de un aumento en la fuerza de un circuito vecino.

Esta ilustración dinámica se debe considerar meramente como una ayuda al lector a comprender lo que significa “Reducción del momentum” en Mecánica. Los hechos de la inducción de corrientes como dependientes de las variaciones de la cantidad llamada Momentum electromagnético, o Estado electrotónico, se basan en los experimentos de Faraday*, Felici†, etc.

Coeficientes de inducción para dos circuitos.

(26) En el campo electromagnético, los valores de *L, M, N* dependen de la distribución de los efectos magnéticos debido a los dos circuitos, y esta distribución depende únicamente de la forma y posición relativa de los circuitos. Por lo tanto, *L, M, N* son cantidades que dependen de la forma y la posición relativa de los circuitos, y están sujetas a variaciones con el movimiento de los conductores. Se verá en el presente que *L, M, N* son cantidades geométricas de la naturaleza de las líneas, es decir, de una sola dimensión en el espacio; *L* depende de la forma del primer conductor, que llamaremos *A*, *N* por el de la segunda, que llamaremos *B*, y *M* por la posición relativa de *A* y *B*.

(27) Sea ξ la fuerza electromotriz que actúa sobre *A*, *x* la fuerza de la corriente, y *R* la resistencia, entonces *Rx* será la fuerza de resistencia. En corrientes estacionarias, la fuerza electromotriz equilibra sólo la fuerza resistente, pero en corrientes variables la fuerza resultante $\xi = Rx$ se emplea en aumentar el "momentum electromagnético", usando la palabra momentum, simplemente, para expresar lo que se genera por una fuerza que actúa durante un tiempo, es decir, una velocidad que existe en un cuerpo.

En el caso de las corrientes eléctricas, la fuerza en acción no es una fuerza mecánica ordinaria, al menos todavía no podemos medirla como fuerza común, pero la llamamos fuerza electromotriz, y el cuerpo movido no es simplemente la electricidad en el conductor, sino algo fuera del conductor, y capaz de ser afectado por otros conductores en sus vecindades llevando corrientes. En esto se parece

**Experimental Researches,* Series I., IX .

†*Annales de Chimie*, ser. 3. xxxiv. (1852) p. 64.

más al impulso reducido de un punto de conducción de una máquina influenciado por sus conexiones mecánicas, que el de un simple cuerpo en movimiento como una bala de cañón o agua moviéndose en un tubo.

Relaciones electromagnéticas entre dos circuitos conductores

(28.) En el caso de dos circuitos conductores, *A* y *B*, supondremos que el momentum electromagnético correspondiente a *A* es

$$Lx + My$$

Y el correspondiente a *B*

$$Mx + Ny$$

donde *L, M, N* corresponden a las mismas cantidades en la ilustración dinámica, excepto que se supone que son capaces de variar cuando se mueven los conductores *A* o *B*.

Entonces, la ecuación de la corriente en *x* en A será

$$\xi = Rx + \frac{d}{dt}(Lx + My) \quad (4)$$

Y la de *y*en *B*

$$\eta = Sy + \frac{d}{dt}(Mx + Ny) \qquad (5)$$

dondeξ yη son las fuerzas electromotrices, *x* e *y* las corrientes y *R* y S las resistencias en *A* y *B*, respectivamente.

Inducción de una corriente por otra

(29) Caso 1:Cuando no hay fuerza electromotriz en *B*, excepto la que surge de la acción de *A*, y permite que la corriente de *A* aumente desde 0 hasta el valor *x*,

$$Sy + \frac{d}{dt}(Mx + Ny) = 0 \qquad (6)$$

De donde

$$Y = \int_0^t y dt = -\frac{M}{S} x \qquad (7)$$

Es decir, una cantidad de electricidad *Y*, que es la corriente inducida total, fluirá a través de *B* cuando *x* se eleva de 0 a *x*. Esto es la inducción por variación de la corriente en el conductor primario. Cuando *M* es positivo, la corriente inducida debido al aumento de la corriente primaria es negativa.

Inducción por el movimiento del conductor

(30) Caso 2:Cuando *x* permanece constante, y *M* cambia a *M'*:

$$Y = -\frac{M' - M}{S} x$$

de modo que si se aumenta *M*, que será cuando los circuitos primario y secundario se acercan entre sí, habrá una corriente inducida negativa; siendo *Y* la cantidad total de electricidad atravesada por B. Esta es una inducción por el movimiento relativo de los conductores primario y secundario.

Ecuación del trabajo y la energía

Para encontrar la relación entre el trabajo realizado y la energía producida, se multiplica la (1) por *x* y la (2) por *y*y se suman

$$\xi x + \eta y = Rx^2 + Sy^2 + x\frac{d}{dt}(Lx + My) + y\frac{d}{dt}(Mx + Ny) \qquad (8)$$

Aquí está el trabajo hecho por unidad de tiempo por la fuerza electromotriz ξx actuando sobre la corriente *x* y manteniéndola, y ηy es el trabajo hecho por la fuerza electromotriz η.Por lo tanto, el lado izquierdo de la ecuación representa el trabajo realizado por las fuerzas electromotrices por unidad de tiempo.

Calor producido por la corriente

(32) Del otro lado de la ecuación tenemos, primero

$$Rx^2 + Sy^2 = H \qquad (9)$$

que representa el trabajo realizado para superar la resistencia de los circuitos en la unidad de tiempo. Esto se convierte en calor. Los términos restantes representan trabajo no convertido en calor. Pueden escribirse

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(Lx^2+2Mxy+Ny^2\right)+\frac{1}{2}\frac{dL}{dt}x^2+\frac{dM}{dt}xy+\frac{1}{2}\frac{dN}{dt}y^2$$

Energía intrínseca de las corrientes

(33) Si *L, M, N* son constantes, todo el trabajo de las fuerzas electromotrices que no es gastado contra la resistencia se empleará al desarrollo de las corrientes. Por lo tanto, toda la energía intrínseca de las corrientes es

$$\frac{1}{2}Lx^2+Mxy+\frac{1}{2}Ny^2=E \qquad (10)$$

Esta energía existe en una forma imperceptible para nuestros sentidos, probablemente como movimiento real, el lugar de este movimiento no es simplemente los circuitos conductores, sino el espacio que los rodea.

Acción mecánica entre conductores

(34) Los términos remanentes

$$\frac{1}{2}\frac{dL}{dt}x^2+\frac{dM}{dt}xy+\frac{1}{2}\frac{dN}{dt}y^2=W \qquad (11)$$

representan el trabajo realizado en la unidad de tiempo derivado de las variaciones de *L, M* y *N*, o lo que es lo mismo, alteraciones en la forma y posición de los circuitos conductores *A* y *B*.

Ahora bien, si se realiza el trabajo cuando se mueve un cuerpo, debe surgir de una fuerza mecánica ordinaria que actúa sobre el cuerpo mientras se mueve. Por lo tanto, esta parte de la expresión muestra que hay una fuerza mecánica que impulsa cada parte de los conductores en aquella dirección en la que los valores de *L, M* y *N* sean los más incrementados.

La existencia de la fuerza electromagnética entre los conductores que transportan corrientes es, por lo tanto, una consecuencia directa de la acción conjunta e independiente de cada corriente en el campo electromagnético. Si A y B pueden acercarse a una distancia *ds* para aumentar *M* desde *M* a M’ mientras que las corrientes son *x* e *y*, entonces el trabajo realizado es

$$\left(M'-M\right)xy$$

y la fuerza en la dirección de *ds* será

$$\frac{dM}{ds}xy \qquad (12)$$

y esto será una atracción si *x* e *y* son del mismo signo, y si *M* aumenta a medida que *A* y *B* se aproximan.

Parece, por lo tanto, que si admitimos que la parte no resistida de la fuerza electromotriz, mientras actúa, continúa generando un estado auto-persistente de la corriente, que podemos llamar (por analogía mecánica) su momentum electromagnético, y que este momentum depende de las circunstancias externas al conductor, entonces tanto la inducción de las corrientes y las atracciones electromagnéticas pueden ser probadas por razonamientos mecánicos. Lo que he llamado momentum electromagnético es la misma cantidad que lo que se llama, por Faraday*, el estado electrotónico del circuito; todo cambio que involucre la acción de una fuerza electromotriz, como el cambio del momentum, involucra la acción de una fuerza mecánica.

Por lo tanto, los fenómenos descritos por Faraday en la Novena Serie de sus *Experimental Researches*, – que fueron los únicos hechos conocidos sobre las corrientes eléctricas, – las leyes de Ampere relacionadas con la atracción de conductores que trasportan corrientes, así como las de Faraday sobre la inducción mutua de corrientes, podrían deducirse por razonamiento mecánico.

Para llevar estos resultados dentro del rango de verificación experimental, tendré que investigar el caso de una sola corriente, de dos corrientes, y de seis corrientes en el equilibrio eléctrico, para permitir al experimentador determinar los valores de *L, M, N*.

Caso de un único circuito

(35) La ecuación de a corriente *x* en un circuito cuya resistencia es *R* y cuyo coeficiente de autoinducción es *L*, actuando por una fuerza electromotriz externa ξ, es

$$\xi - Rx = \frac{d}{dt}Lx \qquad (13)$$

Cuando ξ es constante, la solución toma la forma de

$$x = b + (a-b)e^{-\frac{R}{L}t}$$

donde *a* es el valor de la corriente al comienzo y *b* es su valor final. La cantidad total de electricidad que pasa en un tiempo *t*, donde *t*, tiene un valor grande, es

*Experimental Researches, Series I, 60, etc.

$$\int_0^t x\,dt = bt + (a-b)\frac{L}{R} \tag{14}$$

El valor de la integral de x^2 con respecto al tiempo es

$$\int_0^t x^2 dt = b^2 t + (a-b)\frac{L}{R}\left(\frac{3b+a}{2}\right) \tag{15}$$

La corriente real cambia gradualmente del valor inicial *a* al valor final *b*, pero los valores de las integrales de *x* y x^2 son los mismos que si fluyera una corriente constante de intensidad $\frac{1}{2}$ (a + b) durante un tiempo 2 L/R y luego fuera sucedida por la corriente estable *b*. El tiempo 2 L/R es, generalmente, tan minúsculo como una fracción de segundo, que los efectos sobre el galvanómetro y el dinamómetro pueden calcularse como si el impulso fuera instantáneo.

Si el circuito consta de una batería y una bobina, cuando el circuito se completa por primera vez, los efectos son los mismos que si la corriente tuviera solo la mitad de su potencia final durante el tiempo $2L/R$. Esta disminución de la corriente, debido a la inducción, a veces se denomina contracorriente.

(36) Si se lanza repentinamente una resistencia adicional *r* al circuito que al romper el contacto, fuerza a la corriente a pasar a través de un cable delgado de resistencia *r*, entonces la corriente original que era $a = \xi / R$ da lugar a la corriente final $b = \xi / (R + r)$.

Entonces, la corriente de inducción es $\frac{1}{2}\xi\frac{2R+r}{R(R+r)}$ y continúa durante un tiempo $2L/(R + r)$. Esta corriente es mayor que la que la batería puede mantener para los dos cables *R* y *r* y puede ser suficiente para provocar la ignición del cable delgado *r*.

Cuando el contacto se rompe separando los cables en el aire, esta resistencia adicional viene dada por el aire interpuesto, y dado que la fuerza electromotriz a través de la nueva resistencia es muy grande, se forzará la producción de una chispa.

Si la fuerza electromotriz es de la forma *E* sen *pt*, como en el caso de una bobina que gira en un campo magnético, entonces

$$x = \frac{E}{\zeta} sin(pt - \alpha)$$

donde $\zeta^2 = R^2 + L^2p^2$ y tg$\alpha = Lp/R$

Caso de dos circuitos

(37) Sea *B* el circuito primario y sea *S* el circuito secundario, entonces tenemos un caso similar al de la bobina de inducción.

Las ecuaciones de las corrientes son aquellas marcadas con *A* y *B*, y aquí podemos suponer que *L*, *M*, *N* son constantes porque no hay movimiento de los conductores. Las ecuaciones se vuelven

$$\left.\begin{aligned} Rx + L\frac{dx}{dt} + M\frac{dy}{dt} = \xi \\ Sy + M\frac{dx}{dt} + N\frac{dy}{dt} = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (13^*)$$

Para encontrar la cantidad total de electricidad que pasa, solo tenemos que integrar estas ecuaciones con respecto a *t*; entonces si x_0, y_0 son las intensidades de la corriente en el tiempo 0, y x_1, y_1 en el tiempo *t*, y si *X, Y* son las cantidades de electricidad pasadas a través de cada circuito durante el tiempo *t*,

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{1}{R}\{\xi t + L(x_{0.} - x_1) + M(y_0 - y_1)\} \\ Y &= \frac{1}{S}\{M(x_{0.} - x_1) + N(y_0 - y_1)\} \end{aligned}\right\} \qquad (14^*)$$

Cuando se completa el circuito B, y *t* es grande, las corrientes totales hasta el tiempo t, se encuentran al hacer

$$x_0 = 0, \qquad x_1 = \xi/Ry_0 = 0 \qquad y_1 = 0$$

$$X = x_1\left(t - \frac{L}{R}\right) Y = -\frac{M}{S}x_1 \qquad (15^*)$$

El valor de la contracorriente total en *B* es por lo tanto independiente del circuito secundario y la corriente de inducción en el circuito secundario depende solo de M, el coeficiente de inducción entre las bobinas, S la resistencia de la bobina secundaria, y x_1 la fuerza final de la corriente en *B*.

Cuando la fuerza electromotriz | deja de actuar, hay una corriente extra en el circuito primario y una corriente inducida positiva en el circuito secundario, cuyos valores son iguales y opuestos a los producidos al hacer contacto.

(38) Todas las cuestiones relacionadas con la cantidad total de corrientes transitorias, medidas por el impulso dado al imán del galvanómetro, pueden resolverse de esta manera sin la necesidad de una solución completa de las ecuaciones. El efecto de calentamiento de la corriente y el impulso que le da a la bobina suspendida del dinamómetro de Weber dependen del cuadrado de la corriente en cada instante durante el corto tiempo que dura.

Por lo tanto, debemos obtener la solución de las ecuaciones, y de la solución podemos encontrar los efectos tanto en el galvanómetro como en el dinamómetro; y luego podemos hacer uso del método de Weber para estimar la intensidad y la duración de una corriente uniforme mientras dura, lo que produciría los mismos efectos.

(39) Sean n_1, n_2, las raíces de la ecuación

$$(LN - M^2)n^2 + (RN + LS)n + RS = 0 \qquad \textbf{(16)}$$

y supongamos que la bobina primaria actúa con una fuerza electromotriz constante Rc, de modo que c sea la corriente constante que podría mantener; entonces la solución completa de las ecuaciones para hacer contacto es

$$x = \frac{c}{S}\frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2}\left\{\left(\frac{S}{n_1} + N\right)e^{n_1 t} - \left(\frac{S}{n_2} + N\right)e^{n_2 t} + S\frac{n_1 - n_2}{n_1 n_2}\right\} \qquad (17)$$

$$y = \frac{cM}{S}\frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2}\left(e^{n_1 t} - e^{n_2 t}\right) \qquad (18)$$

A partir de las cuales podemos calcular el impulso sobre el dinamómetro

$$\int x^2 dt = c^2\left\{t - \frac{3}{2}\frac{L}{R} - \frac{1}{2}\frac{M^2}{RN + LS}\right\} \qquad (19)$$

$$\int y^2 dt = c^2 \frac{1}{2}\frac{M^2 R}{S(RN + LS)} \qquad (20)$$

Los efectos de la corriente en la bobina secundaria sobre el galvanómetro y el dinamómetro son los mismos que los de una corriente uniforme

$$-\frac{1}{2}c\frac{MR}{RN + LS}$$

en un tiempo

$$2\left(\frac{L}{R} + \frac{N}{S}\right)$$

(40) La ecuación entre trabajo y la energía puede verificarse fácilmente. El trabajo hecho por la fuerza electromotriz es

$$\xi\int x^2 dt = c^2(Rt - L)$$

El trabajo realizado para superar la resistencia y producir calor

$$R\int x^2dt + S\int y^2dt = c^2\left(Rt - \frac{3}{2}L\right)$$

$$= \frac{1}{2}c^2L$$

(41) Si el circuito *R* se interrumpe repentina y completamente mientras transporta una corriente *c*, entonces la ecuación de la corriente en la bobina secundaria sería

$$y = c\frac{M}{N}e^{-\frac{S}{N}t}$$

Esta corriente comienza con un valor $c\frac{M}{N}$ y desaparece gradualmente.

La cantidad total de electricidad es $c\frac{M}{S}$ y el valor de $\int y^2dt$ es $= c^2\frac{M^2}{2SN}$

Los efectos sobre el galvanómetro y el dinamómetro son iguales al que produce una corriente uniforme $\frac{1}{2}c\frac{M}{N}$ durante un tiempo $\frac{2N}{S}$ Por lo tanto, el efecto de calentamiento es mayor que el de la corriente al hacer contacto.

(42) Si una fuerza electromotriz descrita por ξ cos *pt* actúa sobre el circuito *R*, entonces, si se remueve el circuito *S*, el valor de *x* será:

$$x = \frac{E}{A}sen\left(pt - \alpha\right)$$

$$A^2 = R^2 + L^2p^2$$

$$tan\alpha = \frac{Lp}{R}$$

El efecto de la presencia del circuito *S* en las vecindades es llevar el valor de *A* y α, a lo que serían si R se volviera

$$R + p^2\frac{MS}{S^2 + p^2N^2}$$

y *L* se volviera

$$L - p^2 \frac{MN}{S^2 + p^2 N^2}$$

Por lo tanto, el efecto de la presencia del circuito *S* es aumentar la resistencia aparente y disminuir la aparente autoinducción del circuito *R*.

Sobre la Determinación de Coeficientes de Inducción por el Equilibrio Eléctrico

(43) La determinación del balance eléctrico se hace mediante seis conductores que unen cuatro puntos, *AC,DE*, dos y dos. Un par, *AC*, de estos puntos está conectado a través de la batería *B*. El par opuesto, *DE*, está conectado a través del galvanómetro *G*. Entonces, si las resistencias de los cuatro conductores restantes están representadas por *P, Q, R, S* y las corrientes en ellas por *x, x–z* e *y + z*, la corriente a través de *G* será *z*. Sean los potenciales en los cuatro puntos *A, C, D, E*. Entonces las condiciones de las corrientes constantes se pueden encontrar a partir de las ecuaciones

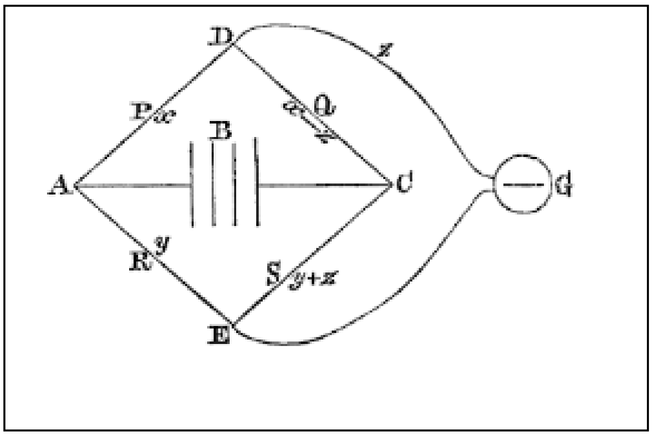
$$\left.\begin{array}{ll} Px = A - D & Q(x - z) = D - C \\ Ry = A - E & S(y + z) = E - C \\ Gz = D - E & B(x + y) = A + C + F \end{array}\right\} \qquad (21)$$

Resolviendo estas ecuaciones, se encuentra para *z*

$$z\left\{\frac{1}{P}+\frac{1}{Q}+\frac{1}{R}+\frac{1}{S}+B\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{R}\right)\left(\frac{1}{Q}+\frac{1}{S}\right)+G\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{Q}\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{S}\right)+\frac{BG}{PQRS}(P+Q+R+S)\right\}=F\left(\frac{1}{PS}-\frac{1}{QR}\right) \qquad (22)$$

En esta expresión F es la fuerza electromotriz de la batería, z la corriente a través del galvanómetro cuando se ha vuelto estacionario. *P, Q, R, S* las resistencias en las cuatro ramas. *B* la de la batería y los electrodos, y *G* la del galvanómetro.

(44) Si *PS = QR*, entonces *z* = 0, y no habrá corriente constante a través del galvanómetro se puede producir al hacer o interrumpir el circuito debido a la inducción, y las indicaciones del galvanómetro pueden usarse para determinar los coeficientes de inducción, siempre que entendamos las acciones que tienen lugar.



Supondremos que *PS = QR*, de modo que la corriente *z* desaparece cuando se deja transcurrir suficiente tiempo y

$$x(P+Q) = y(R+S) = \frac{F(P+Q)(R+S)}{(P+Q)(R+S)+B(P+Q)(R+S)}$$

Sean los coeficientes de Inducción entre *P, Q, R, S,* los dados por la siguiente tabla; sea *p* el coeficiente de inducción de *P* sobre sí mismo, entre *P* y *Q*, sea *h*, y así sucesivamente. Sea *g* el coeficiente de inducción del galvanómetro sobre sí mismo y supongamos que está fuera del alcance de la influencia inductiva de *P, Q, R, S* (como debe ser para evitar la acción directa de *P, Q, R, S* sobre la aguja). Sean *X, Y, Z* las integrales de *x, y, z* con respecto a *t*. Al hacer contacto *x, y, z* son cero. Después de un tiempo *z* desaparece y*x* e *y* alcanzan valores constantes. Las ecuaciones para cada conductor serán entonces

$$\left\{\begin{array}{l} PX + (p+h)x + (k+l)y = \int Adt - \int Ddt \\ Q(X-Z) + (h+q)x + (m+n)y = \int Ddt - \int Cdt \\ RY + (k+m)x + (r+o)y = \int Adt - \int Edt \\ S(Y+Z) + (l+n)x + (o+s)y = \int Edt - \int Cdt \\ GZ = \int Ddt - \int Edt \end{array}\right\} \tag{24}$$

Resolviendo estas ecuaciones para ***Z*** se encuentra

$$\left.\begin{array}{l} Z\left\{\frac{1}{P}+\frac{1}{Q}+\frac{1}{R}+\frac{1}{S} + B\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{R}\right)\left(\frac{1}{Q}+\frac{1}{S}\right) + G\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{Q}\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{S}\right) + \frac{BG}{PQRS}(P+Q+R+S)\right\} \\ = -F\frac{1}{PS}\left\{\frac{p}{P}-\frac{q}{Q}-\frac{r}{R}+\frac{s}{S}+h\left(\frac{1}{P}-\frac{1}{Q}\right)+k\left(\frac{1}{P}-\frac{1}{Q}\right)+l\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{Q}\right)-m\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{S}\right)\right\}+n\left(\frac{1}{Q}-\frac{1}{S}\right)+o\left(\frac{1}{S}-\frac{1}{R}\right) \end{array}\right\} \tag{25}$$

(45) Sea α la deflexión del galvanómetro por una corriente instantánea cuya intensidad es Z.

Sea θ la deflexión permanente producida por llevar la relación entre *PR* y *QR* de 1 a ζ.

También sea *T* el tiempo de vibración de la aguja del galvanómetro entre dos detenciones consecutivas.

	P	Q	R	S
P	p	h	k	l
Q	h	q	m	n
R	k	m	r	o
S	l	n	o	s

Entonces llamando a la cantidad

(26) $$\left\{\frac{p}{P}-\frac{q}{Q}-\frac{r}{R}+\frac{s}{S}+h\left(\frac{1}{P}-\frac{1}{Q}\right)+k\left(\frac{1}{P}-\frac{1}{Q}\right)+l\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{Q}\right)-m\left(\frac{1}{P}+\frac{1}{S}\right)\right\}+n\left(\frac{1}{Q}-\frac{1}{S}\right)+o\left(\frac{1}{S}-\frac{1}{R}\right)=\tau$$

encont con-
tramos

$$\frac{Z}{z}=\frac{2\sin\frac{1}{2}\alpha}{\tan\theta}\frac{T}{\pi}=\frac{\tau}{1-\zeta} \tag{27}$$

Al determinar τ por experimento, es mejor hacer la alteración de la resistencia en uno de los brazos mediante el arreglo descrito por el Sr. Jenkin en el Informe de la Asociación Británica de 1863, mediante el cual se puede medir con precisión cualquier valor de ξde 1 a 1,01.

Observamos (α) la mayor desviación debido al impulso de inducción cuando el galvanómetro está en circuito, cuando se realizan las conexiones, y cuando las resistencias están ajustadas para no dar una corriente permanente.

Luego observamos (β) la mayor desviación producida por la corriente permanente cuando la resistencia de uno de los brazos aumenta en la proporción de 1 a ξ, el galvanómetro no está en circuito hasta poco después de que la conexión se realiza con la batería. Para eliminar los efectos de la resistencia del aire, lo mejor es variar ξ hasta casi $\beta = 2\alpha$; entonces

$$\tau = T\frac{1}{\pi}(1-\zeta)\frac{2\sin\frac{1}{2}\alpha}{\tan\frac{1}{2}\beta} \tag{28}$$

Si todos los brazos del balance excepto *P* están formados por bobinas de resistencia de alambre muy fino de poca longitud y duplicados antes de ser enrollados, los coeficientes de inducción que corresponden a estas bobinas serán insensibles, y τ se reducirá a p/P. Por lo tanto, el equilibrio eléctrico proporciona los medios para medir la autoinducción de cualquier circuito cuya resistencia se conozca.

(46) También se puede usar para determinar el coeficiente de inducción entre dos circuitos, como por ejemplo, que entre *P* y *S* que hemos llamado *m*; pero sería más conveniente medir esto midiendo directamente la corriente, como en (37), sin usar el de equilibrio. También podemos determinar la igualdad de p/P y q/Q al no haber una corriente de inducción, y así, cuando conocemos el valor de *p*, podemos determinar el de *q* por un método más perfecto que la comparación de deflexiones.

Exploración del campo electromagnético.

(47) Supongamos ahora que el circuito primario *A* es de forma invariable, y exploremos el campo electromagnético por medio del circuito secundario *B*, que supondremos que es variable en forma y posición.

Podemos comenzar por suponer que *B* consiste en un conductor recto corto, con sus extremidades deslizándose sobre dos carriles conductores paralelos, que se ponen en conexión a cierta distancia de la pieza deslizante.

Entonces, si desliza el conductor movible en una dirección dada, aumenta el valor de M, una fuerza electromotriz negativa actuará en el circuito *B*, tendiendo a producir una corriente negativa en *B* durante el movimiento de la pieza deslizante.

Si se mantiene una corriente en el circuito *B*, entonces la pieza deslizante tenderá a moverse en esa dirección, lo que hace que *M* aumente. En cada punto del campo siempre habrá una cierta dirección de modo que un conductor movido en esa dirección no experimente ninguna fuerza electromotriz en cualquier dirección en que se giren sus extremidades. Un conductor que transporta corriente no experimentará ninguna fuerza mecánica que lo impulse en esa dirección o lo contrario.

Esta dirección se llama la dirección de la línea de fuerza magnética a través de ese punto. El movimiento de un conductor a través de dicha línea produce fuerza electromotriz en una dirección perpendicular a la línea y a la dirección del movimiento, y un conductor que transporta una corriente se impulsa en una dirección perpendicular a la línea y a la dirección de la corriente.

(48) Podemos suponer que *B* consiste en un circuito plano muy pequeño capaz de ser colocado en cualquier posición y de hacer girar su plano en cualquier dirección. El valor de M será mayor cuando el plano del circuito sea perpendicular a la línea de fuerza magnética. Por lo tanto, si se mantiene una corriente en B, tenderá a establecerse en esta posición y, por sí misma, indicará, como un imán, la dirección de la fuerza magnética.

Sobre las líneas de fuerza magnéticas

(49) Suponga cualquier superficie que dibuje, cortando las líneas de fuerza magnética, y que en esta superficie se permita que cualquier sistema de líneas se dibuje a intervalos pequeños, de modo que se ubiquen uno al lado del otro sin cortarse entre sí. Luego, dibuje cualquier línea en la superficie cortando todas estas líneas y permita que una segunda línea se dibuje cerca de ella, su distancia desde la primera es tal que el valor de M para cada uno de los espacios pequeños encerrados entre estas dos líneas y las líneas del primer sistema sea igual a la unidad.

De la misma manera, se dibujarán más líneas para formar un segundo sistema, de modo que el valor de M para cada retículo formado por la intersección de los dos sistemas de líneas sea la unidad. Finalmente, desde cada punto de intersección de estos retículos, trace una línea a través del campo, siempre coincidiendo en su dirección con la dirección de la fuerza magnética.

(50) De esta manera, todo el campo se llenará con líneas de fuerza magnética en forma de intervalos regulares, y las propiedades del campo electromagnético se expresarán completamente por ellos.

1º Si se dibuja cualquier curva cerrada en el campo, el valor de M para esa curva se expresará por el número de líneas de fuerza que atraviesan esa curva cerrada.

2º. Si esta curva es un circuito conductor y se mueve a través del campo, una fuerza electromotriz actuará en él, representada por la tasa de disminución del número de líneas que pasan a través de la curva.

3º. Si se mantiene una corriente en el circuito, el conductor actuará sobre las fuerzas que tienden a moverlo para aumentar el número de líneas que pasan a través de él, y la cantidad de trabajo realizado por estas fuerzas será igual a la corriente en el circuito multiplicada por el número de líneas adicionales.

4to. Si se coloca un pequeño circuito plano en el campo y se puede girar libremente, colocará su plano perpendicular a las líneas de fuerza. Un pequeño imán se moverá espontáneamente hasta colocarse con su eje en la dirección de las líneas de fuerza.

5to. Si en el campo se coloca una barra larga y uniformemente magnetizada, cada polo será activado por una fuerza en la dirección de las líneas de fuerza. El número de líneas de fuerza que pasan por la unidad de área es igual a la fuerza que actúa sobre un polo unitario multiplicado por un coeficiente que depende de la naturaleza magnética del medio, y se denomina coeficiente de inducción magnética.

En fluidos y sólidos isotrópicos, el valor de este coeficiente μ es el mismo en cualquier dirección en que las líneas de fuerza pasen a través de la sustancia, pero en sólidos cristalizados, tensionados y organizados, el valor de μ puede depender de la dirección de las líneas de fuerza con respecto a los ejes de cristalización, tensión o crecimiento.

En todos los cuerpos, μ se ve afectado por la temperatura, y en el hierro parece disminuir a medida que la intensidad de la magnetización aumenta.

Sobre superficies magnéticas equipotenciales

(51) Si exploramos el campo con una barra uniformemente magnetizada, siempre que uno de sus polos se encuentre en una parte muy débil del campo magnético, entonces las fuerzas efectuarán trabajo sobre el otro polo mientras la barra se mueve por el campo.

Si comenzamos desde un punto dado y trasladamos este polo desde él a cualquier otro punto, el trabajo realizado será independiente de la trayectoria del polo entre los dos puntos; siempre que no pase corriente eléctrica entre las diferentes trayectorias que recorre el polo.

Por lo tanto, cuando en el campo no hay corrientes eléctricas sino solo imanes, podemos dibujar una serie de superficies de manera que el trabajo hecho al pasar de una a otra sea constante sea cual sea el camino que se siga entre ellas. Tales superficies se llaman Superficies equipotenciales, y en casos ordinarios son perpendiculares a las Líneas de fuerza magnética.

Si estas superficies están dibujadas de manera tal que, cuando un polo unidad pasa en orden de una a otra, se realiza una unidad de trabajo, entonces el trabajo realizado en cualquier movimiento de un polo magnético será medido por la fuerza del polo multiplicado por el número de superficies que ha atravesado en la dirección positiva.

(52) Si hay circuitos que llevan corrientes eléctricas en el campo, entonces todavía habrá superficies equipotenciales en las partes del campo externas a los conductores que transportan las corrientes, pero el trabajo realizado en un polo unidad al pasar de uno a otro dependerá de la cantidad de veces que el camino del polo circula alrededor de cualquiera de estas corrientes. Por lo tanto, el potencial en cada superficie tendrá una serie de valores en la progresión aritmética, que se diferencian por el trabajo realizado al pasar completamente alrededor de una de las corrientes en el campo.

Las superficies equipotenciales no serán superficies cerradas continuas, sino que algunas de ellas tendrán extensiones limitadas, terminando en el circuito eléctrico como su borde o límite común. El número de estos será igual a la cantidad de trabajo realizado en un polo unidad al recorrer la corriente, y esto mediante la medición ordinaria $= 4\pi\gamma$, donde γ es el valor de la corriente.

Por lo tanto, estas superficies están conectadas con la corriente eléctrica como las burbujas de jabón están conectadas con un anillo en los experimentos del Sr.Plateau. Cada corriente γ tiene superficies unidas a ella. Estas superficies tienen a la corriente como su borde común y se encuentran con ella en ángulos iguales. La forma de las superficies en otras partes depende de la presencia de otras corrientes e imanes, así como de la forma del circuito al que pertenecen.

PARTE III. ECUACIONES GENERALES DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

(53.) Supongamos que tres direcciones rectangulares en el espacio sean los ejes *x, y, z,* y dejemos que todas las cantidades que tengan cierta dirección sean expresadas por sus componentes en estas tres direcciones.

Corrientes eléctricas (*p, q, r*)

(54) Una corriente eléctrica consiste en la transmisión de electricidad de una parte de un cuerpo a otro. Sea *p* la cantidad de electricidad transmitida en una unidad de tiempo a través de la unidad de área perpendicular al eje de *x,* entonces *p* es el componente de la corriente en ese lugar en la dirección de *x*

Usaremos las letras *p, q, r* para denotar las componentes de la corriente por unidad de área en las direcciones de *x, y, z.*

Desplazamientos eléctricos (*f, g, h*)

(55) El desplazamiento eléctrico consiste en la electrificación opuesta de los lados de una molécula o partícula de un cuerpo que puede o no estar acompañada de transmisión a través del cuerpo. Suponga que la cantidad de electricidad que aparecería en las caras *dy, dz* de un elemento *dx, dy, dz* cortado del cuerpo sea *f dydz,* entonces *f* es el componente del desplazamiento eléctrico paralelo a *x.* Usaremos *f, g, h* para denotar los desplazamientos eléctricos paralelos a *x, y, z* respectivamente.

Las variaciones del desplazamiento eléctrico deben agregarse a las corrientes *p, q, r* para obtener el movimiento total de la electricidad, que podemos llamar *p ', q'. r',* para que

$$\left.\begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt} \\ q' &= q + \frac{dg}{dt} \\ r' &= r + \frac{dh}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A)}$$

Fuerza electromotriz (*P, Q, R*)

(56) Supongamos que *P, Q, R* representan a los componentes de la fuerza electromotriz en cualquier punto. Entonces P representa la diferencia de potencial por unidad de longitud en un conductor colocado en la dirección *x* en el punto dado.

Podemos suponer un alambre indefinidamente colocado paralelo a x en un punto dado y tocado, por la acción de la fuerza por dos pequeños conductores, que luego son aislados y eliminados de la influencia de la fuerza electromotriz. El valor de P podría determinarse midiendo la carga de los conductores.

Por lo tanto, si l es la longitud del cable, la diferencia de potencial entre sus extremos será Pl, y si C es la capacidad de cada uno de los conductores pequeños, la carga en cada uno será $\frac{1}{2}CPl$. Dado que las capacidades de los conductores moderadamente grandes, medidas en el sistema electromagnético, son excesivamente pequeñas, las fuerzas electromotrices ordinarias que surgen de las acciones electromagnéticas difícilmente podrían medirse de esta manera. En la práctica, tales mediciones se realizan siempre con conductores largos que forman circuitos cerrados o casi cerrados.

Momentum electromagnético (*F, G, H*)

(57) Sea que F, G, H representen los componentes del momentum electromagnético en cualquier punto del campo, debido a cualquier sistema de imanes o corrientes. Entonces F es el impulso total de la fuerza electromotriz en la dirección de x que será generado al eliminar del campo esos imanes o corrientes, es decir, si P fuera la fuerza electromotriz en cualquier instante durante la remoción del sistema.

$$F = \int P dt$$

De ahí que la parte de la fuerza electromotriz que depende del movimiento de los imanes o las corrientes en el campo, o su alteración de intensidad, es

$$P = -\frac{dF}{dt}, \quad Q = -\frac{dG}{dt}, \quad R = -\frac{dH}{dt}, \tag{29}$$

Momentum electromagnético de un circuito

(58) Sea s la longitud del circuito, si integramos

$$\int \left(F\frac{dx}{ds} + G\frac{dy}{ds} + H\frac{dz}{ds} \right) ds \tag{30}$$

alrededor del circuito, obtendremos el momentum electromagnético total del circuito, o el número de líneas de fuerza magnética que pasan a través de él, cuyas variaciones miden la fuerza electromotriz total en el circuito. Este momentum electromagnético es lo mismo que el Profesor Faraday le ha aplicado el nombre del Estado Electrotónico.

Si el circuito es el límite del área elemental $dydz$, entonces el momentum electromagnético es

$$\left(\frac{dH}{dy}-\frac{dG}{dz}\right)dydz$$

Y este es el número de líneas de fuerza magnética que pasan a través del área *dydz*.

Fuerza magnética (α, β, γ)

(59) Supongamos que α, β, γ representan la fuerza que actúa sobre un polo magnético unitario colocado en el punto dado resuelto en las direcciones de *x*, *y* y *z*.

Coeficiente de inducción magnética (μ)

(60) Sea μ la relación entre la inducción magnética en un medio dado y la del aire bajo una fuerza de magnetización igual, entonces el número de líneas de fuerza en la unidad de área perpendicular a *x* será μα (μ es una cantidad que depende de la naturaleza del medio, su temperatura, la cantidad de magnetización ya producida, y en cuerpos cristalinos, que varía con la dirección).

(61) Expresando el momentum eléctrico de pequeños circuitos perpendiculares a los tres ejes mediante esta notación, obtenemos el siguiente

Ecuaciones de fuerza magnética

$$\left.\begin{aligned}\mu\alpha&=\frac{dH}{dy}-\frac{dG}{dz},\\ \mu\beta&=\frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx},\\ \mu\gamma&=\frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy},\end{aligned}\right\}\qquad (B)$$

Ecuaciones de las corrientes

(62) Por experiencia se sabe que el movimiento de un polo magnético en el campo electromagnético en un circuito cerrado no puede generar trabajo a menos que el circuito que describe el polo pase alrededor de una corriente eléctrica. Por lo tanto, excepto en el espacio ocupado por las corrientes eléctricas,

$$\alpha dx+\beta dy+\gamma dz=d\varphi \qquad (31)$$

es una diferencial completa de φ , el potencial magnético.

La cantidad φ puede ser susceptible de un número indefinido de valores distintos, de acuerdo con el número de veces que el punto de exploración pasa alrededor de las corrientes eléctricas en su curso. La diferencia entre valores sucesivos de φ correspondiente a un pasaje completamente circular de una corriente de fuerza *c*, es $4\pi c$.

Por lo tanto, si no hay corriente eléctrica

$$\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} = 0$$

Pero si hay una corriente *p'*

Análogamente,

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} &= 4\pi p' \\ \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} &= 4\pi q' \\ \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} &= 4\pi r' \end{aligned}\right\} \qquad (C)$$

A estas ecuaciones, las podemos llamar *ecuaciones de las corrientes.*

Fuerza electromotriz en un circuito

(63) Sea ξ la fuerza electromotriz que actúa en el circuito A, luego

$$\xi = \int \left(P\frac{dx}{ds} + Q\frac{dy}{ds} + R\frac{dz}{ds} \right) ds \qquad (32)$$

donde *ds* es el elemento de longitud, y la integración se realiza a lo largo de todo el circuito.

Suponga que las fuerzas en el campo sean las debidas a los circuitos *A* y *B*, entonces el momentum electromagnético de *A* es

$$\int \left(F\frac{dx}{ds} + G\frac{dy}{ds} + H\frac{dz}{ds} \right) ds = Lu + mv \qquad (33)$$

donde *u* y *v* son las corrientes que circulan por *A* y *B*, y

$$\xi = -\frac{d}{dt}(Lu + mv) \qquad (34)$$

Si no hubiera movimiento en el circuito *A*

$$\left.\begin{aligned} P &= -\frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx} \\ Q &= -\frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy} \\ R &= -\frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz} \end{aligned}\right\} \qquad (35)$$

donde Ψ es una función de *x*, *y*, *z* y *t*, que es indeterminada en cuanto a la solución de las ecuaciones anteriores, porque los términos que dependen de ella desaparecerán al integrarse alrededor del circuito. Sin embargo, la cantidad Ψ siempre puede determinarse en un caso particular cuando conocemos las condiciones reales del caso. La interpretación física de Ψ es que representa el potencial eléctrico en cada punto del espacio.

Fuerza electromotriz en un conductor en movimiento

(64) Supongamos que un conductor recto, corto, de longitud *a*, paralelo al eje de *x* se mueve con una velocidad cuyas componentes son *dx/dt*, *dy/dt*, *dz/dt* permitiendo que sus extremidades se deslicen a lo largo de dos conductores paralelos con una velocidad *ds/dt*. Busquemos la alteración del momentum electromagnético del circuito del cual esta disposición forma parte.

En una unidad de tiempo, el conductor en movimiento ha recorrido las distancias *dx/dt*, *dy/dt*,*dz/dt*, a lo largo de las direcciones de los tres ejes, y al mismo tiempo las longitudes de los conductores paralelos incluidos en el circuito han aumentado cada una en *ds/dt*.

Por ello, la cantidad

$$\int\left(F\frac{dx}{ds} + G\frac{dy}{ds} + H\frac{dz}{ds}\right)ds$$

aumentará debido a los siguientes incrementos

$a\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{dt} + \frac{dF}{dy}\frac{dy}{dt} + \frac{dF}{dz}\frac{dz}{dt}\right)$ debido al movimiento del conductor.

$-a\frac{ds}{dt}\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{dt} + \frac{dG}{dx}\frac{dy}{dt} + \frac{dH}{dx}\frac{dz}{dt}\right)$ debido al alargamiento del circuito.

Por lo tanto, el incremento total será

$$a\left(\frac{dF}{dy} - \frac{dG}{dx}\right)\frac{dy}{dt} - a\left(\frac{dH}{dx} - \frac{dF}{dz}\right)\frac{dz}{dt}$$

O, en función de las ecuaciones de la Fuerza Magnética

$$P = \mu\gamma\frac{dy}{dt} - \mu\beta\frac{dz}{dt} \qquad (36)$$

Las ecuaciones completas de la fuerza electromotriz sobre un conductor en movimiento, pueden ahora escribirse de la siguiente manera: —

Ecuaciones de la Fuerza Electromotriz

$$\left.\begin{aligned} P &= \mu\left(\gamma\frac{dy}{dt} - \beta\frac{dz}{dt}\right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx} \\ Q &= \mu\left(\alpha\frac{dz}{dt} - \gamma\frac{dx}{dt}\right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy} \\ R &= \mu\left(\beta\frac{dx}{dt} - \alpha\frac{dy}{dt}\right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz} \end{aligned}\right\} \qquad (D)$$

El primer término en el lado derecho de cada ecuación representa la fuerza electromotriz que surge del movimiento del conductor mismo. Esta fuerza electromotriz es perpendicular a la dirección del movimiento y a las líneas de fuerza magnética; y si se dibujara un paralelogramo cuyos lados representen en dirección y magnitud la velocidad del conductor y la inducción magnética en ese punto del campo, entonces el área del paralelogramo representará la fuerza electromotriz debida al movimiento del conductor, y la dirección de la fuerza será perpendicular al plano del paralelogramo.

El segundo término en cada ecuación indica el efecto de los cambios en la posición o en las fuerza de imanes o corrientes en el campo.

El tercer término muestra el efecto del potencial eléctrico Ψ. No tiene ningún efecto en provocar una corriente circulante en un circuito cerrado. Indica la existencia de una fuerza que impulsa la electricidad hacia o desde ciertos puntos definidos en el campo.

Elasticidad eléctrica

(66) Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un dieléctrico, pone cada parte del dieléctrico en una condición polarizada, en la que sus lados opuestos están electrizados opuestamente. La cantidad de esta electrificación depende de la fuerza electromotriz y de la naturaleza de la sustancia, y, en sólidos que tienen una estructura definida según sus ejes, en la dirección de la fuerza electromotriz con respecto a estos ejes. En sustancias isótropas, si k es la relación entre la fuerza electromotriz y el desplazamiento eléctrico, podemos escribir las

Ecuaciones de elasticidad eléctrica.

$$\left.\begin{aligned} P &= kf \\ Q &= kg \\ R &= kh \end{aligned}\right\} \qquad (E)$$

Resistencia eléctrica

67) Cuando una fuerza electromotriz actúa sobre un conductor, produce una corriente de electricidad a través de él. Este efecto es adicional al desplazamiento eléctrico ya considerado. En sólidos de estructura compleja, la relación entre la fuerza electromotriz y la corriente depende de su dirección a través del sólido. En las sustancias isótropas, que solo consideraremos aquí, si ζ es la resistencia específica referida a la unidad de volumen, podemos escribir las

Ecuaciones de la resistencia eléctrica

$$\left.\begin{aligned} P &= -\varsigma p \\ Q &= -\varsigma q \\ R &= -\varsigma r \end{aligned}\right\} \qquad (F)$$

Cantidad eléctrica

(68) Supongamos que *e* representa la cantidad de electricidad positiva libre contenida en la unidad de volumen en cualquier parte del campo; luego, dado que esto surge de la electrificación de las diferentes partes del campo que no se neutralizan entre sí, podemos escribir el

Ecuación de la electricidad libre

$$e + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0 \qquad (G)$$

(69) Si el medio es conductor de la electricidad, entonces tendremos otra condición, que podría llamarse, como en hidrodinámica, la

Ecuación de continuidad

$$\frac{de}{dt}+\frac{dp}{dx}+\frac{dq}{dy}+\frac{dr}{dz}=0 \qquad (H)$$

(70) En estas ecuaciones del campo electromagnético hemos supuesto veinte cantidades variables, a saber,

Para el momentum electromagnético	$F \quad G \quad H$
Para la intensidad magnética	$\alpha \quad \beta \quad \gamma$
Para la fuerza electromotriz	$P \quad Q \quad R$
Para la corriente debida a una conducción verdadera	$p \quad q \quad r$
Para el desplazamiento eléctrico	$f \quad g \quad h$
Para la corriente total (incluida la variación del desplazamiento)	$p' \quad q' \quad r'$
Para la cantidad de electricidad libre	e
Para el potencial eléctrico	Ψ

Entre esas veinte cantidades hemos encontrado veinte ecuaciones, a saber:

Tres ecuaciones para la fuerza magnética	(***B***)
Tres ecuaciones para las corrientes eléctricas	(***C***)
Tres ecuaciones para la fuerza electromotriz	(***D***)
Tres ecuaciones para la elasticidad eléctrica	(***E***)
Tres ecuaciones para la resistencia eléctrica	(***F***)
Tres ecuaciones para el movimiento total de la electricidad	(***A***)
Una ecuación para la electricidad libre	(***G***)
Una ecuación de continuidad	(***H***)

Estas ecuaciones son suficientes para determinar todas las relaciones entre las cantidades que se dan entre ellas, siempre que sepamos las condiciones del problema. No obstante, en muchos casos, solo se requieren algunas de las ecuaciones.

Energía intrínseca del campo electromagnético

(71) Hemos visto (33) que la energía intrínseca de cualquier sistema de corrientes se encuentra al multiplicar la mitad de la corriente en cada circuito por su momentum electromagnético. Esto es equivalente a encontrar la integral

$$E=\frac{1}{2}\sum\left(Fp'+Gq'+Hr'\right)dV \qquad (37)$$

sobre todo el espacio ocupado por las corrientes, donde p', q', r' son los componentes de las corrientes, y F, G, H los componentes del momentum electromagnético. Sustituyendo los valores de p', q', r' de las ecuaciones de las Corrientes (C), esto se convierte

$$\frac{1}{8\pi}\sum\left\{F\left(\frac{d\gamma}{dy}-\frac{d\beta}{dz}\right)+G\left(\frac{d\alpha}{dz}-\frac{d\gamma}{dx}\right)+H\left(\frac{d\beta}{dx}-\frac{d\alpha}{dy}\right)\right\}dV$$

Integrando por partes y recordando que α, β, γ, se anulan a una distancia infinita, esta expresión se convierte en

$$\frac{1}{8\pi}\sum\left\{\alpha\left(\frac{dH}{dy}-\frac{dG}{dz}\right)+\beta\left(\frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx}\right)+\gamma\left(\frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy}\right)\right\}dV$$

Donde la integración está extendida a todo el espacio. Referida a la ecuación de la Fuerza Magnética (B), esta ecuación se vuelve

$$E=\frac{1}{8\pi}\sum\{\alpha\times\mu\alpha+\beta\times\mu\alpha+\gamma\times\mu\gamma\}dV \qquad (38)$$

Donde α, β, γ, son las componentes de la intensidad magnética, o la fuerza por unidad de polo magnético, y $\mu\alpha$, $\mu\beta$, $\mu\gamma$, son las componentes de la cantidad de inducción magnética, o el número de líneas de fuerza en la unidad de área.

En medios isótropos, el valor de m es el mismo en todas las direcciones y podemos expresar el resultado de manera más simple diciendo que la energía intrínseca de cualquier parte del campo magnético que surge de su magnetización es

$$\frac{\mu}{8\pi}I^2$$

por unidad de volumen, donde I es la intensidad magnética.

(72) La energía puede almacenarse en el campo de una manera diferente, por ejemplo, mediante la acción de la fuerza electromotriz en la producción de desplazamiento eléctrico. El trabajo realizado por una fuerza electromotriz variable, P, al producir un desplazamiento variable, f, se obtiene integrando

$$\int Pdf$$

entre $P = 0$ y el valor dado de P.

Como $P = kv$, ecuación (E), esta cantidad se vuelve

$$\int kfdf=\frac{1}{2}kf^2=\frac{1}{2}Pf$$

Por lo tanto, la energía intrínseca de cualquier parte del campo, tal como existe en forma de desplazamiento eléctrico, es

$$\frac{1}{2}\sum(Pf+Qg+Rh)dV$$

y la energía total existente en el campo será

$$E=\sum\left\{\frac{1}{8\pi}(\alpha\mu\alpha+\beta\mu\beta+\gamma\mu\gamma)+\frac{1}{2}(Pf+Qg+Rh)\right\}dV \qquad (I)$$

El primer término de esta expresión depende de la magnetización del campo, y es explicado, en nuestra teoría, por el movimiento real de algún tipo. El segundo término depende de la polarización eléctrica del campo, y se explica, en nuestra teoría, por la tensión de algún tipo en un medio elástico.

(73) En una ocasión anterior* intenté describir un tipo particular de movimiento y un tipo particular de tensión, dispuestos de tal manera como para dar cuenta de los fenómenos. En el presente artículo evito cualquier hipótesis de este tipo; y al usar palabras como momentum eléctrico y elasticidad eléctrica en referencia a los fenómenos conocidos de la inducción de corrientes y la polarización de los dieléctricos, simplemente deseo dirigir la mente del lector a fenómenos mecánicos que lo ayudarán a comprender los eléctricos. Todas estas frases en el presente documento deben considerarse como ilustrativas, no como explicativas.

(74) Al hablar de la Energía del campo, sin embargo, deseo ser entendido literalmente. Toda la energía es lo mismo que la energía mecánica, ya sea que exista en forma de movimiento o de elasticidad, o en cualquier otra forma. La energía en los fenómenos electromagnéticos es energía mecánica. La única pregunta es, ¿dónde reside? En las viejas teorías, la calidad desconocida se ha llamado energía potencial o el poder de producir ciertos efectos a distancia. En nuestra teoría, la energía reside en el campo electromagnético, en el espacio que lo rodea a los cuerpos electrizados y magnéticos, así como en los cuerpos mismos, y se presenta en dos formas diferentes, que pueden describirse, sin hipótesis, como polarización magnética y polarización eléctrica, o, de acuerdo con una hipótesis muy probable, como el movimiento y la tensión de uno y el mismo medio.

(75) Las conclusiones a las que llegamos en el presente trabajo son independientes de esta hipótesis y son solamente, deducidas de hechos experimentales de tres tipos:

1. La inducción de corrientes eléctricas por el aumento o la disminución de corrientes vecinas según los cambios en las líneas de fuerza que pasan por el circuito.

2. La distribución de la intensidad magnética de acuerdo con las variaciones de un potencial magnético.

* "On the Physical Lines of Force", *Philosophical Magazine*, 1861-62.

3. La inducción (o influencia) de electricidad estática a través de dieléctricos.

Ahora podemos proceder a demostrar a partir de estos principios la existencia y las leyes de las fuerzas mecánicas que actúan sobre las corrientes eléctricas, los imanes y los cuerpos electrificados colocados en el campo electromagnético.

PARTE IV. ACCIONES MECÁNICAS EN EL CAMPO

Fuerza mecánica sobre un conductor móvil

(76) Hemos demostrado (§§ 34 y 35) que el trabajo realizado por las fuerzas electromagnéticas para ayudar al movimiento de un conductor es igual al producto de la corriente en el conductor multiplicado por el incremento del momentum electromagnético debido a la movimiento.

Sea un conductor recto de longitud corta *a* que se mueva paralelo a sí mismo en la dirección de *x*, con sus extremos en dos conductores paralelos. Entonces el incremento del momentum electromagnético debido al movimiento de *a* será

$$a\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{ds}+\frac{dG}{dx}\frac{dy}{ds}+\frac{dH}{dx}\frac{dz}{ds}\right)\delta x$$

El incremento debido al alargamiento del circuito al aumentar la longitud de los conductores paralelos será

$$-a\left(\frac{dF}{dx}\frac{dx}{ds}+\frac{dF}{dy}\frac{dy}{ds}+\frac{dF}{dz}\frac{dz}{ds}\right)\delta x$$

El incremento total es

$$a\delta x\left\{\frac{dy}{ds}\left(\frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy}\right)-\frac{dz}{ds}\left(\frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx}\right)\right\}$$

Que, de acuerdo con las ecuaciones de la Fuerza magnética (*B*)

$$a\delta x\left\{\frac{dy}{ds}\mu\gamma-\frac{dz}{ds}\mu\beta\right\}$$

Sea *X* la fuerza que actúa a lo largo de la dirección de *x* por unidad de longitud del conductor; entonces, el trabajo realizado es $Xa\delta x$

Sea *C* la corriente en el conductor y sean *p', q', r'* sus componentes, entonces

$$Xa\delta = Ca\delta xx\left(\frac{dy}{ds}\mu\gamma-\frac{dz}{ds}\mu\beta\right)$$

Análogamente

$$\left.\begin{aligned} X &= \mu\gamma q'-\mu\beta r' \\ Y &= \mu\alpha r'-\mu\gamma p' \\ Z &= \mu\beta p'-\mu\alpha q' \end{aligned}\right\} \qquad (J)$$

Estas son las ecuaciones que determinan la fuerza mecánica que actúa sobre un conductor que transporta una corriente. La dirección de la fuerza es perpendicular a la corriente y a las líneas de fuerza, y se mide por el área del paralelogramo formado por líneas paralelas a la corriente y las líneas de fuerza, y es proporcional a sus intensidades.

Fuerza mecánica de un imán

(77) En cualquier parte del campo no atravesada por las corrientes eléctricas, la distribución de la intensidad magnética puede representarse por los coeficientes diferenciales de una función que puede denominarse potencial magnético. Cuando no hay corrientes en el campo, esta cantidad tiene un valor único para cada punto. Cuando hay corrientes, el potencial tiene una serie de valores en cada punto, pero sus coeficientes diferenciales tienen solo un valor, es decir,

$$\frac{d\varphi}{dx} = \alpha, \quad \frac{d\varphi}{dy} = \beta, \quad \frac{d\varphi}{dz} = \gamma,$$

Sustituyendo esos valores de α, β, γ, en la expresión para la energía intrínseca del campo, (ecuación 38), e integrando por partes se obtiene:

$$-\sum\left\{\varphi\frac{1}{8\pi}\left(\frac{d\mu\alpha}{dx}+\frac{d\mu\beta}{dy}+\frac{d\mu\gamma}{dz}\right)\right\}dV$$

La expresión

$$\sum\left(\frac{d\mu\alpha}{dx}+\frac{d\mu\beta}{dy}+\frac{d\mu\gamma}{dz}\right)dV = \sum m\,dV$$

indica el número de líneas de fuerza magnética que tienen su origen dentro del espacio V. Ahora solo conocemos un polo magnético como el origen o la terminación de las líneas de fuerza magnética, y un polo unitario es aquel que tiene 4π líneas pertenecientes a ella, ya que produce una unidad de intensidad magnética a la unidad de distancia sobre una esfera cuya superficie es 4π.

Por lo tanto, si m es la cantidad de carga magnética positiva libre en la unidad de volumen, la expresión anterior puede escribirse $4\pi m$, y la expresión de la energía del campo se convierte en

$$E = \sum\left(\frac{1}{2}\varphi m\right)dV \tag{40}$$

Si hay dos polos magnéticos m_1 y m_2 produciendo potenciales φ_1 y φ_2 en el campo, entonces, si m_2 se mueve una distancia dx y es enviada en esa dirección por una fuerza X, el trabajo realizado será Xdx y la disminución de la energía en el campo será

$$d\left(\frac{1}{2}(\varphi_1+\varphi_2)(m_1+m_2)\right),$$

y esto debe ser igual, de acuerdo con el Principio de Conservación de la Energía.

Como la distribución φ_1 está determinada por m_1 y φ_2 por m_2, las cantidades $\varphi_1 m_1$ y $\varphi_2 m_2$ permanecerán constantes

Tal como Green ha probado (*Essay*, p. 10) se puede demostrar que

$$\varphi_1 m_1 = \varphi_2 m_2$$

De modo que

$$Xdx = d(m_2\varphi_1)$$

o, llamando α_1, β_1, γ_1 a las intensidades magnéticas en las tres direcciones del espacio debidas a m_1

$$\left.\begin{aligned} X &= m_2\frac{d\varphi_1}{dx} = m_2\alpha_1 \\ Y &= m_2\beta_1 \\ Z &= m_2\gamma_1 \end{aligned}\right\} \qquad (K)$$

de modo que un polo magnético es impulsado en la dirección de las líneas de fuerza magnética con una fuerza igual al producto de la fuerza del polo y la intensidad magnética.

(78) Si se colocara en el campo un solo polo magnético, lo que sería el polo de un imán enormemente largo, la única solución para φ sería

$$\varphi_1 = -\frac{m_1}{\mu}\frac{1}{r}$$

Donde m_1 es la carga magnética del polo y r la distancia al polo.

La repulsión entre dos polos de cargas magnéticas m_1 y m_2, es

$$m_2\frac{d\varphi_1}{dr} = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2}$$

En el aire, o en cualquier otro medio en el cual $\mu = 1$, esto es simplemente $m_1 m_2/r^2$ pero en otros medios, la fuerza actuante entre dos polos magnéticos dados es inversamente proporcional al coeficiente de inducción magnética del medio. Esto puede explicarse por la magnetización del medio inducida por la acción de los polos.

Fuerza mecánica sobre un cuerpo electrificado

(79) Si no hay movimiento o cambio de intensidad de las corrientes o imanes en el campo, la fuerza electromotriz se debe enteramente a la variación del potencial eléctrico, y tendremos (§65)

$$P = -\frac{d\Psi}{dx}, \quad Q = -\frac{d\Psi}{dy}, \quad R = -\frac{d\Psi}{dz},$$

Integrando por partes la expresión (*I*) para la energía debida al desplazamiento eléctrico y recordando que *P*, *Q y R* se anulan a una distancia infinita, esa expresión se vuelve

$$\frac{1}{2}\sum\left\{\Psi\left(\frac{df}{dx}+\frac{dg}{dy}+\frac{dh}{dz}\right)\right\}dV$$

o, por la ecuación de la electricidad libre (*G*)

$$-\frac{1}{2}\sum(\Psi e)\,dV$$

Mediante la misma demostración que se usó en el caso de la acción mecánica sobre un imán, se puede demostrar que la fuerza mecánica sobre un cuerpo pequeño que contiene una cantidad de electricidad libre e_2 colocada en un campo cuyo potencial proveniente de otros cuerpos electrificados es Ψ tiene por componentes

$$\left.\begin{aligned} X &= e_2\frac{d\Psi_1}{dx} - P_1 e_2 \\ Y &= e_2\frac{d\Psi_1}{dy} - Q_1 e_2 \\ Z &= e_2\frac{d\Psi_1}{dz} - R_1 e_2 \end{aligned}\right\} \qquad (D)$$

De modo que un cuerpo electrificado es impulsado en la dirección de la fuerza electromotriz con una fuerza igual al producto entre la cantidad de electricidad libre y la fuerza electromotriz.

Si la electrificación del campo surge de la presencia de un pequeño cuerpo electrificado que contiene e_1 de electricidad libre, la única solución de Ψ_1 es

$$\Psi_1 = \frac{k}{4\pi}\frac{e_1}{r} \qquad (43)$$

donde *r* es la distancia a la que se encuentra el cuerpo electrificado.

Por lo tanto, la repulsión entre dos cuerpos electrificados con cargas e_1 y e_2 será

$$e_2 \frac{d\Psi_1}{dr} = \frac{k}{4\pi} \frac{e_1 e_2}{r^2} \qquad (44)$$

Medición de los fenómenos eléctricos por efectos electrostáticos

(80) Las cantidades con las que hemos tenido que tratar han sido expresadas hasta ahora en términos del Sistema Electromagnético de medición, que se basa sobre la acción mecánica entre las corrientes. El sistema electrostático de medición se basa en la acción mecánica entre cuerpos electrificados, y es independiente, e incompatible, con el sistema electromagnético; de modo que las unidades de los diferentes tipos de cantidad tienen valores diferentes según el sistema que adoptemos, y para pasar de un sistema a otro, se requiere una reducción de todas las cantidades.

De acuerdo con el sistema electrostático, la repulsión entre dos pequeños cuerpos cargados con cantidades η_1 y η_2 de electricidad es

$$\frac{\eta_1 \eta_2}{r^2}$$

donde *r* es la distancia entre ellos.

Sea la relación entre los dos sistemas, tal que una unidad electromagnética de electricidad contiene *v* unidades electrostáticas, entonces $\eta_1 = ve_1$ y $\eta_2 = ve_2$ y esta repulsión se puede expresar:

$$v^2 \frac{e_1 e_2}{r^2} = \frac{k}{4\pi} \frac{e_1 e_2}{r^2}, \text{ por la ecuación (44)} \qquad (45)$$

Donde *k*, el coeficiente de "elasticidad eléctrica" en el medio en el cual se efectúan los experimentos— por ejemplo, aire común — está vinculado a *v*, el número de unidades electrostáticas en una unidad electromagnética, mediante la ecuación:

$$k = 4\pi v^2 \qquad (46)$$

La cantidad *v* puede determinarse experimentalmente de diversas maneras. De acuerdo con los experimentos de los Sres. Weber y Kohlrausch,

V = 310.740.000 metros por segundo

(81) De esta investigación surge que, si suponemos que el medio que constituye el campo electromagnético, cuando es dieléctrico, es capaz de recibir en cada parte del mismo una polarización eléctrica, en la que los lados opuestos de cada elemento en el que podamos concebir que el medio dividido está electrificado opuestamente, y si también asumimos que esta polarización o desplazamiento eléctrico es proporcional a la fuerza electromotriz que lo produce o mantiene, entonces podemos demostrar que los cuerpos electrificados en un medio dieléctrico actuarán el uno sobre el otro con fuerzas que obedecen las mismas leyes establecidas por el experimento.

La energía involucrada en las atracciones y repulsiones eléctricas que se producen, se supone almacenada en el medio dieléctrico que rodea los cuerpos electrificados, y no en la superficie de los cuerpos mismos, que en nuestra teoría son simplemente las superficies delimitadoras del aire, u otro dieléctrico, en el que se buscarán las verdaderas causas de la acción.

Nota sobre la atracción gravitatoria

(82) Después de asignar a la acción del medio circundante las atracciones y las repulsiones tanto magnéticas como eléctricas, y al encontrar que dependen del cuadrado inverso de la distancia, esto nos lleva naturalmente a preguntar si la atracción gravitatoria, que sigue a la misma ley respecto de la distancia, no es también asignable a la acción de un medio circundante.

La gravitación difiere del magnetismo y la electricidad en lo siguiente; que los cuerpos en cuestión son todos del mismo tipo, en vez de ser de signos opuestos, como los polos magnéticos y los cuerpos electrificados, y que la fuerza entre estos cuerpos es una atracción y no una repulsión, como es el caso entre cuerpos eléctricos y magnéticos similares.

Las líneas de fuerza gravitacionales en las proximidades de dos cuerpos densos, son exactamente de la misma forma que las líneas de fuerzas magnéticas cerca de dos polos del mismo nombre; pero mientras que los polos son repelidos, en el caso de los cuerpos, son atraídos. Sea E la energía intrínseca del campo que rodea a dos cuerpos gravitantes M_1 y M_2, y que E' sea la energía intrínseca del campo que rodea a dos polos magnéticos m_1 y m_2, de iguales valores numérico a M_1 y M_2, y que X sea la fuerza gravitatoria que actúa durante el desplazamiento δx y X' la fuerza magnética,

$$X\delta x = \delta E \quad X'\delta x = \delta E'$$

X y X' tienen igual valor numérico pero signos opuestos, de modo que

$$\delta E = -\delta E'$$

$$E = C - E'$$

$$= C - \sum \frac{1}{8\pi}\left(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2\right) dV$$

donde α, β, γ, son las componentes de la intensidad magnética. Si R es la fuerza gravitante resultante, y R' la fuerza magnética resultante en una parte correspondiente del campo,

$$R = -R' \quad \text{y} \quad \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = R^2 = R'^2$$

Luego

$$E = C - \sum \frac{1}{8\pi} R^2 dV$$

La energía intrínseca del campo de gravitación debe ser menor donde sea que haya una fuerza gravitante resultante.

Como la energía es esencialmente positiva, es imposible que una parte del espacio tenga energía intrínseca negativa. Por lo tanto, aquellas partes del espacio en las que no hay fuerza resultante, como los puntos de equilibrio en el espacio entre los diferentes cuerpos de un sistema, y dentro de la sustancia de cada cuerpo, deben tener una energía intrínseca por unidad de volumen mayor que

$$\frac{1}{8\pi} R^2$$

donde R es el mayor valor posible de la intensidad de la fuerza gravitante en cualquier parte del universo.

Por lo tanto, la suposición de que la gravedad proviene de la acción del medio circundante en la forma señalada, lleva a la conclusión de que cada parte de este medio posee, cuando no se interfiere, una enorme energía intrínseca, y que la presencia de cuerpos densos influye en el medio para disminuir esta energía dondequiera que haya una atracción resultante.

Como no puedo entender de qué manera un medio puede poseer tales propiedades, no puedo avanzar más en esta dirección en la búsqueda de la causa de la gravedad.

PARTE V – TEORÍA DE LOS CONDENSADORES

Capacidad de un condensador

(83) La forma más simple de condensador consiste en una capa uniforme de materia aislante limitada por dos superficies conductoras, y su capacidad se mide por la cantidad de electricidad en cada superficie cuando la diferencia de potenciales es la unidad.

Sea S el área de cualquier superficie, *a* el espesor del dieléctrico y *k* su coeficiente de elasticidad eléctrica; entonces, en un lado del condensador, el potencial esΨ_1, y en el otro lado $\Psi_1 + 1$y dentro de su sustancia

$$\frac{d\Psi}{dx} = \frac{1}{a} = kf \qquad (48)$$

Dado que $d\Psi/dx$, y por lo tanto *f*, es cero fuera del condensador, la cantidad de electricidad sobre su primera superficie es igual a – *Sf* y sobre la segunda + *Sf*. La capacidad del condensador será entonces $Sf = S/ak$ en unidades electromagnéticas.

Capacidad específica de la inducción eléctrica (*D*)

(84) Si el dieléctrico del condensador es aire, entonces su capacidad en medidas electrostáticas es $S / 4\pi a$ (despreciando las correcciones que surgen de las condiciones que deben cumplirse en los bordes). Si el dieléctrico tiene una capacidad cuya relación con la del aire es *D*, entonces la capacidad del condensador será $DS/4\pi a$.

Por lo tanto

$$D = \frac{k_0}{k}$$

dondek_0 es el valor de *k* en el aire, el que se toma como unidad.

Absorción eléctrica

(85) Cuando el dieléctrico que forma el condensador no es un aislante perfecto, los fenómenos de conducción se combinan con los del desplazamiento eléctrico. El condensador, cuando se lo deja

cargado, pierde gradualmente su carga, y en algunos casos, después de descargarse por completo, adquiere gradualmente una nueva carga del mismo signo que la carga original, y esta finalmente desaparece. Estos fenómenos han sido descritos por el Profesor Faraday (*Experimental Investigations*, Serie XL) y por el Sr. F. Jerkin (*Report of Committee of Board of Trade on submarine Cables*) y pueden clasificarse bajo el nombre de "*Absorción Eléctrica*".

(86) Tomaremos el caso de un condensador compuesto por cualquier cantidad de capas paralelas de diferentes materiales. Si la diferencia constante de potenciales entre sus superficies extremas se mantiene durante un tiempo suficiente hasta que se establezca una condición de flujo constante estable de electricidad, entonces cada superficie delimitada tendrá una carga de electricidad que depende de la naturaleza de las sustancias en cada lado de ella. Si las superficies extremas se descargan ahora, estas cargas internas se disiparán gradualmente, y una cierta carga puede reaparecer en las superficies extremas si están aisladas o, si están conectadas por un conductor, se puede instar a una cierta cantidad de electricidad a través del conductor durante el restablecimiento del equilibrio.

Supongamos que el grosor de las diversas capas del condensador sean a_1, a_2, etc. Supongamos que los valores de k para estas capas sean, respectivamente, k_1, k_2, etc., y sea

$$a_1k_1 + a_2k_2 + \text{etc.} = ak$$

donde k es la elasticidad eléctrica del aire y a es el espesor de un condensador de aire equivalente.

Supongamos que las resistencias de las capas sean, respectivamente, r_1, r_2, etc., y hagamos $r_1 + r_2 + \text{etc.} = r$ sea la resistencia de todo el condensador a una corriente estacionaria que lo atraviesa por unidad de superficie.

Sean f_1, f_2, etc., los desplazamientos eléctricos en cada capa.

Sean p_1, p_2, etc., las corrientes eléctricas en cada capa.

Sea Ψ_1 el potencial sobre la primer superficie y e_1 la carga eléctrica por unidad de superficie.

Sean Ψ_2 y e_2 las correspondientes cantidades en el límite entre la primera y la segunda superficie, y así sucesivamente. Entonces, por la ecuaciones (G) y (H)

$$\left.\begin{array}{ll} e_1 = -f_1, & \dfrac{de_1}{dt} = -p_1, \\ e_2 = f_1 - f_2, & \dfrac{de_1}{dt} = p_1 - p_2, \\ etc. & etc. \end{array}\right\} \qquad (51)$$

Pero, por las ecuaciones (E) y (F)

$$\left.\begin{array}{l} \Psi_1 - \Psi_2 = a_1 k_1 f_1 = r_1 p_1 \\ \Psi_2 - \Psi_3 = a_2 k_2 f_2 = r_2 p_2 \\ etc. \qquad etc. \qquad etc. \end{array}\right\} \tag{52}$$

Después de mantener la fuerza electromotriz durante un tiempo suficiente, la corriente se vuelve igual en cada capa, y

$$p_1 = p_2 = etc. = p = \frac{\Psi}{r}$$

dondeΨ es la diferencia de potencial entre las capas extremas. Entonces, tenemos

$$\left.\begin{array}{l} f_1 = -\dfrac{\Psi}{r}\dfrac{r_1}{a_1 k_1}, \qquad f_2 = -\dfrac{\Psi}{r}\dfrac{r_2}{a_2 k_2}, etc. \\ e_1 = \dfrac{\Psi}{r}\dfrac{r_1}{a_1 k_1}, \qquad e_2 = \dfrac{\Psi}{r}\left(\dfrac{r_2}{a_2 k_2} - \dfrac{r_1}{a_1 k_1}\right), etc. \end{array}\right\} \tag{53}$$

Estas son las cantidades de electricidad sobre las diferentes superficies.

(87) Supongamos, ahora, que el condensador se descargue conectando las superficies extremas a través de un conductor perfecto para que sus potenciales se igualen instantáneamente, con lo que se alterará la electricidad en las superficies extremas, pero en las superficies internas no tendrá tiempo de alterarse. La diferencia total de potenciales será entonces

$$\Psi' = a_1 k_1 e'_1 + a_2 k_2 \left(e'_1 + e_2\right) + a_3 k_3 \left(e'_1 + e_2 + e_3\right), etc. = 0 \tag{54}$$

donde, si e'_1 es lo que e_1 se vuelve en el instante de la descarga

$$e'_1 = \frac{\Psi}{r}\frac{r_1}{a_1 k_1} - \frac{\Psi}{ak} = e_1 - \frac{\Psi}{ak} \tag{55}$$

Por lo tanto, la descarga instantánea es Ψ/ak, o la cantidad de electricidad que sería descargada por un condensador de aire del grosor equivalente, y no es afectada por la falta de un aislamiento perfecto.

(88) Supongamos ahora que se corta la conexión entre las superficies extremas y que el condensador se abandona a su evolución espontánea, y consideremos la disipación gradual de las cargas internas. Sea Ψ' la diferencia de potencial de las superficies extremas en cualquier instante t; entonces

$$\Psi' = a_1 k_1 f_1 + a_2 k_2 f_2 + etc. \tag{56}$$

Pero

$$a_1 k_1 f_1 = -r_1 \frac{df_1}{dt}$$

$$a_2 k_2 f_2 = -r_2 \frac{df_2}{dt}$$

De este se encuentra que $f_1 = A_1 e^{-\frac{a_1 k_1}{r_1}}$, $f_2 = A_2 e^{-\frac{a_2 k_2}{r_2}}$, etc., y al referirse a los valores de e'_1. e_2, etc., se encuentra

$$\left.\begin{array}{l} A_1 = \dfrac{\Psi}{r}\dfrac{r_1}{a_1 k_1} - \dfrac{\Psi}{ak} \\ A_2 = \dfrac{\Psi}{r}\dfrac{r_2}{a_2 k_2} - \dfrac{\Psi}{ak}. \\ etc. \end{array}\right\} \tag{57}$$

lo que nos permite encontrar la diferencia de potenciales extremos en cualquier momento.

$$\Psi' = \Psi\left\{\left(\frac{r_1}{r} - \frac{a_1 k_1}{ak}\right)^{e^{-\frac{a_1 k_1}{r_1}t}} + \left(\frac{r_2}{r} - \frac{a_2 k_2}{ak}\right)^{e^{-\frac{a_2 k_2}{r_2}t}} + etc.\right\} \tag{58}$$

(89) Según este resultado, si todas las capas están hechas de la misma sustancia, Ψ'siempre será cero. Si las capas son de sustancias diferentes, el orden en que estén colocadas es indiferente, y el efecto será el mismo ya sea que cada sustancia consista en una sola capa o esté dividida en cualquier cantidad de capas delgadas y dispuestas en cualquier orden entre capas delgadas de las otras sustancias Cualquier sustancia, por lo tanto, cuyas partes no son matemáticamente homogéneas, aunque puedan ser aparentemente así, puede exhibir fenómenos de absorción. Además, dado que el orden de magnitud de los coeficientes es el mismo que el de los índices, el valor de Ψ'nunca puede cambiar el signo, sino que debe comenzar desde cero, pasar a ser positivo y finalmente anularse.

(90) Consideremos ahora la cantidad total de electricidad que pasaría de la primera superficie a la segunda, si el condensador, después de estar completamente saturado por la corriente y luego descargado, tiene sus superficies extremas conectadas por un conductor de resistencia R. Sea p la corriente en este conductor; luego, durante la descarga,

$$\Psi' = p_1 r_1 + p_2 r_2 + etc. = pR \tag{59}$$

Integrando con respecto al tiempo, y llamando q_1, q_2. etc., a las cantidades de electricidad que atraviesan los diferentes conductores,

$$q_1 r_1 + q_2 r_2 + etc. = qR \tag{60}$$

Las cantidades de electricidad sobre las diversas superficies serán

$$e'_1 - q - q_1,$$
$$e_2 + q_1 - q_2,$$
$$etc.$$

y dado que al final todas estas cantidades se anulan, encontramos

$$q_1 = e'_1 - q$$
$$q_2 = e'_1 + e_2 - q$$

de donde

$$qR = \frac{\Psi}{r}\left(\frac{r_1^2}{a_1k_1} + \frac{r_2^2}{a_2k_2} + etc.\right) - \frac{\Psi r}{ak}$$

o

$$q = \frac{\Psi}{akrR}\left\{a_1k_1a_2k_2\left(\frac{r_1}{a_1k_1} - \frac{r_2}{a_2k_2}\right)^2 + a_2k_2a_3k_3\left(\frac{r_2}{a_2k_2} - \frac{r_3}{a_3k_3}\right)^2 + etc.\right\} \qquad (61)$$

una cantidad esencialmente positiva; de modo que, cuando la electrificación primaria tiene una determinada dirección, la descarga secundaria siempre está en la misma dirección que la descarga primaria*.

*Desde que este trabajo fue comunicado a la Royal Society, he visto un artículo de M. Gaugaih en los *Annales de Chimie* de 1864, en el que ha deducido los fenómenos de absorción eléctrica y descarga secundaria de la teoría de los condensadores compuestos.

PARTE VI. – TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA DE LA LUZ

(91) Al comienzo de este documento utilizamos la hipótesis óptica de un medio elástico a través del cual se propagan las vibraciones de la luz, a fin de demostrar que tenemos motivos justificables para buscar, en el mismo medio, la causa de otros fenómenos además de los de la luz. Luego examinamos los fenómenos electromagnéticos, buscando su explicación en las propiedades del campo que rodea los cuerpos electrizados o magnetizados. De esta forma, llegamos a ciertas ecuaciones que expresan ciertas propiedades del campo electromagnético. Ahora procederemos a investigar si estas propiedades de lo que constituye el campo electromagnético, deducidas solo de los fenómenos electromagnéticos, son suficientes para explicar la propagación de la luz a través de la misma sustancia.

(92) Supongamos que una onda plana cuyos cosenos directores son, *l*, *m*, *n* se propaga a través del campo con una velocidad *V*. Entonces todas las funciones electromagnéticas serán funciones de

$$w = lx + my + +nz - Vt$$

Las ecuaciones de la Fuerza Magnética, (*B*), se volverán

$$\mu\alpha = m\frac{dH}{dw} - n\frac{dG}{dw}$$

$$\mu\beta = n\frac{dF}{dw} - l\frac{dH}{dw}$$

$$\mu\gamma = l\frac{dG}{dw} - m\frac{dF}{dw}$$

Si multiplicamos estas ecuaciones respectivamente por *l*, *m* y *n* y las sumamos

$$l\mu\alpha + m\mu\beta + n\mu\gamma = 0 \qquad (62)$$

que muestra que la dirección de la magnetización debe estar en el mismo plano de la onda.

(93) Si combinamos las ecuaciones de la Fuerza Magnética (*B*) con las de las Corrientes eléctricas (*C*), y, por comodidad, abreviamos

$$\frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = J, \text{ y } \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} = \nabla^2 \qquad (63)$$

$$\left.\begin{aligned} 4\pi\mu p' &= \frac{dJ}{dx} - \nabla^2 F \\ 4\pi\mu q' &= \frac{dJ}{dy} - \nabla^2 G \\ 4\pi\mu r' &= \frac{dJ}{dz} - \nabla^2 H \end{aligned}\right\}$$

Si el medio en el que se estableció el campo es un dieléctrico perfecto, no hay una conducción verdadera, y las corrientes *p*', *q*', *r* 'son solo variaciones en el desplazamiento eléctrico. Por las ecuaciones de las Corrientes Totales (*A*),

$$p' = \frac{df}{dt}, \qquad q' = \frac{dg}{dt}, \qquad r' = \frac{dh}{dt}, \tag{65}$$

Pero estos desplazamientos eléctricos son causados por fuerzas electromotrices y, por las ecuaciones de la Elasticidad eléctrica (*E*)

$$P = kf, \quad Q = kg, \qquad R = kh, \tag{66}$$

Estas fuerzas electromotrices se deben a las variaciones de las funciones electromagnéticas o electrostáticas, ya que no hay movimiento de conductores en el campo; de modo que las ecuaciones de la fuerza electromotriz (*D*) son

$$\left.\begin{aligned} P &= -\frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx} \\ Q &= -\frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy} \\ R &= -\frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz} \end{aligned}\right\} \tag{67}$$

(94) Combinando estas ecuaciones, podemos obtener las siguientes

$$\left.\begin{aligned} k\left(\frac{dJ}{dx} - \nabla^2 F\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2F}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dx\,dt}\right) &= 0 \\ k\left(\frac{dJ}{dy} - \nabla^2 G\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2G}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dy\,dt}\right) &= 0 \\ k\left(\frac{dJ}{dz} - \nabla^2 H\right) + 4\pi\mu\left(\frac{d^2H}{dt^2} + \frac{d^2\Psi}{dz\,dt}\right) &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{68}$$

Si diferenciamos la tercera de estas ecuaciones con respecto a *y*, y la segunda con respecto a *z*, y las restamos, *J* e Ψ desaparecen, y recordando las ecuaciones (*B*) de la fuerza magnética, los resultados pueden escribirse

$$\left.\begin{aligned} k\nabla^2\mu\alpha &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\alpha \\ k\nabla^2\mu\beta &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\beta \\ k\nabla^2\mu\gamma &= 4\pi\mu\frac{d^2}{dt^2}\mu\gamma \end{aligned}\right\} \qquad (69)$$

(95) Si suponemos que α, β, γ, son funciones de *lx* + *my* + *nz* – *Vt* = *w*, la primera ecuación se vuelve en

$$k\mu\frac{d^2\alpha}{dw^2} = 4\pi\mu^2V^2\frac{d^2\alpha}{dw^2} \qquad (70)$$

o

$$V = \pm\sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}} \qquad (71)$$

Las otras ecuaciones dan el mismo valor para *V*, de modo que la onda se propaga en cualquier dirección con una velocidad *V*.

Esta onda consiste enteramente en perturbaciones magnéticas, la dirección de la magnetización está en el mismo plano de la onda. Ninguna perturbación magnética cuya dirección de magnetización no se encuentre en el plano de la onda se puede propagar como una ola plana.

Por lo tanto, las perturbaciones magnéticas propagadas a través del campo electromagnético concuerdan con la luz en esto: que la perturbación en cualquier punto es transversal a la dirección de propagación, y que tales ondas pueden tener todas las propiedades de la luz polarizada.

(96) El único medio en el que se han realizado experimentos para determinar el valor de *k* es el aire, en el que μ = l, y por lo tanto, por la ecuación (46),

$$V = v \qquad (72)$$

De acuerdo con los experimentos electromagnéticos de los Sres. Weber y Kohlrausch[*]

***v* = 310.740.000 metros por segundo**

es el número de unidades electrostáticas en una unidad electromagnética de electricidad, y esto, de acuerdo con nuestro resultado, debe ser igual a la velocidad de la luz en el aire o en el vacío.

La velocidad de la luz en el aire, según los experimentos del Sr. Fizeau[†] es

[*] *Leipzig Trans.*, Vol. V, (1857) p. 260; o *Poggendorff Ann.*, Agosto 1856, p. 10.

V = 314.858.000 metros por segundo

De acuerdo con los experimentos más precisos del Sr. Foucault‡

V = 298.000.000 metros por segundo

La velocidad de la luz en el espacio que rodea la Tierra, deducida del coeficiente de aberración y el valor aceptado del radio de la órbita de la Tierra, es

V = 308.000.000 metros por segundo

(97) Por lo tanto, la velocidad de la luz deducida del experimento concuerda bastante bien con el valor de v deducido del único conjunto de experimentos que hasta ahora poseemos. El valor de v se determinó midiendo la fuerza electromotriz con la que se cargaba un condensador de capacidad conocida, y luego descargando el condensador a través de un galvanómetro, para medir la cantidad de electricidad en él, en unidades electromagnéticas. En el experimento, el único uso de la luz fue para ver los instrumentos. El valor de V encontrado por el Sr. Foucault se obtuvo al determinar el ángulo a través del cual giraba un espejo giratorio, mientras que la luz reflejada por él iba y regresaba a lo largo de un curso medido. Ningún uso fue hecho con electricidad o magnetismo.

(97) Por lo tanto, la velocidad de la luz deducida del experimento concuerda suficientemente con los resultados experimentales. La concordancia de los resultados parece mostrar que la luz y el magnetismo son características de la misma naturaleza y que la luz es una perturbación electromagnética propagada a través del campo de acuerdo con leyes electromagnéticas.

(98) Volvamos ahora a las ecuaciones de (94), en las cuales aparecen las cantidades J e Ψ, para ver si algún otro tipo de perturbación puede propagarse a través del medio dependiente de estas cantidades que desaparecen de las ecuaciones finales.

Si determinamos χ de la ecuación

$$\nabla^2\chi = \frac{d^2\chi}{dx^2} + \frac{d^2\chi}{dy^2} + \frac{d^2\chi}{dz^2} = J \tag{73}$$

y F', G' H' de las ecuaciones

$$F' = F - \frac{d\chi}{dx}, \quad G' = G - \frac{d\chi}{dy}, \quad H' = H - \frac{d\chi}{dz}, \tag{74}$$

Entonces

†*Comptes Rendus*, Vol. XXIX, (1849), p. 90.
‡*Ibid.* Vol. LV, (1862), pp. 501, 792.

$$\frac{dF'}{dx}+\frac{dG'}{dy}+\frac{dH'}{dz}=0 \tag{75}$$

y las ecuaciones de (94) toman la forma

$$k\nabla^2 F' = 4\pi\mu\left(\frac{d^2F'}{dt^2}+\frac{d}{dxdt}\left(\Psi+\frac{d\chi}{dt}\right)\right) \tag{76}$$

derivando las tres ecuaciones respecto de *x, y,* y *z,* y sumando, encontramos que

$$\Psi = -\frac{d\chi}{dt}+\varphi(x,y,z) \tag{77}$$

y que

$$\left.\begin{aligned} k\nabla^2 F' &= 4\pi\mu\frac{d^2F'}{dt^2}\\ k\nabla^2 G' &= 4\pi\mu\frac{d^2G'}{dt^2}\\ k\nabla^2 H' &= 4\pi\mu\frac{d^2H'}{dt^2}\end{aligned}\right\} \tag{78}$$

Por lo tanto, las perturbaciones indicadas por *F*', *G*', *H* 'se propagan con la velocidad $V = \sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}$ a través del campo; y dado que

$$\frac{dF'}{dx}+\frac{dG'}{dy}+\frac{dH'}{dz}=0$$

la resultante de esas perturbaciones se encuentra en el plano de la onda.

(99) La parte restante de las perturbaciones totales *F, G, H* es la parte que depende de χ, no está sujeta a ninguna condición excepto la expresada en la ecuación

$$\frac{d\Psi}{dt}+\frac{d^2\chi}{dt^2}=0$$

Si, sobre esta ecuación efectuamos la operación ∇^2 se obtiene

$$ke = \frac{dJ}{dt} - k\nabla^2\varphi(x,y,z) \tag{79}$$

Como el medio es un aislante perfecto, la electricidad libre es inamovible y, por lo tanto, *dJ/dt* es una función de *x, y, z* y el valor de *J* es constante o cero o aumenta uniformemente con el tiempo o disminuye uniformemente con el tiempo, de modo que ninguna perturbación que dependa de J se puede propagar como una onda.

(100) Las ecuaciones del campo electromagnético, deducidas de evidencia puramente experimental, muestran que solo se pueden propagar vibraciones transversales. Si tuviéramos que ir más allá de nuestro conocimiento experimental y asignar una densidad definida a una sustancia que deberíamos llamar "fluido eléctrico", y seleccionar a la electricidad vítrea o a la resinosa como representante de ese fluido, entonces podríamos tener vibraciones normales propagadas con una velocidad dependiendo de esta densidad. Sin embargo, no tenemos evidencia de la densidad de la electricidad, ya que no sabemos si se debe considerar a la electricidad vítrea como una sustancia o como carente de sustancia.

Por lo tanto, la ciencia electromagnética conduce exactamente a las mismas conclusiones que la ciencia óptica con respecto a la dirección de las perturbaciones que pueden propagarse a través del campo; ambos afirman la propagación de vibraciones transversales, y ambos dan la misma velocidad de propagación. Por otro lado, ambas ciencias muestran confusión cuando se les pide afirmar o negar la existencia de vibraciones normales.

Relación entre el índice de refracción y el carácter electromagnético de la sustancia.

(101) De acuerdo con la teoría ondulatoria, la velocidad de la luz en un medio es

$$\frac{1}{i}V_0$$

donde i es el índice de refracción del medio y V_0 es la velocidad de la luz en el vacío. De acuerdo con la Teoría Electromagnética, la velocidad de la propagación de una onda es

$$\sqrt{\frac{k}{4\pi\mu}}$$

donde, de acuerdo con las ecuaciones (49) y (71)

$$k = \frac{1}{D}k_0 \text{ y } k_0 = 4\pi V_0^2$$

Por lo tanto

$$D = \frac{i^2}{\mu} \qquad (80)$$

Es decir, la Capacidad Inductiva Específica es igual al cuadrado del índice de refracción dividido por el coeficiente de inducción magnética.

Propagación de perturbaciones electromagnéticas en un medio cristalino.

(102) Calculemos ahora las condiciones de propagación de una onda plana en un medio para el cual los valores de k y μ son diferentes en diferentes direcciones. Como no proponemos dar una investigación completa de la cuestión en el presente imperfecto estado de la teoría en lo que se refiere a perturbaciones de corto período, supondremos que los ejes de inducción magnética coinciden en dirección con los de la elasticidad eléctrica.

(103) Sean λ, μ, ν, los valores de los coeficientes magnéticos según los tres ejes. Entonces, las ecuaciones de la fuerza magnética (B) toma la forma

$$\left.\begin{aligned}\lambda\alpha &= \frac{dH}{dy}-\frac{dG}{dz}\\ \mu\beta &= \frac{dF}{dz}-\frac{dH}{dx}\\ \nu\gamma &= \frac{dG}{dx}-\frac{dF}{dy}\end{aligned}\right\}$$

(81)Las ecuaciones de las corrientes eléctricas (C) quedan como antes.

Las ecuaciones de la elasticidad eléctrica (E) serán

$$\left.\begin{aligned}P &= 4\pi a^2 f\\ Q &= 4\pi b^2 g\\ R &= 4\pi c^2 h\end{aligned}\right\} \tag{82}$$

donde $4\pi a^2$, $4\pi b^2$ y $4\pi c^2$, son los valores de k para los ejes de x, y y z.

Combinando estas ecuaciones con (A) y (D) se obtienen ecuaciones de la forma

$$\frac{1}{\mu\nu}\left(\lambda\frac{d^2F}{dx^2}+\mu\frac{d^2F}{dy^2}+\nu\frac{d^2F}{dz^2}\right)-\frac{1}{\mu\nu}\frac{d}{dx}\left(\lambda\frac{dF}{dx}+\mu\frac{dG}{dy}+\nu\frac{dH}{dz}\right)=\frac{1}{a^2}\left(\frac{d^2F}{dt^2}+\frac{d^2\Psi}{dxdt}\right) \tag{83}$$

(104) Si l, m, n, son los cosenos directores de la onda y V su velocidad y

$$lx+my+nz-Vt=w \tag{84}$$

entonces F, G, H y Ψ, serán funciones de w y si indicamos con F', G', H' y Ψ' a las derivadas segundas de esas cantidades respecto de w, se obtienen las ecuaciones

$$\left.\begin{aligned}&\left(V^2-a^2\left(\frac{m^2}{\nu}+\frac{n^2}{\mu}\right)\right)F'+\frac{a^2lm}{\nu}G'+\frac{a^2\,ln}{\mu}H'-lV\Psi'=0\\&\left(V^2-b^2\left(\frac{n^2}{\lambda}+\frac{l^2}{\nu}\right)\right)G'+\frac{b^2mn}{\lambda}H'+\frac{b^2ml}{\nu}F'-mV\Psi'=0\\&\left(V^2-c^2\left(\frac{l^2}{\mu}+\frac{m^2}{\lambda}\right)\right)H'+\frac{c^2nl}{\mu}F'+\frac{c^2nm}{\lambda}G'-nV\Psi'=0\end{aligned}\right\}\qquad(85)$$

Si ahora hacemos

$$\left.\begin{aligned}&V^4-V^2\frac{1}{\lambda\mu\nu}\left\{l^2\lambda\left(b^2\mu+c^2\nu\right)+m^2\mu\left(c^2\nu+a^2\lambda\right)+n^2\nu\left(a^2\lambda+b^2\mu\right)\right\}\\&\qquad+\frac{a^2b^2c^2}{\lambda\mu\nu}\left(\frac{l^2}{a^2}+\frac{m^2}{b^2}+\frac{n^2}{c^2}\left(l^2\lambda+m^2\mu+n^2\nu\right)=U\right)\end{aligned}\right\}\qquad(86)$$

Encontraremos

$$F'V^2U-l\Psi'VU=0\qquad(87)$$

y ecuaciones similares para G' y H'. Por lo tanto, o

$$V=0\qquad(88)$$

$$U=0\qquad(89)$$

o

$$VF'=l\Psi',\quad VG'=m\Psi',\quad VH'=n\Psi'\qquad(90)$$

La tercera suposición indica que la resultante de F', G', H', se encuentra en la dirección normal al plano de la onda, pero las ecuaciones no nos indican si esta perturbación, siendo posible, pudiera propagarse, ya que no disponemos de otra relación entre Ψ' y F', G', H'.

La solución $V = 0$, se refiere al caso en el cual no hay propagación.

La solución $U = 0$ da dos valores para V^2 que corresponden a los valores de F', G', H', que están dados por la ecuación

$$\frac{l}{a^2}F'+\frac{m}{b^2}G'+\frac{n}{c^2}H'=0\qquad(91)$$

$$\frac{a^2l\lambda}{F'}\left(b^2\mu-c^2\nu\right)+\frac{b^2m\mu}{G'}\left(c^2\nu-a^2\lambda\right)+\frac{c^2n\nu}{H'}\left(a^2\lambda-b^2\mu\right)=0\qquad(92)$$

(105) Las velocidades a lo largo de los ejes son las siguientes:

Dirección de propagación		x	y	z
Direcciones de los desplazamientos eléctricos	x		$\frac{\boldsymbol{a}^2}{\nu}$	$\frac{\boldsymbol{a}^2}{\mu}$
	y	$\frac{\boldsymbol{b}^2}{\nu}$		$\frac{\boldsymbol{b}^2}{\lambda}$
	z	$\frac{\boldsymbol{c}^2}{\mu}$	$\frac{\boldsymbol{c}^2}{\lambda}$	

Ahora sabemos que en cada plano principal de un cristal, el rayo polarizado en ese plano obedece a la ley ordinaria de la refracción y, por lo tanto, su velocidad es la misma en cualquier dirección en que se propague ese plano.

Si la luz polarizada consiste en perturbaciones electromagnéticas en las que el desplazamiento eléctrico se produce en el plano de polarización, entonces

$$\boldsymbol{a}^2 = \boldsymbol{b}^2 = \boldsymbol{c}^2 \qquad (93)$$

Por el contrario, si el desplazamiento es perpendicular al plano de polarización

$$\lambda = \mu = \nu \qquad (94)$$

De los experimentos magnéticos de Faraday, Plücker, etc., sabemos que, en muchos cristales, λ, μ y ν, son diferentes entre sí.

Los experimentos de Kohlrausch* sobre inducción eléctrica a través de cristales, parecen mostrar que *a*, *b* y *c*, para un cristal dado, pueden ser diferentes.

Pero las desigualdades entre λ, μ y ν, son tan pequeñas que se requieren grandes fuerzas magnéticas para indicar sus diferencias y esas diferencias no parecen ser de magnitudes suficientes para dar cuenta de la doble refracción de los cristales.

Por otro lado, los experimentos de inducción eléctrica son susceptibles de error debido a pequeños defectos o partes de materia conductora en el cristal.

Se requerirán más experimentos sobre las propiedades magnéticas y dieléctricas de los cristales antes de poder decidir si la relación de estos cuerpos con las fuerzas magnéticas y eléctricas es la misma, ya sea que estas fuerzas son permanentes, como cuando están alternando con la rapidez de las vibraciones de la luz.

* *Phil. Mag.* , 1852.

Relación entre la resistencia eléctrica y la transparencia

(106) Si el medio, en lugar de ser un aislante perfecto, es un conductor cuya resistencia por unidad de volumen es ζ, entonces no solo habrá desplazamientos eléctricos, sino también verdaderas corrientes de conducción en las que la energía eléctrica se transformará en calor, y la ondulación se debilita de ese modo. Para determinar el coeficiente de absorción, investiguemos la propagación a lo largo del eje de x de la perturbación transversal *G*.

Por las ecuaciones anteriores

$$\frac{d^2G}{dx^2} = -4\pi\mu(q')$$

$$= -4\pi\mu\left(\frac{df}{dt} + q\right) \quad \text{por } (A)$$

$$\frac{d^2G}{dx^2} = -4\pi\mu\left(\frac{1}{k}\frac{d^2G}{dt^2} - \frac{1}{\zeta}\frac{dG}{dt}\right) \text{ por } (E) \text{ y } (F) \qquad (95)$$

Si *G* tiene la forma

$$G = e^{-px} \cos(qx + nt) \qquad (96)$$

encontramos que

$$p = \frac{2\pi\mu}{\zeta}\frac{n}{q} = \frac{2\pi\mu}{\zeta}\frac{V}{i} \qquad (97)$$

donde *V* es la velocidad de la luz en el aire e *i* es el índice de refracción. La proporción de la luz incidente transmitida a través de un espesor *x* es

$$e^{-2px} \qquad (98)$$

Sea *R* la resistencia, en unidades electromagnéticas, de una placa de una sustancia cuyo espesor es *x*, su ancho *b*, y su largo *l*¸ entonces

$$R = \frac{l\zeta}{bx}$$

$$2px = 4\pi\mu\frac{V}{i}\frac{l}{bR} \qquad (99)$$

(107) La mayoría de los cuerpos sólidos transparentes son buenos aislantes, mientras que todos los buenos conductores son muy opacos.

Los electrolitos permiten que una corriente pase fácilmente, pero, a menudo, son muy transparentes. Podemos suponer, sin embargo, que en las vibraciones de la luz que se alternan rápidamente, las fuerzas electromotrices actúan durante un tiempo tan breve que no permite efectuar una separación completa entre las partículas en combinación, de modo que cuando la fuerza se invierte las partículas oscilan en sus posiciones anteriores sin pérdida de energía.

El oro, la plata y el platino son buenos conductores y, sin embargo, cuando se reducen a placas suficientemente delgadas, permiten que la luz pase a través de ellos. Si la resistencia del oro es la misma para las fuerzas electromotrices de corto período que para aquellas con las que hacemos los experimentos, la cantidad de luz que pasa a través de un trozo de hoja de oro, cuya resistencia fue determinada por el Sr. C. Hockin, sería solo 10^{-50} de la luz incidente, una cantidad totalmente imperceptible. Yo encontré que entre 1/500 y 1/1000 de luz verde, pasa a través de una hoja delgada de oro. Gran parte de esta luz se transmite a través de los agujeros y las grietas; no obstante, hay suficiente transmisión a través del oro mismo para darle un tono verde fuerte a la luz transmitida. Este resultado no puede conciliarse con la teoría electromagnética de la luz, a menos que supongamos que hay menos pérdida de energía cuando las fuerzas electromotrices se invierten con la rapidez de las vibraciones de la luz que cuando actúan durante tiempos sensibles, como en nuestros experimentos.

Valores absolutos de las Fuerzas Electromotrices y Magnéticas que intervienen en la Propagación de la Luz.

(108) Si la ecuación de la propagación de la luz es

$$F = A\cos\frac{2\pi}{\lambda}(z - Vt)$$

la fuerza electromotriz será

$$P = -A\frac{2\pi}{\lambda}V\sin\frac{2\pi}{\lambda}(z - Vt)$$

y la energía por unidad de volumen será

$$W = \frac{P^2}{8\pi\mu V};$$

de modo que

$$P = \sqrt{8\pi\mu VW},$$

donde V es la velocidad de la luz y W es la energía comunicada por la luz a la unidad de área en un segundo.

De acuerdo con los datos de Pouillet y calculados por el Profesor W. Thomson[*], el valor mecánico de la luz solar directa sobre la Tierra es

83,4 libras-pie, por segundo y por pie cuadrado.

Esto da el valor máximo de *P* de la luz solar directa desde el Sol hasta la Tierra

$$\boldsymbol{P} = \mathbf{60.000.000}$$

o, alrededor de 600 celdas de Daniell por metro.

Sobre la superficie solar, el valor de *P* sería alrededor de

13.000 celdas de Daniell por metro.

Sobre la Tierra, el valor máximo de la fuerza magnética sería 0.193[†],

y sobre la superficie solar sería 4,13.

Estas fuerzas electromotrices y magnéticas deben concebirse como que se invierten dos veces en cada vibración de la luz; es decir, más de mil millones de millones de veces en un segundo.

[*] Transactions of the Royal Society of Edinburgh, **1854** ("Mechanical Energies of the Solar System").

[†] La fuerza magnética horizontal en Kew (en el SO de Londres) es de alrededor de 1,76 en unidades métricas.

PARTE VII. CÁLCULOS DE LOS COEFICIENTES DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Métodos generales

(109) Como ya ha sido mostrado, las relaciones electromagnéticas entre dos circuitos conductores, A y B, dependen de una función M de sus formas y posiciones relativas.

M puede calcularse de diferentes maneras, lo que por supuesto debe conducir al mismo resultado.

Primer método. M es el momentum electromagnético del circuito B cuando A transporta una corriente unitaria, o

$$M = \int \left(F \frac{dx}{ds'} + G \frac{dy}{ds'} + H \frac{dz}{ds'} \right) ds'$$

donde *F, G, H* son los componentes del momentum electromagnético debido a una corriente unitaria en *A*, y *ds*' es un elemento de la longitud de *B*, y la integración se realiza a lo largo de todo el circuito de B.

Para encontrar *F, G, H,* observamos que por (*B*) y (*C*)

$$\frac{d^2F}{dx^2} + \frac{d^2F}{dy^2} + \frac{d^2F}{dz^2} = -4\pi\mu p'$$

con ecuaciones similares para *G* y *H*, donde *p'*, *q'* y *r'*, son las componente de la corriente en *A*.

Ahora, si sólo consideramos un sólo elemento *ds* de *A*, tendremos

$$p' = \frac{dx}{ds} ds, \quad q' = \frac{dy}{ds} ds, \quad q' = \frac{dy}{ds} ds$$

y la solución de las ecuaciones da

$$F = \frac{\mu}{\zeta} \frac{dx}{ds} ds, \quad G = \frac{\mu}{\zeta} \frac{dy}{ds} ds, \quad H = \frac{\mu}{\zeta} \frac{dz}{ds} ds$$

donde ζ es la distancia de cualquier punto a *ds*. Luego

$$M = \iint \frac{\mu}{\zeta}\left(\frac{dx}{ds}\frac{dx}{ds'} + \frac{dy}{ds}\frac{dy}{ds'} + \frac{dz}{ds}\frac{dz}{ds'}\right) ds\,ds'$$

$$= \iint \frac{\mu}{\zeta} \cos\theta\, ds\,ds'$$

donde θ es el ángulo entre las direcciones de los dos elementos *ds* y *ds'* y ζ es la distancia entre ellos, y la integración se realiza a lo largo de ambos circuitos.

En este método, nos limitamos a la integración de sólo dos circuitos lineales.

(110) Segundo método. *M* es el número de líneas de fuerza magnética que pasan a través del circuito *B* cuando *A* transporta una corriente unitaria, o

$$M = \sum (\mu\alpha l + \mu\beta m + \mu\gamma n)\, dS'$$

donde μα, μβ y μγ, son las componentes de la inducción magnética debida a una corriente unitaria en *A*, S' es una superficie limitada por la corriente y *l*, *m* y *n* son los cosenos directores de la normal a la superficie, la integración se extiende sobre la superficie.

Esto lo podemos expresar de la forma

$$M = \mu \sum \frac{1}{\zeta^2} \sin\theta \sin\theta' \sin\varphi\, dS'\, ds$$

donde *dS*' es un elemento de la superficie delimitada por *B*, *ds* es un elemento del circuito *A*, ζ es la distancia entre ellos, θ y θ' son los ángulos entre ζ y *ds* y entre ζ y la normal a dS' respectivamente, y φ es el ángulo entre los planos en los que se miden θ y θ'. La integración se realiza alrededor del circuito A y sobre la superficie delimitada por B.

Este método es más conveniente en el caso de circuitos que se encuentran en un plano, en cuyo caso sen θ = 1 y sen φ = l.

111. Tercer método. M es esa parte de la energía magnética intrínseca de todo el campo que depende del producto de las corrientes en los dos circuitos, siendo cada corriente unitaria.

Sean α, β, γ los componentes de la intensidad magnética en cualquier punto debido al primer circuito, α', β', γ' lo mismo para el segundo circuito; entonces la energía intrínseca del elemento de volumen *dV* del campo es

$$\frac{\mu}{8\pi}\left[(\alpha+\alpha')^2 + (\beta+\beta')^2 + (\gamma+\gamma')^2\right] dV$$

La parte que depende del producto de las corrientes es

$$\frac{\mu}{4\pi}\left(\alpha\alpha' + \beta\beta' + \gamma\gamma'\right)dV$$

Por lo tanto, si conocemos las intensidades magnéticas *I* e *I'* debidas a la corriente unitaria en cada circuito, podemos obtener *M* integrando

$$\frac{\mu}{4\pi}\sum \mu I\, I' \cos\theta dV$$

sobre todo el espacio, siendo q el ángulo entre las direcciones de *I* e *I'*.

Aplicación a una bobina

(112) Para encontrar el coeficiente de inducción mutua (*M*) entre dos conductores lineales circulares situados en planos paralelos, en los que la distancia entre las curvas es en todas partes la misma, y pequeña en comparación con el radio de cualquiera de ellos.

Si *r* es la distancia entre las curvas, y *a* el radio de cualquiera de ellas, entonces cuando *r* es muy pequeño en comparación con *a*, por el segundo método encontramos, como primera aproximación,

$$M = 4\pi a\left(ln\frac{8a}{r} - 2\right)$$

Para una mejor aproximación al valor de *M*, sean *a* y a_1 los radios de los círculos, y *b* la distancia entre sus planos; entonces

$$r^2 = (a - a_1)^2 + b^2$$

Para obtener M se deben considerar las siguientes condiciones:

1º. M debe cumplir la ecuación diferencial

$$\frac{d^2M}{da^2} + \frac{d^2M}{db^2} + \frac{1}{a}\frac{dM}{da} = 0$$

Esta ecuación, que es verdadera para cualquier campo magnético simétrico con respecto al eje común de los círculos, no puede por sí misma conducir a la determinación de *M* como una función de, *a*, a_1 y *b*. Por lo tanto, se debe hacer uso de otras condiciones.

2º. El valor de M debe permanecer igual cuando se intercambian a y a1.

3º. Los primeros dos términos de M deben ser los mismos que los dados anteriormente.

M puede así expandirse en la siguiente serie:

$$M = 4\pi a \log\frac{8a}{r}\left\{1+\frac{1}{2}\frac{a-a_1}{a}+\frac{1}{16}\frac{3b^2+(a_1-a)^2}{a^2}-\frac{1}{32}\frac{\left(3b^2+(a-a_1)^2(a-a_1)\right)}{a^3}+etc.\right\}-$$

$$-4\pi a\left\{2+\frac{1}{2}\frac{a-a_1}{a}+\frac{1}{16}\frac{b^2-3(a_1-a)^2}{a^2}-\frac{1}{48}\frac{\left(6b^2-(a-a_1)^2\right)(a-a_1)}{a^3}+etc.\right\}$$

(113) Podemos aplicar este resultado para encontrar el coeficiente de autoinducción (L) de una bobina circular de alambre cuya sección es pequeña en comparación con el radio del círculo.

Supongamos que la sección de la bobina sea un rectángulo, donde c es el ancho en el plano del círculo, y b la profundidad perpendicular a dicho plano.

Sea a el radio medio de la bobina y n el número de vueltas; entonces, mediante la integración, encontramos

$$L = \frac{n^2}{b^2c^2}\iiiint M(xyx'\,y')\,dx\,dy\,dx'\,dy'$$

donde M $(xyx'y')$ representa el valor de M para los dos enrollamientos cuyas coordenadas son xy y $x'y'$ respectivamente; y la integración se realiza primero con respecto a x e y sobre la sección rectangular, y luego con respecto a x' e y' en el mismo espacio.

$$L = 4\pi n^2 a\left\{\ln\frac{8a}{r}+\frac{1}{12}-\frac{4}{3}\left(\theta-\frac{\pi}{4}\right)\cot 2\theta-\frac{\pi}{3}\cos 2\theta-\frac{1}{6}\cot^2\ln\cos\theta-\frac{1}{6}\tan^2\theta\ln\sin\theta\right\}+$$

$$+\frac{\pi n^2 r^2}{24a}\left\{\begin{array}{l}\ln\frac{8a}{r}\left(2\sin^2\theta+1\right)+3{,}45+27{,}475\cos^2\theta-3{,}2\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)\frac{\sin^3\theta}{\cos\theta}+\\ +\frac{1}{5}\frac{\cos^4\theta}{\sin^2\theta}\ln\cos\theta+\frac{13}{3}\frac{\sin^4\theta}{\cos^2\theta}\ln\sin\theta\end{array}\right\}$$

donde a representa al radio medio de la bobina

r es la diagonal de la sección rectangular = $\sqrt{b^2+c^2}$

θ es el ángulo entre r y el plano del círculo.

n es el número de enrollamientos.

Los logaritmos son neperianos y los ángulos se expresan en unidades circulares.

En los experimentos realizados por el Comité de la British Association para determinar un estándar de Resistencia Eléctrica, se usó una bobina doble, consistente en dos bobinas de sección rectangular, prácticamente iguales, colocadas paralelas con un pequeño espacio entre ellas.

El valor de L para esta bobina fue encontrado de la siguiente manera:

El valor de L fue calculado aplicando la fórmula precedente en seis casos diferentes, en los cuales las secciones rectangulares consideradas tenía siempre el mismo ancho, mientras que la profundidad fue

$\boldsymbol{A, B, C, \quad A + B, \quad B + C, A + B + C}$,

siendo $n = 1$ en cada caso.

Llamando a los resultados

$$L(A), \quad L(B), \quad L(C), \quad \text{etc.},$$

Calculamos los coeficientes de mutua inducción $M(AC)$ de dos bobinas así,

$$\boldsymbol{2CM(AC) = (A + B + C)^2L(A + B + C) - (A + B)^2L(A + B) - (B + C)^2L(B + C) + B^2L(B)}$$

Entonces, su n_1 es el número de enrollamientos en la bobina A y n_2 el número de enrollamientos en la bobina B, el coeficiente de autoinducción de las dos bobinas en conjunto es

$$\boldsymbol{L = n_1^2L(A) + 2n_1n_2L(AC) + n_2^2L(B)}$$

(114) Estos valores de L fueron calculados sobre la base de la suposición de que los enrollamientos estaban uniformemente distribuidos de modo de llenar exactamente toda la sección. Sin embargo, este no es el caso ya que el alambre tiene, generalmente, forma circular y cubierto por un material aislante. Luego, la corriente sobre el alambre está más concentradas que lo que estaría si se hubiese distribuido uniformemente sobre la sección (rectangular) y las corrientes en los alambres de las vecindades no actuasen sobre ella exactamente, tal como lo haría una corriente uniforme.

Las correcciones que surgen de estas consideraciones pueden expresarse mediante cantidades numéricas, las que podemos multiplicar por la longitud del alambre, para que tengan los mismos valores cualquiera sea la forma de la bobina.

Sea D, la distancia entre cada alambre y el siguiente, suponiendo que están dispuestos en orden rectangular y sea d el diámetro del alambre. Entonces, la corrección por el diámetro del alambre es

$$\boldsymbol{+2\left(log\frac{D}{d} + \frac{4}{3}log\,2 + \frac{\pi}{3} - \frac{11}{6}\right)}$$

La corrección para los ocho alambres más próximos es

+ 0,0236

Para los dieciséis de la siguiente ronda es

+ 0,00083

Estas correcciones multiplicadas por la longitud del alambre y adicionadas al resultado anterior, dan el verdadero valor de *L*, considerado como la medida del potencial de la bobina en sí misma, por unidad de corriente en el alambre, cuando esta corriente se ha establecido por un tiempo suficiente, y está distribuida uniformemente a través de la sección del alambre.

(115) Pero al inicio de una corriente y durante su variación, la corriente no es uniforme a través de la sección del alambre, debido a que la acción inductora entre diferentes porciones de la corriente tiende a hacer a la corriente más fuerte en una parte de la sección que en otra. Cuando una fuerza electromotriz uniforme *P* que surge por alguna causa actúa sobre un alambre cilíndrico de resistencia específica ζ, se tiene

$$p\zeta = P - \frac{dF}{dt}$$

donde *F* se obtiene a partir de la ecuación

$$\frac{d^2F}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dF}{dr} = -4\pi\mu p$$

donde *r* es la distancia al eje del cilindro

Hagamos que un término del valor de F sea de la forma Tr^n, donde *T* es una función del tiempo, entonces el término de *p* que lo produce es de la forma

$$-\frac{1}{4\pi\mu}n^2Tr^{n-2}$$

Luego, si se escribe

$$F = T + \frac{\mu\pi}{\zeta}\left(-P + \frac{dT}{dt}\right)r^2 + \left(\frac{\mu\pi}{\zeta}\right)^2 \frac{1}{1^2 \times 2^2}\frac{d^2T}{dt^2}r^4 + etc.$$

$$p\zeta = \left(P + \frac{dT}{dt}\right) - \frac{\mu\pi}{\zeta}\frac{d^2T}{dt^2} - \left(\frac{\mu\pi}{\zeta}\right)^2 \frac{1}{1^2 \times 2^2}\frac{d^3T}{dt^3}r^4 - etc.$$

La contracorriente total de la autoinducción en cualquier punto será

$$\int\left(\frac{P}{\zeta}-p\right)dt=\frac{1}{\zeta}T+\frac{\mu\pi}{\zeta^2}\frac{dT}{dt}r^2+\frac{\mu^2\pi^2}{\zeta^3}\frac{1}{1^2\times 2^2}\frac{d^2T}{dt^2}r^4+etc.$$

Integrada entre $t = 0$ y $t = \infty$.

Cuando $\boldsymbol{t = 0}$ $\quad p = 0 \quad \therefore \quad \left(\frac{dT}{dt}\right)_0 = P\,, \quad \left(\frac{d^2T}{dt^2}\right)_0 = 0, \quad etc.$

Cuando $\boldsymbol{t = \infty}$ $\quad p = \frac{P}{\zeta} \quad \therefore \quad \left(\frac{dT}{dt}\right)_\infty = 0\,, \quad \left(\frac{d^2T}{dt^2}\right)_\infty = 0, \quad etc.$

$$\int_0^\infty\int_0^r 2\pi\left(\frac{P}{\zeta}-p\right)rdrdt=\frac{1}{\zeta}T\pi r^2+\frac{1}{2}\frac{\mu\pi^2}{\zeta^2}\frac{dT}{dt}r^4+\frac{\mu^2\pi^3}{\zeta^3}\frac{1}{1^2\times 2^2\times 3^2}\frac{d^2T}{dt^2}r^6+etc.$$

Integrada desde $t = 0$ hasta $t = \infty$

Cuando $\boldsymbol{t = 0}$, $\boldsymbol{p = 0}$ a lo largo de la sección, $\therefore \quad \left(\frac{dT}{dt}\right)_0 = P\,, \quad \left(\frac{d^2T}{dt^2}\right)_0 = 0, \quad etc.$

Cuando $\boldsymbol{t = \infty}$ $\boldsymbol{p = 0}$ " " " " $\quad \therefore \quad \left(\frac{dT}{dt}\right)_\infty = 0\,, \quad \left(\frac{d^2T}{dt^2}\right)_\infty = 0, \quad etc.$

Además, si l es la longitud del alambre y R su resistencia

$$R=\frac{\zeta l}{\pi r^2}$$

y si C es la corriente establecida en el alambre, $\boldsymbol{C = Pl/R}$

La contracorriente total puede escribirse

$$\frac{l}{R}(T_\infty - T_0)-\frac{1}{2}\mu\frac{l}{R}C=-\frac{LC}{R} \quad \text{por la Sección (35)}$$

Ahora bien, si la corriente en lugar de ser variable desde el centro del cable hasta la circunferencia de la sección exterior, hubiera sido la misma en todas partes, el valor de F habría sido

$$F = T + \mu\gamma\left(1-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

donde γ es la corriente en el alambre en cada instante y la contracorriente total sería

$$\int_0^{\infty}\int_0^{r}\frac{1}{\zeta}\frac{dF}{dt}2\pi r dr = \frac{l}{R}\left(T_{\infty}-T_0\right)-\frac{3}{4}\mu\frac{l}{R}C = -\frac{L'C}{R}$$

y
$$L = L' - \frac{1}{4}\mu l$$

o el valor de L que se debe usar para calcular la autoinducción de un cable, para corrientes variables, es menor que el que se deduce de la suposición de que la corriente es constante en toda la sección del cable en $^{1}/_{4}\ \mu l$ donde l es la longitud del alambre, y μ es el coeficiente de inducción magnética correspondiente a la sustancia del alambre.

(116) Las dimensiones de la bobina utilizada por el Comité de la *British Association* en sus experimentos en King's College en 1864 fueron las siguientes:

	En metros
Radio medio	= a = 0,158194
Profundidad de cada bobina	= b = 0,01608
Ancho de cada bobina	= c = 0,01841
Distancia entre las bobinas	= 0,02010
Número de enrollamientos	n = 313
Diámetro del alambre	= 0,00126

El valor de *L* derivado del primer término de la expresión es 437440 metros.

La corrección que depende de que el radio no sea infinitamente grande en comparación con la sección de la bobina que se encuentra en el segundo término es – 7345 metros.

La corrección dependiente del diámetro del alambre (por unidad de longitud) fue	+ 0,44997
La corrección por ocho alambres vecinos	+ 0,0236
La corrección por dieciséis alambres vecinos	+ 0,0008
La corrección por variación de la corriente en diferentes partes de la sección	– 0,2500
Corrección total por unidad de longitud	0,22437
Longitud	311236 *metros*
Suma de las correcciones	70 *metros*
Valor final de *L* calculado	430165 *metros*

Este valor de *L* fue empleado para reducir las observaciones, de acuerdo con el método explicado en el informe del Comité[*]. La corrección dependiente de *L* varía con el cuadrado de la velocidad. El resultado de dieciséis experimentos en los cuales se aplicó esta corrección y en los cuales la velocidad variaba de 100 revoluciones en diecisiete segundos a 100 revoluciones en setenta y siete segundos fueron comparados mediante el método de los cuadrados mínimos para establecer qué otras

[*] British Association Reports, 1863, p. 169.

correcciones dependientes del cuadrado de la velocidad deberían aplicarse para reducir los errores a un mínimo.

Los resultados de este ensayo mostraron que el valor calculado de *L*, debería multiplicarse por 1,0618 para obtener un valor de *L* que daría los resultados más consistentes.

Por lo tanto, tenemos *L* por cálculos	430165 *metros*
Valor probable de *L* por el método de los cuadrados mínimos	456748 *metros*
Resultado de experimentos con Balanza eléctrica, sección (46)	410000 *metros*

El valor de *L* calculado a partir de las dimensiones de la bobina es probablemente mucho más preciso que cualquiera de las otras determinaciones.

TABLA DE MATERIAS

APÉNDICE C

LAS FUERZAS DE LAS OSCILACIONES ELÉCTRICAS, TRATADAS SEGÚN LA TEORÍA DE MAXWELL.[1]

(*Wiedemann's Ann*. 36, pág. 1, 1889)

Los resultados de los experimentos con oscilaciones eléctricas rápidas que he hecho me parecen que confieren a la teoría de Maxwell una posición de superioridad sobre las otras teorías de la electrodinámica. Sin embargo, he basado mi primera interpretación de esos experimentos sobre las concepciones antiguas, tratando de explicar el fenómeno, en parte desde la coincidencia de las fuerzas electrostáticas y electrodinámicas. Tal diferencia es ajena a la teoría de Maxwell, ya que, en su desarrollo puro, esta distinción es extraña. Ahora voy a demostrar que el fenómeno se puede explicar en términos de la teoría de Maxwell sin introducir esta diferenciación. De probar esto, dejaría sentado al mismo tiempo cualquier cuestión sobre una propagación independiente de la fuerza electrostática, que es absurda en la teoría de Maxwell.

Aparte de esta aspiración especial, no deja de ser interesante una visión más cercana del papel que cumplen las fuerzas que acompañan a una oscilación rectilínea.

Las Fórmulas

En lo siguiente, tendremos que tratar solamente con las fuerzas en el éter libre. Así en el éter, X, Y, Z son los componentes de la fuerza eléctrica según las coordenadas x, y, z,[2]. L, M, N, son los componentes de la fuerza magnética. Ambas fuerzas se miden en unidades de Gauss[3], t mide el tiempo y A es la velocidad recíproca de la luz. Entonces, según Maxwell, el cambio temporal de las fuerzas depende de su distribución espacial según las siguientes ecuaciones.

[1] *Die Kräfte electrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie*.

[2] Respecto de los sistemas de coordenadas que establecen su origen en un plano xy. Entonces los valores positivos de x están dirigidos hacia nosotros, los valores positivos de z aumentan hacia arriba y la dirección positiva según el eje y es hacia la derecha. Sin esta fijación, en las siguientes ecuaciones, los signos de las fuerzas eléctricas y magnéticas no tendrían el significado convencional.

[3] H. v. Helmholzt, Wied, Ann, 17, pág. 48, 1882.

(1) $$\begin{cases} A\dfrac{dL}{dt}=\dfrac{dZ}{dy}-\dfrac{dY}{dz} \\ A\dfrac{dM}{dt}=\dfrac{dX}{dz}-\dfrac{dZ}{dx} \\ A\dfrac{dN}{dt}=\dfrac{dY}{dx}-\dfrac{dX}{dy} \end{cases}$$ (2) $$\begin{cases} A\dfrac{dX}{dt}=\dfrac{dM}{dz}-\dfrac{dN}{dy} \\ A\dfrac{dY}{dt}=\dfrac{dN}{dx}-\dfrac{dL}{dz} \\ A\dfrac{dZ}{dt}=\dfrac{dL}{dy}-\dfrac{dM}{dx} \end{cases}$$

Originalmente, y en todo momento, deben satisfacerse las siguientes condiciones:–

(3) $$\frac{dL}{dx}+\frac{dM}{dy}+\frac{dN}{dz}=0 \quad \text{y} \quad \frac{dX}{dx}+\frac{dY}{dy}+\frac{dZ}{dz}=0$$

La fuerza eléctrica contenida en un elemento de volumen τ del éter es igual a

$$\frac{1}{8\pi}\int\left(X^2+Y^2+Z^2\right)d\tau$$

la energía magnética es igual a

$$\frac{1}{8\pi}\int\left(L^2+M^2+N^2\right)d\tau$$

la integración se extiende a través del volumen τ. La energía total es la suma de estas partes.

Todo esto constituye, en lo que se refiere al éter, la parte esencial de la teoría de Maxwell. Maxwell llegó a ello partiendo de la idea de acción a distancia y atribuyó al éter las propiedades de un medio dieléctrico altamente polarizable. Hay otras formas de llegar al mismo resultado. Sin embargo, no podemos proporcionar ninguna prueba directa de esas ecuaciones ya que hasta ahora ninguna experiencia directa lo ha logrado. Por ello, parece más lógico considerarlos como una suposición hipotética, independientemente de la forma en que se haya llegado a ellos y basar sus probabilidades sobre el gran número de regularidades que los resumen. Si se adopta este punto de vista, se pueden obviar una serie de ideas auxiliares que complican la comprensión de la teoría de Maxwell, ideas que, en cierto modo, carecer de un significado importante si, finalmente, excluimos la noción de acción directa a distancia.

Si multiplicamos las ecuaciones (1) por *L, M, N*, y las ecuaciones (2) por *X, Y, Z*; las sumamos y las integramos para un volumen cuyo elemento de volumen es $d\,\tau$ y el elemento de superficie es $d\omega$, obtendremos –

$$\frac{d}{dt}\left\{\frac{1}{8\pi}\int\left(X^2+Y^2+Z^2\right)d\tau+\frac{1}{8\pi}\int\left(L^2+M^2+N^2\right)d\tau\right\}$$

$$=\frac{1}{4\pi A}\int\left\{\left(NY-MZ\right)\cos n,x+\left(LZ-NX\right)\cos n,y+\left(MX-LY\right)\cos n,z\right\}d\omega$$

donde n,x, n,y, n,z son los ángulos que forman las normales de $d\omega$ con el eje.

Esta ecuación muestra que ha aumentado la cantidad de energía del espacio, y puede considerarse que ha entrado a través de los elementos de la superficie. La cantidad de energía que entra por cada elemento de superficie es igual al producto de las componentes de las fuerzas eléctrica y magnética determinadas por la superficie, multiplicada por el seno del ángulo que forman entre sí, y dividida por $4\pi A$. Es conocido que a partir de esto el Dr. Poynting ha basado una teoría notable sobre la transferencia de energía en el campo electromagnético[2].

Respecto a la solución de las ecuaciones nos limitamos al importante caso especial en que la distribución de la fuerza eléctrica es simétrica respecto al eje z, de tal modo que esta fuerza en todos los puntos se encuentra en el plano meridional que pasa por el eje de z y depende tan sólo de la coordenada z del punto y su distancia $\rho = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ del eje z. R es la componente de la fuerza eléctrica en la dirección de ρ, a saber $Xx/\rho + Yy/\rho$; y además P es la componente de la fuerza magnética perpendicular al plano del meridiano, a saber $Ly/\rho - Mx/\rho$. Podemos afirmar que si Π es una función cualquiera de ρ, z, t, que satisface la ecuación –

$$A^2 d^2 \Pi / dt^2 = \Delta\Pi$$

y si hacemos $Q = \rho d\Pi/d\rho$, entonces el sistema

$$\rho Z = dQ/d\rho, \qquad \rho P = A dQ/dt,$$

$$\rho R = -dQ/dz, \qquad N = 0$$

es una solución posible de nuestras ecuaciones.

Para probar esta afirmación observaremos que tenemos –

$$X = R\frac{d\rho}{dx} = -\frac{d^2\Pi}{dxdz}, \qquad L = P\frac{d\rho}{dy} = A\frac{d^2\Pi}{dydt},$$

$$Y = R\frac{d\rho}{dy} = -\frac{d^2\Pi}{dydz}, \qquad M = -P\frac{d\rho}{dx} = -A\frac{d^2\Pi}{dxdt}$$

$$Z = \frac{1}{\rho}\frac{d}{d\rho}\left(\rho\frac{d\Pi}{d\rho}\right) = \frac{d^2\Pi}{dx^2} + \frac{d^2\Pi}{dy^2}, \qquad N = 0$$

Sólo se debe sustituir estas expresiones en las ecuaciones (1), (2) y (3) para llegar a las ecuaciones (2) y (3) que son idénticas, y también las ecuaciones (1) si consideramos la ecuación diferencial por Π.

[2] J.H. Poynting, *Phil. Trans.*, 1884, II pág. 343.

También podemos mencionar que, obviando ciertas limitaciones de poca importancia práctica, puede representarse de la misma forma toda posible distribución de fuerzas eléctrica que sea simétrica respecto al eje z; pero no es necesario aceptar esa idea para el propósito que buscamos.

La función Q es también muy importante. Las líneas en que la superficie de revolución Q = constante cortan los planos meridianos son las líneas de fuerza eléctrica; la construcción de las mismas para un plano meridiano es capaz de proporcionar una imagen vívida de la distribución de la fuerza en cualquier momento. Si cortamos el espacio hueco que hay entre las superficies Q y $Q + d$Q en diferentes lugares mediante superficies giratorias alrededor del eje z, entonces, para todas estas secciones el producto de la fuerza eléctrica y la sección transversal – que Maxwell llama la inducción a través de la sección, – es la misma. Si preparamos el sistema de superficies Q = constante, para que al pasar de una a otra Q aumente en la misma cantidad dQ, entonces, la afirmación es también válida si comparamos las secciones de los diversos espacios que se han formado. En el diagrama plano formado por la intersección de los planos meridionales con las superficies equidistantes Q = constante, la fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia perpendicular entre dos de las líneas Q = constante cuando los puntos comparados están a la misma distancia del eje z; en general, la regla es que la fuerza es inversamente proporcional al producto de esta distancia, y de la coordenada ρ del punto considerado.

En lo que sigue podremos introducir junto a ρ y z la coordenada polares r y θ, que están relacionadas con la primera con las relaciones $\rho = r \sin \theta$, $z = r \cos \theta$, r es la distancia hasta el origen de nuestro sistema de coordenadas.

Las ***fuerzas alrededor de una oscilación rectilínea***.

Hagamos que E equivalga a la cantidad de electricidad, l una longitud, $m = \pi/\lambda$, la inversa de una longitud, y $n = \pi /T$, la inversa de un tiempo. Hagamos:

$$\Pi = El\,\frac{\sin(mr - nt)}{r}$$

Este valor satisface la ecuación $A^2 d^2 \Pi dt^2 = \Delta\Pi$, si estipulamos que $m/n = \mathrm{T}/\lambda = A$, resulta que λ /T será igual a la velocidad de la luz. Debemos observar que la ecuación referida siempre se cumple, excepto en el origen de nuestro sistema de coordenadas.

Para averiguar qué proceso eléctrico corresponde en este punto a la distribución de fuerza especificada por Π, investiguemos su proximidad inmediata. De esta forma r será pequeña y se podrá despreciar respecto a λ, y mr carecerá de importancia comparada con nt. Entonces Π será[1] igual a E/sin nt/r. Entonces,

---

[1] Ver Nota 22 al final del libro

$$\left(\frac{d^2}{dx^2}+\frac{d^2}{dy^2}\right)\left(\frac{1}{r}\right)=-\frac{d^2}{dz^2}\left(\frac{1}{r}\right)$$

tenemos

$$X=-\frac{d^2\Pi}{dxdz},\qquad Y=-\frac{d^2\Pi}{dydz},\qquad Z=-\frac{d^2\Pi}{dz^2}$$

Por lo tanto, las fuerzas eléctricas aparecen como las derivadas de un potencial

$$\phi=\frac{d\Pi}{dz}=-El\,sin\,nt\,\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{r}\right)$$

y esto corresponde a un punto doble eléctrico, cuyo eje coincide con el eje *z*, y cuyo momento oscila entre los valores extremos +*El* y –*El* con el periodo *T*. O sea que nuestra distribución de fuerzas representa la acción de una oscilación rectilínea que tiene una longitud *l* muy pequeña, y en cuyos polos, en el máximo, están libres las cantidades de electricidad +*E* y –*E*. La fuerza magnética perpendicular a la dirección de la oscilación y en su proximidad inmediata se perfila como –:

$$P=AEl\;n\cos nt\,\sin\theta/r^2$$

Según la ley de Biot-Savart esta es la fuerza de un elemento de corriente de longitud *l* que está en la dirección del eje *z*, y cuya intensidad, en unidades magnéticas, oscila entre los valores extremos +π*AE*/*T* y – π*AE*/*T*. De hecho, el movimiento de la cantidad de electricidad *E* determina una corriente de esta magnitud.

A partir de Π tenemos–

$$Q=Elm\left\{cos(mr-nt)-\frac{sin(mr-nt)}{mr}\right\}sin^2\theta,$$

y de aquí se obtienen las fuerzas *Z, R, P* por diferenciación. Es verdad que la fórmula general es demasiado complicada para poder estudiar la distribución directa de las fuerzas. Pero en algunos casos especiales, que indicaremos, los resultados son relativamente sencillos–

(1) Ya hemos considerado lo que sucede en la proximidad inmediata a la oscilación.

(2) En el eje *z*, es decir, en la dirección de la oscilación, tenemos $d\rho = rd\theta$, $dz = dr$, $\theta = 0$; por lo tanto, tenemos

$$R=0,\qquad\qquad P=0,$$

$$Z=\frac{2Elm}{r^2}\left\{cos(mr-nt)-\frac{(mr-nt)}{mr}\right\}$$

La fuerza eléctrica actúa siempre en la dirección de la oscilación; a cortas distancias disminuye inversamente con el cubo de la distancia, a distancias grandes según la inversa del cuadrado de la distancia.

(3) En el plano *xy*, es decir, cuando $z = 0$, tenemos $dz = rd\theta$,

$d\rho = dr$, $\theta = 90°$; y –

$$P = \frac{AElmn}{r}\left\{\sin(mr-nt)+\frac{\cos(mr-nt)}{mr}\right\}$$

$$R = 0$$

$$Z = \frac{Elm^2}{r}\left\{-\sin(mr-nt)-\frac{\cos(mr-nt)}{mr}+\frac{\sin(mr-nt)}{m^2r^2}\right\}$$

En el plano ecuatorial de la oscilación la fuerza eléctrica es paralela a la oscilación, y su amplitud es

$$El\,\frac{\sqrt{1-m^2r^2+m^4r^4}}{r^3}$$

La fuerza disminuye continuamente al aumentar la distancia, al principio rápidamente siguiendo la inversa de la distancia elevada al cubo, pero después lentamente siguiendo la inversa de la distancia. Al aumentar la distancia sólo se puede observar la acción de la oscilación en el plano ecuatorial, y no a lo largo del eje.

(4) A distancias muy grandes podemos despreciar las potencias altas de $1/r$ comparadas con las bajas. De modo que a esas distancias–

$$Q = Elm\cos(mr-nt)\sin^2\theta$$

de lo que podemos deducir

$$P = Elmn\sin(mr-nt)\sin\theta/r$$
$$Z = Elm^2\sin(mr-nt)\sin^2\theta/r$$
$$R = Elm^2\sin(mr-nt)\sin\theta\cos\theta/r$$

De lo que se deduce que $Z\cos\theta + R\sin\theta = 0$. Por lo tanto, a distancias grandes la fuerza siempre es perpendicular al vector radio del origen de la fuerza; la propagación toma la forma de una onda transversal pura. La magnitud de la fuerza es $Elm^2\sin(mr-nt)\sin\theta/r$. A una distancia constante del punto cero se reduce hacia el eje, siendo proporcional a la distancia de esta última.

Para encontrar la distribución de la fuerza en las partes restantes usamos la representación gráfica, que dibujan en momentos determinados las líneas de fuerza eléctrica, es decir, las curvas Q = constante, para valores equidistantes de Q. Al aparecer Q como el producto de dos factores, de los cuales uno depende únicamente de *r*, y el otro sólo de θ, la construcción de estas curvas no presenta gran dificultad. Podemos dividir todos los valores de *Q*, ya que deseamos dibujar la curva de varias

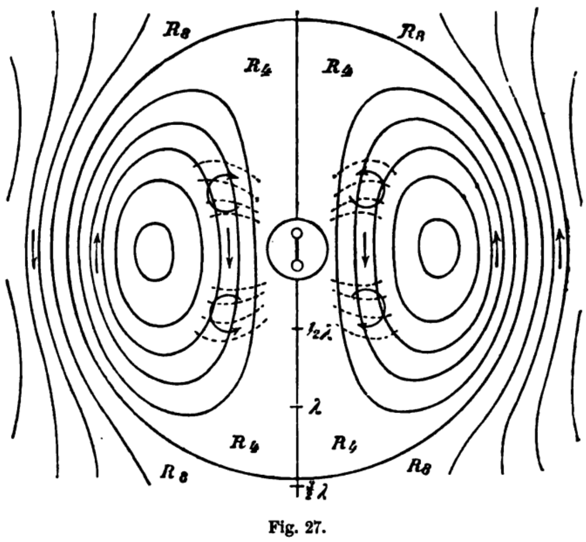


Fig. 27.

maneras con dos factores; podemos determinar el ángulo θ para el cual *sen* 2θ es igual a un factor y, por medio de una curva auxiliar, el valor de *r* para el cual la función de *r* contenido en *Q* es igual al otro factor; de este modo podemos encontrar todos los puntos de la curva que deseemos. Al comenzar la construcción de estas curvas se pueden observar muchos artificios pequeños que serían tediosos explicar. Nos contentaremos al considerar los resultados de la construcción mostrada en las Figuras. 27 a 30.

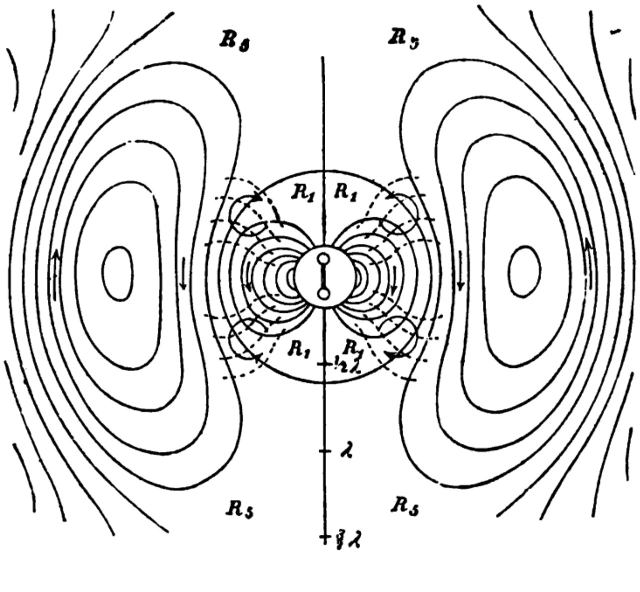


Fig. 28

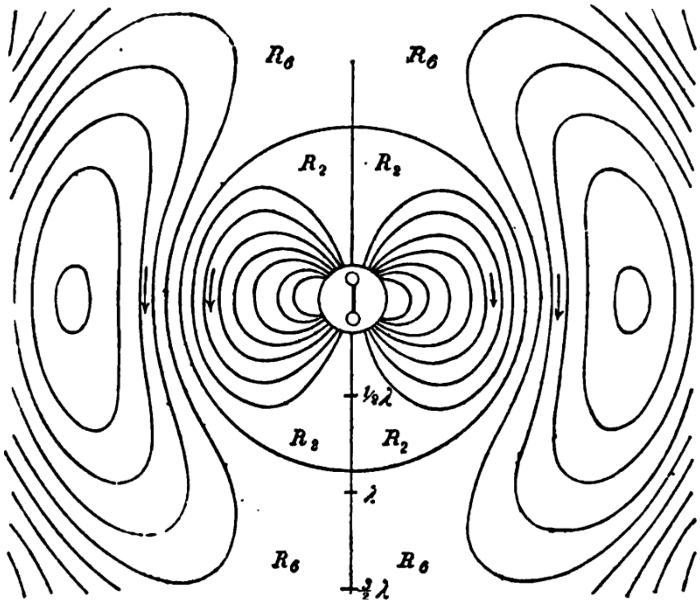


Fig. 29

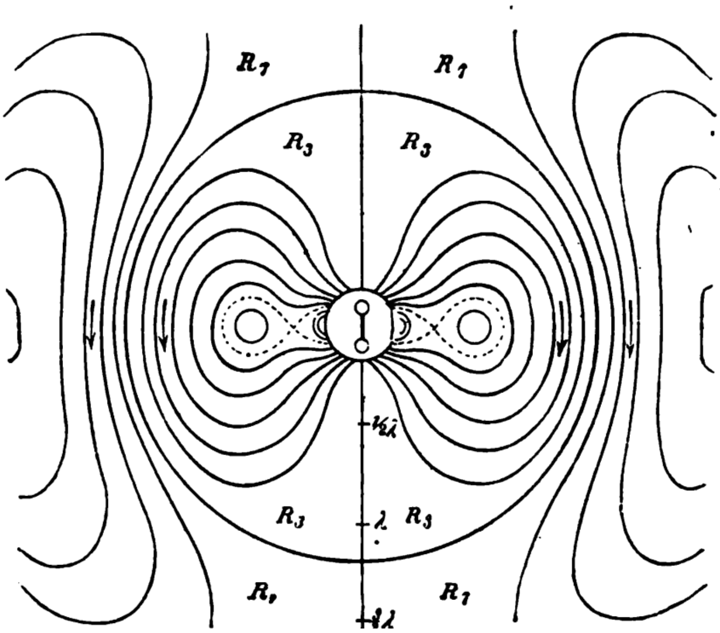


Fig. 30.

Estas figuras presentan la distribución de fuerza en los momentos t = 0, 1/4T, 1/2T, 3/4T o invirtiendo adecuadamente las flechas para todos los momentos siguientes que sean múltiplos de 1/4T. En el origen se muestra en la posición correcta y aproximadamente a la escala correcta, el aparato que se usó para excitar las oscilaciones en nuestros primeros experimentos. Las líneas de fuerza no son correctas en este dibujo, nuestra fórmula supone que el oscilador es infinitamente corto, y no es la adecuada en las proximidades de un oscilador finito.

Vamos a explicarlo con los diagramas de la Fig. 27. En ellos $t = 0$; la corriente está en su punto máximo, pero los polos del oscilador rectilíneo no están cargados de electricidad – no converge hacia ellos ninguna línea de fuerza. Pero a partir del punto $t = 0$, las líneas de fuerza comienzan a surgir de los polos; están encerradas en una esfera representada por el valor $Q = 0$. Además, en la Fig. 27, esta esfera es infinitamente pequeña, pero aumenta rápidamente, y en el tiempo $t = 1/4T$ (Fig. 28) ocupa el espacio R_1. La distribución de las líneas de fuerza en el interior de la esfera es prácticamente similar a la que corresponde a una carga eléctrica estática en los polos. La velocidad con que se dispersa la superficie esférica $Q = 0$ a partir de los polos es mucho mayor que $1/A$; de hecho, en el tiempo $1/4T$ esta velocidad correspondería tan sólo al valor de $1/4\lambda$ dado en la figura. A una distancia infinitesimal del origen, la velocidad de propagación es infinita. Este es un fenómeno que, según el viejo modo de expresión, está representado por la hipótesis que la acción electromagnética viaja con la velocidad $1/A$, y se encuentra superpuesta a una fuerza electrostática que viaja a una velocidad infinita. En nuestra teoría representamos el fenómeno de una forma más correcta diciendo fundamentalmente que las ondas que se desarrollan no deben su formación únicamente a los procesos en el origen, sino que surgen de las condiciones que rodean a todo el espacio, y que más tarde, según nuestra teoría, es el asiento real de la energía. Sin embargo, la superficie $Q = 0$ se dispersa a una velocidad que se acerca gradualmente a $1/A$, y en el tiempo $t = 1/2T$ (Fig. 29) ocupa el espacio R_2. En ese tiempo la carga electrostática de los polos está a su máximo desarrollo; el número de líneas de fuerza que convergen hacia los polos es máximo. A medida que progresa el tiempo no salen más líneas de fuerza de los polos, sino más bien se retiran las existentes hacia el conductor oscilante, hasta desaparecer como líneas de fuerza, y convierten su energía en energía magnética. En ese momento aparece como una acción peculiar que puede reconocerse plenamente, y en ningún caso en su inicio, en la Fig. 30 ($t = 3/4T$). Las líneas de fuerza que se distancian de su origen se flexionan lateralmente debido a su tendencia a contraerse; esta flexión se acerca cada vez más hacia el eje z, una parte de las líneas exteriores se separan como líneas de fuerza cerradas que avanzan independientemente por el espacio, mientras que el resto de las líneas de fuerza vuelven a regresar al conductor oscilante.

El número de líneas de fuerza que se retraen es tan grande como el número de líneas de fuerza que han salido, pero su energía se ha reducido debido a la energía que se ha separado. Esta pérdida de energía corresponde a la radiación hacia el espacio. La consecuencia de todo esto es que la oscilación se va debilitando, a menos que se restaure la energía en su origen. Al tratar la oscilación como no amortiguada hemos supuesto tácitamente la presencia de estas fuerzas. En la Fig. 27 –en la que regresamos al tiempo $t = T$, imaginamos que se han invertido las flechas– las partes separadas de las líneas de fuerza llenan el espacio esférico R_4, mientras que las líneas de fuerza que salen de los polos han desaparecido por completo. Pero las líneas de fuerza nuevas salen de los polos y se congregan con las líneas que han salido al espacio R_5 (Fig. 28). No es necesario explicar cómo viajan estas líneas de fuerza al espacio R_6 (Fig. 29), R_7 (Fig. 30), R_8 (Fig. 27). Viajan más y más para convertirse en una onda transversal pura, tal como se debilitan en la distancia. El mejor modo de describir el juego de las fuerzas sería dibujarlas a intervalos de tiempo más cortos y unirlas a un disco estroboscópico.

Al examinar con más detalle los dibujos observamos que en los puntos que no caen sobre el eje z ni en el plano xy la dirección de la fuerza cambia a cada instante. Si representamos la fuerza en esos puntos de la manera normal, con una línea que pasa por el punto, el extremo de esta línea no se moverá sencillamente hacia delante y hacia atrás a lo largo de la línea recta durante una oscilación, sino que describirá una elipse. Para averiguar en qué puntos se aproxima esta elipse a un círculo y, por lo tanto, donde la fuerza gira de forma sucesiva por todos los puntos del horizonte sin ningún cambio de magnitud apreciable, superponemos dos de los dibujos que corresponden a tiempos que se diferencian entre sí por $1/2T$, es decir, las Figs. 27 y 29, o 28 y 30. En estos puntos observaremos que las líneas de un sistema cortan claramente en ángulo recto a las del segundo sistema, y las distancias entre las líneas de un sistema son iguales a las del segundo. Los pequeños cuadriláteros formados por la intersección de ambos sistemas son cuadrados en los puntos postulados. De hecho se observan regiones de este tipo; en las Figs. 27 y 28 están indicadas con flechas circulares, sus direcciones dan al mismo tiempo la dirección de rotación de la fuerza. Para otras explicaciones se insertan líneas de puntos que pertenecen al sistema de líneas de las Figs. 29 y 30. Además, se observa que el comportamiento explicado no presenta tan sólo la fuerza en los puntos referidos, sino en toda la superficie que hay entre estos puntos, y al dispersarse forma el eje z. Sin embargo la fuerza reduce su magnitud en esta dirección con tanta rapidez que su comportamiento peculiar sólo llama la atención en los puntos mencionados.

En una serie de observaciones imperfectas que no están guiadas por la teoría, el sistema de fuerzas descrito, y exigido por la teoría, puede presentarse de la manera descrita en un primer trabajo[1]. Las observaciones referidas no nos permiten reconocer todos los detalles complicados, tan sólo muestran correctamente los rasgos principales de la distribución. Según ambas observaciones y la teoría, la distribución de la fuerza en las cercanías del oscilador es similar a la distribución electrostática. Según ambas observaciones y la teoría, la fuerza se dispersa principalmente en el plano ecuatorial y disminuye en este plano, al principio con mucha rapidez, después lentamente, sin alcanzar nunca el cero a una distancia intermedia. Según ambas observaciones y la teoría, la fuerza en el plano ecuatorial, a lo largo del eje, y a grandes distancias, tiene su dirección constante y su magnitud variable; mientras que, en puntos intermedios, su dirección varía mucho y su magnitud varía poco. El único desacuerdo entre la teoría y las observaciones referidas es este – según la primera, la fuerza a grandes distancias siempre debe ser perpendicular al radio vector desde el origen, mientras que según la última, aparece paralela a la oscilación. Estas dos se convierten en lo mismo cerca del plano ecuatorial, donde las fuerzas son fuertes, pero no en las direcciones que caen entre el plano ecuatorial y el eje. Yo creo que el error está en las observaciones. En los experimentos referidos el oscilador estaba paralelo a las dos paredes principales de la habitación; y las componentes de la fuerza paralelas al oscilador podrían estar reforzadas con respecto a las componentes normales del oscilador.

De modo que repetí los experimentos, haciendo diversos cambios en la posición del oscilador primario, y observé que los resultados concordaban con la teoría en algunas varias posiciones. No obstante, los resultados no carecían de ambigüedad, ya que a distancias grandes y en lugares donde la fuerza era débil, las perturbaciones debidas a las condiciones ambientales del espacio a mi disposición eran tan grandes que no pude llegar a ninguna decisión verdadera.

[1] Ver V, pág. 90.

Mientras el oscilador está funcionando la energía oscila entrando y saliendo por las superficies esféricas que rodean el origen. Pero la energía que sale en cada periodo de oscilación es mayor que la energía que retorna, y esta diferencia en la cantidad es igual en todas las superficies. Este exceso representa la pérdida de energía debida a la radiación en cada periodo de oscilación. La podemos calcular fácilmente para una superficie esférica, cuyo radio r sea tan grande que podamos usar la fórmula simplificada. De esta forma la energía que sale en cada instante dt por la zona esférica que está entre θ y $\theta + d\,\theta$ es

$$\boldsymbol{dt\ 2\pi r\ sin\ \theta \times rd\theta \times (Z\ sin\ \theta - R\ cos\ \theta)\ P \times 1/4\pi A}.$$

Si sustituimos los valores que corresponden a los valores grandes de r por Z, P y R, e integramos con respecto a θ desde 0 hasta π, y con respecto a t desde 0 hasta T, podemos obtener la energía que pasa por toda la esfera durante una semioscilación

$$\boldsymbol{1/3E^2l^2m^3nt = \pi 4E^2l^2/3\lambda^3}$$

Intentaremos deducir a partir de ello una estimación aproximada de las cantidades involucradas realmente en nuestros experimentos. En ellos tenemos dos esferas de 15 cm de radio cargadas con polaridades opuestas hasta que salta una chispa a una distancia de 1 cm. Si estimamos que la diferencia de potencial entre las dos esferas es de 120 unidades electrostáticas CGS ($gm^{1/2}\,cm^{1/2}$ seg^{-1}), cada esfera está cargada a un potencial de ± 60 unidades electrostáticas, o sea que, su carga es de E = 15 × 60 = 900 unidades CGS ($gm^{1/2}\,cm^{1/2}$ seg^{-1}). La cantidad de energía total que posee el oscilador en el inicio es de 2 × $^1/_2$ ×900 × 60 = 54.000 ergios, es decir, la energía que posee un gramo al caer 55 cm. La longitud l del oscilador es de 100 cm, y la longitud de onda de 480 cm. Por lo tanto, la pérdida de energía en un semiperiodo de oscilación es de 2400 ergios[1]. Por consiguiente, es evidente que después de una semioscilación se ha gastado en la radiación la mitad de la energía. La rápida caída de las oscilaciones, indicado en nuestros experimentos, está determinada necesariamente por la radiación, y esto ocurriría aunque la resistencia del conductor y de la chispa fuera despreciable.

2400 ergios de energía en 1,5 cienmillonésimas de segundo equivalen al trabajo de 22 HP. Se debe proporcionar al oscilador primario continuamente la energía suficiente para mantener las oscilaciones con una intensidad constante a pesar de la radiación. Durante las primeras oscilaciones la intensidad de la radiación a una distancia de 12 metros del conductor primario corresponde a la intensidad de la radiación solar en la superficie de la Tierra.

Los experimentos de interferencia

Para averiguar la velocidad de propagación de la fuerza eléctrica en el plano ecuatorial, hicimos interferir la acción de una onda eléctrica que avanzaba a velocidad constante sobre un cable[1]. Parece que las interferencias que se obtienen no se suceden entre sí a distancias iguales, estos cambios son más rápidos en las cercanías de la oscilación que a grandes distancias. Este comportamiento se ex-

[1] Ver Nota 23 al final del libro.

[1] Ver VII, pág. 107.

plica suponiendo que la fuerza total se puede dividir en dos partes, una, la electromagnética, que se propaga a la velocidad de la luz, y la otra, la electrostática, que se propaga a una velocidad mayor, quizás infinita. Pero por ahora, según nuestra teoría, la fuerza considerada en el plano ecuatorial es –

$$Z = Elm^3 \left\{ -\frac{sin(mr - nt)}{mr} - \frac{cos(mr - nt)}{m^2 r^2} + \frac{sin(mr - nt)}{m^3 r^3} \right\},$$

y esta expresión no se puede dividir en dos ondas sencillas que viajen con velocidades diferentes. Por lo tanto, nuestra teoría actual es correcta, la primera explicación sólo sirve como una aproximación de la verdadera. Vamos a investigar ahora si la teoría actual nos lleva a una explicación del fenómeno.

Para comenzar, podemos escribir $\mathbf{Z = B\, sin(nt - \delta_1)}$ donde la amplitud de la fuerza

$$B = El \frac{\sqrt{1 - m^2 r^2 + m^4 r^4}}{r^3},$$

y la fase δ_1 de la fuerza está determinada por la ecuación –

$$tan\delta_1 = \frac{sin\, mr / mr + cos\, mr / m^2 r^2 - sin\, mr / m^3 r^3}{cos\, mr / mr - sin\, mr / m^2 r^2 - cos\, mr / m^3 r^3}$$

que, después de la transformación, da

$$\delta_1 = mr - tan^{-1} \frac{mr}{1 - m^2 r^2}$$

En la Fig. 31 la cantidad δ_1 está representada como una función de *mr* en la curva δ_1. La longitud *ab* de la figura corresponde al valor de π, ambos para las abscisas y ordenadas. Si consideramos *r*, en vez de *mr*, como la abscisa variable, la longitud *ab* en las abscisas corresponde a media longitud de onda. Para referirnos directamente a los experimentos que hemos discutido, se coloca debajo del diagrama otra división del eje de abscisas en metros. Según los resultados obtenidos directamente por experimentación[2], λ vale 4,8 metros, y a partir de ello se determina la longitud del metro (o escala de las divisiones); pero la primera marca de la escala no es el oscilador, sino que se encuentra a una distancia de 0,45 metros por delante del mismo. De este modo las divisiones representan las divisiones de la línea de base que se usa para determinar las interferencias.

[2] Ver VIII, pág. 121.

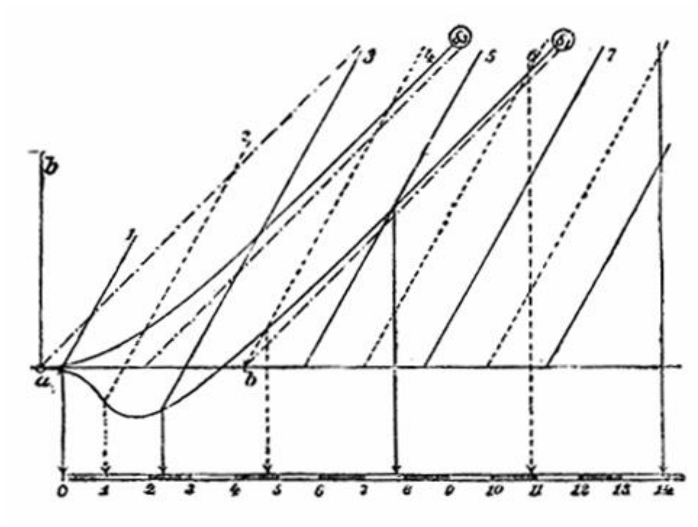


Figura 31

Veremos en la figura que no aumenta la fase desde la fuente, más bien es como si las ondas se originaran a una distancia de $^1/_2\lambda$ en el espacio y se dispersan a partir de ese punto, en parte hacia el conductor, y en parte hacia el espacio. A distancias mayores la fase es inferior a π, como si las ondas hubieran avanzado a velocidad constante desde el origen; de modo que, las ondas se comportan a distancias grandes como si hubieran viajado la primera semilongitud de onda con velocidad infinita.

La acción *w* de las ondas en el alambre para una posición dada del conductor secundario pueden representarse de la forma $\boldsymbol{w = C\ sen(nt - \delta_2)}$ donde δ_2 se usa como abreviatura de $m_1r + \delta = \pi r/\lambda_1 + \delta$. λ_1 representa la semilongitud de onda de las ondas en el cable, que en nuestros experimentos era de 2,8 metros. δ indica la fase de esta acción en el punto $r = 0$, que alteramos arbitrariamente interponiendo alambres de varias longitudes. De igual forma podemos alterar la amplitud de *C*, y podemos hacer que la magnitud de la acción de las ondas en el cable sea aproximadamente la misma que la acción directa. La fase de la interferencia depende sólo de la diferencia de las fases δ_1 y δ_2. Con este ajuste particular del circuito circular secundario que indica nuestra expresión para *w*, ambas acciones se refuerzan entre sí (es decir, la interferencia tiene el signo +) si $\delta_1 - \delta_2$ es igual a cero o a un múltiplo impar de 2π; las acciones se anulan entre sí (es decir, la interferencia tiene signo –) si $\delta_1 - \delta_2$ es igual a un múltiplo impar de π; no se obtiene ninguna interferencia (se dice que "la interferencia tiene signo 0") si $\delta_1 - \delta_2$ es igual a un múltiplo impar de $^1/_2\,\pi$.

Supongamos ahora que δ está determinado para que al inicio de la escala, la fase de la interferencia tenga un valor definido, ε, para que $\delta_1 = \delta_2 + \varepsilon$. La línea recta 1 en nuestro dibujo representará el valor de $\delta_2 + \varepsilon$ como función de la distancia. Se ha elegido la inclinación de la línea para que un aumento de la abscisa de $\lambda_1 = 2{,}8$ metros, la ordenada aumente el valor π, y para que corte a la curva δ_1 en el punto cuya abscisa esté en el inicio de la escala. Las líneas 2, 3, 4, etc. Representan además el curso de los valores de $\delta_2 + \varepsilon - {}^1/_2\,\pi$, $\delta_2 + \varepsilon - \pi$, $\delta_2 + \varepsilon - {}^3/_2\,\pi$, etc. Estas líneas son todas paralelas a la línea 1, y están dibujadas para que corten todas las ordenadas a distancias de $^1/_2\,\pi$, y a todas las abscisas a distancias de 1,4 metros. Si proyectamos sobre el eje de abscisas los puntos de intersección de estas líneas rectas con la curva, obtenemos claramente las distancias para las cuales

δ_1 es igual a $\delta_2 + \varepsilon + {}^1/_2\,\pi$, $\delta_2 + \varepsilon + \pi$, $\delta_2 + \varepsilon + {}^3/_2\,\pi$, etc., es decir, para que la fase de interferencia haya aumentado ${}^1/_2\,\pi$, π, ${}^3/_2\,\pi$, etc. respecto al punto cero. Con esto deducimos directamente de la figura: – Si en el punto cero de la línea de base la interferencia tiene el signo + (–), primero el signo 0 está a 1 metro, el signo – (+) a 2,3 metros, vuelve a tomar el signo 0 a 4,8 metros; la interferencia se invierte al signo + (–) a 7,6 metros, vuelve a ser 0 a 14 metros, y a partir de allí se suceden los signos uno tras otro en orden a distancias iguales. Si en el punto cero de la línea de base la interferencia tiene el signo 0, tendrá también este signo a 2,3 metros, 7,6 metros y 14 metros; tendrá un carácter marcadamente positivo o negativo a 1 metro, 4,8 metros y 11 metros del punto cero. Los valores intermedios corresponden a fases intermedias. Si se compara este resultado teórico con los resultados experimentales, y en especial con las interferencias que ocurren al introducir 100, 250, 400 y 550 cm. de cable[1], el acuerdo es tan completo como podría esperarse. Con las interferencias del segundo tipo no he podido obtener un acuerdo tan perfecto[2]. Para producir estas interferencias hemos usado el circuito circular secundario en una posición en que el factor más importante sea la integral de la fuerza de inducción en el circuito cerrado. Si consideramos que las dimensiones de este último son muy pequeñas, la integral de la fuerza es proporcional a la relación de cambio de la fuerza magnética perpendicular al plano del círculo y, por lo tanto, es proporcional a la expresión–

$$\frac{dP}{dt} = AElm^2n^2\left\{-\frac{\cos(mr - nt)}{mr} + \frac{\sin(mr - nt)}{m^2r^2}\right\},$$

De modo que podemos deducir la fase δ_3 de esta acción o, después de la transformación

$$\delta_3 = mr - \tan^{-1} mr$$

La línea δ_3 de la Fig. 31 representa la curva de esta función. Podemos ver que la fase de esta acción aumenta continuamente desde el mismo origen. Por lo tanto, el fenómeno que apunta a una velocidad de propagación finita debe, en el caso de estas interferencias, considerarse incluso cerca del oscilador. Esto es lo que se observa en los experimentos, y esta es la ventaja que presenta este tipo de interferencia. Pero por el contrario, en los experimentos la velocidad aparente cerca del oscilador es mayor que a distancia de él, y no puede negarse que, según la teoría, esto debe causar un cambio de fase pequeño, pero observable, un cambio incluso más rápido que el que se observa en los experimentos. Me parece probable que en una teoría más completa – en que no se considera los dos conductores de una longitud despreciable – y quizás una mejor estimación de λ lleve a un acuerdo más satisfactorio.

[1] Ver pág. 112.
[2] Ver pág. 113.

Ondas en alambres conductores

La función $\boldsymbol{K(p\rho)=\int_0^\infty e^{-\frac{1}{2}p\rho\left(e^u+e^{-u}\right)}du}$

que, para valores de ρ grandes, se acerca asintóticamente a la función $\sqrt{\pi/p\rho}\,e^{-p\rho}$ y para valores infinitesimales de ρ a la función –log ($p\rho/2$) – 0,577, satisface la ecuación diferencial–

$$\frac{d^2K(p\rho)}{d\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{dK(p\rho)}{d\rho}-p^2K(p\rho)=0\,,$$

Entonces, si ponemos–

$$\Pi=\frac{2J}{An}\sin(mz-nt)K(p\rho)$$

Π satisface la ecuación $A^2d^2\Pi/dt^2=\Delta\Pi$, si hacemos $p^2=m^2-A^2n^2$. Debe entenderse que J representa una corriente en unidades magnéticas, p y $m=\pi/\lambda$ el inverso de la longitud, y $n=\pi/T$ el inverso del tiempo. La función **Π** satisface esta ecuación en todo el espacio, excepto en el eje z, donde es discontinua. Los valores R, Z, P, N, que se pueden deducir de **Π**, representan una perturbación eléctrica que tiene lugar en un alambre muy fino extendido sobre el eje z en la inmediata proximidad de este alambre, si despreciamos las cantidades que contienen las potencias pares de ρ, tenemos–

$$Q_0=-\frac{2J}{An}\sin(mz-nt),$$

y, por lo tanto,

$$R_0=-\frac{2Jm}{An\rho}\cos(mz-nt),$$

$$P_0=-\frac{2J}{\rho}\cos(mz-nt).$$

el sufijo 0 indica que se supone que ρ es muy pequeña y se puede despreciar. De la expresión para R_0 se obtiene que la cantidad de electricidad e en unidades de longitud del alambre es–

$$e=\frac{1}{4\pi}2\pi\rho R_0=\frac{Jm}{An}\cos(mz-nt)$$

De la misma forma en la expresión de P_0 se obtiene que la corriente i es–

$$i = \frac{1}{4\pi} 2\pi\rho P_0 = J\, cos(mz - nt)$$

Los valores de *i* y *e* satisfacen la ecuación necesaria *Ade*/*dt* = – *di*/*dz*. Esto nos indica que la perturbación considerada es una onda eléctrica senoidal que se propaga en dirección positiva a lo largo del eje *z*, cuya semilongitud de onda es λ, y el semiperiodo de oscilación es *T*, su velocidad de propagación es λ /*T* = *n*/*m,* y su intensidad es tal que la corriente máxima que se obtiene es ±*J*. Si estipulamos que pueden actuar arbitrariamente sobre el alambre las fuerzas externas, podemos considerar que λ y *T* son independientes entre sí. En toda relación entre estas cantidades, es decir, para cualquier velocidad de las ondas, las líneas de fuerza eléctrica tienen una forma definida que, independientemente del tiempo, se desliza a lo largo del alambre. Podemos representarlas de la misma forma que antes, dibujando las líneas en que *Q* = constante.

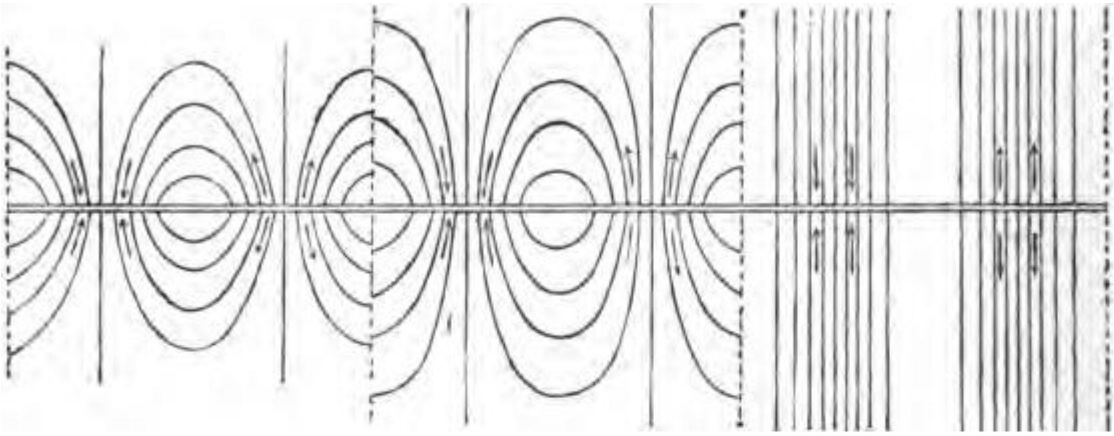


Fig. 32.

En la Fig. 32 se puede ver una representación. En primer lugar, la Fig. 32*a* representa el caso en que la velocidad es muy pequeña y *p* = *m*. El dibujo representa la distribución de la fuerza electrostática, a saber, la que se obtiene cuando la electricidad distribuida sobre el alambre es tal que su densidad es una función senoidal de la longitud del alambre. La Fig. 32b indica las líneas de fuerza para una velocidad próxima a 1/2 de la velocidad de la luz. Podemos ver que en su viaje de ida y vuelta por el cable, las líneas de fuerza trazan unos círculos más amplios que el anterior. Según el viejo modelo de concepción esto se explicaría diciendo que la fuerza electromagnética, que es paralela al cable, debilita la componente electrostática en la misma dirección, y no afecta a la componente perpendicular al alambre. El debilitamiento de la componente paralela al alambre puede anular incluso el total. Si tomamos que la velocidad de propagación por el alambre es igual a la luz, *p* se vuelve cero, K(*p*ρ) se reduce a –log ρ + const. para cualquier valor de ρ –

$$Q = -\frac{2J}{An} sin(mz - nt)$$

y

$$R = -\frac{2Jm}{An\rho}cos(mz - nt) \qquad Z = 0$$

$$P = -\frac{2J}{\rho}cos(mz - nt) \qquad N = 0$$

La distribución de la fuerza es la más simple que se puede concebir; la fuerza eléctrica es siempre normal al cable y se reduce en proporción inversa a la distancia a él. En la Fig. 32c están representadas las líneas Q = const., dibujadas para valores equidistantes de Q. Para las ondas que viajan a una velocidad mayor que $1/A$, p se convierte en imaginaria. En este caso nuestra fórmula necesita una transformación, pero no tiene significado práctico, por lo que no es necesario discutirla. En la superficie de un conductor, la componente de la fuerza eléctrica que es tangencial a la superficie no presenta discontinuidad en el interior del conductor. Según Maxwell, se conoce como conductor perfecto a uno en cuyo interior sólo pueden existir fuerzas tan pequeñas que son despreciables. De esto se deduce que deben desvanecerse las componentes tangenciales de la fuerza en la superficie de un conductor perfecto. A menos que esto no sea correcto, se deduce que las ondas eléctricas deben propagarse en los alambres con buena conductividad a la velocidad de la luz y en la forma representada en la Fig. 32c. Sólo en esta distribución de fuerza en particular siempre es normal a la superficie del alambre. De hecho, se deduce en la teoría de Maxwell, así como en las otras teorías antiguas, que las ondas electromagnéticas viajan por los alambres perfectamente conductores a la velocidad de la luz.

Por otra parte, si confiamos poco en nuestros experimentos, esta conclusión es incorrecta si la propagación se realiza a una velocidad mucho menor y aproximadamente bajo forma indicada en la Fig. 32b. Este resultado es tanto más sorprendente ya que la velocidad en los alambres también parece ser una velocidad completamente independiente de la naturaleza del alambre. He encontrado que es así en alambres de diversos metales y que varían ampliamente en grosor y en la forma de la sección, y también en columnas de fluidos conductores. Todavía permanecen oscuras las causas que determinan esta velocidad. La resistencia, en todos los casos, no tiene nada que ver. Durante algún tiempo pensé que podía verse afectada por la constante k, gracias a su introducción por parte del Sr. H. v. Helmholtz para extender la teoría de Maxwell[1], pero posteriores consideraciones llevaron a rechazar esta idea. Si fuera correcta únicamente la condición límite, aún sería posible una onda de la forma de la Fig. 32c. Esta sería siempre una onda transversal pura, y esta onda debe viajar siempre con la misma velocidad de las ondas transversales planas en el espacio, sin importar si se presentan simultáneamente ondas longitudinales o no. Aunque un valor finito de la constante k no explicara la diferencia entre las dos velocidades, postularía la posibilidad de dos tipos de ondas en el alambre con velocidades diferentes; los experimentos no han mostrado ningún indicio de este fenómeno. Más bien parece dudoso que la condición límite sea correcta para las fuerzas alternas con rapidez.

Por otra parte, aunque no parece posible conceder ninguna velocidad de cualquier magnitud a las ondas que viajan a lo largo del eje z, no hay dificultad en reducir la velocidad tanto como se desee por debajo de su valor máximo, o en producir distribuciones de fuerza intermedias entre las

[1] H. v. Helmholtz, *Wiss.. Abh*, 1. pág. 545 – 628.

formas 32a y 32c. Con este objeto se hizo que las ondas avanzaran sobre alambres curvados o enrollados en espiral. Por ejemplo, enrollé un alambre de 40 metros en una espiral de 1 cm. de diámetro, y tan juntas que la longitud de la espiral era de 1,6 metros; pude observar nodos a una distancia de 0,31 metros, mientras que en el alambre recto los nodos estaban separados por 2,8 metros. A medida que se estiraba la espiral los valores cambiaban gradualmente del uno al otro. Por lo tanto, cuando se mide la velocidad a lo largo del eje z (el eje de la espiral), las ondas se mueven mucho más lentamente en el alambre bobinado. Cuando se mide la velocidad en el alambre recto las ondas avanzan con más rapidez. En los alambres doblados el comportamiento es similar. A menos que me equivoque, la teoría de Maxwell, suponiendo la condición límite en los conductores buenos, es incapaz de explicar esto. Me parece que según esta teoría, la propagación, medida a lo largo del eje z, tiene lugar siempre en todo conductor a la velocidad de la luz; siempre que, en primer lugar, no se considere la resistencia del conductor, en segundo lugar, que las dimensiones del conductor perpendicular al eje sean despreciables en comparación a la longitud de onda. Ambas condiciones se satisfacen en alambres metálicos bobinados; pero no ocurre lo que debería ocurrir.

En nuestras investigaciones para explicar las observaciones por medio de la teoría de Maxwell no he conseguido eliminar todas las dificultades. No obstante, se ha encontrado que la teoría responde satisfactoriamente a la mayoría de fenómenos; y debe reconocerse que esto no es poco. Pero si intentamos adaptar cualquier otra teoría antigua a los fenómenos, nos encontramos desde el primer momento con incongruencias, a menos que reconciliemos estas teorías con las de Maxwell introduciendo el éter como dieléctrico y de la manera indicada por v. Helmholtz.

TABLA DE MATERIAS

APÉNDICE D:

SOBRE LA RADIACIÓN ELÉCTRICA[1]

(*Sitzungsber. D. Berl. Akad. D. Wiss*. 13 Diciembre 1888. *Wiedemann's Ann.,* 36, pág. 769)

Tan pronto logré demostrar que la acción de una chispa eléctrica se propaga por el espacio como una onda, diseñé varios experimentos a fin de concentrar esta acción y hacerla perceptible a distancias mayores mediante la colocación del conductor primario en la línea focal de un gran espejo cóncavo parabólico. Estos espejos no dieron los resultados deseados, y sospeché que el fracaso se debía a la gran desproporción entre la longitud (4 a 5 metros) de las ondas que había usado y las dimensiones del espejo. Recientemente observé que los experimentos que he descrito pueden hacerse bastante bien con oscilaciones de una frecuencia diez veces mayor, y con ondas cuyas longitudes de onda fueran la décima parte de las que utilicé al principio. De modo que volví a usar espejos cóncavos, y obtuve mejores resultados que los creía esperar. He conseguido producir, sin ninguna duda, radiaciones a partir de electricidad, y hacer con ellos los experimentos elementales que normalmente se hacen con la luz y el calor radiante. A continuación, la narración de estos experimentos:–

El aparato

Las ondas cortas se excitan con el mismo método que hemos usado para producir las ondas largas. El conductor primario se puede describir, fácilmente, así:– Imagínese un cuerpo cilíndrico de latón (Ver Figs. 35 y 36 y la descripción de ellas al final de este trabajo), de un diámetro de 3 cm y 26 cm de longitud, interrumpido en el centro por un chispero cuyos polos a cada lado están formados por esferas de 2 cm de radio. La longitud del conductor es aproximadamente igual a media longitud de onda de la oscilación correspondiente en alambres rectos; con esto podemos estimar aproximadamente el periodo de oscilación. Es esencial que las superficies polares del chispero, se limpien y pulan con frecuencia y durante los experimentos deben estar protegidas de la iluminación de la descarga lateral simultánea; si no se hace eso las oscilaciones no se excitan. A partir de la apariencia y sonido de las chispas se puede saber si el chispero está en un estado satisfactorio. La descarga se propaga a las dos mitades del conductor mediante dos alambres cubiertos de gutapercha que se conectan a cada lado cerca del chispero. No utilicé la bobina grande de Ruhmkorff, sino que encontré que era mejor emplear una pequeña bobina de inducción de Keiser y Schmidt; las chispas más largas que generaba esta bobina entre las puntas eran de 4,5 cm de largo. Se alimentaba con la corriente de tres acumuladores, que hacían saltar chispas de 1 a 2 cm de largo entre los terminales esféricos del conductor primario. Para estos experimentos se redujo la separación del chispero a 3 mm.

Para detectar las fuerzas eléctricas en el espacio también se usaron las pequeñas chispas inducidas en un conductor secundario. Usé, como antes, un circuito conductor circular que se podía girar

[1] *Ueber Strahlen electrischer Kraft*.

y que tenía el mismo periodo de oscilación que el conductor primario. Estaba hecho de alambre de cobre de 1 mm de diámetro, y en el ejemplo presente el círculo tenía un diámetro de tan sólo 7,5 cm. Un extremo del cable tenía una esfera de latón pulido de pocos milímetros de diámetro; el otro extremo estaba en punta y podía ajustarse, hasta una distancia extremadamente corta de la esfera de latón mediante un tornillo que estaba aislado del alambre. Como se puede comprender sin dificultad, debemos tratar sólo con diminutas chispas de una longitud de unas pocas centésimas de mm; y con un poco de práctica se puede juzgar mejor con el brillo de las chispas y no con su longitud. El conductor circular sólo da un efecto diferencial, y no se adapta bien para su uso en la línea focal de un espejo cóncavo. Por eso, en su mayor parte los trabajos se hicieron con otro conductor preparado de la siguiente manera:– Se dispusieron en línea recta dos trozos de alambre, cada uno de una longitud de 50 cm y 5 mm de diámetro, con sus extremos próximos separados por 5 cm. Desde estos extremos se llevaron en paralelo entre sí y perpendiculares a los primeros, dos alambres, de 15 cm de longitud y 1 mm de diámetro, hasta un chispero como el del conductor circular. En este conductor se producía el efecto de resonancia, que en este caso cumplía un pequeño papel. Hubiera sido más sencillo colocar el chispero en medio del alambre recto; pero el observador hubiera debido manejar y observar el chispero en el foco del espejo sin tapar la apertura. Por esta razón se prefirió el primer montaje al otro, a pesar que hubiera tenido más ventajas.

La producción del rayo

Si se monta el oscilador primario en un espacio libre bastante grande, con la ayuda del conductor circular, se puede detectar en sus proximidades, a una escala más pequeña, los fenómenos que ya había observado y descrito anteriormente que ocurrían en las proximidades de una oscilación mayor[1]. La mayor distancia a que pueden percibirse las chispas en el conductor secundario es de 1,5 metros, y cuando el chispero primario está en muy buenas condiciones, como máximo a 2 metros. Cuando se sitúa un plano reflector en un lado del oscilador primario, a la distancia adecuada y paralela a él, se refuerza la acción en el lado opuesto. Para ser más precisos:– Si la distancia elegida es muy pequeña, o algo mayor de 30 cm, la placa debilita el efecto; lo aumenta mucho a distancias de 8 a 15 cm, ligeramente a una distancia de 45 cm, y no ejerce ninguna influencia a distancias mayores. He llamado la atención sobre este fenómeno en un trabajo anterior, y podemos deducir de él que la vibración correspondiente en el aire tiene una semilongitud de onda de 30 cm. Podríamos esperar un posterior refuerzo si sustituyéramos la superficie plana por un espejo cóncavo que tuviera la forma de cilindro parabólico, y en cuya línea focal se encontrara el eje de la oscilación primaria. La longitud focal del espejo debería ser la menor posible, si se desea concentrar la acción de forma adecuada. Pero si la onda directa no ha de anular inmediatamente la acción de la onda reflejada, la longitud focal no debe ser mucho menor de un cuarto de longitud de onda. Por eso, fijé la longitud focal en 12,5 cm, y construí el espejo curvando una hoja de cinc de 2 metros de largo, 2 metros de ancho y 1/2 mm de espesor dando la forma deseada sobre un molde de madera con la curvatura exacta. La altura del espejo tenía 2 metros, la anchura de esta apertura tenía 1,2 metros, y 0,7 metros de fondo. El oscilador primario estaba fijado en medio de la línea focal. Los alambres que condu-

[1] Ver las memorias V, VII y VIII.

cían la descarga pasaban por el espejo; la bobina de inducción y las pilas estaban situadas detrás del espejo para estar fuera de la trayectoria de las ondas. Al investigar, con nuestros conductores, en las proximidades del oscilador, comprobamos que no se observa ninguna acción detrás del espejo o a sus lados; pero en la dirección del eje óptico del espejo pueden percibirse las chispas hasta una distancia de 5 a 6 metros. Cuando se sitúa una superficie conductora en ángulo de forma que se oponga al paso de las ondas, pueden detectarse las chispas en sus proximidades e incluso a distancias mayores –hasta 9 ó 10 metros. Las ondas reflejadas en la superficie conductora refuerzan en ciertos puntos las ondas que avanzan. En otros puntos se debilitan las dos ondas. Enfrente del plano podemos reconocer claramente los máximos y los mínimos con el conductor rectilíneo, y con el conductor circular el fenómeno de interferencia característico llamado ondas estacionarias que he descrito en un papel anterior. He sido capaz de distinguir cuatro puntos nodales, que estaban situados en la pared y a 33, 65 y 98 cm de ella. Con esto calculamos la semilongitud de onda aproximada, de 33 cm, y su periodo de oscilación de 1,1 milmillonésima de segundo, suponiendo que viajen a la velocidad de la luz. En los alambres la oscilación da una longitud de onda de 29 cm. Por lo tanto, parece que estas ondas cortas tienen una velocidad algo menor en los cables que en el aire, pero la relación de las dos velocidades es muy próxima al valor teórico –unidad– y no es muy diferente del que aparece como probable en nuestros experimentos con ondas más largas. Todavía debe aclararse este notable fenómeno. Viendo que este fenómeno sólo se presenta cerca del eje óptico del espejo, podemos decir que el resultado es la producción de un rayo eléctrico que procede del espejo cóncavo.

Después construí un segundo espejo, exactamente similar al primero, y unido al conductor rectilíneo secundario de tal modo que los dos cables de 50 cm de largo estuvieran en la línea focal, y los dos cables conectados al chispero pasaban directamente por las paredes del espejo sin tocarlo. De esta forma el chispero estaba situado directamente detrás del espejo, y el observador lo podía ajustar y examinar sin obstruir el paso de las ondas. Esperaba que al interceptar el rayo con este aparato, lo podría observar incluso a distancias mayores; y los hechos demostraron que no me equivocaba. En los recintos a mi disposición podía percibir perfectamente las chispas desde un extremo al otro. La mayor distancia a la que conseguí trazar al rayo, aprovechándome de una puerta, fueron 16 metros; pero según los resultados de los experimentos de reflexión (que se describirán a continuación), no hay duda que se hubieran podido obtener en espacio abierto chispas hasta una distancia de 20 metros. En los experimentos restantes no es necesario distancias tan grandes, y es conveniente que las chispas no sean demasiado débiles en el conductor secundario; para la mayor parte de los experimentos la distancia más adecuada es de 6 a 10 metros. Observaremos sin ninguna dificultad los fenómenos que pueden presentar el rayo. Cuando no se indica lo contrario, se debe suponer que la línea focal de ambos espejos es vertical.

Propagación rectilínea

Si se coloca en línea recta entre ambos espejos una pantalla de cinc de 2 metros de alto y 1 metro de ancho, y en ángulo recto a la dirección del rayo, desaparecen por completo las chispas en el secundario. Se obtiene una sombra exactamente igual con una pantalla de papel de estaño o de oro. Si un ayudante se pasea por el camino del rayo, se oscurecen las chispas en el secundario cuando intercepta el rayo, y vuelven a iluminarse tan pronto deja libre el camino. Los aisladores no detienen el rayo –pasa a través de un tabique o puerta de madera, y se observa con asombro que se pueden ver las chispas dentro de una habitación cerrada. Si dos pantallas conductoras, de 2 metros de alto y 1 metro de ancho, se colocan simétricamente a izquierda y derecha del rayo, y perpendicular a él, no interfieren en absoluto con la chispa secundaria siempre que la anchura de la abertura entre ellas no sea menor que la abertura de los espejos, a saber, 1,2 metros. Si se hace más estrecha la abertura las chispas se debilitan, y anulan cuando la abertura se reduce por debajo de 0,5 metros, se cambian a un lado de la línea que une los espejos. Si se gira 10º el eje óptico del espejo que contiene el oscilador, se debilitan las chispas en el secundario, y un giro de 15º las hace desaparecer.

No hay un límite geométrico exacto del rayo o de las sombras; es fácil reproducir el fenómeno que corresponde a la difracción[1]. Pero todavía no he conseguido observar el máximo y el mínimo en el borde de las sombras.

Polarización

Con el modo en que producimos nuestro rayo no podemos dudar que se trata de vibraciones transversales polarizadas en el sentido óptico. También podemos demostrar experimentalmente que sucede eso. Si se gira el espejo receptor sobre el eje del rayo hasta que su línea focal, y también el conductor secundario, se encuentren en el plano horizontal, se debilitan las chispas en el secundario, y cuando las dos líneas focales se encuentran en ángulo recto, no se observan chispas incluso aunque los espejos se encuentren muy próximos. Los dos espejos se comportan igual que el polarizador y el analizador de los aparatos de polarización.

Después hice un marco octogonal, de 2 metros de alto y 2 metros de ancho; dispuse en él alambres de cobre de 1 mm de diámetro, todos los alambres en paralelo entre sí y separados por 3 cm. Cuando se situaban los espejos con sus líneas focales en paralelo, y se interponía la pantalla de alambres perpendicularmente al rayo, y la dirección de los cables era perpendicular a la dirección de las líneas focales, la pantalla no interfería prácticamente con las chispas en el secundario. Pero si se situaba la pantalla de tal forma que sus alambres estuvieran en paralelo a las líneas focales, detenía por completo al rayo. En este aspecto la pantalla se comportaba ante la energía transmitida por nuestro rayo igual que se comporta una placa de turmalina ante un rayo de luz polarizado. El espejo receptor se volvió a colocar otra vez para que su línea focal fuera horizontal; en estas circunstancias, como se ha mencionado, no aparecían las chispas. No aparecía chispa alguna cuando la interponía la pantalla en el trayecto del rayo, bien que estuvieran los alambres de la pantalla horizontales o verticales. Pero si se situaba el marco de tal forma que los alambres estuvieran inclinados 45º respecto a la línea horizontal, bien a un lado u otro, la interposición de la pantalla hacía aparecer inmediatamente las chispas en el chispero secundario. Esto demuestra claramente que la pantalla divide la oscilación en dos componentes y transmite solamente la componente horizontal a la dirección de sus alambres. Esta componente está inclinada 45º respecto de la línea focal del segundo espejo, y después de haberse resuelto por el espejo, actúa sobre el conductor secundario. Este fenómeno es

[1] Ver Nota 25 al final del libro.

exactamente análogo al aumento de brillo del campo oscuro de dos prismas de Nicol cruzados cuando se interpone una placa cristalina en la posición adecuada.

Respecto a la polarización podemos observar además que, con los medios empleados en la presente investigación, sólo somos capaces de reconocer la fuerza eléctrica. Cuando el oscilador primario está en posición vertical las oscilaciones de esta fuerza en el rayo tienen lugar indudablemente en el plano vertical, y no en el plano horizontal. Los resultados de los experimentos con oscilaciones alternas lentas no dejan lugar a duda que las oscilaciones eléctricas están acompañadas de oscilaciones de fuerza magnética que en el rayo tiene lugar en el plano horizontal y es cero en el plano vertical. Por lo tanto, la polarización del rayo no consiste principalmente de una sucesión de oscilaciones en el plano vertical, sino más bien en que las oscilaciones en el plano vertical son de naturaleza eléctrica, mientras que las que tienen lugar en el plano horizontal son de naturaleza magnética. Por lo tanto, a la pregunta obvia de en cuál de los dos planos tiene lugar realmente la oscilación en nuestro rayo, no podemos responder a menos que especifiquemos si la pregunta es para la oscilación eléctrica o magnética. El Sr. Kolaček[1] fue el primero que apuntó claramente que esta consideración todavía no ha sido respondida en una vieja disputa óptica.

Reflexión

Antes hemos demostrado en la interferencia entre la onda que avanza y la onda reflejada la reflexión de las ondas en las superficies conductoras, y también nos hemos aprovechado de la reflexión para construir nuestros espejos cóncavos. Pero ahora vamos a avanzar algo más y separar los dos sistemas de ondas.

Primero coloqué los dos espejos en un recinto grande, uno al lado del otro con sus aperturas enfrentadas en la misma dirección, y sus ejes apuntando a un punto a unos 3 metros de distancia. Por supuesto que el chispero del espejo receptor estaba en la oscuridad. Después preparé un plano vertical con una delgada hoja de cinc, de 2 metros de alto y 2 metros de ancho, y la coloqué en el punto de intersección de los ejes, y la ajusté para que presentara la misma inclinación a ambos lados. Obtuve un vigoroso chorro de chispas que se debían a la reflexión del rayo en la pared. Las chispas cesaban tan pronto se desplazaba unos 15º de la posición correcta con respecto a su eje vertical; de esto se deduce que la reflexión es regular, no difusa. Cuando se apartaba la pared de los espejos, manteniendo que los ejes del último convergieran hacia la pared, las chispas se debilitaban muy poco. Todavía podían observarse chispas cuando las paredes estaban a 10 metros de los espejos, es decir, cuando las ondas debían recorrer una distancia de 20 metros. Debe adoptarse este montaje por presentar varias ventajas para comparar la velocidad de propagación a través del aire con otras velocidades de propagación inferiores, p. ej., por los cables.

Para producir la reflexión del rayo con ángulos de incidencia mayores de cero, hice que pasara el rayo paralelamente a la pared de la habitación donde había una puerta. En la habitación de al lado a donde daba la puerta preparé el espejo óptico de tal forma que su eje óptico estuviera centrado ha-

[1] F. Kolaček, *Wied. Ann*. 34, pág. 676, 1888.

cia la puerta y cortaba la dirección del rayo en ángulo recto. Si se situaba la superficie conductora en posición vertical en el punto de intersección, y ajustado para que tuviera un ángulo de 45º con el rayo y también con el eje del espejo receptor, en el conductor secundario aparecía un chorro de chispas que no se interrumpía al cerrar la puerta. Cuando giré la superficie reflectora unos 10º de la posición correcta desaparecían las chispas. De modo que, la reflexión es regular, y los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. La acción que procede de la fuente de perturbaciones del espejo plano y, por lo tanto, del conductor secundario, puede verse colocando pantallas de sombras en diferentes puntos de su trayecto. Las chispas secundarias cesan inmediatamente; y no se produce ningún efecto cuando se coloca la pantalla en cualquier otro lugar de la habitación. Con la ayuda del conductor circular secundario es posible determinar la posición del frente de onda del rayo; se observó que está en ángulo recto al rayo antes y después de la reflexión, en la reflexión se giraba 90º.

Hasta este momento las líneas focales de los espejos cóncavos eran verticales, y el plano de oscilación era perpendicular al plano de incidencia. Para producir la reflexión con las oscilaciones en el plano de incidencia, coloqué ambos espejos con sus líneas focales horizontales. Observé el mismo fenómeno como en la posición anterior; y, además, no pude reconocer ninguna diferencia en la intensidad del rayo reflejado en los dos casos. Por otra parte, si la línea focal de un espejo es vertical, y el otro horizontal, no se observan chispas en el espejo secundario. La inclinación del plano de oscilación respecto al plano de incidencia no se ve alterada por la reflexión, siempre que esta inclinación tenga uno de los dos valores especiales referidos; pero esto no es válido en general. Incluso se puede cuestionar si el rayo después de la reflexión continúa polarizado. Las interferencias que se producen frente al espejo al interactuar los dos sistemas de onda, y que, como he indicado, hacen aparecer un fenómeno característico en el conductor circular, es muy probable que aclare todos los problemas relacionados con el cambio de fase y amplitud producidos por la reflexión.

Puede mencionarse un experimento posterior relativo a la reflexión sobre una superficie eléctricamente anisótropa. Se volvieron a situar otra vez los dos espejos cóncavos uno al lado del otro, como en los experimentos de reflexión descritos antes; pero ahora se situó frente a ellos, como superficie reflectora, la pantalla de alambres de cobre paralelos que hemos referido antes. Se observó que el chispero del secundario permanecía oscuro cuando los alambres cortaban la dirección de las oscilaciones en ángulo recto, pero aparecían las chispas tan pronto coincidían los alambres con la dirección de las oscilaciones. Por lo tanto, se ve confirmada la analogía entre la placa de turmalina y nuestra superficie con conductores en una dirección en la parte transmitida del rayo[1]. La placa de turmalina absorbe la parte que no se transmite; nuestra superficie la refleja. Si en este último experimento se sitúan los dos espejos con sus líneas focales en ángulo recto, no pueden excitarse chispas en el conductor secundario mediante reflexión en una pantalla isotrópica; pero demostré, para satisfacción mía, que se presentan las chispas cuando se produce la reflexión en la rejilla de alambres, siempre que esté ajustada de tal forma que sus alambres estén inclinados 45º respecto a las líneas focales. Todo lo que se ha dicho antes explica este fenómeno.

[1] Ver Nota 26 al final del libro.

Refracción

Para averiguar si se obtiene alguna refracción en el rayo al pasar del aire a otro medio aislante, disponía de un gran prisma de pez dura, un material parecido al asfalto. La base era un triángulo isósceles de 1,2 metros de lado, y con un ángulo de refracción cercano a 30º. Se colocó verticalmente el borde refractor, la altura del prisma era de 1,5 metros. Pero como el prisma pesaba cerca de 12 quintales[2], y era demasiado grande para moverlo, se dividió en tres piezas, cada una de 0,5 metros de altura, situadas una encima de la otra. El material se colocó en cajas de madera que no parecían interferir. El prisma se situó en un soporte a una altura tal que el centro de su borde refractor estaba a la misma altura que los chisperos primario y secundario. Cuando me satisfizo la refracción que tenía lugar, y me había hecho alguna idea de lo que alcanzaba, preparé el experimento de la siguiente manera:– El espejo productor estaba a una distancia de 2,6 metros frente al prisma y frente a una de las superficies refractoras, de esta forma el eje del haz se dirigía lo más exactamente posible al centro de masa del prisma, y se encontraba con la superficie refractora con un ángulo de 25º (en el lado normal hacia la base). Cerca del borde refractor y también en el lado opuesto del prisma se situaron dos pantallas conductoras para impedir que pasara el rayo por ningún otro camino excepto por el prisma. En el lado del rayo emergente se marcó en el suelo un círculo de un radio de 2,5 metros, que tenía su centro en el centro de masa de la parte inferior del prisma. Se trasladó el espejo receptor a lo largo de este círculo, con su abertura mirando siempre hacia la dirección del rayo incidente; en esta dirección el prisma daba una sombra completa. Pero aparecían las chispas cuando se movía el espejo hacia la base del prisma, comenzando cuando la desviación angular respecto a la primera posición era de 11º. Las chispas aumentaban de intensidad hasta que la desviación llegaba a 22º, y volvía a decrecer. Las últimas chispas se observaban con una desviación de 34º. Cuando el espejo se colocaba en la posición de máximo efecto, y se alejaba del prisma siguiendo el radio del círculo, se podían observar las chispas hasta una distancia de 5 a 6 metros. Cuando un ayudante se mantenía frente al prisma o detrás de él las chispas cesaban siempre, lo que muestra que la acción llega al conductor secundario a través del prisma y no por ningún otro camino. Se repitió el experimento después de colocar ambos espejos con sus líneas focales horizontales, pero sin alterar la posición del prisma. No se observó ninguna diferencia en el fenómeno observado. Un ángulo de refracción de 30º y una desviación de 22º cerca de la desviación mínima corresponde a un índice de refracción de 1,69. El índice de refracción de los materiales similares a la pez, para la luz, está entre 1,5 y 1,6. No debemos dar ninguna importancia a la magnitud o al sentido de esta diferencia[1], si tenemos en cuenta que nuestro método no es exacto, y que el material empleado era impuro.

Hemos aplicado el nombre de fuerza eléctrica al fenómeno que hemos investigado. Quizás sea mejor llamarlos rayos de luz de longitudes de onda muy larga. Los experimentos descritos me parecen que se adaptan notablemente para eliminar cualquier duda sobre la identidad de la luz, del calor radiante y del movimiento ondulatorio electromagnético. Creo que desde ahora debemos tener más confianza para aprovechar las ventajas que se derivan de esta identidad para estudiar la óptica y la electricidad.

---

[2] 12 Centner wog, (12 cwt): 12 quintales. El quintal alemán es una antigua medida de peso, equivalente a 45,6 kg. (El quintal español equivalía a 46,03 kg.)

[1] Ver Nota 27 al final de este libro.

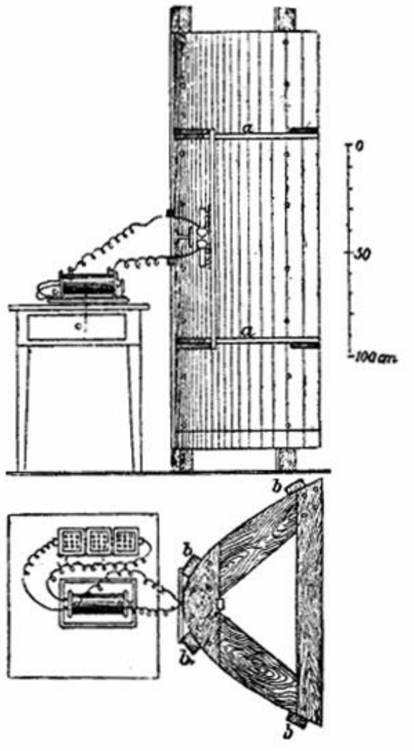


Fig. 35

Explicación de las figuras.– Para facilitar la repetición y extensión de estos experimentos, incluyo las Figs. 35, 36a y 36b de los aparatos que he empleado, aunque se construyeron de forma sencilla para experimentar en aquel momento y sin ninguna intención de durabilidad. La Fig. 35 muestra el esquema del espejo productor y su proyección en planta (promedio). Se verá que la estructura consiste en dos marcos horizontales (*a*, *a*) de forma parabólica, y cuatro soportes verticales (*b*, *b*) que están atornillados a estos marcos para sujetarlos. La hoja reflectora metálica se encuentra entre los marcos y los soportes, y se atornilla a ambos con numerosos tornillos. Los soportes salen por encima y por debajo de la hoja metálica, de esta forma se pueden emplear para manejar y colgar el espejo. La Fig. 36a representa el conductor primario a una escala algo mayor. Las dos partes metálicas deslizantes con fricción son dos tiras de papel resistente que se mantienen juntas por medio de gomas elásticas. Las dos mitades están sujetas a cuatro varillas de lacre que a su vez están atadas con gomas elásticas a listones de madera que forman parte del marco que hemos visto en la Fig. 35. Los dos alambres conductores (cubiertos con gutapercha) terminan en dos agujeros hechos en los terminales del conductor primario. Este montaje permite todo movimiento necesario durante el ajuste de las diversas partes del conductor; puede desmontarse y volverse a montar en pocos minutos, y es esencial que los terminales se limpien y pulan con frecuencia.

Justo en las puntas donde pasan los alambres a través del espejo, se encuentran rodeados por un resplandor azulado durante la descarga. Se ha introducido la pantalla de madera fina para impedir que esta luz llegue al chispero, en caso contrario interferiría seriamente con la producción de oscilaciones.

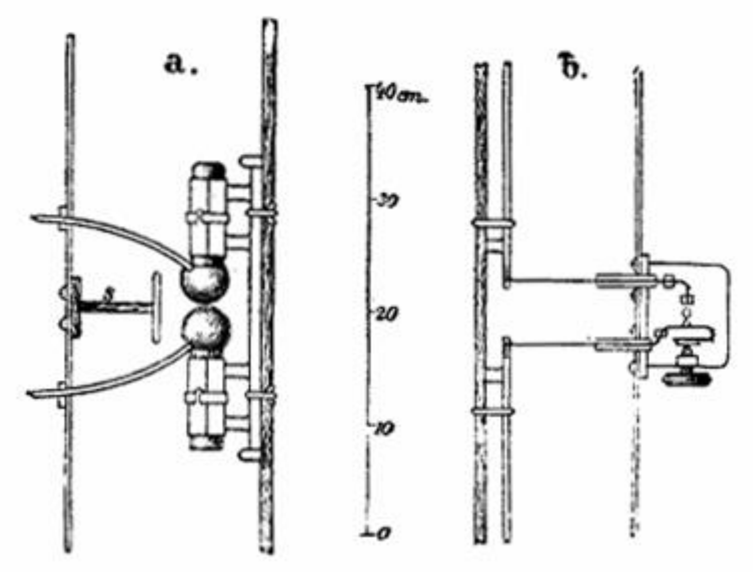


Fig. 36.

Finalmente, la Fig. 36b representa el chispero secundario. Ambas partes del conductor secundario se encuentran sujetas también con varillas de lacre y gomas elásticas a una hendidura que forma parte del marco de madera. Pueden verse en los extremos interiores de estas partes los alambres de conexión, rodeados por tubos de vidrio, que pasan por el espejo y se curvan entre sí. El alambre superior es un polo y lleva un pequeño terminal de latón. El alambre inferior está soldado a un resorte de espiral que lleva el segundo polo, que se trata de una punta fina de cobre. Se ha elegido intencionadamente un metal blando para este terminal; a menos que se tome esta precaución la punta penetra fácilmente en el otro polo, y las diminutas chispas quedan ocultas a la vista en el agujerito que se forma. La figura muestra cómo se ajusta la punta con un tornillo que comprime el muelle por medio de una placa de vidrio que los aísla. El resorte está doblado de una forma en particular para permitir el movimiento fino de la punta empleando tan sólo el tornillo.

No hay duda que pueden modificarse los aparatos descritos aquí sin estorbar al éxito de los experimentos. Siguiendo un sabio consejo, he intentado sustituir el chispero del conductor secundario por las ancas de una rana preparadas para detectar corriente; pero este montaje que es muy sensible bajo otras condiciones no parece adaptarse para este uso[1].

TABLA DE MATERIAS

[1] Ver nota 28 al final del libro.

Bibliografía

Arago, D. F. J., (**1854**):*Histoire de ma Jeunesse*, Kiessling, Schnée & Cie., Bruxelles.

Bence Jones, J., (**1870**): *The Life and Letters of Faraday*, 2 Volúmenes, Longmans, Green & Co., London.

Campbell, L., **Garnett, W.**, (**1882**): *The life of John Clerk Maxwell*, Macmillan & Co., London.

Chappert, A., (**1977**): *Étienne–Louis Malus* (1775 – 1812) *et la Théorie corpusculaire de la lumière*, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris.

Darboux, G (Ed): *Œuvres de Fourier* T. I. (1888), T. II. (1890) Gauthier – Villars et Fils, Paris.

Duhem, H.P., (**1936**): *Un savant français, Pierre Duhem*, Plon et Nourrit, Paris.

Duhem, P.M.M., (2015): *The Electric Theories of J. Clerk Maxwell, A Historic and Critical Study*, Springer International Publishing, Zurich, Switzerland.

Foucault, A. N., (**1878**): *Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault*, Gauthier–Villard Imprimeur Libraire, Paris.

Hertz, H., (**1894**): *Gesammelte Werke*¸ Band I. Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

Tyndall, J., (**1868**): *Faraday as a Discoverer*, Longmans, Green & Co., London.

Fresnel, A. J. (**1866**) : *Œuvres complètes de Augustin Fresnel*, T. I, II, III y IV, Imprimerie Impériale, Paris.

Huygens, Ch., (**1790**): *Traité de la lumiére*, Pierre Vander, Marchand, Libraire, Leyden.

Katz, M., (**2016**): *Temas de Historia de la Química*, 1ª Edición, Asociación Química Argentina, Buenos Aires.

Katz, M., (**2017**): *Temas de Química Física* 1ª Edición, Asociación Química Argentina, Buenos Aires, Capítulo XI. *Fisicoquímica del estado sólido*, pp. 301 – 343.

Lissajous, J. A.,: «Éloge historique de Léon Foucault, *Revue de cours scientifiques*, VIᵉ année, 1868 – 1869, 484 – 489.

Maxwell, J. C., (**1873**): *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford.

Niven, W. D. (Ed), (**1965**): *The Scientific Papers of John Clerk Maxwell*, Vols. I y II, General Publishing Company Ltd., Toronto.

Peacock, G. (Editor), (**1855**): *Life of Thomas Young*, M.D. F.R.S., &c., John Murray, London, Vols. I y II.

Peacock, G., (**1855**): *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*, M.D. F.R.S., &c., John Murray, London.

Picard, E., (**1924**): *Les théories de l'optique et l'œuvre d' Hippolyte Fizeau*, Gauthier – Villars, Paris.

Picard, E., (**1927**): *La vie et l'œuvre de Jean-Baptiste Biot*, Institut de France. Paris.

FIN DEL TOMO I

ÍNDICE ALFABÉTICO

En esta obra, el autor nos presenta los aspectos más relevantes de la historia de la Física. El Tomo I, abarca desde la más remota Antigüedad hasta la confirmación experimental de que la luz es un conjunto de radiaciones electromagnéticas. El Tomo II, de próxima publicación, abarcará los descubrimientos más importantes desde las experiencias de Michelson y Morley hasta la Teoría de la relatividad generalizada.

Miguel Katz, además de ser Profesor en Química y Licenciado en enseñanza de la Química es Doctor en Epistemología e Historia de la Ciencia. Ha sido docente de estas especialidades en varias universidades e Institutos Terciarios y consultor del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y fue galardonado con el Premio "Educación en Química" de la AQA.

ISBN 978-987-46579-8-5