

© Fondo de Cultura Económica

## MICHAEL FARADAY: UN GENIO DE LA FÍSICA EXPERIMENTAL

**Autor:** GERARDO CARMONA./ PATRICIA GOLDSTEIN./ E. LEY-KOO./ S.M.T DE LA SELVA./  
EDUARDO PIÑA./ I.CAMPOS./ J.L.JIMÉNEZ./ LUIS DE LA PEÑA./ JOSE L.CÓRDOVA./ MATÍAS  
MORENO./ LEOPOLDO GARCIA-COLIN S.

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PREFACIO](#)
- [I. MICHAEL FARADAY \(1791-1867\)](#)
- [II. LÍNEAS FÍSICAS DE FUERZA: UNO DE LOS BEBES DE FARADAY, AHIJADO DE MAXWELL\\*](#)
- [III. MICHAEL FARADAY Y LA LICUEFACCIÓN DE LOS GASES](#)
- [IV. LA LEY DE INDUCCIÓN Y LA RELATIVIDAD](#)
- [V. FARADAY Y LA NOCIÓN DEL VACÍO](#)
- [VI. LA CONTRIBUCIÓN DE FARADAY A LA TEORÍA DE DISOCIACIÓN ELECTROLÍTICA](#)
- [VII. FARADAY LAS TEORÍAS DE NORMA: LA UNIFICACIÓN DE LAS FUERZAS](#)
- [VIII. MICHAEL FARADAY, DIAMAGNETISMO Y EL EFECTO HALL CUÁNTICO](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



# COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García- Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

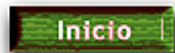
Dr. Guillermo Soberón

## **Coordinadora Fundadora:**

Física Alejandra Jaidar †

## **Coordinadora:**

María del Carmen Farías



Primera edición, 1995

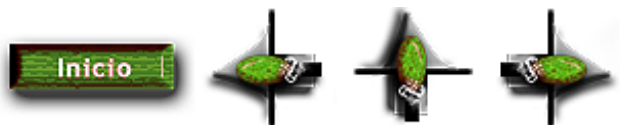
La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-4439-5

Impreso en México



## PREFACIO

En este libro se reúnen las conferencias que se dictaron en la Facultad de Ciencias de la UNAM el 18 de septiembre de 1991, en ocasión del bicentenario del nacimiento de Michael Faraday. Las conferencias, dirigidas a los estudiantes de ciencias, fueron motivadas por la personalidad de Faraday y la profunda trascendencia de sus descubrimientos en la física moderna. Durante la realización del Simposio Faraday nos sorprendió el interés mostrado por muchos de los estudiantes, quienes solicitaron copias impresas de las conferencias. El presente volumen constituye la respuesta a su petición.

El desarrollo de la ciencia, a través de la construcción de teorías y modelos del mundo físico, su comprobación e incluso el descubrimiento de nuevos fenómenos, es un acontecimiento social, logro de la humanidad entera, de permanente actualidad. La asimilación del nuevo conocimiento se realiza, primero, al ampliarse la visión de unos cuantos científicos y posteriormente, por la acumulación de múltiples comprobaciones, esta visión se extiende y pasa a formar parte del acervo de logros de la humanidad. En el inmenso cúmulo de contribuciones científicas encontramos gran diversidad en cuanto a su trascendencia y sólo en contadas ocasiones ha ocurrido, como en el caso de Faraday, que un solo individuo abra un nuevo campo del conocimiento o genere una nueva perspectiva.

Cervantes, Shakespeare, Miguel Ángel, Leonardo da Vinci, Mozart, Beethoven son personajes de tal magnitud dentro de la cultura universal que su obra sigue siendo estudiada y celebrada. Así, por ejemplo, es práctica común que en las universidades se den cursos sobre la trascendencia de Shakespeare o sobre sus antecedentes literarios. Sin embargo, difícilmente ocurre algo similar con respecto a los científicos; no es frecuente que se dediquen cursos al estudio de Newton, Maxwell, Einstein, etc., aunque debiera serlo. Es claro que si, por ejemplo, Shakespeare no hubiera existido, nadie sería capaz de escribir; tal como la conocemos, la tragedia de Hamlet. De manera similar; si Einstein no hubiera existido, nadie sería capaz de escribir *La electrodinámica de los cuerpos en movimiento* tal como la conocemos, aunque tarde o temprano, a partir de la fenomenología, esta teoría se construyera. Debemos reconocer; además, que la singularidad no sólo está en la irreproducibilidad de un determinado logro, sino también en las circunstancias, realidades y principios imperantes que rodearon al genio desde su infancia y que conformaron la visión de su mundo, conceptualmente cambiante, que finalmente adoptó, más o menos en forma consciente, para llevar a cabo sus creaciones, ya sea en humanidades o en ciencia.

Es necesario admitir que la cultura que nos permite reconocer y emocionarnos ante un poema de Pablo Neruda o una obra musical de Mozart y conocer la trayectoria de su vida, no es lo suficientemente amplia como para que sea común reconocer también la influencia de la ciencia y emocionarnos por ella. Así, no es usual que se reconozca explícitamente, por ejemplo, que en el conocimiento del universo el punto de vista heliocentrista de Copérnico obligó al ser humano a situarse a un lado, como un grano de polvo más del cosmos, con todas las consecuencias religiosas y culturales que ello implica. Y ya empequeñecido nada impide al hombre avanzar con su imaginación, su raciocinio y sus instrumentos, paso a paso, más allá de las fronteras del conocimiento de su época, más allá del Big Bang, los cuarks, etc. Una cultura que no incluya los esfuerzos de la ciencia por explicar los fenómenos naturales, más allá de la simple asociación de un nombre con un descubrimiento, permanecerá ineluctablemente anacrónica.

Hemos aprovechado el bicentenario de Michael Faraday para hablar y escribir sobre él con la idea de eliminar; al menos en una pequeña medida, el vacío cultural a su respecto. Faraday es una de esas personalidades que han dejado una huella imborrable tanto en el pensamiento científico más abstracto como en las realidades de nuestra vida diaria, hoy inconcebibles sin el uso de la energía eléctrica, sin ir más lejos.

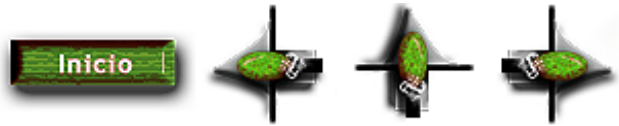
En los escritos aquí reunidos tenemos inicialmente una reseña biográfica y a continuación capítulos que tratan algún aspecto particular de sus investigaciones en una secuencia más o menos cronológica. En ellos comprobamos que la amplitud de sus investigaciones fue enorme: en la química descubrió nuevos compuestos, en lo tocante a la electroquímica las leyes que permiten asociar la carga eléctrica a los átomos. En la termodinámica consiguió la licuefacción de varios gases y, en relación con los fenómenos eléctricos y magnéticos, su extensa investigación lo llevó desde la construcción del primer dispositivo que transforma la energía electromagnética en mecánica (el motor eléctrico), hasta la creación del concepto de campo que habría de sentar las bases de la física moderna.

GERARDO CARMONA.

SARA MARÍA TERESA DE LA SELVA.

PATRICIA GOLDSTEIN.

*Marzo de 1992.*



# I. MICHAEL FARADAY (1791-1867)

GERARDO CARMONA  
PATRICIA GOLDSTEIN.


## RESUMEN

A 200 años del nacimiento de Faraday es necesario reconsiderar su imagen, ya borrada por el tiempo y, retocarla. Reconocer a la distancia que nos dan estos 200 años, no sólo sus contribuciones a la ciencia sino también su emoción por el descubrimiento de los misterios de la naturaleza y el deseo de compartirla mediante sus bien organizadas conferencias.

Nuestro interés al escribir estas notas es hacer un resumen de su obra a través de su vida, pues en muchos casos a Faraday sólo se le identifica por sus contribuciones a la electricidad y al magnetismo o a la electroquímica y se dejan a un lado otros trabajos que reflejan la unidad de su pensamiento. Por ello seguiremos el desarrollo de su vida y sus descubrimientos y ya en los siguientes escritos, se discutirán con mayor profundidad temas específicos para evaluar su contribución y para estudiar su trascendencia en la física actual.

MICHAEL FARADAY nació en Newington, al sur de Londres, el 22 de septiembre de 1791, dos años después de la Revolución francesa, en el seno de una familia pobre, siendo el tercero de cuatro hijos. El padre era herrador de caballos y la madre de origen campesino. Ambos pertenecían a la Iglesia de los sandemanianos, fundada por Robert Sandeman (1718-1771), secta protestante fundamentalista cuya base doctrinal era la creencia literal en las Sagradas Escrituras y cuyas normas básicas de conducta eran el amor y un alto sentido de la comunidad, ambos presentes en Faraday toda su vida, a pesar de la injusticia social que sufrió y de las injusticias profesionales que resultaron de su admirado maestro Humphry Davy.

Su nacimiento tuvo lugar después de que sus padres se mudaron a Newington, muy cerca de Londres, con la intención de mejorar su situación económica, lo que no ocurrió, pues el mismo Michael menciona que disponía de un trozo de pan a la semana. Posteriormente se mudaron a Londres, donde el joven Faraday buscaría el camino que lo llevaría a la ciencia. Cuando tenía 19 años, trabajaba de aprendiz de encuadernador y empezaba a asistir a conferencias científicas, al morir su padre, su hermano Robert, también herrador de caballos, fue quien quedó a cargo de la familia. Su madre murió en 1838, un año después de que subió al trono la reina Victoria (1837-1901) cuando Faraday ya había hecho sus mayores contribuciones a la ciencia y era ya un notable científico.

En cuanto a los inicios de su educación, el mismo Faraday menciona: [1] \*  "Mi educación fue del tipo más corriente; consistió en poco más que los rudimentos de lectura, escritura y aritmética en una escuela diurna común. Las horas fuera de la escuela las pasaba en mi casa y en las calles." En 1804, a los 13 años, concluidos esos estudios, el librero George Riebau lo contrató como mensajero; era además repartidor de periódicos para alquiler. Ese mismo año ascendió a aprendiz de encuadernador; actividad en la que mostró gran capacidad y habilidad, de manera que cinco años más tarde contaba ya con dos ayudantes. El fácil acceso a los libros lo hizo un lector habitual; se despertó su pasión por la ciencia, según afirma, con la lectura del artículo "Electricity" de la *Enciclopedia Británica*, escrito por James Tytler, cuando la estaba encuadernando. Para Tytler todos los efectos eléctricos podían explicarse suponiendo la existencia de un fluido cuyas vibraciones podían explicar no sólo los fenómenos eléctricos sino los ópticos y los térmicos. Este artículo revisaba y enfrentaba las teorías más ortodoxas: la de B. Franklin (1706-1790) según la cual los cuerpos en estado normal poseen un fluido eléctrico y su electricidad, positiva o negativa, significa un aumento o disminución de esa cantidad de fluido y, la de Robert Symmer, quien anunció en 1759, ante la Royal Society, la teoría de la existencia de dos clases de electricidad o de dos fluidos, la electricidad positiva y la negativa que todo cuerpo en estado normal posee en cantidades iguales. La controversia indujo en Faraday el deseo de verificar alguno de los fenómenos ahí descritos y, para ello, construyó un pequeño generador electrostático con ayuda de botellas usadas y madera.

En el Londres de principios del siglo XIX el acceso a la educación y en particular a la ciencia no era fácil, a pesar

de que Benjamin Thompson (conde de Rumford) el 7 de marzo de 1799 fundó la Royal Institution of Great Britain, cuyo propósito era "...difundir el conocimiento y facilitar la introducción general de invenciones y mejoras mecánicas útiles, y enseñar, mediante cursos de conferencias filosóficas y experimentos, la aplicación de la ciencia a las finalidades comunes de la vida". Con todo y esto no había escuelas nocturnas ni cursos por correspondencia ni bibliotecas públicas. Faraday sin embargo tuvo la suerte, en febrero de 1810, de encontrar a un grupo de jóvenes con una pasión común por la ciencia, quienes se reunían en la que llamaron The City Philosophical Society los miércoles por la noche, en casa de John Tatum, quien después de sus conferencias abría su biblioteca a los miembros de la sociedad. Fue en dicha sociedad donde recibió una educación básica en ciencias con cursos sobre electricidad, galvanismo, hidrostática, óptica, geología, mecánica experimental y teórica, química, astronomía y meteorología. En muchos casos esos cursos eran sólo una recolección de observaciones que Tatum ilustraba experimentalmente. Fue ahí donde Faraday puso en operación una pila voltaica. Todas estas experiencias intensificaron su interés por la ciencia y lo llevaron a conocer el libro de Jane Marcet *Conversations on Chemistry*, muy diferente a los libros de química de la época, pues era más técnico y estaba dirigido a aquellos interesados en los cursos de Humphry Davy de la Royal Institution. El texto no era una recolección de observaciones ni de recetas, sino un gran plan o proyecto que promovía el mismo Davy, quien consideraba que la química era la llave para descubrir los misterios de la Naturaleza. Dentro de este gran plan podían considerarse como un todo los fenómenos relativos a las reacciones químicas, las relaciones eléctricas, los fenómenos térmicos y ópticos. Esta visión integral, al tratar simultáneamente gran cantidad de fenómenos, impactó nuevamente a Faraday, quien dirigió sus pensamientos hacia la química.



**Michael Faraday**

En la casa de Tatum conoció a varios jóvenes con los que posteriormente establecerá una estrecha amistad; entre ellos estaban Huxtable, estudiante de medicina, Abbot, oficinista, y Phillips, químico y posteriormente presidente de la Sociedad Química y director de *Annals of Philosophy*. Conoció además a Dance, miembro de la Royal Institution y cliente de la librería de Riebau, quien le ofreció cuatro boletos para asistir a las conferencias de H. Davy sobre química. Faraday tomó notas y las pasó en limpio con todo cuidado, las ilustró en color y además, discutió cada uno de los puntos de interés con los miembros de la Sociedad. En 1812 terminó su contrato con Riebau y empezó como oficial de encuadernación con De la Roche. Con esto se definía así una actividad que podría durar toda su vida, pero ese futuro no lo emocionaba mucho, sobre todo después de haber asistido a los cursos de Davy. En diciembre de 1812 le escribió a Davy pidiéndole empleo y a la solicitud anexó una copia encuadernada de sus notas de los cursos de química, un total de 386 páginas. En octubre Davy había sufrido un accidente en su laboratorio al explotarle un compuesto de cloro que le dañó los ojos y además, en esos momentos salía de viaje de bodas.

Algunos autores afirman que Faraday hizo la solicitud y otros, que Davy recibió la recomendación de tomar a Faraday como amanuense, pues estaba temporalmente imposibilitado por el accidente; de cualquier modo, Davy recibió las notas, pero sólo hasta marzo de 1813 se nombró a Faraday asistente del laboratorio de la Royal Institution, con salario y dos habitaciones a su disposición. Desde este momento, la relación entre ambos fue estrecha y fértil. Habiendo planteado ya el carácter inquieto de Faraday, es necesario esbozar ahora brevemente, la personalidad de Davy y los problemas en los que trabajaba, así como los modelos físicos y la filosofía natural que los sustentaban.

Humphry Davy (1778-1829), huérfano de padre, se inició como aprendiz en una botica en 1794, donde despertó su interés por la química y cuatro años más tarde fue superintendente de un hospital. A los veintiún años descubrió el gas hilarante o de la risa, un óxido nitroso cuyas propiedades estableció con el método más empleado por los químicos: experimentar sobre sí mismo. Se convirtió en un excelente conferencista sobre temas químicos, por lo que el conde de Rumford lo invitó a incorporarse a la Royal Institution, en 1801, como instructor asistente de química y director del laboratorio y, en 1802, fue promovido al cargo de profesor.

Hacia 1808 Davy había descubierto cuatro elementos nuevos: potasio, sodio, magnesio y calcio. El método que utilizó no habría sido posible sin el descubrimiento de la pila de Volta [2] en 1800 y sin la aplicación que de ella hicieron los ingleses Nicholson y Carlisle, quienes demostraron que la electricidad descomponía el agua en sus dos constituyentes, oxígeno e hidrógeno.

Frecuentemente los elementos se encuentran en la naturaleza formando óxidos, por ello, para obtener elementos puros es necesario eliminar el oxígeno empleando carbón, esto es, para obtener un elemento que se desconoce debe calentarse el óxido con carbón puro para formar monóxido y bióxido de carbono y así dejar libre el elemento de interés. Sin embargo, había algunas sustancias en las que no funcionaba ese procedimiento. Davy consideró que lo que no podía separarse con una reacción química se podría por las corrientes eléctricas, como en el caso del agua. Por ello construyó una batería eléctrica de 250 placas metálicas, la más potente en ese momento y envió corrientes intensas a través de la solución que contenía la sustancia por descomponer; sin embargo, no obtuvo buenos resultados pues sólo conseguía el oxígeno y el hidrógeno procedentes del agua. Eliminó entonces el agua y trató a la sustancia sólida sin resultados, hasta que probó con la sustancia fundida [12]. El 6 de octubre de 1807 hizo pasar corriente a través de potasa fundida, liberando así pequeños granos de un metal al que llamó *potasio*. Una semana después, del carbonato sódico, aisló el *sodio*. En 1808 aisló varios metales de sus óxidos, siguiendo el método propuesto por Berzelius, agregando mercurio a la cal obtuvo, con el paso de la corriente, una amalgama de la cual aisló una sustancia a la que llamó calcio. De manera similar obtuvo el magnesio, el estroncio y el bario. Posteriormente en 1810 mostró que el gas verde obtenido del ácido clorhídrico por Scheele (1742-1786) —muerto prematuramente por la costumbre de entonces de oler y gustar para caracterizar a los compuestos químicos nuevos— que se pensaba que era un óxido, en realidad era un elemento y lo llamó *cloro*. Mostró entonces que el ácido clorhídrico no contenía oxígeno, con lo que descalificaba la teoría de Lavoisier; que postulaba que el oxígeno (engendrador de ácidos) era un componente necesario de los ácidos.

Davy inventó el arco eléctrico de alumbrado y en 1815 inventó la lámpara de seguridad usada por los mineros. En 1818 se le otorgó el título de barón y en 1820 fue electo presidente de la Royal Society en sustitución de Joseph Banks, quien en 1808 recibió la comunicación del descubrimiento de Volta. Se dice además que uno de los mayores descubrimientos de Davy fue Faraday, sobre el cual ejerció una dominante influencia intelectual.

Davy además, escribía poesía, pescaba y estaba interesado en la metafísica [3, 9]. Como parte de la tradición científica inglesa de esa época que proporcionaba al químico una guía, estaba el texto de Gowin Knight, *An Attempt to Demonstrate that all the Phenomena in Nature May Be Explained by Two Simple Active Principles, Attraction and Repulsion* (1748). Dicho texto era fácil de conseguir en la biblioteca de la Royal Institution y seguramente, tanto Davy como Faraday, lo conocían. Knight reducía la materia a fuerzas de atracción y de repulsión, y asociaba una clase de materia a cada tipo de fuerza, y dicha asociación generaba el conjunto de fenómenos observados. Otra teoría rival y contemporánea de la primera, era la del jesuita Rudjer Bosovich, quien en su *Philosophiae naturalis Theoria redacta ad unam tegem virium in natura existentium* de 1758 [15,20], a diferencia de Knight, combinaba las fuerzas atractivas y repulsivas en un solo átomo. El átomo era reducido a un punto rodeado de cáscaras alternantes de fuerzas positivas y negativas de diferentes intensidades; sin embargo al acercarse al origen la fuerza repulsiva tendía al infinito, lo que preservaba su propiedad de impenetrabilidad. Muy lejos del origen de fuerzas, más allá de las cáscaras envolventes, la interacción dominante era la atractiva, con una dependencia inversamente proporcional al cuadrado de las distancias, como en la ley gravitacional de Newton. Los átomos de Bosovich retenían todas las propiedades de los corpúsculos de Newton; las fuerzas repulsivas le daban solidez, impenetrabilidad y elasticidad; la existencia de fuerzas en el espacio le daba extensión. Pero las mayores ventajas de este modelo eran para la química, pues las cáscaras permitían la formación de compuestos, unos más estables que otros. Igualmente, los cambios de estado podían entenderse mejor; pues la estabilidad de los estados en un intervalo de temperaturas podía relacionarse con las fuerzas atractivas y repulsivas alternantes entre las partículas constituyentes. Todas estas ideas no tenían aceptación entre los químicos; en particular Lavoisier las rechazó ampliamente por estar tan alejadas de los hechos, por ser puramente metafísicas. Davy, conocedor de estas ideas, no hizo uso de ellas hasta después de convencerse de que el cloro no era un compuesto de oxígeno, como demandaba la teoría de Lavoisier, sino un elemento y que la acidez era resultado de la forma molecular y no de la

existencia de un, ponderable o imponderable, acidificador. Con esto en mente, Davy se dedicó a analizar ácidos y, además, estableció que el diamante es carbón puro. También mostró que la diferencia enorme en sus propiedades era consecuencia únicamente de la modificación del arreglo geométrico de las partículas de carbón. Fue justamente en ese periodo que Faraday ingresó al servicio de Davy en la Royal Institution y no hay duda de que fue introducido a la teoría de Bosovich, como se podrá apreciar en sus comentarios, veinte años más tarde.

Durante sus primeros meses en el laboratorio, Faraday sufrió, junto con Davy, varios accidentes al trabajar con compuestos de cloro y al final del año recibió de éste la proposición de acompañarlo en un viaje por Europa como asistente. En octubre de 1813, a los 22 años, emprendió el viaje en el que no sólo fue un asistente científico hábil, con ingenio e iniciativa, sino que además atendió las necesidades personales de los Davy, resultando un mozo a su servicio. Por ello, en muchas ocasiones, en reuniones científicas que se prolongaban hasta la cena, era excluido de la mesa, con pesar suyo y de los invitados. Viajó con Davy y su esposa a Francia, Italia, Suiza, Alemania, Holanda y Bélgica. Hay que recordar que en esa época Inglaterra estaba en guerra con Francia, a pesar de lo cual se permitía que los científicos de ambas naciones viajaran por sus territorios y en esa ocasión hubo una autorización especial de Napoleón para el libre tránsito de estos científicos. El viaje duró año y medio y durante el mismo, Faraday tuvo la oportunidad de conocer y trabajar con científicos europeos; así fue testigo de importantes descubrimientos.

En París conoció a Ampere, amigo de Davy, quien les presentó una sustancia recientemente extraída de una alga marina por Courtois, descubridor del yodo. Davy y Faraday determinaron las propiedades de ese nuevo elemento. En Ginebra realizaron experimentos con el pez torpedo eléctrico, del cual Henry Cavendish había hecho un modelo con botellas de Leiden, y en Florencia Faraday fue testigo de cómo Davy, utilizando una lente del duque de Toscana, quemó un diamante, con lo que demostró que era carbón puro. En Milán conoció a Volta (1745-1827).

A su regreso a Londres, en abril de 1815, Faraday dedicó todo su esfuerzo a la química, leyendo las revistas científicas accesibles a él; llevaba un registro bibliográfico de lo que leía o le resultaba interesante. Esto no le impidió continuar su relación con The City Philosophical Society, donde impartió cursos sobre los estados de la materia, las propiedades de los metales, etc. [13]. Además organizó reuniones científicas en sus habitaciones en la Royal Institution. Su primer trabajo, publicado en 1816, tiene el título "Analysis of Caustic Lime of Tuscany"; el cual consta de dos páginas; a éste siguió una serie de artículos cortos, sin secuencia, sugeridos por los trabajos de Davy y W. T. Brande, sucesor de Davy como profesor de química en la Royal Institution. También en 1816 impartió su primera conferencia, en la Royal Institution, como profesor; sobre "Propiedades generales de la materia". En 1817 publicó seis artículos cortos; en 1818 once artículos sobre la combustión del diamante, etc., y en varios artículos hechos con la colaboración de Phillips anunció ante la Royal Society la contribución más importante hasta ese momento: la creación de nuevos compuestos de cloro- carbón.

Por la década de 1820 Faraday ya había conseguido una buena reputación como químico analítico. Algunos organismos oficiales solicitaban su opinión; en particular, un comité del parlamento investigó la confiabilidad de la lámpara para mineros, que inventó Davy, pidiendo la asesoría de Faraday. Éste afirmó que la lámpara no era tan confiable como Davy aseguraba. A partir de esto empezó un distanciamiento entre ambos; es posible agregar también que el ingenio y el intenso trabajo sobre varios problemas a los que Faraday fue introducido, produjo un fuerte resentimiento en Davy.

Faraday también inició investigaciones según sus intereses; por ejemplo, ya que la ignición de vapores de aceites era importante para el desarrollo de la iluminación de Londres, estudió varios aceites que podían ser usados en el calentamiento de habitaciones y en la iluminación, lo cual lo llevó a descubrir el benceno en 1825.

En 1818, junto con James Stodart, realizó una serie de experimentos sobre aleaciones de aceros, con el fin de hacerlos más resistentes a las inclemencias del tiempo, pero como había empleado metales raros como platino, rodio y plata, no se pudieron producir industrialmente. En 1821 Faraday se casó con Sarah Barnard, hermana de uno de los miembros de The City Philosophical Society, quien, al igual que Michael, era sandemaniana, y cuyo padre era pastor. Se dice que alrededor de 1840 sustituyó a su suegro como predicador durante tres años.

Aunque en los primeros años la principal actividad de Michael Faraday se centró en la química, su viejo amigo Phillips, ahora director de los *Annals of Philosophy*, lo hizo regresar a la electricidad cuando en 1821 le pidió que escribiera una revisión sobre los trabajos de electromagnetismo de Oersted, Ampere y Biot-Savart, aparecidos el año anterior. El primer descubrimiento de Faraday sobre el electromagnetismo se realizó el 3 de septiembre de 1821 pues, como era habitual en él, repitió cada uno de los experimentos que tenía que reportar. Al repetir el experimento de Oersted con una aguja magnética localizada en diversos puntos alrededor de un alambre que

conducía una corriente, Faraday encontró que la fuerza ejercida por la corriente sobre el imán era de naturaleza circular. Inmediatamente construyó un rotor electromagnético basado en esta idea [19]. Entonces, una barra magnética fija en un extremo podía girar alrededor del alambre que conducía la corriente, a lo largo de la línea de fuerza que actuaba sobre el polo móvil. Diseñó además otro dispositivo con el imán fijo y con uno de los extremos del alambre conductor móvil, pero que tocaba levemente la superficie del mercurio que utilizó para cerrar el circuito. El alambre que transportaba la corriente giraba alrededor del imán; así con estos dos dispositivos, demostraba el acuerdo con la tercera ley de Newton, pues el imán también ejercía una fuerza sobre el alambre. Estos experimentos, que de hecho constituyen la transformación de energía eléctrica en mecánica, proporcionan el principio básico de los motores eléctricos. Sin embargo, la línea de desarrollo para la construcción de los motores se inició en un descubrimiento posterior; en 1831: la inducción electromagnética [5].

En ese momento Davy ya era presidente de la Royal Society y Wollaston vicepresidente. Este último le había sugerido a Davy, unos meses antes, que un alambre conductor de corriente debería torcerse en presencia de un imán. El resultado experimental de Faraday era claro y definitivo y buscó a Wollaston para comentarle su descubrimiento. Al no encontrarlo y, en ausencia de Davy, Faraday publicó su trabajo sin referirse a la idea de Wollaston, lo cual hizo que pronto se le acusara de deshonesto. Después de varias entrevistas con Wollaston, el problema quedó aclarado, y sin ningún resentimiento, éste lo felicitó por su descubrimiento, pero eso no alteró el malestar de Davy, quien, en 1823, insistió en la calumnia contra Faraday. Ese trabajo también le causó problemas con Ampère, pues éste proponía, como era dogma después de Newton, que todas las fuerzas en la naturaleza eran centrales.

Mientras tanto, era difícil para Faraday realizar investigaciones independientes salvo en los momentos en que Davy se ausentaba. Durante esos periodos Faraday trató de formar nuevos compuestos de cloro o su descomposición química. Al regresar de un viaje, Davy le sugirió hacer el proceso en un recipiente cerrado. Faraday calentó en un tubo de vidrio cerrado uno de los compuestos de cloro para estudiar su descomposición; realizó el experimento en presencia de uno de los amigos de Davy, el doctor Paris; ambos quedaron sorprendidos al observar la aparición de pequeñas gotitas de un líquido en el extremo frío del tubo. Al día siguiente, Faraday confirmó que el líquido era cloro licuado. No sólo era importante en la licuefacción el aumento de presión creado por el calentamiento, sino que también la temperatura tenía un papel relevante, pues el líquido se había depositado en el extremo frío del recipiente. Posteriormente, en 1826 y en 1845, regresó al mismo problema, sumergiendo un extremo del recipiente en una mezcla frigorífica consiguió licuar muchas otras sustancias. Sin embargo, había otras que no presentaban signos de licuefacción como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, etc., por lo que los llamó gases permanentes. La temperatura más baja que Faraday obtuvo fue  $163^{\circ}\text{K}$  ( $-110^{\circ}\text{C}$ ). Algunos autores consideran que en la licuefacción del cloro en 1823, la influencia de Davy fue mínima; otros en cambio consideran que la sugerencia de Davy de calentar los cristales de hidrato de cloro en un tubo de vidrio cerrado se apoyaba en el modelo de Boscovich, el cual permitía visualizar el efecto que tendría el calentamiento. Esto es, al aumentar la agitación molecular, los enlaces de hidrógeno se romperían, permitiendo así una asociación más íntima y estable entre los átomos de cloro.

En 1823 Phillips decidió hacer a Faraday miembro de la Royal Society, por lo que le pidió a Wollaston que encabezara la lista de los 29 miembros que debían proponerlo, a lo cual accedió al igual que los restantes miembros, salvo Davy, entonces presidente de la institución. El 8 de enero de 1824 se nombra a Faraday socio de la Royal Society en votación secreta, con un voto en contra.

Posteriormente Davy enfermó y se retiró de la dirección de la Royal Society en 1825, ocupando Faraday su lugar. El difícil acceso a la educación y a la ciencia en aquella época, para personas como él, lo motivó el resto de su vida a organizar múltiples conferencias dirigidas sobre todo a los jóvenes. A partir de ese momento Faraday las instituyó e invitó a todos los miembros de la institución a impartirlas los viernes por la tarde. Muchas de ellas fueron impartidas por el propio Faraday y era tal su reputación de buen conferencista que era habitual la asistencia de oyentes como Eduardo, príncipe de Gales, el duque de Edimburgo, etc. Esto le permitió extender su influencia científica entre los políticos victorianos.

Faraday además impartía cursos en la Royal Military Academy, era miembro del Scientific Advising Committee of the Admiralty y asesor científico de The Trinity House, la institución que estaba a cargo de los faros del país. En 1826 inició además cursos de Navidad, especiales para niños. Justo en diciembre de 1826, Davy sufrió un ataque de parálisis, renunció a la Royal Society, y finalmente, murió en Suiza en 1829.

Habiendo muerto Wollaston y Davy, Faraday pudo regresar con toda libertad a sus estudios sobre electricidad que, aunque explícitamente interrumpidos, habían estado en sus pensamientos desde entonces. Recordemos que el 21 de

octubre de 1821 publicó el trabajo titulado *On Some New Electro-Magnetical Motions, and On The Theory of Magnetism*, donde registró la primera conversión de energía eléctrica en mecánica y que contiene la primera noción de líneas de fuerza. La visión que tenía entonces Faraday del electromagnetismo era muy diferente de la de sus contemporáneos, quienes, obligados por la tradición, trataban de explicar los fenómenos en razón de los fluidos eléctricos, de la acción a distancia y de las fuerzas centrales. Al principio Faraday consideró que las moléculas del medio por donde fluía la corriente se encontraban en un estado de esfuerzo que se transmitía a los alrededores: el estado electrotónico. ¿Este estado de esfuerzo podía ser transmitido y provocar un estado de esfuerzo en un alambre cercano? En su cuaderno de notas en 1822 escribió "convert magnetism into electricity"; esto es, habiendo encontrado que una corriente produce un efecto magnético, era natural preguntarse por el efecto inverso ¿de qué manera los imanes pueden generar un efecto eléctrico? Entre 1822 y 1831 en cuatro ocasiones, investigó varias posibilidades y además trató de examinar el estado de esfuerzos generado en un medio que trasmite una corriente, analizando con luz polarizada una celda electrolítica en operación, con resultados negativos. Era costumbre en Faraday que tan pronto como hacía experimentos en un área, a continuación lo hiciese en otra, pero motivado por el modelo que tenía en mente. Por ejemplo, en el lapso señalado también estuvo interesado, a petición de la Royal Society, en el desarrollo de vidrios ópticos cuya naturaleza estudió, así como en su perfeccionamiento y producción. La calidad de los vidrios obtenidos fue tal que le pidieron que se encargara de su producción industrial; no aceptó, pero les entregó sus notas para que los produjeran. Casi simultáneamente apareció en la revista de la Royal Institution la traducción de los trabajos de Fresnel sobre la teoría ondulatoria de la luz, que proporcionaban el soporte teórico a su trabajo sobre los vidrios.

También entre 1828 y 1830 estuvo trabajando en otro fenómeno ondulatorio: la propagación del sonido. Faraday presentó ante la Royal Institution los trabajos realizados por Charles Wheatstone sobre la propagación ondulatoria del sonido, en una serie de conferencias en la que él no era el único expositor; pues también participaban algunos músicos. Uno de los efectos que más motivaron a Faraday fueron las figuras de Chladni que pueden apreciarse fácilmente con ayuda de arena fina depositada sobre una lámina. Dichas figuras son producidas por la redistribución de arena sobre la lámina, debido a las vibraciones generadas por un violín. Este fenómeno muestra la inducción acústica, en la cual el aire sirve como medio transmisor de la vibración de la cuerda del violín hasta la lámina con arena. En su cuaderno de notas no hay ningún comentario que indique alguna relación entre dicha inducción acústica y la que él buscaba desde 1822. Los primeros seis meses de 1831 Faraday los dedicó a la generación de todo tipo de figuras de Chladni, estudiando el efecto de la densidad del aire en la vecindad de la lámina vibrante. Posteriormente, en marzo de 1831, después de descubierta la ley de inducción electromagnética, entregó un escrito al cuidado de la Royal Society en donde estableció una analogía entre los fenómenos acústicos y los electromagnéticos [10]. A continuación presentamos un extracto.

Algunos resultados de las investigaciones incluidas en los dos artículos intitulados "Experimental Researches in Electricity" recientemente leídos ante la Royal Society y los aspectos que de ellos emanan, en conexión con otros aspectos y experimentos, me conducen a creer que la acción magnética es progresiva y que requiere tiempo; esto es, que cuando un imán actúa sobre otro imán o un pedazo de fierro distante, la causa de la influencia (que por el momento llamaré magnetismo) avanza gradualmente desde los cuerpos magnéticos y requiere tiempo para su transmisión, que probablemente se encuentre que es muy sensible.

Pienso también que veo la razón para suponer que la inducción eléctrica (de la tensión) se lleva a cabo en un tiempo progresivo similar.

Me inclino a comparar la difusión de las fuerzas magnéticas, a partir de un polo magnético, a las vibraciones sobre una superficie de agua en equilibrio, o con aquellas del aire en el fenómeno del sonido; es decir, me inclino a pensar que la teoría vibracional se aplicará a estos fenómenos, como lo es al sonido y muy probablemente a la luz.

Por analogía, pienso que puede ser posible también su aplicación a los fenómenos de tensión.

Desearía trabajar estos aspectos experimentalmente, pero, como mucho de mi tiempo está comprometido con los deberes de mi oficina y como los experimentos serían prolongados y pueden ser sujetos a las observaciones de otros, deseo, al depositar este artículo al cuidado de la Royal Society, tomar posesión y derechos, en el caso de que en alguna fecha sean confirmados experimentalmente, para reclamar el crédito por estos aspectos en esa fecha, ya que hasta donde yo sé, nadie es consciente de ellos ni puede reclamarlos más que yo.

En junio de 1831 (recordemos que Maxwell nació el 13 de junio de ese mismo año) tuvo conocimiento del electroimán construido por Joseph Henry de Albany, Nueva York, con el cual se podían levantar 300 kilogramos de hierro; pero lo realmente importante era que al invertir la polaridad de las conexiones eléctricas, el peso permanecía suspendido un corto tiempo, lo que indicaba que no eran los fluidos eléctricos los que tenían que ver en estos fenómenos, sino las propiedades mismas de la materia. En agosto, Faraday estaba ya convencido de que la electricidad y el magnetismo eran ondas que se propagaban en un medio material. Faraday construyó dos bobinas en los lados opuestos de un anillo de hierro, el medio material; una batería era insertada en el circuito abierto de la primera bobina y al cerrarlo la magnetizaba; finalmente, un galvanómetro insertado en la segunda bobina detectaría cualquier posible corriente. En muchas ocasiones Faraday había hecho mediciones similares, pero lo había hecho conectando el circuito secundario, después de generar la corriente en el primario; pero ahora sabía lo que buscaba. Justamente al igual que una lámina vibrante producía patrones de vibración sobre otra lámina vecina, ahora las ondas generadas por una corriente en el circuito primario producían un patrón o estado en el secundario, a través del medio material: el núcleo de hierro. El circuito era pues el detector de la onda producida por el primario. Nótese que este diseño es la versión elemental de los transformadores.

Dos meses más tarde Faraday descubrió la manera en que un imán permanente generaba una corriente eléctrica; el 17 de octubre anunció la producción de efectos eléctricos por medios magnéticos. Para llegar a este punto fue necesario construir varios dispositivos experimentales, lo que se fue simplificando poco a poco hasta lo esencial. A diferencia del experimento de agosto, en el que usó una batería para generar la corriente en el circuito primario, ahora empleó sólo imanes y alambres enrollados alrededor del núcleo de hierro. Después, eliminando el núcleo de hierro, observó que se inducía una corriente al introducir un imán en el interior de la bobina y que había un cambio de signo de la corriente cuando el imán a su vez era retirado. Finalmente, empleó un solo anillo conductor y obtuvo la corriente inducida tan sólo haciéndolo pasar cerca del imán. En todos estos experimentos el aspecto común era el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. Los dispositivos experimentales que construyó inicialmente, incluían como medio material al núcleo de hierro, porque permite la transmisión de ese estado de tensión electrotónica o vibración, posteriormente los redujo a lo esencial cuando indujo una corriente en un aro tan sólo moviéndolo en presencia de un campo magnético. Habiendo eliminado el medio material, receptor y transmisor de la señal proveniente del imán en movimiento, dirigió toda su atención al concepto de líneas de fuerza, señalando que para generar una corriente era necesario que el conductor cortara líneas de fuerza magnética. El 28 de octubre realizó otro experimento con el que resultó el prototipo del generador eléctrico, el cual producía una corriente continua a partir del magnetismo. El dispositivo consistía en un disco delgado de cobre que rotaba, alrededor de su eje, entre los polos de un imán permanente. Dos conductores hacían un contacto deslizante, uno en la orilla del disco y otro en el eje y, ambos extremos finalmente, quedaban unidos a un galvanómetro para cerrar el circuito. El galvanómetro indicaba que, mientras el disco girara, se produciría una corriente continua.

Al producir electricidad a partir del movimiento mecánico Faraday inventó el generador eléctrico, pero aún tuvieron que transcurrir 50 años para que se construyeran generadores eficientes y para que se acelerara aún más la Revolución Industrial; también fue necesario que transcurrieran varios años para que se aceptaran las líneas de campo, hasta que James Clerk Maxwell entró a escena, en 1856, cuando publicó su trabajo titulado *Sobre las líneas de fuerza de Faraday*, en el que empleaba el lenguaje matemático que requerían los descubrimientos de Faraday. También en 1864 Maxwell demostró que los cambios eléctricos y magnéticos se propagaban como ondas y finalmente, en 1873, seis años después de la muerte de Faraday, publicó su *Treatise on Electricity and Magnetism*, en el que reconocía su deuda con Faraday.

Durante los últimos meses de 1832 Faraday desvió su atención hacia el estudio de la identidad de la electricidad producida por diferentes mecanismos, como generadores electrostáticos, celdas voltaicas, termopares, inducción y peces eléctricos. Para ello, llevó a cabo una amplia búsqueda bibliográfica sobre efectos similares de las diferentes formas de electricidad, repitiendo los experimentos pero en muchas ocasiones obtenía resultados diferentes de los que habían reportado los autores [1], lo que lo llevó a diseñar aparatos de medición más precisos. Pero el objetivo de todo esto era determinar la verdadera naturaleza del estado electrotónico. En primer lugar tenía que mostrar; aunque lo creía firmemente, que todas las electricidades, independientemente de cómo habían sido generadas, eran idénticas. Después era necesario determinar qué era lo que producía ese estado de tensión, cuyo relajamiento al cerrar el circuito generaba una corriente, y cómo ésta, a su vez, generaba un campo magnético.

Por ejemplo, ¿en qué consiste el estado electrotónico en una celda electrolítica o en un sólido aislante? El examen cuidadoso del fenómeno de descomposición electrolítica llevó a Faraday a enunciar las leyes cuantitativas de la electroquímica. ¿De qué manera una cantidad dada de electricidad estaba en relación con los productos de la

descomposición electrolítica? La primera ley de la electroquímica establece que la masa liberada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que se hace pasar a través de la solución, y la segunda ley nos dice que, para sustancias diferentes, el peso depositado por una cantidad de electricidad es proporcional a su correspondiente peso químico equivalente. Para ejemplificar; recuérdese que el peso equivalente del oxígeno es 8, su peso atómico es 16, y su peso molecular 32. En 1881 Hermaun von Helmholtz señaló que para que estas leyes tuviesen sentido era necesario que, al igual que la materia, la electricidad se pudiera dividir en pequeñas unidades. En otras palabras, esto quería decir que había átomos de electricidad.

Hay que señalar también que Faraday propuso dar el nombre de *electrólisis* a la ruptura de moléculas por una corriente eléctrica. Llamó *electrolito* a la solución a través de la cual fluía la corriente, *electrodos* a las varillas de metal introducidas en la solución y evitó llamarles *polos opuestos*, pues demostró que no eran polos de fuerza. Al electrodo positivo le llamó *ánodo* y al negativo *cátodo*. A las cargas en movimiento a través de la solución las llamó *iones*, que quiere decir viajero en griego. Y a los iones que viajan en dirección al ánodo los llamo *aniones* y a los que se dirigen al cátodo, *cationes*.

A continuación Faraday mostró experimentalmente que los componentes de una sal binaria, en la solución, migraban en direcciones opuestas hasta ser depositadas en las terminales. Para justificar tal comportamiento arguyó que la corriente eléctrica "exalta" a los componentes de la molécula en direcciones opuestas, permitiendo que cada componente intercambie sucesivamente a su pareja en su migración hacia la terminal.

De esta manera Faraday probó la identidad de las electricidades, y además, motivado por la unidad de los fenómenos físicos, mostró que la electricidad no sólo tenía que ver con la afinidad química, como ya lo sabía el mismo Davy, sino que era responsable de ella [*Philosophical Transactions*, 1834, párrafo 852]. Con el modelo descrito en el párrafo anterior mostró también que las terminales no eran las que actuaban a distancia, sino que eran las fuerzas intermoleculares generadas por la tensión impuesta por la fuerza eléctrica las responsables de la descomposición química. De sus estudios en electroquímica había adquirido una visión que nadie en ese momento poseía. Inició entonces sus estudios sobre los dieléctricos y en 1838 desarrolló toda una teoría coherente de la electricidad. En 1839, después de ocho años de trabajo intenso, sufrió un ataque de nervios del cual realmente nunca se recuperó. Durante los siguientes cinco años fue incapaz de concentrar su mente en los fenómenos eléctricos y magnéticos y se dedicó en cambio a las labores de la Royal Institution y de nuevo a la condensación de los gases.

En 1844 hizo un viaje de descanso a Suiza, durante el cual publicó un trabajo en donde probaba, a su satisfacción, que sólo los átomos de Boscovich eran compatibles con los fenómenos de conducción y no conducción en cuerpos. Este trabajo establecía el inicio de otro periodo de actividad que se vio reforzado por una carta de William Thomson (lord Kelvin), quien le comentó el éxito de su tratamiento matemático de las líneas de campo en algunos problemas y además le sugirió algunos experimentos para probar sus resultados. Uno de estos experimentos, que Faraday ya había intentado en 1821, consistía en examinar el efecto de la acción eléctrica aplicada a un dieléctrico, sobre la luz polarizada. Realizó el experimento pero no obtuvo sino los mismos resultados negativos que hasta entonces; sin embargo, ahora no abandonó el problema, pues ya sabía que los fenómenos eléctricos y magnéticos estaban conectados. Obtuvo luz polarizada de la reflexión en un espejo y la hizo pasar a través de diferentes medios, cristal de calcita, turmalina, etc., inmersos en un campo magnético, sin que se diera algún cambio en la polarización. Sólo hasta que empleó un vidrio de alto índice de refracción que él mismo construyó, pudo observar la rotación en el plano de polarización, rotación que se invertía si se invertía el campo magnético. Este es el efecto Faraday, descubierto el 13 de septiembre de 1845. Esto también le sugirió que el magnetismo no era una propiedad de algunas sustancias como el hierro, el níquel y el cobalto, sino que debía estar presente en toda la materia. No todos los materiales responden de la misma manera ante el campo magnético. Algunos, como el hierro, se alinean a las líneas del campo magnético y lo intensifican en su interior; otros, como el bismuto, lo hacen transversalmente a las líneas de campo magnético, expulsando las líneas de campo de su interior. Faraday denominó a los primeros *paramagnetos* y a los segundos *diamagnetos*.

A continuación y, sorprendentemente, pues si hubiera tenido resultados positivos habría descubierto el espín del electrón, realizó otro experimento con una llama colocada entre los polos de un imán, a la que inyectó sales de sodio y litio para estudiar su espectro; pero no pudo detectar alteraciones por el campo magnético, aunque años más tarde, en 1896, Zeeman sí observó el desdoblamiento de las líneas espectrales. El efecto Zeeman tuvo un papel muy importante en el estudio de la estructura y propiedades magnéticas de los átomos y en particular del espín y del momento magnético del electrón.

Finalmente su visión unificadora de la naturaleza lo llevó a declarar; en su Bakerian Lecture de 1850, titulada "On the Possible Relation of Gravity to Electricity", que

La larga y constante persuasión de que todas las fuerzas de la naturaleza son mutuamente dependientes, ya sea teniendo un origen común, o siendo más bien manifestaciones diferentes de un poder fundamental, a menudo me ha llevado a pensar en la posibilidad de establecer, mediante la experimentación, una conexión entre la gravedad y la electricidad, introduciendo así a la primera al grupo, de tal forma que la cadena de las mismas, incluyendo al magnetismo, las fuerzas químicas y al calor, ligue a tantas y tan variadas manifestaciones de la fuerza mediante relaciones comunes.

Su última conferencia ante la Royal Institution fue el 20 de junio de 1862, cuando tenía setenta años. Cuatro años antes, en 1858 se le proporcionó una de las Casas de Gracia y Favor, de la reina Victoria. Ahí murió nueve años más tarde, el 25 de agosto de 1867.

La extensión y profundidad del trabajo de Faraday puede resumirse en esta cita de L. P. Williams [9]:

Como Berzelius, Faraday fue un químico analítico de considerable habilidad; como Gay-Lussac y Dalton, fue aplaudido por la comunidad científica por su trabajo sobre gases; como Oersted y Ampère, creó una nueva época en el estudio del electromagnetismo; como Fresnel y Young, hizo contribuciones fundamentales a la teoría de la luz; como sir Humphry Davy, fue fundador de la electroquímica, sin embargo, a diferencia de estos hombres, trabajó casi simultáneamente en todos estos campos.

Sus cenizas se encuentran en una modesta tumba en el cementerio de Highgate.

El filósofo debe ser un hombre dispuesto a escuchar todas las sugerencias, pero determinado a juzgar por sí mismo. No debe dejarse influir por las apariencias; no debe de tener hipótesis favorita alguna; no pertenecer a escuela alguna; en doctrina, no poseer maestro alguno. No debe aceptar criterios de autoridad, sino de realidad. La verdad debe ser su objetivo primario. Si a estas cualidades se agrega la laboriosidad, puede en verdad aspirar a hablar dentro del templo de la naturaleza. MICHAEL FARADAY .

## REFERENCIAS

- [1] Ernesto E. Galloni. (Introducción y notas). *Los fundamentales. "Michael Faraday". Investigaciones experimentales de electricidad*. Series I-V. EUDEBA, 1971.
- [2] Ernesto E. Galloni. (Introducción, traducción y notas). *Los Fundamentales. "Alejandro Volta". La invención de la pila eléctrica*. EUDEBA, 1965.
- [3] L. P. Williams. "Michael Faraday". *Dictionary of Science Biography*. Vol. IV, pp. 527-540. American Council of Learned Societies, 1971, Compilador: C. C. Gillispie. En este trabajo se presenta una visión general de la vida científica de Faraday y se analiza la influencia del modelo de Boscovich en todas sus investigaciones. Aquí, como en la referencia 9, el átomo de Boscovich es de naturaleza fundamental, pues se dice que una combinación de estos átomos nos da los elementos químicos y una combinación de elementos nos da los compuestos químicos.
- [4] D. K. C. MacDonald. *Faraday, Maxwell y Kelvin*. EUDEBA, 1966.
- [5] H. I. Sharlin, "From Faraday to the Dynamo". *Scientific American*, mayo de 1961.
- [6] E. C. Watson. "Reproductions of Prints, Drawings and Paintings of Interest in the History of Physics". *American Journal of Physics*, 8, p. 387, 1940.
- [7] E. G. D. Cohen. "Toward Absolute Zero". *American Scientist*, 65, 1977.
- [8] K. Mendelssohn. *The Quest for Absolute Zero*. McGraw Hill, 1966.
- [9] L. P. Williams. "Faraday and the Structure of Matter". *Contemporary Physics*, 1960, 2.
- [10] L. P. Williams. "Faraday's Discovery of Electromagnetic Induction", *Contemporary Physics*, 1963-1964, 5.

Véanse las referencias ahí incluidas.

[11] R. García Torres. *Michael Faraday*. CONALEP, Limusa, 1988.

[12] W. S. Knickerbocher, (comp.) *Classics of modern science*. Beacon Press, Boston, [1927], 1962. Aquí aparece reimpresso el artículo de H. Davy "On Some New phenomena of Chemical Changes Produced by Electricity", tomado de *Transactions of the Royal Society of London*, leído el 19 de noviembre de 1807.

[13] David M. Knight. (Clasificación e introducción). *Classical Scientific Papers. Chemistry*. Second Series of *Papers on the Nature and Arrangements of the Chemical Elements*. American Elsevier, 1970.

[14] N. J. Nersessian. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Kluwer Academic Publishers, Londres, 1984.

[15] L. L. Whyte. "Boscovich and Particle Theory". *Nature*, 9 de febrero de 1957, pp. 284-285. Aquí se hace una clara y bella exposición de la teoría de Boscovich y se dan las referencias originales de interés y su traducción al inglés.

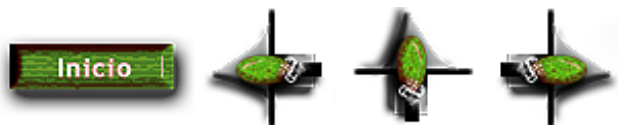
[16] Bram de Swaan. *El inventor del porvenir. James Clerk Maxwell*. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, 1990. Colección Viajeros del Conocimiento.

[17] Isaac Asimov *Breve historia de la química*. Alianza Editorial, núm. 580. *Momentos estelares de la ciencia*. Alianza Editorial. núm. 799. *On Chemistry*. Anchor Books, EUA 1975.

[18] J. Jeans. *Historia de la física*. México, FCE, (Colección Breviarios, núm. 84), 2a. edición en español, 1960.

[19] Gerald Holton. *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Reverté, 1979.

[20] Frank Greenway. *John Dalton and the Atom*. Cornell University Press, 1966.



1Los números entre corchetes remiten a las referencias colocadas al final del capítulo.

---



## II. LÍNEAS FÍSICAS DE FUERZA: UNO DE LOS BEBES DE FARADAY, AHIJADO DE MAXWELL\*

E. LEY-KOO

### RESUMEN

Se revisa en este capítulo la evolución de las ideas sobre las líneas de fuerza desarrolladas por Faraday a lo largo de sus investigaciones en torno a fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos, desde su concepción inicial de esas líneas como representativas de las direcciones, sentidos y magnitudes de las fuerzas respectivas, hasta su convencimiento de que las mismas tenían una existencia física. Se ilustra la oposición que esas ideas de Faraday encontraron entre muchos de sus contemporáneos, en contraste con la incorporación de las mismas, en el desarrollo de la teoría dinámica del campo electromagnético por Maxwell.

### INTRODUCCIÓN

PARTE del título de este trabajo "Uno de los bebés de Faraday", con el cual se anunció la presente contribución al Simposio Michael Faraday por los doscientos años de su nacimiento, se escogió a sabiendas de que él no tuvo hijos pero sí muchas investigaciones e ideas fructíferas. El título está asociado a una anécdota sobre el anuncio público de Faraday de su descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética, en una de las conferencias que dictaba los viernes por la noche en la Royal Institution. Cuando Faraday dio a conocer que en una espiral de alambre que se mueve en la vecindad de un imán se induce una corriente eléctrica, alguien del público le preguntó: "¿Para qué sirve eso?", y él respondió: "¿Para qué sirve un bebé recién nacido?" y El lector interesado puede leer en el libro *The Feynman Lectures on Physics* el prodigioso desarrollo de la tecnología eléctrica a partir de ese bebé, incluyendo su impacto en múltiples actividades humanas.

El bebé que finalmente se escogió para la presentación en el simposio, así como esta versión para el presente libro, lleva el nombre de "Líneas físicas de fuerza" y fue apadrinado por Maxwell, como se indica en el resto del título. En este capítulo se revisa la evolución de las ideas de Faraday en torno a las líneas de fuerza a lo largo de sus investigaciones sobre diversos fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos. Se destaca cómo los descubrimientos sucesivos de Faraday en el estudio de esos fenómenos lo llevaron de su concepción inicial de las líneas de fuerza como representativas de la dirección, sentido e intensidad de las fuerzas mismas en cada punto del espacio, a su convencimiento de que esas líneas tenían una existencia física. También se ilustra la oposición que las líneas de fuerzas propuestas por Faraday encontraron entre muchos de sus contemporáneos.

El trabajo experimental y los descubrimientos de Faraday tuvieron amplio reconocimiento durante su vida, pero sus concepciones teóricas, incluyendo la de las líneas de fuerza, no fueron aceptadas en ese periodo. Parte de ese rechazo se puede entender al tomar en cuenta que en la primera mitad del siglo XIX prevalecía la idea de acción a distancia y que la física teórica ya había adoptado plenamente el lenguaje matemático para su formulación y desarrollo. En contraste, aunque las concepciones de Faraday tenían una base experimental directa y su intuición física estaba muy desarrollada, sus ideas sobre las líneas de fuerza se contraponían a la idea de acción a distancia, y además al no hablar el lenguaje matemático, él no pudo presentar sus ideas en ese lenguaje para ser entendido. Afortunadamente para el estudio de los fenómenos electromagnéticos, Maxwell sí aceptó a ese bebé de Faraday haciéndolo su ahijado, vistiéndolo con las ropas del lenguaje matemático y además, contribuyó a su desarrollo a través de la formulación de la teoría dinámica del campo electromagnético.

Así, en la sección titulada "De limaduras de hierro a líneas físicas de fuerza", se describen algunas de las investigaciones experimentales realizadas por Faraday y sus interpretaciones de los fenómenos observados, que lo condujeron a reconocer que las líneas físicas de fuerza constituyen el concepto apropiado para describir los fenómenos electromagnéticos.

Los trabajos originales de Faraday pueden ser estudiados en su obra *Experimental Researches in Electricity* (1831-1855), y en su *Diario de laboratorio* (1820-1862) que donó a la Royal Institution. En la sección titulada "Teoría dinámica del campo electromagnético", se ilustra la forma en que Maxwell efectivamente apadrinó, promovió y desarrolló las ideas de Faraday sobre las líneas físicas de fuerza, culminando con su síntesis de la descripción

unificada de los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos.

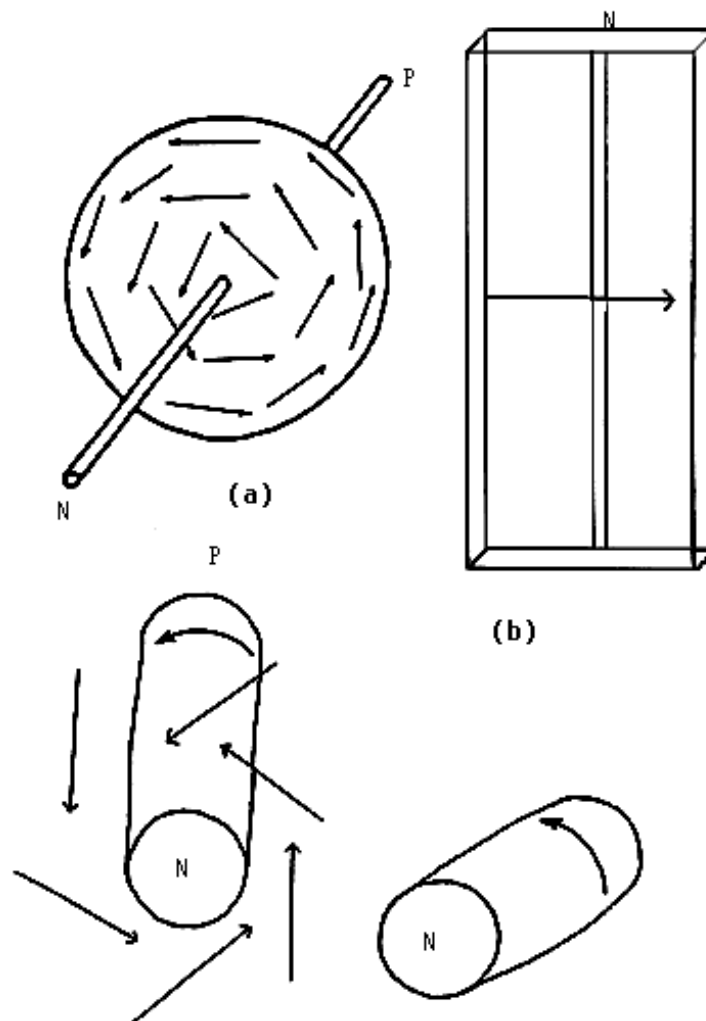
La sección titulada "Algunas flores de aquellos polvos" se dedica a ilustrar la fertilidad de otros trabajos e ideas de Faraday, los cuales tuvieron que esperar diferentes periodos de invernación para ser reconocidos, apreciados y desarrollados por científicos de épocas más recientes. Algunos de esos otros bebés de Faraday se incluyeron en el simposio y sus biografías aparecen en este volumen.

## **DE LIMADURAS DE HIERRO A LÍNEAS FÍSICAS DE FUERZA**

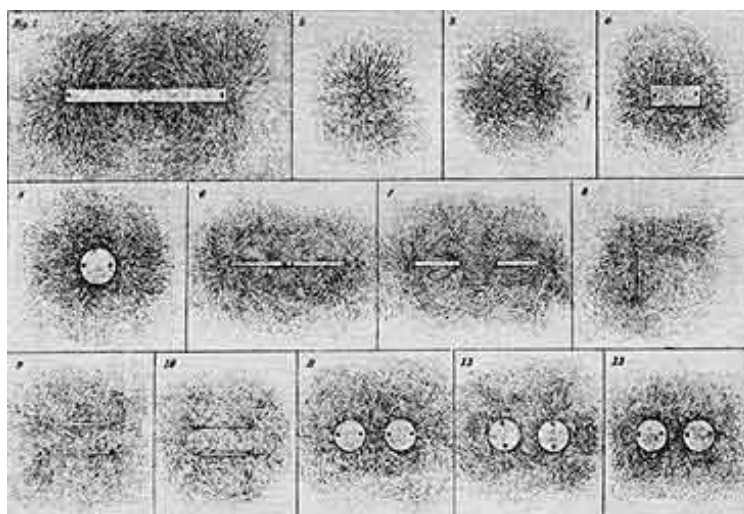
Del trabajo de Faraday destacan su habilidad e ingenio experimental, que lo condujeron a descubrir fenómenos importantes, así como su perseverancia en el estudio de esos fenómenos, que le permitió concebir los conceptos clave para describirlos y entenderlos. En esta sección se revisan algunas de sus investigaciones experimentales acerca de fenómenos de inducción electromagnética, inducción electrostática, efectos magnéticos sobre la luz, paramagnetismo y diamagnetismo; en este proceso de revisión se ilustra la evolución de las ideas de Faraday sobre las líneas de fuerza.

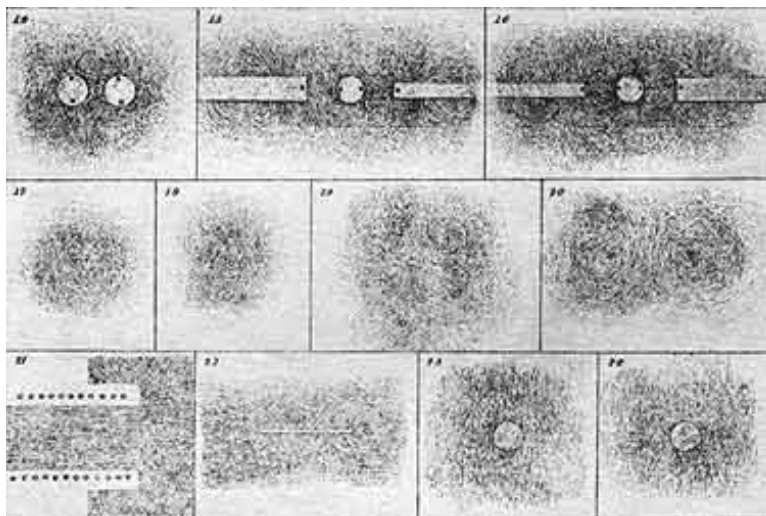
Como antecedentes de esas investigaciones que él realizó de 1831 a 1855, se deben mencionar el descubrimiento del electromagnetismo por Oersted en 1820, y el estudio sistemático, tanto experimental como teórico, de los efectos magnéticos debidos a corrientes eléctricas por Ampère, Biot y Savart en los años subsecuentes. La importancia de este descubrimiento se debe a que permitió reconocer que existe una conexión entre los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos, los cuales hasta ese momento habían sido observados y estudiados por separado. En la década de 1820-1830, los investigadores de esos fenómenos, incluido Faraday, especularon y experimentaron sobre el fenómeno inverso al electromagnetismo, es decir, la generación de efectos eléctricos a partir de un sistema magnético. Ninguno tuvo éxito en esos años, pero Faraday sí lo logró al iniciarse la siguiente década.

El antecedente de las líneas de fuerza para visualizar los efectos de orientación asociados a un imán se remonta hasta varios siglos antes de la época de Faraday. Peregrinus las estudió en el siglo XIII usando agujas magnetizadas y Gilbert las producía en el siglo XVII usando limaduras de hierro; ambos usaban imanes de forma esférica a los que llamaban "terrellas". La figura II.1, tomada del Diario de Faraday (1821-1822), ilustra el uso de la orientación de agujas magnetizadas en la vecindad de la corriente eléctrica en un conductor recto conectado a las terminales P (positiva) y N (negativa) de una pila voltaica, para visualizar los efectos magnéticos recién descubiertos por Oersted. La figura II.2, tomada de las *Investigaciones experimentales en electricidad* (en adelante IEE, 1852) y que forma parte del trabajo titulado "Delineación de líneas magnéticas de fuerza mediante limaduras de hierro", muestra la inclinación de Faraday a lo largo de su vida de investigador por ese medio para explorar y poner de manifiesto los efectos de sistemas magnéticos, incluyendo imanes (1-16), corrientes eléctricas (17-22) y materiales (23-24). A continuación se hace un recorrido por algunos de sus trabajos, los cuales contribuyeron a convencerlo de que las líneas de fuerza magnéticas y eléctricas tenían existencia propia.



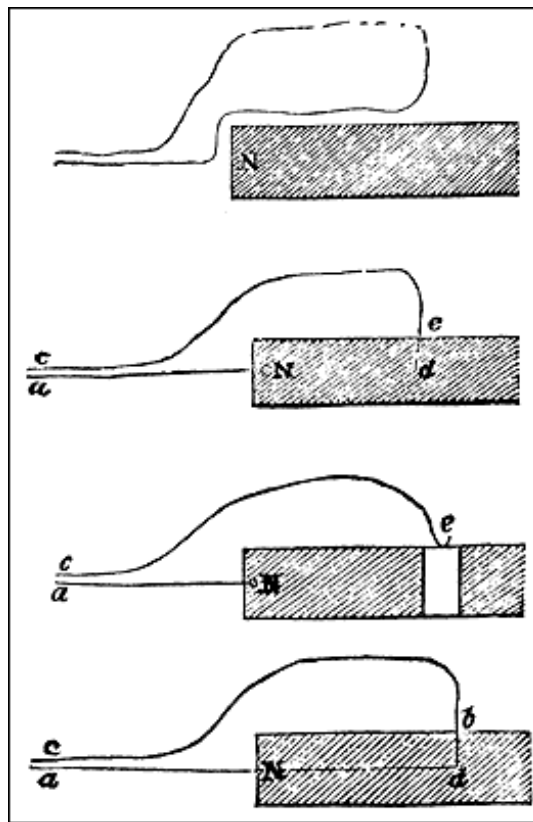
**Figura II.1. Dispositivos para ilustrar la orientación de agujas magnetizadas en la vecindad de una corriente eléctrica: a) Disco de Davy, b) Caja de vidrio de Faraday, c) Taquete de madera de Faraday y d) Tapón de corcho de Faraday.**





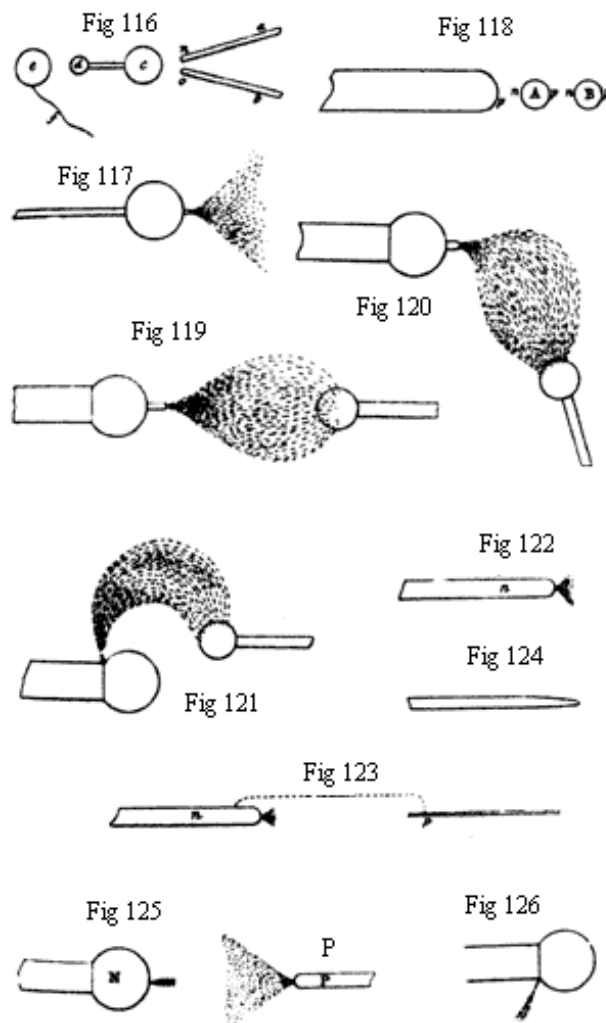
**Figura II.2. Delineación de líneas magnéticas de fuerza mediante limaduras de hierro.**

El fenómeno de inducción electromagnética fue descubierto y estudiado sistemáticamente por Faraday en los primeros años de la década de 1830-1840. En las dos décadas siguientes él contribuyó a la investigación de muy diversos fenómenos de electricidad, magnetismo y óptica. Después, a principios de la década de 1850-1860, sus investigaciones se concentraron en la aplicación de la inducción electromagnética para explorar y medir las fuerzas magnéticas. Efectivamente, de las veintinueve series de sus IEE, las dos primeras, la novena y las dos últimas están dedicadas a diferentes aspectos de ese fenómeno. A continuación se mencionan algunos de los títulos de las secciones de esas series que ilustran puntos clave del fenómeno y hacen referencia a las líneas de fuerza magnética. En la Serie I, de noviembre de 1831, las secciones 1. "Inducción de corrientes eléctricas" y 2. "Evolución de electricidad a partir de magnetismo" contienen la descripción de los experimentos en los que Faraday detectó por primera vez las corrientes eléctricas en circuitos conductores, inducidas tanto por otros circuitos con corriente como por imanes permanentes. En la Serie II, de diciembre de 1831, la sección 6 se titula "Comentarios generales e ilustraciones de la fuerza y dirección de la inducción magnetoeléctrica en general". La Serie IX, de enero de 1835, corresponde a la sección 15 y consta de los experimentos "Sobre la influencia por inducción de una corriente eléctrica sobre sí misma, y sobre la acción inductiva de corrientes eléctricas en general". La Serie XXVIII, de finales de 1851, corresponde a la sección 34 titulada "Sobre líneas de fuerza magnética; su carácter definitivo; y su distribución dentro de un imán y a través del espacio". La figura II.3, tomada de esa Serie ilustra los experimentos correspondientes. La Serie XXIX, de 1852, consta de tres secciones que son la secuela de esos experimentos: sección 35. "Sobre el uso de la corriente magneto- eléctrica inducida como una prueba y medida de fuerzas magnéticas"; sección 36. "Sobre la cantidad y disposición general de las fuerzas de un imán cuando se asocia con otros imanes" y sección 37. "Delineación de líneas de fuerza magnética mediante limaduras de hierro".



**Figura II.3. Exploración de las líneas de fuerza magnética dentro y fuera de un imán por el método de la corriente inducida en un alambre.**

Entre 1837 y 1838 Faraday emprendió sus investigaciones de electrostática, sobre las que escribió las Series XI, XII y XIII a lo largo de las cuales desarrolló la sección 18, titulada "Sobre la inducción estática". Algunos resultados de estas investigaciones que Faraday utilizó para formar sus ideas sobre líneas de fuerza eléctrica, aparecen en las subsecciones 1: "Inducción una acción de partículas contiguas", 4: "Inducción en líneas curvas", 5: "Capacidad inductiva específica", 6: Resultados generales sobre la naturaleza de la inducción" y 9: "Descarga disruptiva bajo la forma de cepillo". La figura II.4 tomada de la última subsección, ilustra la visualización de las líneas de inducción a través de las líneas luminosas de descarga del cepillo eléctrico, en diferentes sistemas y en diferentes posiciones relativas.



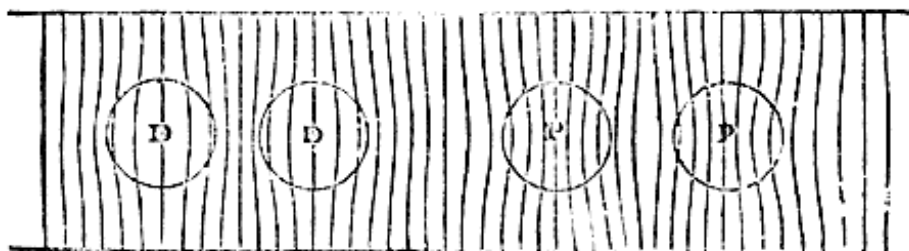
**Figura II.4. Visualización de líneas de inducción electrostática a través de las líneas de descarga de conductores en forma de cepillo cargados.**

Faraday descubrió en 1845 el efecto que lleva su nombre y que es el tema de la investigación de la Serie XIX, sección 26: "Sobre la magnetización de la luz y la iluminación de las líneas magnéticas de fuerza" y que incluye las subsecciones 1: "Acción de imanes sobre la luz", 2: "Acción de corrientes eléctricas sobre la luz", y 3: "Consideraciones generales". En una nota de aclaración sobre el significado del título, Faraday escribió:

Mi intención era expresar que la línea de fuerza magnética es iluminada como la Tierra es iluminada por el Sol, o como la telaraña es iluminada por la lámpara de astrónomo. Usando un rayo de luz, podemos señalar, a ojo, la dirección de las líneas magnéticas a través de un cuerpo; y por la alteración del rayo y su efecto óptico sobre el ojo, se puede ver el curso de las líneas de la misma forma en que se puede ver el curso de un hilo de vidrio, o de cualquier otra sustancia transparente, que se hace visible mediante la luz: y esto es lo que quise decir con iluminación, como se explica en detalle en el artículo.

De 1845 a 1851 Faraday estudió los efectos mutuos entre sistemas magnéticos y diferentes materiales. Esto queda ilustrado con las investigaciones reportadas en las Series y secciones subsecuentes: Series XX y XXI, sección 27: "Sobre nuevas acciones magnéticas, y sobre la condición magnética de toda la materia"; Serie XXII, sección 28: "Sobre la polaridad cristalina del bismuto (y otros cuerpos) y sobre su relación con la forma magnética de fuerza"; Serie XXIII, sección 29: "Sobre la condición polar o de otro tipo de cuerpos diamagnéticos"; Serie XXV, sección 31: "Sobre la condición magnética y diamagnética de los cuerpos"; Serie XXVI, sección 32: "Poder de conducción magnética"; y Series XXVI y XXVII, sección 33: "Magnetismo atmosférico". La figura II.5 tomada de la sección 32, resume el comportamiento de materiales diamagnéticos (D) y paramagnéticos (P) en una región del espacio en la que originalmente existía un campo magnético uniforme. Los materiales diamagnéticos presentan una conducción magnética pobre, es decir; reducen la transmisión de la fuerza magnética; su comportamiento es análogo al de los materiales dieléctricos en la situación electrostática. Los materiales paramagnéticos presentan una mayor conducción magnética e intensifican la transmisión de la fuerza magnética. En consecuencia, los cuerpos

diamagnéticos tienden a moverse de regiones de fuerza magnética intensa a regiones de fuerza magnética menos intensa, y los cuerpos paramagnéticos presentan la tendencia opuesta. En esta figura, las dos esferas D se repelen entre sí, pues la fuerza magnética en la región entre ambas es mayor que en las posiciones de las mismas; análogamente, las dos esferas P también se repelen entre sí, pues ahora la fuerza magnética en la región entre ambas es menos intensa que en las posiciones de las mismas. En cambio, las esferas D y P más próximas entre sí se atraen, pues D tiende a ir a la región de fuerza magnética más débil en la vecindad de P y a su vez P tiende a ir a la región de fuerza magnética más intensa en la vecindad de D. Es pertinente señalar que el concepto de conducción magnética introducido por Faraday corresponde a lo que en terminología moderna se llama *permeabilidad magnética*.



**Figura II.5. Ilustración de la conducción magnética relativa de esferas diafrámicas y paramagnéticas y de las fuerzas entre ellas.**

El método de trabajo que se puede reconocer en las investigaciones de Faraday combina la experimentación para examinar la validez de sus ideas y el desarrollo de ideas con base directa en los experimentos. La evolución de sus ideas sobre líneas de fuerza está entrelazada de esta manera con sus investigaciones experimentales de los fenómenos mencionados en los párrafos anteriores. La terminología misma refleja esa evolución: en la Serie II, sección 6 describe las "curvas magnéticas" y su relación con la inducción magneto- eléctrica dinámica y, veinte años más tarde, con la experiencia y confianza adquiridas a lo largo de sus investigaciones sobre fenómenos eléctricos en medios materiales, fenómenos ópticos en medios materiales, sometidos a campos magnéticos, y fenómenos magnéticos en medios materiales, regresa a aquel tema y escribe la Serie XXVIII, sección 34: "Sobre las líneas de fuerza magnética, su carácter definitivo y su distribución dentro de un imán y a través del espacio". En este último escrito las líneas de fuerza magnética se reconocen no solamente a través de los efectos de orientación de agujas magnetizadas o de limaduras de hierro sino también mediante los efectos de inducción magneto- eléctrica y magneto- óptica: una línea de fuerza magnética es aquella línea a lo largo de la cual, si se mueve un alambre transversal en cualquiera de sus dos sentidos, no hay tendencia a la formación de corriente alguna en el alambre, mientras que si se mueve en cualquier otra dirección sí se presenta esa tendencia; o es aquella línea que coincide con la dirección del eje magnecristalino de un cristal de bismuto que se mueve en un sentido y otro a lo largo de la misma. El método de la corriente inducida en un alambre en movimiento permite establecer que las líneas de fuerza magnética existen tanto en el interior como en el exterior de un imán, que son curvas cerradas que pasan en una parte de su curso a través del imán y que la cantidad de ellas dentro del imán en su ecuador es exactamente igual en fuerza a la cantidad en cualquier sección de la totalidad de las del exterior. Las líneas de fuerza fuera de un imán se pueden afectar en su dirección mediante el uso de diferentes medios materiales. Esta variedad de efectos físicos que ponen en evidencia las características de las líneas de fuerza magnética contribuyeron a que Faraday diera un paso decisivo en sus concepciones. A continuación se describen algunos de los trabajos adicionales a través de los cuales Faraday presentó sus ideas más definitivas sobre las líneas de fuerza.

Los trabajos incluidos en las IEE comprenden los artículos sobre las investigaciones experimentales, publicados originalmente en *Philosophical Transactions*, y otros artículos o comunicaciones, publicados en otras revistas o dados a conocer por otros medios, en los que Faraday presentaba sus nuevos puntos de vista o especulaciones sobre los fenómenos investigados. Los siguientes artículos de 1852 pertenecen al segundo grupo: "Sobre las líneas de fuerza magnética", publicado en *Royal Institution Proceedings*; "Sobre el carácter físico de las líneas de fuerza magnética", en *Philosophical Magazine*, y "Sobre las líneas físicas de fuerza magnética", en *Royal Institution Proceedings*. Una nota de aclaración en el segundo de estos artículos ilustra la cautela de Faraday en la presentación de sus nuevos puntos de vista y también la raíz experimental de la que brotaron esos puntos:

El siguiente artículo contiene tanto de naturaleza especulativa e hipotética, que he pensado que es más

apropiado para las páginas del *Philosophical Magazine* que para las del *Philosophical Transactions*. ...El artículo, como es evidente, es la secuela de las Series XXVIII y XXIX, que están en prensa en *Philosophical Transactions* y depende mucho, en cuanto a su base experimental, de los resultados más estrictos y conclusiones contenidos en ellos.

Entre el primer artículo y los dos siguientes se aprecia el cambio de posición de Faraday en la presentación de sus concepciones, como se ilustra en el párrafo introductorio del tercer artículo:

En una ocasión anterior (refiriéndose al primer artículo) se describieron y definieron ciertas líneas en la vecindad de un imán de barra (que son las que se hacen visibles al usar limaduras de hierro espolvoreadas en la vecindad del imán) y se recomendaron para expresar con precisión la naturaleza, condición, dirección y cantidad de la fuerza en cualquier región dada, ya sea en el interior o en el exterior de la barra. En ese momento las líneas se consideraron en abstracto. Sin abandonar o cambiar nada de lo que se dijo entonces, ahora se entra en la investigación de la existencia física posible y probable de tales líneas. Quienes deseen reconsiderar los diferentes puntos que corresponden a estas partes de la ciencia magnética se pueden referir a las Series XXVIII y XXIX en cuanto a los datos sobre las líneas *representativas* de fuerza y a un artículo (el segundo) en *Phil. Mag.* en cuanto a los argumentos relativos a las líneas *físicas* de fuerza.

En los dos últimos artículos Faraday no se limita al estudio de las fuerzas magnéticas, sino que considera sucesivamente las fuerzas de gravitación, la propagación de la luz, las fuerzas de electricidad estática y de electricidad dinámicas, para compararlas entre sí y tomarlas como puntos de comparación en el estudio de las primeras. En ese proceso cuestiona las ideas de acción a distancia y de acciones instantáneas; también señala el importante papel que desempeña la presencia de diferentes medios en la ocurrencia de los fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos y plantea la interrogante sobre cómo ocurren en un vacío perfecto. En el artículo en *Philosophical Magazine*, Faraday escribió:

Mi objetivo es considerar qué tanto el magnetismo es una acción a distancia (como se piensa que es la gravedad); o qué tanto posee la naturaleza de otros fenómenos (como la luz y la electricidad), cuyas líneas dependen, para la comunicación de fuerza, de agentes físicos intermedios.

La revisión somera de algunos trabajos de Faraday realizada en esta sección trata de reflejar la sólida base experimental de sus concepciones teóricas sobre las líneas de fuerza. Su propio comentario sobre el papel que estas líneas jugaban en sus trabajos es el siguiente:

He estado tan acostumbrado a usarlas y especialmente en mis últimas investigaciones que, sin querer, puedo haberme prejudicado en su favor y dejado de ser un juez con una visión clara. En todo caso, siempre he tratado de que el experimento sea la prueba y el controlador de la teoría y la opinión; pero ni eso ni el examen minucioso en principio, me han señalado que haya algún error en su uso.

Así, Faraday estaba convencido de la validez de las líneas de fuerza en la descripción y entendimiento de los fenómenos electromagnéticos.

## TEORÍA DINÁMICA DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Una muestra de la reacción de muchos contemporáneos de Faraday, en relación con sus ideas sobre líneas de fuerza, es el siguiente párrafo de una carta de George Airy, quien era astrónomo real, a Peter Barlow, en 1855:

El efecto de un imán sobre otro imán se puede representar perfectamente suponiendo que ciertas partes actúan como si jalaran por medio de una cuerda, y que otras partes actúan como si empujaran con una vara. Y la representación no es vaga, sino una cuestión de estricto cálculo numérico; y cuando este cálculo se realiza con base en la simple ley del inverso del cuadrado de la distancia, el resultado representa (numéricamente) los fenómenos con precisión. Yo puedo responder por esto, porque perpetuamente estamos haciendo este cálculo. Yo sé sobre las dificultades de predecir los efectos de la evidencia en las mentes de otras gentes, pero yo declaro que difícilmente puedo imaginar que alguien que conoce este acuerdo práctica y numéricamente dude un instante en la selección entre esta acción simple y precisa, por una parte y algo tan vago y variante, como

las líneas de fuerza, por la otra.

En contraste, William Thomson y James Clerk Maxwell fueron los únicos que sí tomaron en consideración la alternativa planteada por Faraday. Thomson, quien más tarde sería lord Kelvin, desde 1845 publicó el artículo titulado "Sobre la teoría matemática de la electricidad en equilibrio" en el *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, cuya base experimental fue el trabajo "Sobre Inducción Estática" de Faraday incluidas las "líneas curvas de acción inductiva". Conviene hacer notar que en esa época Faraday solamente había adoptado las líneas de fuerza en su aspecto representativo; la matematización de sus ideas por Thomson reforzó su creencia en la veracidad y generalidad del método de representación. Diez años más tarde, cuando Faraday ya había dado a conocer sus ideas sobre las líneas físicas de fuerza y los comentarios sobre las mismas eran análogos a los de Alry, el joven matemático Maxwell, a la edad de 24 años, inició sus contribuciones al estudio de la electricidad y el magnetismo a partir de los trabajos experimentales y las concepciones teóricas de Faraday.

Antes de describir los trabajos de Maxwell, es interesante reconocer las limitaciones de Faraday, en cuanto a sus conocimientos de matemáticas, y las razones de esas limitaciones. Por una parte, él no tuvo una educación formal en general y menos aún, específicamente en matemáticas. También se dice que había un componente religioso. Efectivamente, Faraday pertenecía a la iglesia sandemaniana, cuyos seguidores creen estrictamente en la Biblia. El uso de los números para referirse a los capítulos y versículos del libro sagrado es correspondientemente muy estricto, y por extensión los números no deben manipularse. Desde el punto de vista de Maxwell esas limitaciones de Faraday resultaron positivas para sus trabajos experimentales y concepciones teóricas. En el *Tratado de electricidad y magnetismo*, Maxwell escribió:

Tal vez fue de beneficio para la ciencia que Faraday no fuera un matemático declarado, aunque sí fue un perfecto conocedor de las formas fundamentales de espacio, tiempo y fuerza. El no tuvo la tentación de involucrarse en las muchas investigaciones interesantes en matemáticas puras que sus descubrimientos le habrían sugerido si se hubieran exhibido en una forma matemática, y tampoco se sintió obligado a forzar sus resultados en una forma aceptable al gusto matemático de la época, o de expresarlos en una forma que los matemáticos pudieran atacar. De ese modo, él quedó en libertad de hacer su propio trabajo, de coordinar sus ideas con sus hechos y de expresarlos en lenguaje natural y no técnico. Es principalmente con la esperanza de hacer de estas ideas la base de un método matemático que he emprendido este tratado.

Los trabajos a través de los cuales Maxwell anunció su apadrinamiento del bebé de Faraday fueron sucesivamente: "Sobre las líneas de fuerza de Faraday", en *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* (1855, 1856); "Líneas físicas de fuerza", en *Philosophical Magazine* (1861, 1862); "una teoría dinámica del campo electromagnético", en *Royal Society Transactions* (1864), y el *Tratado de electricidad y magnetismo* (1873).

En el primer trabajo usa analogías de fluidos para modelar el comportamiento de las líneas de fuerza, y las aplica para describir las propiedades de los dieléctricos, los imanes permanentes, la inducción paramagnética y la diamagnética, la inducción magnecristalica, la conducción de corriente eléctrica, las fuerzas electromotrices, la acción de corrientes cerradas a distancia y las corrientes eléctricas inducidas. En el segundo trabajo usa analogías de vórtices moleculares para reproducir los efectos mecánicos de fenómenos magnéticos, de corrientes eléctricas, de electricidad estática y de la acción del magnetismo sobre la luz polarizada. En el primero, Maxwell escribió:

Es a través del uso de analogías de este tipo que he tratado de formular, de una manera conveniente y manejable, esas ideas matemáticas que son necesarias para el estudio de los fenómenos de electricidad. Los métodos son en general los sugeridos por los procesos de razonamiento que se encuentran en las investigaciones de Faraday... Por el método que he adoptado, espero hacer evidente que no estoy tratando de establecer una teoría física de una ciencia en la que no he realizado experimento alguno y que el límite de mi empresa es mostrar cómo, mediante una aplicación estricta de las ideas y los métodos de Faraday, la conexión entre los muy diferentes tipos de fenómenos que él ha descubierto puedan colocarse de manera clara 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 se puedan hacer a partir de ellos.

Mientras en este primer trabajo, Maxwell solamente le puso las ropas matemáticas al bebé de Faraday, en los siguientes ya contribuyó a su desarrollo físico. En el segundo aparece ya la corriente de desplazamiento. En el tercero, las líneas de fuerza se han convertido en el campo electromagnético y Maxwell formuló una teoría

dinámica del mismo. Maxwell reconoce que la teoría electromagnética de la luz que él empezó a desarrollar en este trabajo, y la propuesta por Faraday en el trabajo *Pensamientos sobre vibraciones de rayos* en 1846, coinciden en contenido físico, excepto que en la época de Faraday no había datos para calcular la velocidad de la luz. En la introducción al *Tratado*, Maxwell, describe las diferencias entre los puntos de vista de Faraday y de los matemáticos (Gauss, Weber, Riemann, J. y C. Neumann, Lorenz, etc.):

Por ejemplo, Faraday en su mente vio líneas de fuerza que cruzaban todo el espacio donde los matemáticos vieron centros de fuerza atrayendo a distancia; Faraday vio un medio donde ellos no vieron sino distancia; Faraday buscó el lugar de los fenómenos en las acciones reales que ocurrían en el medio; ellos se dieron por satisfechos de que lo habían encontrado en un poder de acción a distancia que actuaba sobre los fluidos eléctricos... Por lo tanto he tomado el papel de abogado más que el de juez, y he ejemplificado un método en vez de tratar de dar una descripción imparcial de ambos. No dudo que el otro método tenga sus militantes, y será hábilmente defendido...

Si por algo de lo que he escrito aquí puedo ayudar al estudiante a entender los modos de pensamiento y de expresión de Faraday, lo consideraré como el logro de uno de mis principales objetivos: comunicar a otros el mismo deleite que yo mismo he encontrado al leer las *Investigaciones* de Faraday.

Para concluir esta sección se presenta una cita adicional de Maxwell, asociada a su última conferencia pública en Cambridge, en 1878:

En una universidad estamos especialmente obligados a reconocer no solamente la unidad de la Ciencia misma, sino la comunión de los trabajadores de la ciencia. Somos demasiado aptos para suponer que estamos congregados aquí meramente para estar dentro del alcance de ciertas facilidades de estudio, tales como museos y laboratorios, bibliotecas y conferencias, de modo que cada uno de nosotros puede estudiar lo que prefiera. Supongo que cuando las abejas se amontonan alrededor de las flores es que lo hacen por la miel, sin pensar que es el polvo que ellas llevan de flor en flor lo que hace posible una variedad más espléndida de flores y un enjambre más activo de abejas en los años futuros.

## **ALGUNAS FLORES DE AQUELLOS POLVOS**

Como una muestra de la fertilidad de algunas de las investigaciones e ideas de Faraday, en esta sección se señalan algunos de los descubrimientos de la física de este siglo que constituyen flores de aquellos polvos. Concretamente, se hace referencia a sus resultados experimentales sobre la electrólisis y sus ideas sobre lo que él llamó el estado electrotónico.

La existencia de una unidad natural y cuantizada de carga eléctrica se asocia a los trabajos de J. J. Thomson, quien descubrió el electrón en 1897, y de Millikan, quien midió la carga eléctrica del electrón en 1909. Es bien sabido que las leyes de la electrólisis de Faraday y la hipótesis de Avogadro implican la existencia de tal unidad, incluyendo su valor numérico como la razón del Faraday al número de Avogadro. Faraday había reconocido desde 1834 que en la electrólisis cada átomo o ion tiene asociada una cantidad definida de electricidad:

Los pesos equivalentes de los cuerpos son simplemente las cantidades de los mismos que contienen cantidades de electricidad iguales; . . . siendo la electricidad la que determina la fuerza de combinación. O, si adoptamos la teoría o fraseología atómica, entonces los átomos de los cuerpos que son equivalentes entre sí en su acción química ordinaria, tienen cantidades de electricidad iguales naturalmente asociadas a ellos.

En analogía con lo afirmado por Maxwell sobre la posibilidad de que Faraday hubiera podido calcular la velocidad de la luz, aquí se puede decir respecto de la unidad natural de carga que Faraday no disponía del dato del valor numérico del número de Avogadro. En términos prácticos, en un momento dado, la determinación de la carga del electrón a partir del Faraday y el número de Avogadro permitió reconocer que la determinación correspondiente por el método de la gota de aceite tenía un error sistemático.

Michael Faraday introdujo la idea del estado electrotónico desde la Serie 1 de sus IEE, en la Serie 3 que tituló "Nuevo estado o condición eléctrica de la materia". Todos los cuerpos adquieren tal estado en presencia de imanes o de corrientes eléctricas. El estado mismo no se manifiesta a través de algún fenómeno conocido mientras no se modifique, pero cualquier cambio en este estado se manifiesta como una corriente o como una tendencia a producir

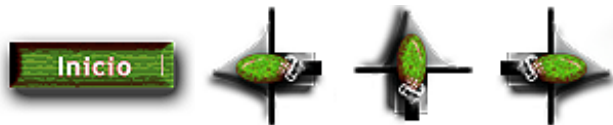
una corriente. Faraday en la Serie II, sección 6 consideró que la idea del estado electrotónico era innecesaria, una vez que encontró que las "curvas magnéticas" le permitían entender la inducción magnetoelectrónica. Sin embargo, volvió a invocarlo en la Serie IX en conexión con el fenómeno de autoinducción, en la Serie XIII sobre la corriente eléctrica y sus fuerzas transversales en la Serie XIV sobre la relación de las fuerzas eléctricas y magnéticas y en la Serie XXVIII. En esta última escribió: "La idea de un estado electrotónico ha sido forzada en mi mente una y otra vez."

En su trabajo "Sobre las líneas de fuerza de Faraday", Maxwell tradujo la idea física y cualitativa de Faraday a lo que llamó funciones electrotónicas o componentes de la intensidad electrotónica. En el *Tratado de electricidad y magnetismo*, Maxwell señala:

A través de una serie de experimentos, guiado por una aplicación intensa de pensamiento, pero sin la ayuda de cálculos matemáticos, Faraday llegó a reconocer la existencia de algo que ahora conocemos como una cantidad matemática, y que inclusive puede llamarse la cantidad fundamental en la teoría del electromagnetismo. Pero como él llegó a esta concepción por una trayectoria puramente experimental, le adscribió una existencia física, y supuso que era una condición peculiar de la materia, aunque estuvo dispuesto a abandonar esta teoría cuando pudo explicar los fenómenos a través de formas más familiares de pensamiento... "El valor científico de la concepción de Faraday de un estado electrotónico consiste en haber dirigido la atención a una cierta cantidad, de cuyos cambios dependen los fenómenos reales.

En el tratado, Maxwell usa para esta cantidad los nombres de potencial vectorial de inducción magnética, *momentum* electrocinético y *momentum* electromagnético, según la situación en estudio. Desde luego, corresponde al potencial vectorial en la terminología moderna del electromagnetismo. Su significado de *momentum* potencial por unidad de carga implícito en los dos últimos términos empleados por Maxwell, no parece ser muy conocido en los textos modernos.

La diseminación del estado electrotónico de Faraday se reconoce en tres especímenes de reciente floración: 1) La no unicidad en la definición del potencial vectorial se traduce en la libertad de las llamadas transformaciones de norma; a su vez, el principio de invariancia de norma se ha reconocido como el principio idóneo para describir unificadamente las interacciones fundamentales. 2) La acción, integral de línea del momentum, está cuantizada y ya sabemos que la carga eléctrica también está cuantizada la integral de línea del potencial vectorial que es igual al flujo magnético o número de líneas de inducción magnética, está cuantizada y su unidad natural es la razón de la unidad de acción (constante de Planck) entre la carga del electrón. 3) De la Ley de Faraday de inducción magnetoelectrónica, la ley de Ohm y la cuantización de carga y de flujo magnético, se sigue que la resistencia eléctrica está cuantizada y que su unidad natural es la constante de Planck dividida entre el cuadrado de la carga del electrón. Algunas flores del punto 1 se analizan en detalle en el capítulo sobre teorías de norma del doctor Matías Moreno, en tanto que los puntos 2 y 3 tienen una conexión directa con el capítulo del doctor Leopoldo García-Colín sobre diamagnetismo y efecto Hall cuantizado.



### III. MICHAEL FARADAY Y LA LICUEFACCIÓN DE LOS GASES

S.M. T. DE LA SELVA  
y E. PIÑA

A FINALES del siglo XVIII y principios del XIX la investigación más importante en el campo de la fisicoquímica giraba en torno a las siguientes cuestiones:

1) ¿Será verdad, como supusieron Turgot y Lavoisier, que toda sustancia pura, al igual que el agua, puede existir en forma sólida, líquida o gaseosa, dependiendo de la cantidad de calor que se le añada o sustraiga? [1]

Aún se mantenía la idea de que una sustancia elemental estaría definida no sólo por sus propiedades químicas, sino también por sus propiedades físicas. Así, el elemento oxígeno, ¿era necesariamente gaseoso?; ¿existen los gases permanentes?

2) Ante el hecho sorprendente de que todos los gases conocidos se reducen en un 0.0037 ( $=1/273$ ) de su volumen a cero grados centígrados por cada grado que baje su temperatura, era inevitable preguntarse qué ocurriría con la sustancia a  $-273^{\circ}\text{C}$ ; si es que se pudiera alcanzar una temperatura tan baja (véase la figura III.1) [2].

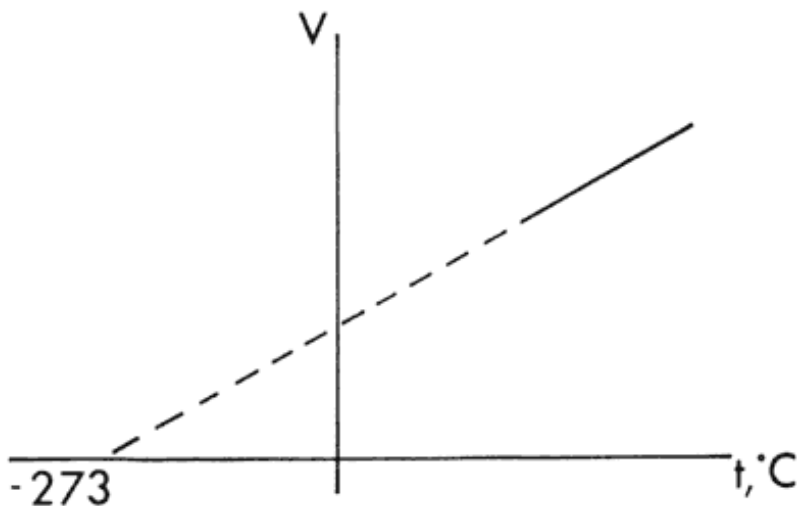
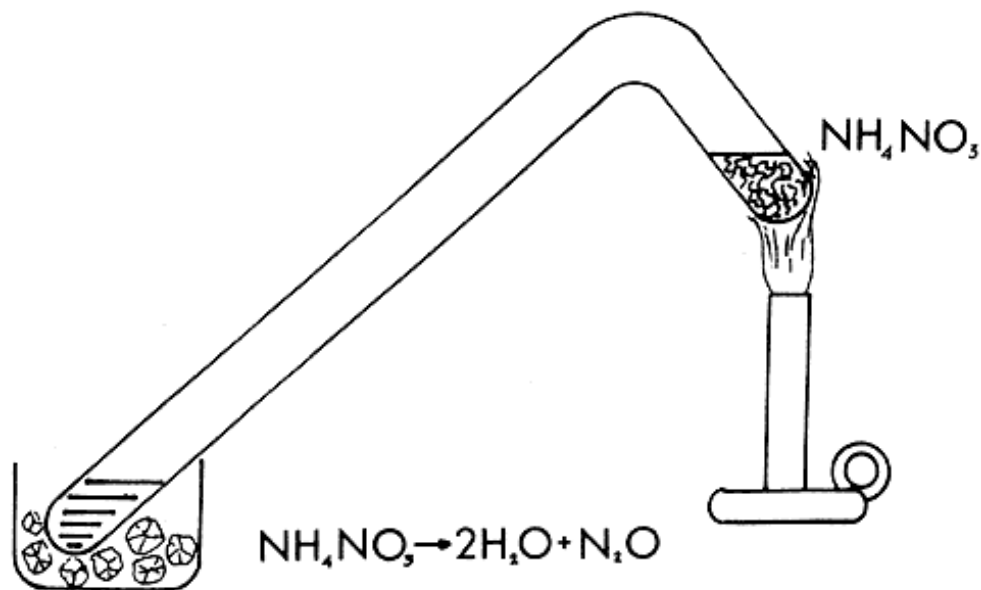


Figura III.1

Desde que Faraday era joven se sabía ya que se podían licuar los siguientes gases: el  $\text{NH}_3$ , ya fuera por "compresión o por "enfriamiento", desde 1799; el  $\text{SO}_2$ , por "enfriamiento" y el  $\text{Cl}_2$  por "compresión", desde 1800. Estos términos fueron al menos los que emplearon los investigadores que realizaron las licuefacciones, pero en realidad cuando decían haber procedido, por ejemplo, por enfriamiento de vapores desprendidos en reacciones químicas, sus experimentos se realizaban en recipientes cerrados y rígidos (véase la figura III.2), por lo que implicaban un cierto grado de compresión y cuando comprimían no siempre rodeaban el recipiente con una camisa que garantizara una temperatura constante. Era tema de debate el papel que tenían la presión y la temperatura en la posible licuefacción de los gases. Ya desde 1681, Denis Papin había demostrado que el agua en un recipiente cerrado permanecía líquida aunque su temperatura hubiera rebasado su punto de ebullición normal,  $100^{\circ}\text{C}$  [3].



**Figura III.2**

El tema incidía sobre las hipótesis atómicas de la época. Por ejemplo, en el caso del agua se argumentaba que la densidad del líquido era mucho mayor que la del gas; por lo tanto era concebible que comprimiendo el gas, se consiguiera apretar los átomos unos contra otros mientras se "exprimía" el calor y así se licuara. También, en vista de que si se calentaba suficientemente un líquido y éste se evaporaba, se reflexionaba en que si se bajara suficientemente la temperatura de un gas, éste se licuaría. Se preguntaban si sería posible prescindir del enfriamiento y bastaría sólo con comprimir.

A esta situación, prometedora pero aún confusa, se sumaban los experimentos, más antiguos (1761) de J. Black, quién había descubierto que el agua, en su punto de ebullición, requería una cantidad importante de calor para ser convertida en vapor a la misma temperatura. De hecho, fue el mismo Black quien acuñó los nombres de calor latente de vaporización para el calor mencionado y calor latente de fusión para el requerido en la conversión de un sólido en líquido a la temperatura de fusión. En 1783 J. Watt, el creador de la máquina de vapor, descubrió que el calor latente de vaporización cambiaba con la presión. Al aumentar la presión y subir el punto de ebullición del agua, observó que el calor latente disminuía y parecía anularse, a una presión más alta, al tiempo que las densidades del líquido y del vapor se hacían más cercanas. Ya en 1822 Cagnard de la Tour, después de hacer el vacío en una ampolla de vidrio que al admitir alcohol etílico en ella hasta que el líquido ocupe dos quintos de su volumen, mostró que al calentarla, el líquido se expandía hasta que llegaba un momento en que desaparecía. Según Cagnard de la Tour el líquido se había convertido totalmente en vapor, pero se podría haber argüido que todo el alcohol se había licuado por el aumento de la presión. Cagnard de la Tour investigó también el éter sulfúrico y el agua, y concluyó que "para toda sustancia existen, una presión, un volumen y una temperatura llamados punto crítico, tales que si el líquido se somete a ellos, se transforma en gas"[3]. Con las palabras "se transforma en gas", Cagnard de la Tour expresaba el hecho que realmente observaba, la desaparición de la superficie de separación entre el líquido y el vapor.

Respecto a la cuestión [2] mencionada antes, sólo diremos que en el transcurso del siglo XIX y la primera mitad del XX se llegó a predecir que todas las sustancias se solidificarían o al menos se licuarían antes de alcanzar la temperatura de  $-273^\circ\text{C}$ , que tal temperatura sólo se puede alcanzar con un número infinito de sucesivos enfriamientos [4, 5] y que la extrapolación señalada en la figura III.1 sirve para establecer la escala de temperatura de Kelvin (T), definida como

$$T = \text{temperatura Celsius} + 273.16,$$

escala que emplearemos de aquí en adelante.

En 1823, Michael Faraday se interesó en la posibilidad de licuefacción de los gases, asunto que estaba lejos de ser claro, emprendió una serie de experimentos que constituyen el primer intento sistemático de investigar esta cuestión. Faraday licuó los siguientes gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{HCN}$ . En la figura

III.2 se muestra el esquema de la forma de licuefacción del óxido nítrico. Sin embargo, no pudo licuar ni el  $H_2$  ni el  $O_2$  ni el  $N_2$  ni el  $CO$ , los cuales resistieron todos sus intentos [6]. En 1845 volvió a repetir sus experimentos, y llegó a la conclusión de que "a la temperatura de Cagnard de la Tour o un poco más alta, no es probable que ningún aumento de presión, excepto quizá uno extraordinariamente grande, convierta el gas en líquido" [7]. También consideró la posibilidad de que los gases que no pudo licuar fuesen permanentes [8].

Hubieron de pasar veinticuatro años antes de que Thomas Andrews publicara sus investigaciones sobre la licuefacción y solidificación del  $CO_2$ . Fue a partir de éstas cuando se entendió la utilidad de construir diagramas de las distintas fases de las sustancias, con los cuales se pueden saber las condiciones de presión y temperatura a las cuales una sustancia dada estará en equilibrio en una o más fases. Andrews mostró que si el gas se mantenía a una temperatura constante arriba de su temperatura crítica, era imposible licuarlo por la sola acción de la compresión (trayectoria A de la figura III.3), y si se mantenía por abajo, el gas se licuaría por la sola acción de una presión suficiente (trayectoria B de la figura III.3). Al hablar de licuefacción en este contexto, Andrews se refería específicamente a la aparición de una frontera, esto es, de una superficie entre el líquido y el vapor. Andrews también mostró que es posible licuar el gas de una manera continua, esto es, sin que se presentara en ningún instante la formación de una superficie de separación entre las fases líquida y gaseosa. Para ello bastaba con llevar al gas a través de un proceso que le diera la vuelta al punto crítico, como se indica en la trayectoria C de la figura III.3.

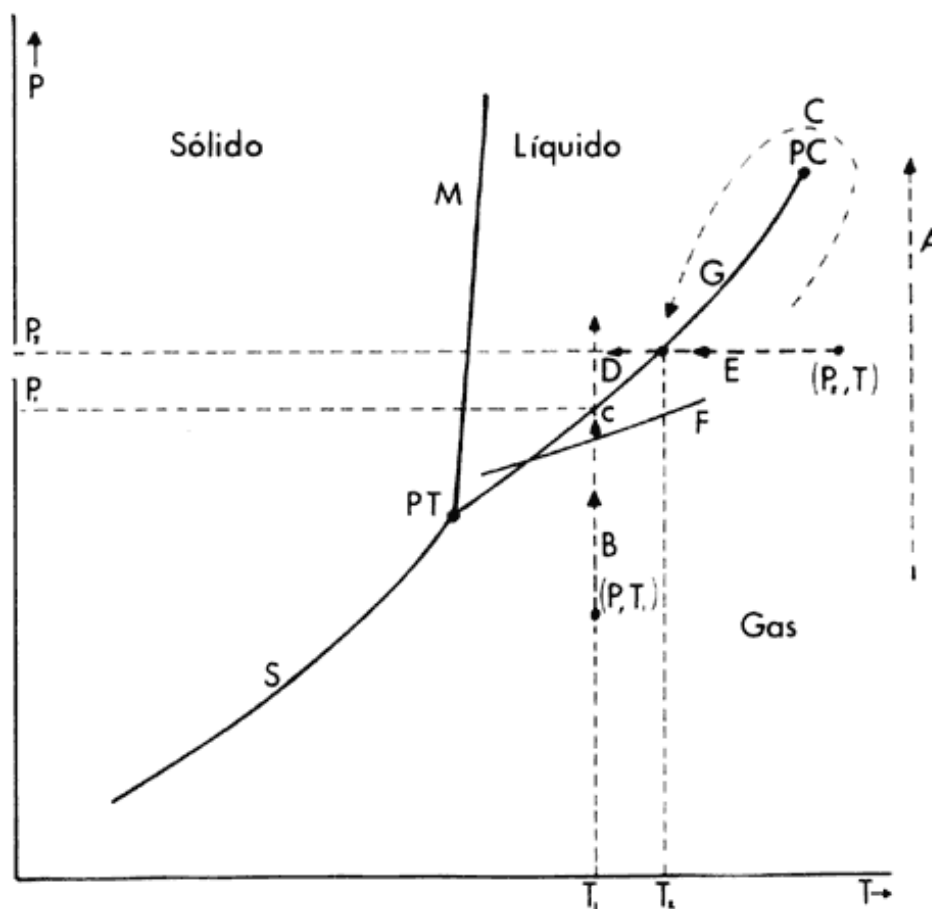
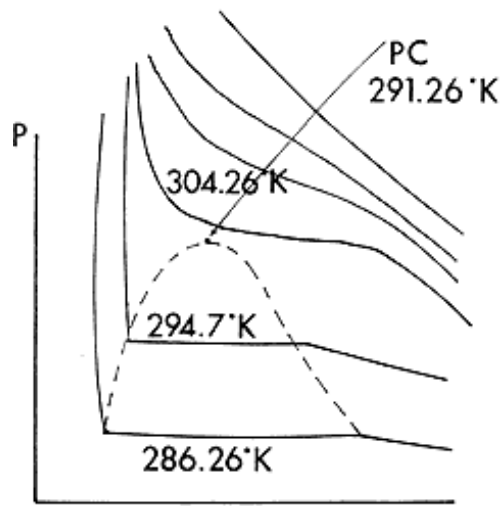


Figura III.3

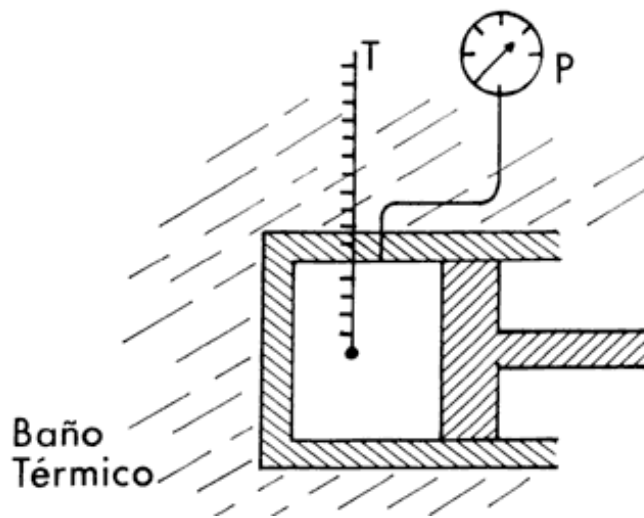
En la figura III.4 se muestra parte de los experimentos de Andrews [3]. En este diagrama se advierte cómo al aumentarse la temperatura, es decir al moverse hacia arriba, a distintas isothermas, la diferencia entre el volumen específico del gas  $V_g$  y el del líquido  $V_l$  se anula en el punto crítico (PC).



**Figura III.4**

La realización de muchos experimentos con distintas sustancias puso de manifiesto los siguientes hechos sorprendentes: Digamos que se empieza con un gas a una temperatura  $T_1 < T_c$  y a una presión  $p < p_c$ , encerrado en un recipiente cuyo esquema se muestra en la figura III.5. El recipiente está rodeado por una chaqueta que lo mantiene a la temperatura  $T_1$ . Se va comprimiendo, es decir; se va forzando al pistón hacia adentro y el volumen va disminuyendo; la presión va aumentando; el proceso se debe llevar a cabo con bastante lentitud como para que en cualquier posición del pistón se pueda medir la presión y la temperatura. Con esto se está haciendo que el gas siga la trayectoria B de la figura III.3. Llega un instante en que la presión alcanza un valor  $p_1$ , y el volumen del sistema es todavía el volumen ocupado por el gas  $V_g$ ; a partir de este instante, la presión permanece fija en el valor  $p_1$  (punto c), aunque se siga forzando al pistón hacia adentro; esto es, aunque el volumen siga disminuyendo. Cuando se ha alcanzado la presión  $p_1$ , como se sigue comprimiendo, el gas comienza a condensarse y mientras, la presión permanece en el valor  $p_1$  y el volumen disminuye, coexisten las fases líquida y gaseosa, pero enriqueciéndose la líquida a expensas de la gaseosa. Así que mientras coexistan las fases, comprimir no implica aumento de la presión. Si se continúa la compresión, llega un momento en que toda la masa ha pasado a la fase líquida y la fase gaseosa ha desaparecido; el volumen del sistema es ahora el volumen del líquido  $V_1$ . El pistón se atranca, la presión que estaba fija, reanuda ahora su incremento y se constata entonces que para una disminución de volumen, se requiere la aplicación de una presión mucho mayor sobre el pistón de la que se requería cuando estaba presente sólo la fase gaseosa porque los líquidos son mucho menos comprensibles que los gases. A partir de este momento, el punto representativo de las condiciones del sistema se empieza a mover de nuevo, esta vez a lo largo de la trayectoria D. Debe notarse que mientras se da la transformación del gas en líquido, se está extrayendo energía del sistema mediante la chaqueta de enfriamiento que mantiene fija la temperatura. Al llegar a la presión  $p_1$ , la energía por unidad de masa del sistema es la energía del gas  $U_g$ ; al iniciarse otra vez el aumento de presión, la energía específica del sistema es la energía del líquido  $U_1 < U_g$ . La termodinámica establece que el calor latente  $l$  que se requiere extraer en este proceso, está dado por la siguiente fórmula:

$$\lambda = [U_g - U_1] + p_1 [V_g - V_1]$$



**Figura III.5**

El juego de valores  $(T_1, p_1)$  es un punto de la llamada curva de coexistencia líquido-vapor, línea G de la figura III.3, que conecta al punto crítico (PC) con el punto triple (PT). Dicha curva es el lugar geométrico que representa las condiciones de temperatura y presión a las que la sustancia existe en las dos fases, gaseosa y líquida, y separa las regiones en las que la sustancia está en una u otra fase. Los demás puntos de la curva de coexistencia se determinan de igual manera con sólo cambiar cada vez el valor de la temperatura de la chaqueta. La temperatura  $T_1$ , de cualquier punto de la curva G, no es otra que la temperatura de condensación del líquido a la presión  $p_1$ . El hecho que merece ser destacado es que cuando se separa el sistema en dos fases, temperatura constante implica presión constante, aunque la energía y el volumen cambien. Mientras el sistema permanezca en algún punto de coexistencia, la energía y el volumen toman, si la sustancia está *al inicio* del proceso de licuefacción (o de su inverso, el proceso de evaporación), los valores correspondientes con una de las fases solamente; en los estados intermedios toman valores distintos para las dos fases y, al final, los valores correspondientes a la otra fase. Así pues, asociadas a cada punto de coexistencia  $(T_1, p_1)$  están las diferencias  $V_g - V_l$  y  $U_g - U_l$ . En otras palabras, en una licuefacción llevada a cabo cruzando la curva de coexistencia tiene lugar una discontinuidad en la energía y el volumen y se puede observar la frontera de separación de las fases.

Desde luego es posible realizar el experimento manteniendo al gas a una presión constante  $P_2 < P_C$  mediante algún acoplamiento mecánico con un sistema auxiliar de presión constante tal que permita al pistón, moverse libremente al mismo tiempo que se va enfriando por contacto térmico con una fuente fría comenzando con una temperatura  $T < T_C$ . El sistema recorre así la trayectoria E de la figura III.3. Al proceder de esta manera, se extrae energía del sistema, la temperatura baja y el volumen disminuye porque el pistón, libre, se desplaza hacia adentro, al llegar la temperatura al valor  $T_2$ , permanece fija, aunque se siga enfriando y el volumen siga disminuyendo. Otra vez está teniendo lugar la transición de gas a líquido, y mientras estén presentes las dos fases, enfriar no implica descenso de la temperatura. Una vez que toda la masa se ha licuado porque se ha continuado con la extracción de energía y la concomitante reducción de volumen, la temperatura reinicia su descenso. El hecho importante ahora es que al separarse el sistema en dos fases, presión constante implica temperatura constante, aunque se den cambios en la energía y el volumen. Estos cambian desde  $U_i = U_{\text{gas}}$  y  $V_i = V_{\text{gas}}$  hasta  $U_f = U_{\text{líquido}}$  y  $V_f = V_{\text{líquido}}$ , y se tiene otra vez que el calor latente que se ha extraído está dado por la misma expresión [1]

El cambio de volumen asociado a la transición de fase se ilustra en la figura III.4, en donde se ve que las curvas de temperatura constante, cuando están por debajo de la curva correspondiente a la temperatura crítica, muestran una región rectilínea de presión constante, acotada por los puntos  $\{V_g, p_1\}$  y  $\{V_l, p_1\}$ .

La realización exhaustiva de experimentos de este tipo condujo al trazado de los primeros diagramas de fase. En dichos diagramas están marcadas las curvas de coexistencia, no sólo de líquido y vapor, sino también de sólido y líquido (curva M) y de sólido y gas (curva 5) de la figura III.3. Dichas curvas separan las regiones donde el sistema cerrado, y por tanto de masa constante, es homogéneo y en ellas se pueden fijar la presión y la temperatura o cualquier otra pareja de propiedades en forma independiente una de la otra.

Interesa saber ahora lo que establece la termodinámica ante las pruebas experimentales descritas. Esto es

importante porque entonces se podrá obtener información sobre otras situaciones: Mezclas sin interacción química, mezclas con interacción química, predicciones sobre el número de fases y su relación con el número de componentes y con el número de variables que requieren ser fijadas en forma independiente unas de las otras, para que el estado del sistema pueda ser completamente caracterizado en todas y cada una de sus propiedades y así se puedan predecir resultados en situaciones experimentales diferentes.

A los sistemas de un solo componente (sustancia pura) homogéneos y abiertos -es decir los que pueden intercambiar masa con sus alrededores- y justamente con cada una de las fases coexistentes son sistemas abiertos y sus "alrededores" son la otra fase, se asocia el llamado potencial químico, propiedad que nos dice cómo cambia la energía disponible en el sistema si se cambia la masa. En el caso de mezclas, se asocia un potencial químico a cada uno de los componentes, con el cual se señala cómo cambia la energía disponible del sistema si cambia la masa del componente.

La termodinámica establece que para que dos o más fases estén en equilibrio, se requiere no sólo que su temperatura y su presión sean las mismas, sino que además su potencial o potenciales químicos tengan el mismo valor en cada fase. A partir de estas igualdades es posible obtener; en el caso de un sistema cerrado en el que permanezcan constantes las masas de cada uno de los componentes —condición con la cual quedan excluidas las reacciones químicas— la llamada regla de las fases de Gibbs, que dice cómo están relacionados el número de fases  $f$  y el número de componentes  $c$  con el número de variables  $l$  que se pueden fijar, del conjunto de variables asociadas al sistema, de manera independiente unas de otras:

$$l = 2 - f + c \quad (2)$$

Por ejemplo, en el caso que hemos analizado, el número de componentes es uno y si el sistema está en una fase, digamos sólido,  $f=1$ , con lo que  $l = 2$ . Esto indica que se pueden o se tienen que fijar independientemente dos variables,  $p$  y  $T$ , ó  $p$  y  $V$  ó  $V$  y  $T$ , ó  $U$  y  $p$ , u otras dos variables cualesquiera que sean, para que el estado del sistema pueda ser completamente caracterizado. Nótese que un sistema de un componente puede existir en tres fases; pero cuando esto ocurre, por la regla (2), sus grados de libertad son cero, esto es, todas sus propiedades quedan fijas y no se puede alterar ninguna, so pena de destruir una de las fases. En esta situación, el estado del sistema corresponde al punto triple (PT) de la figura III.3.

La termodinámica también proporciona la relación que conecta la pendiente de cualquiera de las curvas de coexistencia con los diferentes valores de volumen y de energía de las dos fases, al inicio y al final de la coexistencia. Estas relaciones, conocidas como relaciones de Clausius- Clapeyron, en el caso del vapor y del líquido, por ejemplo, adquieren la forma,

$$dp/dT = \lambda / (V_g - V_l), \quad (3)$$

donde  $\lambda$  representa al calor latente asociado a la transición de fase. La ecuación de Clapeyron nos permite conocer la pendiente de la curva de coexistencia partiendo de los datos experimentales de  $V_g$ ,  $V_l$  y  $\lambda$ . Con esta ecuación se ve que una disminución en la presión —en vista de que  $V_g > V_l$  y  $U_g > U_l$ — ocasiona que la temperatura de ebullición disminuya; en efecto, todos sabemos que el agua hierve a menor temperatura en la ciudad de México que a la orilla del mar porque la presión atmosférica en la ciudad es menor que a la orilla del mar; todos sabemos también que en una olla Express, los alimentos se cuecen más rápido porque, tratándose de un recipiente cerrado y rígido, la presión aumenta, con lo que se incrementa también la temperatura de ebullición del agua.

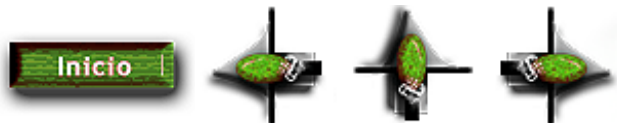
Regresando a los experimentos de condensación de Faraday se puede ver, teniendo presente la figura III.2, que calentando un extremo del recipiente rígido, se provocaba un aumento de presión —aunque no tan controlable como el que se podía lograr en una compresión con émbolo. Pero además, como se enfriaba por el otro extremo, el aumento de presión debido al calentamiento, por una parte y el debido a la reacción química que producía el gas, por otra, se veía disminuido por el enfriamiento. El proceso puede representarse cualitativamente por la trayectoria F en la figura III.3.

Regresando al descubrimiento del punto crítico por Caignard de la Tour al comentario de Faraday y al trabajo cuantitativo de Andrews, se ve en dónde está el secreto para licuar los gases que se pensaban permanentes, a saber; aquellos cuyas temperaturas críticas son relativamente bajas. El asunto, entonces, es colocarlos a una temperatura menor que su temperatura crítica. L. Cailletet, por un lado, y R. Pictet, por otro, descubrieron procedimientos para conseguirlo casi simultáneamente, en 1877, cuando notaron la formación de las primeras gotas de oxígeno y de nitrógeno que hayan sido observadas. El procedimiento de Cailletet fue, esquemáticamente, el siguiente: *Primero*, enfriar el gas por contacto térmico con una fuente fría. *Segundo*, aislarlo, para que no reciba energía del exterior. *Tercero*, permitir que el gas se expanda, con lo que realiza trabajo de expansión, esto es, con lo que pierde energía, disminuyendo así su temperatura.

Los experimentos de Michael Faraday en la licuefacción de los gases forman parte importante de la base experimental que llevó a entender la necesidad de los diagramas de fase y al posterior desarrollo de la ciencia y la consecuente tecnología de bajas temperaturas. Al ocuparse de la licuefacción de los gases, Faraday se mostró como uno de los más grandes físico-químicos en la historia de la ciencia.

## REFERENCIAS

- [1] T. L. Hankis *Science and the Enlightenment*. Cambridge University Press, Nueva York, 1988.
- [2] G. J. Holton. *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. 2a. ed., Reverté, Barcelona, 1981.
- [3] S. G. Brush. *The Kind of Motion We Call Heat*. vol. 1, North-Holland, Nueva York, 1986, cap. 7.
- [4] L. García- Colín. *Introducción a la termodinámica clásica*. 3a. ed., Trillas, México, 1986, cap. 17
- [5] E. Piña Garza. *Termodinámica*. Limusa, México, 1978, cap. 8.
- [6] J. R. Partington. *Text-Book of Inorganic Chemistry*. 6a. ed., Macmillan, Nueva York, 1950.
- [7] J. R. Partington. *An Advanced Treatise on Physical Chemistry*. Vol. 1, Longmans Green & Co., 1949, p. 624.
- [8] E. G. D. Cohen, "Toward Absolute Zero". *Am. Sci.* 65, noviembre- diciembre de 1977, p. 752.



## IV. LA LEY DE INDUCCIÓN Y LA RELATIVIDAD

I.CAMPOS  
y J. L. JIMÉNEZ

EN LA trama de la ciencia se entretajan, en complicados patrones, la experiencia y la imaginación impulsadas por la curiosidad y la pasión por el conocimiento. Faraday contribuyó a esa trama con sus trascendentes experimentos, mientras su inspirada imaginación nos legó el concepto de campo, sin el cual la física contemporánea no podría concebirse. ¡Y qué decir de su pasión por la ciencia! que incluso lo llevó al colapso nervioso en 1839, cuando tenía 48 años y que, aunque le hizo disminuir el ritmo de sus experimentos, no afectó la profundidad de sus pensamientos.

Nos dice Holton (1973, p. 390):

El mismo progreso de la ciencia ha dependido, a menudo, de lo que en su tiempo se habría considerado como una terca obstinación de sus devotos, pero que ahora se toma como inspirada tenacidad. A este respecto nombres como los de Faraday y Joule vienen a la mente al instante.

Y vaya que progresó la ciencia con Faraday quien, sin lugar a dudas, aportó las simientes experimentales y conceptuales de la física moderna.

Con Faraday, la visión del mundo físico cambia de la concepción mecanicista, que considera que la materia está compuesta por partículas en perpetuo movimiento en el vacío, a la concepción actual, que concibe que las partículas están inmersas en campos de fuerza a través de los cuales interactúan. De esta manera, la acción a distancia, común pero falsamente atribuida a Newton, se transforma en una acción local, en la que la partícula perturba al campo en su inmediata vecindad, perturbación que después se transmite a través del mismo campo, con una velocidad finita para afectar así otras partículas a distancia. Cabe señalar que esta concepción aún está incompleta, y que la interacción entre partícula y campo plantea interesantes problemas que constituyen un verdadero desafío a la imaginación y capacidad de experimentación de los físicos contemporáneos. Como veremos más adelante, el germen de esta problemática aparece ya como una inquietud recurrente de Faraday.

Como consecuencia de la apasionada dedicación de Faraday a la experimentación, a menudo se le considera como un convencido empirista. La total ausencia de una educación formal parecería reforzar esta idea, porque ¿cómo alguien, sin contacto con la enseñanza superior ni un curso de filosofía al menos, podría concebir esas ideas tan complejas acerca del mundo? Sin embargo esta imagen de Faraday es falsa. El llegó a expresar su convicción de que la experimentación es imposible sin la guía de la imaginación. Es decir, la física sólo puede dar frutos en matrimonio con una metafísica.

La metafísica que guió a Faraday (Berkson, 1981, p. 83) fue la concepción de la unidad e interconexión de todos los fenómenos; de ella se siguen cuatro consecuencias: 1) la conservación de las fuerzas; 2) la unidad de las fuerzas; 3) el efecto de tensión de las fuerzas sobre los cuerpos, y 4) el rechazo de la acción a distancia. Escribió Faraday, citado por Gillespie (1960, p. 441):

Desde hace mucho he tenido la opinión, casi convicción, que comparten, creo, muchos otros amantes del conocimiento natural, de que las diversas formas bajo las que se manifiestan las fuerzas de la materia tienen un origen común. En otras palabras, están tan directamente relacionadas y son tan dependientes entre sí, que de alguna manera se pueden convertir unas en otras y poseen poderes equivalentes.

Esta metafísica se puede rastrear en Kant (1786), en su *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (Principios metafísicos de las ciencias naturales). Con el filósofo alemán Schelling, dicha filosofía se convirtió ya en todo un movimiento cultural: la *Naturalphilosophie*, que invadiría otras ramas del saber; desde la física, con Oersted (uno de los seguidores de Schelling) hasta la literatura. Pero es difícil establecer una relación entre Kant y Faraday. Más bien parece que Faraday llegó a estas ideas a través de sus convicciones religiosas, pues al igual que

Newton, Faraday creía que Dios era el creador y conservador del Universo (Pearce Williams, 1965, p. 527); para ambos, Dios estaba en todo tiempo en todo punto del espacio. De estas convicciones religiosas, Newton derivó sus nociones de espacio y tiempo absolutos, mientras que Faraday vislumbró, a través de ellas, el concepto de campo. No deja de ser paradójico que años después, esas nociones, *espacio y tiempo absolutos*, por un lado, y el *campo* por otro, entraran en un conflicto que se resolvería sólo a costa de modificar radicalmente los conceptos imperantes de espacio y tiempo, como lo exige la relatividad especial.

También es notable que Faraday, en ese íntimo contacto con el mundo físico que adquirió tras sus cuidadosos experimentos, llegara al dilema continuidad-discontinuidad de la materia, que por siglos había desafiado a los más grandes pensadores; más aún, sus experimentos aportaron pruebas para *ambos* aspectos del dilema con lo que ese problema pasó del campo de la especulación al de la ciencia experimental. Por un lado, los experimentos electroquímicos de Faraday que establecieron la relación entre la cantidad de electricidad que pasa por una celda electrolítica y la cantidad de sustancia liberada en cada electrodo, apuntaban ya a la existencia de cierta carga mínima elemental. Y ciertamente Hermann von Helmholtz usó esos resultados para proponer, en 1881, que la electricidad era transportada por partículas. Pocos años después, esa conjetura se convertiría en la teoría de los electrones, que a su vez daría lugar a la relatividad especial y a la física atómica.

Sin embargo, Faraday no se inclinaba por el atomismo tradicional, que concebía a la materia como compuesta de pequeñas partículas en el vacío. Su concepción de los átomos es más cercana a la de Bosovich, para quien los últimos constituyentes de la materia eran intrincados centros de fuerza. Al igual que Aristóteles y, siglos después, Descartes, Faraday rechaza el vacío, pero con nuevos argumentos sólidamente basados en la experiencia. Puesto que las partículas se consideraban como separadas entre sí por el espacio, éste debía tomarse como la única parte continua, pero "...si el espacio es aislante, no puede existir en los cuerpos conductores, y si es conductor no puede existir en los cuerpos aislantes", argumentó Faraday (Gillespie, 1960, p. 455). Por lo tanto, agrega Faraday:

El punto de vista recién formulado sobre la constitución de la materia parecería implicar forzosamente la conclusión de que la materia llena todo el espacio, o al menos todo el espacio hasta el que se extiende la gravitación (incluyendo el Sol y su sistema); porque la gravitación es una propiedad de la materia que depende de cierta fuerza, y es esta fuerza la que constituye la materia. Según este punto de vista, la materia no es sólo mutuamente permeable, sino que cada átomo se extiende, por así decirlo, a través de todo el sistema solar, pero conservando siempre su propio centro de fuerza. (Gillespie, 1960, p. 457).

Es de esta manera como Faraday trata de resolver el dilema continuidad-discontinuidad: sintetizando los conceptos de campo y partícula en un solo centro de líneas de fuerza. Una vez más, esa idea sería retomada posteriormente por Einstein, quien llegó a concebir las partículas como cuasisingularidades del campo, pero las complicadas ecuaciones no lineales que se requieren para formalizar esta idea han hecho que el progreso en esta dirección haya sido muy limitado. En Faraday es también claramente manifiesta la aspiración a una teoría de campo unificado (Berkson, 1981, p. 79), aspiración compartida por los más grandes físicos y que aún ahora conserva su vigencia.

Pero la visión de un mundo compuesto por centros de fuerza no estaba exenta de dificultades. Maxwell recogió la concepción de Faraday y la tradujo a un lenguaje matemático, echando mano de modelos mecánicos y analogías hidrodinámicas. Para cuantificar las líneas de fuerza de Faraday, Maxwell introdujo el flujo de un fluido imaginario incomprensible, que fluía por tubos que variaban en sección transversal, de punto a punto, siendo la intensidad del campo proporcional a la "velocidad" del fluido hipotético. Este fluido tenía fuentes y sumideros, que serían las cargas positivas y negativas. Es importante hacer notar que Maxwell intentó concretar una visión unitaria, en la que las cargas y corrientes surgían de las propiedades de un medio subyacente (Buchwald, 1985, p. 23). Estos conceptos de carga y corriente son difíciles de entender ahora, pues consideramos a la carga eléctrica como una propiedad de las partículas elementales y a la corriente como el resultado de su movimiento. Sin embargo, uno no puede dejar de relacionar estas ideas, consideradas como anticuadas por muchos, con los "agujeros de gusano" de Wheeler, quien con ello trata de deducir la carga eléctrica de la topología del espacio- tiempo.

Pero Maxwell tenía muy clara la distinción entre sus modelos y analogías con respecto a la realidad:

Al referir todo a la idea puramente geométrica del movimiento de un fluido imaginario, espero obtener generalidad y precisión, y evitar los peligros que surgen de una teoría prematura que pretenda explicar la causa de los fenómenos. Si los resultados que he logrado de la mera especulación son de alguna utilidad para los filósofos experimentales en vías a sistematizar, arreglar e interpretar sus resultados, habrán cumplido su

propósito. Y una teoría madura, en la que los hechos físicos sean físicamente explicables, surgirá de quienes, al interrogar a la naturaleza misma, puedan obtener la única verdadera solución a las preguntas que la teoría matemática sugiere (Gillespie, 1960, p. 462).

De este modo, Maxwell estableció una teoría matemática de los fenómenos electromagnéticos y ópticos, que mantendría ocupados a muchos físicos durante la segunda mitad del siglo XIX. Pero, como ocurre a menudo, algunos seguidores de Maxwell convirtieron sus medios continuos imaginarios en un medio mecánico real: el éter. Este medio se convirtió así en el sustrato en el que las líneas de fuerza se visualizaban como tensiones, adquiriendo de este modo energía potencial y energía cinética. Sin embargo, Maxwell, igual que Faraday, al rechazar el vacío lo sustituyó por un "éter", cuyas propiedades no pudo englobar en un esquema adecuado:

Cualesquiera dificultades que podamos tener para formar una idea congruente de la constitución del éter, no puede haber duda de que los espacios interplanetario e interestelar no están vacíos, sino que están ocupados por una sustancia material o cuerpo, que ciertamente es el cuerpo más grande, y probablemente el más uniforme, del que tenemos algún conocimiento (Gillespie, p. 492).

No obstante, como ya se mencionó, los experimentos electroquímicos de Faraday sugerían el transporte de la carga por partículas, que a finales del siglo pasado darían lugar a la teoría de los electrones, con la cual se abandonaría la teoría unitaria de Faraday y Maxwell en favor de la teoría dualista, que postula la existencia de dos entidades: las partículas y los campos. Como es común en toda concepción dualista, el primer problema que surge, es la naturaleza de la interacción entre dichas entidades. Este es también el problema de la relación entre materia y éter o, en términos más modernos, entre radiación y materia. Específicamente una de las primeras preocupaciones de los físicos que compartían esta visión era la manera en que el movimiento de la materia modificaba el estado del éter. En este contexto surgen experimentos como el de Fizeau, que intentaban determinar si los medios transparentes arrastraban o no al éter en su movimiento. En este punto empezaron a aparecer resultados experimentales contradictorios, pues el experimento de Fizeau parecía indicar un arrastre parcial del éter, mientras que el experimento de Michelson no mostraba indicios de tal arrastre. Estas son las anomalías que según Kuhn, preceden a una revolución científica; el autor de esa revolución sería Einstein. Sin embargo, fundamentalmente no fueron resultados experimentales los que incitarían a Einstein a rebelarse contra el orden establecido. Desde luego Einstein había meditado sobre la posible existencia de un "éter lumínico" pero según afirmó en sus *Notas autobiográficas*, desde los dieciséis años había tenido serias dudas al respecto, puesto que si hubiera sido posible alcanzar una onda lumínica, ésta aparecería como un campo electromagnético que no sería posible crear con ninguna configuración de cargas en reposo. Aquí se tiene que regresar a Faraday y a uno de sus más importantes descubrimientos: la ley de inducción. Fiel a sus convicciones de la unidad de todas las fuerzas, Faraday buscó por años el efecto inverso al descubierto por Oersted, es decir; la obtención de una corriente eléctrica a partir del magnetismo. Sus esfuerzos alcanzaron finalmente el éxito en 1831, con lo que sentó las bases de la tecnología electromecánica.

En particular; el efecto de inducción dependía únicamente del movimiento relativo entre el circuito donde aparecía la corriente eléctrica y el imán, fuente del campo magnético. El que la corriente inducida dependiese sólo del movimiento relativo fue ampliamente subrayado por Maxwell. El efecto de inducción se manifestaba también, notablemente, en el llamado generador homopolar; o efecto de inducción unipolar; de gran importancia tecnológica porque permite obtener una corriente continua, sin necesidad de rectificación. Este generador consiste en esencia en un conductor que gira alrededor de un imán conductor permanente y que está en contacto con él. La corriente aparece ya sea que el imán esté en reposo y el conductor sea el que gire, o si el conductor está en reposo y es el imán el que gire. Al igual que en las aplicaciones habituales de la ley de inducción, sólo importa el movimiento relativo. Sin embargo, a fines del siglo pasado y en los primeros años de éste, la explicación que se daba para la generación de la corriente inducida era diferente si era el circuito o el imán el que se movía; por otro lado, existían serias dudas sobre la aplicación de la ley de inducción a los generadores homopolares (Millet; 1981, PP. 153, 155). Como Einstein indicó en el primer párrafo de su célebre trabajo de 1905, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", la interpretación habitual en ese tiempo hacía una distinción asimétrica entre los dos casos. En un ensayo que escribió Einstein en 1919, pero que no publicó: "Ideas y métodos fundamentales de la teoría de la relatividad, presentados en su evolución" (citado en Miller; 1981, p. 145), menciona que esta asimetría le resultaba insoportable, por lo que la ley de inducción desempeñó un papel fundamental en el nacimiento de la teoría especial de la relatividad. Einstein establece entonces la aplicabilidad de la ley de Faraday a los generadores homopolares y elimina la asimetría interpretativa del fenómeno de inducción, pero para ello introduce el concepto de que los campos eléctrico y magnético son relativos al sistema de referencia desde el cual se juzgan los fenómenos. Esta relativización del campo electromagnético se fundamenta, a su vez, en la relativización del espacio y del tiempo.

En otras palabras, la aportación fundamental de Einstein consistirá en modificar la cinemática, esto es, los conceptos de espacio y tiempo, para hacer compatibles a la electrodinámica y a la mecánica. De esta manera, las ecuaciones de Maxwell pasan a ser válidas en todo sistema inercial, no sólo en los sistemas en reposo respecto del éter. Esto equivale al postulado de Einstein de que la velocidad de la luz es la misma respecto de todos los sistemas inerciales. Desde luego, habría que modificar también la mecánica newtoniana como consecuencia de los cambios en la cinemática. Esta modificación constituye la mecánica relativista, invariante bajo las mismas transformaciones que, la electrodinámica, esto es, las transformaciones de Lorentz. Este es el punto en el que Einstein saltó, en su trabajo de 1905, de los "ejemplos de esta clase" (los de la ley de inducción) a "los intentos infructuosos por descubrir cualquier movimiento de la tierra relativo al medio lumínico [el éter]". Einstein concluyó la introducción de su famoso trabajo con la afirmación de que el "éter lumínico" era superfluo, pues el punto de vista que iba a introducir "no requería un espacio absolutamente estacionario".

De este modo Einstein logró reconciliar "materia y radiación". Sin embargo, la historia no termina aquí. Aún quedan problemas por resolver. Uno de ellos es la interacción de una carga con su propio campo. Esto se refleja en la llamada "reacción de radiación". La teoría actual es totalmente insatisfactoria, pues la fuerza que surge de la supuesta interacción de una carga con su propio campo al radiar, parece predecir una autoaceleración, y que si se trata de eliminar se desencadena otro efecto no menos paradójico, la preaceleración. Esto nos lleva nuevamente a la visión unitaria de Faraday, pues en la relatividad general, la materia y el espacio- tiempo se vuelven una y la misma cosa. Los centros de fuerza de Faraday se convierten en centros de curvatura del espacio- tiempo. Esta es la concepción de la geometrodinámica de Wheeler; quien intenta reducir las propiedades de la materia, como carga y masa, a las propiedades topológicas del espacio-tiempo. Aún queda un largo camino por recorrer; pero ¿qué mayor aventura puede haber que adentrarse en los misterios de la naturaleza?

## BIBLIOGRAFÍA

Berkson, W. *Las teorías de los campos de fuerzas. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Universidad, 310, Madrid, 1981.

Buchwald, J. Z. *From Maxwell to Microphysics*. Chicago, 1985.

Einstein, A. "On the Electrodynamics of Moving Bodies", en *Principle of Relativity*, Dover, 1952.

----, *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, 1055, Madrid, 1984.

Gillespie, Ch. C. *The Edge of Objectivity: An Essay in the History of scientific ideas*. Princeton, 1960.

Holton, G. *Thematie Origins of Scientific Thought* Harvard, 1973.

Miller, A. I. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*. Addison-Wesley, Reading, 1981.

O'Rahilly, A. *Electromagnetic Theory* Dover, Nueva York, 1965.

Shaffner, K. F. *Nineteenth-Century Aether Theories*. Pergamon, Oxford, 1972.

Scott, W. T. "Re source letter F.C. 1 On the Evolution of the Electromagnetic Field Concept". *A. J Phys.*, 31, 819, 1963.

Tricker, R. A. R. *The Contributions of Faraday and Maxwell to electrical Sciences*. Pergamon, Oxford, 1966.

Whittaker, E. A. *History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper and Row, Nueva York, 1953.

Williams, P. L. *Michael Faraday. A Biography*. Basic Books, Nueva York, 1965.

---

Inicio



### COMENTARIOS INTRODUCTORES

CUANDO se piensa en el desarrollo de la física a lo largo del siglo XIX, es frecuente imaginarlo como un proceso continuo y apacible, carente de las violentas rupturas que caracterizaron a las primeras décadas de nuestro siglo. Sin embargo, es un hecho que durante el siglo pasado surgieron al menos dos vertientes de la física, de naturaleza netamente revolucionaria. La primera de ellas, cronológicamente hablando, surgió con la incorporación a la física de la hipótesis de los químicos sobre la estructura corpuscular de la materia y su posterior desarrollo y aplicación, por ejemplo, a la teoría cinética de los gases y al redireccionamiento de la investigación hacia los fenómenos de escala atómica.

Para percibir las dificultades que el modelo atómico tuvo que superar para su aceptación general, baste recordar que investigadores de la talla de Ostwald, el creador de la físico- química —por no traer a colación el ejemplo usual de Mach—, todavía en el presente siglo, aceptaban los átomos a lo más, como un modelo útil pero carente de realidad física; o bien, que se requirió un siglo completo para transformar la hipótesis de Dalton en una teoría física *comprobada* —lo que ocurrió con los trabajos sobre el movimiento browniano de Einstein (y Smoluchowski) y su ulterior verificación experimental por Perrin y sus discípulos, periodo que va de 1905 a 1915, aproximadamente—<sup>2</sup>




lo que permitió sustituir la convicción dominante hasta entonces, derivada de la física clásica y newtoniana, firmemente reforzada por la teoría electromagnética de la materia como un continuo, por la de su estructura granular.

La segunda ruptura epistemológica a que hicimos mención se refiere a lo que viene a ser; indudablemente, la mayor contribución conceptual de la física de varios siglos, y no sólo del XIX: la introducción del concepto de *campo* como un ente físico de nivel ontológico, equivalente al que goza la *materia*. Es difícil exagerar la importancia de este descubrimiento, no sólo para el estudio de fenómenos no mecánicos como los electromagnéticos, sino para nuestra comprensión general de la estructura y naturaleza del mundo físico. En las siguientes páginas trataremos de repasar someramente algunos de los momentos centrales del proceso intelectual que permitió llegar a la noción de *campo electromagnético* que nació con los trabajos pioneros de Michael Faraday (1791-1867), y de describir cómo es que esta búsqueda se liga profundamente con la respuesta a otra pregunta milenaria: ¿qué es y cómo es el vacío?


### FARADAY Y SUS LÍNEAS DE FUERZA

A partir de sus observaciones experimentales de fenómenos magnéticos, Faraday llegó a la convicción de que éstos se dan en la región del espacio que rodea a los cuerpos magnetizados —y algo similar ocurre con los electrizados— por lo que no se trata de acciones a distancia, sino de efectos transmitidos por las *líneas de fuerza* que él consideraba algo así como el *camino* o el *vehículo* de las acciones magnéticas. Detengámonos en un par de comentarios para aclarar las ideas.

El primero se refiere a la noción misma de línea de fuerza. Faraday partía de una concepción de la materia dentro de la tradición atomista de Boscovich, Bernoulli, Dalton, Davy —su mentor— etc., considerándola formada por

centros puntuales, a los que convergen las líneas de fuerza.<sup>3</sup>  Las líneas de fuerza representan para Faraday un estado de esfuerzos y deformaciones que se da en el espacio entre los átomos. Faraday tiende a considerarlas como una *sustancia*, sujeta a los esfuerzos correspondientes y transmisora de ellos; esta sustancia se distingue de la materia común y sus diferentes estados deberían permitir explicar *todas* las fuerzas entre los cuerpos. Esta idea conduce a Faraday a convencerse de que debe ser posible transformar unas fuerzas en otras, e incluso unificarlas en una sola. De aquí deriva Faraday su convicción de que debería existir alguna relación entre la luz y la electricidad con el magnetismo, lo que logró verificar finalmente con el descubrimiento del *efecto Faraday* que consiste en la modificación del plano de polarización de la luz por un imán.

Más tarde, en 1844, para evitar las paradojas a que conduce la noción de acción a distancia, Faraday propuso considerar que cada átomo está conectado a cualquier otro a través de líneas de fuerza, por lo que la acción de éstas se extiende sobre todo el espacio. Así, desapareció para Faraday la noción de *espacio vacío* que no necesitaba de un éter transmisor de las acciones eléctricas o magnéticas: la sustancia de la fuerza permea todo el espacio y el interior de la materia común. Argumentó que, en todo caso, las líneas de fuerza podrían corresponder, alternativamente, a algún estado de éter, como una vibración o una tensión, etc., por lo que el *medio* magnético en el espacio podría ser el propio éter. En cualquiera de estas formas, estamos en presencia de una *concepción campal del fenómeno magnético* que se abre paso, por vez primera, en la descripción de los fenómenos físicos.

La teoría de la gravitación universal elaborada por Newton considera que la fuerza gravitatoria entre los cuerpos celestes actúa de manera instantánea e independiente del medio (o espacio) entre tales cuerpos. Esta concepción influenció largamente el pensamiento físico y prevalecía aún a mediados del siglo pasado; fue aceptada por autores tan importantes como Ampère. La preocupación central de Faraday desde 1821, año en que inicia sus investigaciones sobre la electricidad y el magnetismo, es precisamente la verificación de su hipótesis alternativa —o especulación, como él la llama— de que las acciones eléctricas y magnéticas son progresivas y requieren tiempo para *propagarse*. Por ejemplo, logró demostrar que la inducción magnética —fenómeno descubierto por él mismo— no es una acción a distancia, sino el resultado de que se cortan líneas de fuerza (sea por movimiento entre conductor e imán, sea porque se haga cambiar la corriente en un conductor, con los cuerpos fijos).<sup>4</sup> 


La noción de un éter que llena el espacio —incluyendo los intersticios de la materia y sus átomos— es tan antigua como el pensamiento materialista griego; entre los griegos, el éter era la *quinta esencia*, más fundamental aún que los cuatro elementos que creían que daban cuerpo a la materia y que era quizá la materia del alma. A este éter se le consideraba material y atómico y, para Lucrecio, su movimiento generaba el movimiento de los astros. Con la noción newtoniana de espacio absoluto y la teoría ondulatoria de la luz, propuesta por Newton —que la consideraba complemento indispensable de su teoría corpuscular de la luz— Hooke y, especialmente Huygens y sus sucesores, reaparece en la física la noción de éter —ahora como éter luminífero— como la sustancia en que se asientan las vibraciones de las ondas luminosas. En esta visión, el éter es a la luz lo que el aire al sonido o el océano a las olas. Más aún que en Faraday, la posición de Newton respecto del éter es ambivalente, aunque su tendencia es negarlo (por ejemplo, en la segunda edición de su *Opticks*, 1706) o, en todo caso, mantenerlo explícitamente como una hipótesis.

## DE MAXWELL A EINSTEIN: LOS CAMPOS CLÁSICOS

Como hemos visto, a Faraday lo atrae, más que el éter; la idea del espacio en sí mismo permeado por la sustancia que él considera fundamental, el *medio* o la *sustancia* magnética o eléctrica; concibe las líneas de fuerza como *estados del espacio* —y esto debería poder extenderse a la luz y a la gravedad— y no considera que sea necesario el éter para que puedan existir tales líneas, aunque tampoco se resiste a admitirlo si fuera necesario, si bien su esquema no lo necesita. Maxwell (1831-1879) inició sus investigaciones sobre la electricidad y el magnetismo en 1861, partiendo de las nociones de Faraday. Igual que su predecesor; interpretó las líneas de fuerza como estados de esfuerzos y deformaciones, *pero* de un éter mecánico y newtoniano. Maxwell fue muy lejos con este modelo, en combinación con el método de analogías: consideró un *modelo mecánico* del éter en términos de celdas rotatorias (los vórtices), separadas entre sí por esferitas giratorias que evitan la fricción, modelo que según él, posee un comportamiento análogo al de los fenómenos eléctricos y magnéticos que estaba investigando.

La analogía resultó tan acabada, que le permitió deducir las ecuaciones correctas para los fenómenos electromagnéticos. Por ejemplo, encontró que en analogía a los cambios en el *desplazamiento* de las celdas elementales generados por los esfuerzos, debía introducir una *corriente de desplazamiento* asociada a la variación de los campos eléctricos en los medios dieléctricos. Este es quizá el descubrimiento específico más importante de Maxwell, pues de él depende la posibilidad de existencia de las ondas electromagnéticas. Este ejemplo muestra el inmenso valor heurístico que las analogías tuvieron en las manos de Maxwell para establecer las leyes del electromagnetismo.


En la descripción original de Maxwell, los fenómenos electromagnéticos quedan representados por *campos*

asociados al fluido etéreo: campos de velocidad, de esfuerzos, etc.<sup>5</sup>  En esta forma llegó a sus ecuaciones del electromagnetismo como una teoría de campo, en la que las líneas de fuerza son esfuerzos sobre el éter magnético

—que distinguía cuidadosamente de su *modelo*, el éter de los vórtices—. Los fenómenos electromagnéticos se propagan, según esta teoría, como en un medio elástico, es decir; con velocidad finita, Maxwell descubrió que era muy cercana a la de la luz. Esta observación le permitió identificar a la luz como una onda electromagnética y simplificar el esquema, proponiendo que su éter y el luminífero eran la misma cosa. Sin embargo, cada vez se alejaba más de las concepciones originales de Faraday; por ejemplo, encontró que los campos eléctricos y magnéticos se propagaban en dirección ortogonal a las líneas de fuerza, por lo que éstas no podían concebirse ni como trayectorias ni como vehículos de los correspondientes efectos, como proponía Faraday.

Hacia 1864, Maxwell dio el paso definitivo: aceptó las acciones electromagnéticas como un campo, al que se propone describir sin recurrir a modelos o analogías circunstanciales; en su *Tratado de electricidad y magnetismo*, ve ya al campo electromagnético como un sistema dinámico, generado por la materia en movimiento, y poseedor de propiedades físicas como energía, momento, etc., que antes de Maxwell eran atributo exclusivo de la materia ponderable. Sin embargo, pese a asignarle tales atributos sustanciales, Maxwell mantuvo al campo electromagnético aún en un nivel ontológico diferente al de la materia, pues no lo trató como una sustancia, sino como *estado de una sustancia*, el éter luminoso.

Con todo ello, el establecimiento por Maxwell de la teoría electromagnética, que engloba los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos en un cuerpo teórico unificado, permanece hasta nuestros días como una de las grandes proezas del intelecto humano. La comprobación por Heinrich Hertz (1857-1894) de la existencia real de las ondas electromagnéticas o hertzianas predichas por Maxwell, además de unificar definitivamente la óptica y el


electromagnetismo,<sup>6</sup>  abrió a la humanidad una gama de nuevas posibilidades científicas y tecnológicas de gran importancia y vastedad —especialmente en las comunicaciones— comparables con las que los grandes descubrimientos de Faraday introdujeron con el uso generalizado de la energía eléctrica.

Desde el punto de vista del desarrollo de la noción de campo, el continuador tal vez más significativo de la obra de Maxwell fue Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). Este investigador holandés llegaría a convertirse en un patriarca de la física teórica. Partió de la hipótesis de que la materia está hecha de moléculas cargadas (iones) que interaccionan entre sí vía el éter, el cual sin embargo, permanece invariablemente inmóvil. Como el éter actúa sobre los iones —a través de la fuerza ponderomotriz o fuerza de Lorentz— pero éstos no actúan sobre aquél por el requerimiento de inmovilidad), el éter de Lorentz resulta un sistema dinámico no newtoniano, que viola la ley de acción y reacción. Pronto (en 1892), Lorentz se convenció de que el campo electromagnético mismo —el estado del éter no-newtoniana— tampoco era un sistema newtoniano en su teoría.

Alrededor de 1890, Lorentz se encontró con una contradicción dentro de la teoría de la luz que requirió una solución insólita. Desde tiempo atrás se sabía que la aberración de la luz —es decir, la desviación angular de la luz que nos llega de las estrellas— se podía explicar adecuadamente mediante la teoría de Fizeau (1819-1896), que se deduce de suponer que el éter excesivo, en el interior de la materia, es arrastrado por ésta en su movimiento en el espacio cósmico. Sin embargo, los elegantes experimentos de Albert Michelson (1852-1931) y sus colaboradores demostraron, sin lugar a dudas, que no hay movimiento relativo éter- Tierra. La única salida que encontró Lorentz a esta dificultad para su teoría del éter móvil consistió en inventar una contracción *ad hoc* de los cuerpos en la dirección de su movimiento respecto del éter. Esta es la famosa *contracción* de Lorentz, propuesta simultáneamente por el físico irlandés George Fitzgerald (1851-1901) y redescubierta poco tiempo después, desde perspectivas muy diferentes, por el matemático y filósofo francés Henri Poincaré (1854-1912) y por el joven Einstein. Para Lorentz esta contracción era un fenómeno real, de origen *dinámico* aunque no newtoniano, debida, pensaba inicialmente, al cambio de la fuerza entre el éter y los iones producido por el movimiento; más tarde la supuso generada por el cambio en las *dimensiones* de los electrones en movimiento respecto del éter.


Lorentz jamás renunció a la idea del éter sustancial e inmóvil y a la concepción del campo electromagnético como un estado de dicho éter no newtoniano, ni aun frente al advenimiento de la teoría de la relatividad que asignara a su contracción y a la respectiva transformación temporal —también dependiente de la velocidad y que para Lorentz era un mero cambio de variable, carente de contenido físico— un carácter fundamental. El cambio cualitativo se da con la intervención de Einstein (1879-1955) en el asunto.

Desde muy joven, Einstein se sintió atraído por varias dificultades que observó en la descripción de algunos fenómenos fundamentales. Es muy conocido el hecho de que en 1895 (a los 16 años de edad), siendo estudiante en la pequeña ciudad suiza de Aarau, comprendió que la mecánica de Newton y la teoría de Maxwell eran incompatibles. El argumento es por demás simple, pero no trivial: si suponemos un observador que corre al lado de un rayo luminoso con la velocidad de la luz, lo que deberá percibir son sólo las vibraciones del campo

electromagnético, pues respecto del corredor nada se propaga; sin embargo, ni en la óptica ni en la teoría electromagnética existe luz que no se propague. Luego, aunque la mecánica autoriza a pensar en los términos anteriores, no existe tal luz en reposo y algo deja de funcionar al combinar mecánica y electromagnetismo. Otros ejemplos de que la teoría era aún insatisfactoria, los veía Einstein en la asimetría de la descripción cuando se consideraba la interacción entre un imán y un conductor en movimiento relativo,<sup>7</sup>  o bien, en el fracaso de los intentos por detectar el movimiento terrestre respecto del éter —que Einstein aún no sabía— que condujeron a Lorentz a su hipótesis de contracción de los cuerpos en movimiento.

Einstein partió del argumento de que ni los fenómenos mecánicos ni los electromagnéticos poseen propiedad alguna que corresponda a la noción de reposo absoluto; esta observación le sugirió que "las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica son válidas para todos los sistemas de referencia para los que son válidas las leyes de la mecánica", conjetura que después elevó al nivel de postulado con el nombre de *principio de la relatividad*. Al anterior agregó un segundo postulado que verdaderamente separa a la nueva teoría de la clásica, en el que establece que "la luz viaja en el vacío con la misma velocidad  $c$ , independientemente del estado de movimiento de la fuente emisora"; con ello Einstein logró tener en las manos todas las herramientas con que construyó la relatividad especial y recuperó la consistencia entre la mecánica y el electromagnetismo (a expensas, de modificar apropiadamente a la primera). El primer paso que dio lo llevó a concebir la transformación de Lorentz (como la llamó Poincaré) *como un efecto cinemático*, característico de la estructura del espacio- tiempo que surge de sus postulados. Conviene aquí observar la profunda diferencia que existe entre esta descripción y la de Lorentz, quien en su momento interpretó la contracción por él descubierta, como se ha dicho, como debida al cambio en las fuerzas entre el éter y los iones, generado por el cambio de la velocidad (respecto del éter). Para Einstein se trataba de un efecto universal puramente cinemático y recíproco (independiente de las teorías específicas): si dos observadores se mueven relativamente, cada uno verá las longitudes del otro contraídas, con la misma ley, al medirlas desde su propio sistema de referencia.

La nueva descripción le permitió a Einstein construir la electrodinámica de los cuerpos en movimiento —éste es precisamente el título de su famoso trabajo— a partir de la electro-dinámica de Maxwell para cuerpos en reposo. No aparece en la teoría la *necesidad* de introducir un éter, pues en ningún momento se requiere echar mano de nociones como espacio absolutamente estacionario o velocidad en el espacio vacío en el que tienen lugar procesos electrodinámicos, por lo que Einstein propuso dejar de lado la noción de éter, por superflua. El campo electromagnético se ha transformado con esto en un *estado del espacio* y ha adquirido un *status* ontológico a la par con la materia: el mundo físico está hecho de materia y campos; ambos entes son portadores de atributos físicos sustanciales como energía, momento, etcétera.

Para la relatividad especial la noción de éter es innecesaria; sin embargo, no demanda que se niegue al éter; de hecho, en un trabajo de revisión de 1907, Einstein insistió en que era el éter, entendido como asiento de las fuerzas eléctricas y magnéticas, el que no cabía en la teoría, pues "los campos electromagnéticos aparecen no como estados de una suerte de materia, sino como entes que tienen existencia independiente, de naturaleza similar a la de la materia ponderable y que tienen la propiedad de inercia en común con ella".<sup>8</sup> 

¿Y el campo gravitatorio? En la teoría general de la relatividad que Einstein construyó en el curso de la década 1907-1916, la estructura (la métrica) del espacio-tiempo quedaba determinada por la materia, a través de su campo gravitacional que aparecía así como un elemento irreducible (ineliminable) de la descripción; además, la inercia (masa) del campo gravitatorio, era a su vez fuente de efectos gravitacionales lo que hace que esta teoría no sea lineal. Esto contrasta con el campo electromagnético que puede ser nulo en las teorías clásicas y no interacciona directamente consigo mismo por no poseer cargas. La dualidad irreducible materia-campo gravitatorio —a la que cabría agregar el campo electromagnético que es lógicamente independiente y no es parte estructural indispensable del espacio- tiempo— es poco atractiva o verosímil conceptualmente. Por ello, desde el inicio de esta teoría, Einstein se dio a la tarea —nunca concluida— de elaborar una teoría unificada, en la que se eliminaría tal dualidad vía el descubrimiento de un solo ente ontológico, del que se derivarían todos los demás.

Para la teoría general de la relatividad queda abierta la posibilidad de que no exista cosa tal como "el espacio vacío", libre de toda forma de materia o campos. Y puesto que el campo gravitatorio es irreducible, llena todo el espacio y lo dota de atributos físicos, bien se le puede considerar como el éter de la teoría general de la relatividad. Este punto de vista fue adoptado por Einstein, cuando escribió (1920), por ejemplo, que: "De acuerdo con la teoría general de la relatividad, el espacio sin éter es inimaginable; en tal espacio... no tendrían posibilidad de existir varillas de medición y relojes ni tampoco intervalos espacio- temporales en el sentido de la física..." Espacio-

tiempo, campo gravitatorio y éter se han transformado aquí en una noción única.

## CAMPOS Y VACÍO EN LA FÍSICA CUÁNTICA

Con el advenimiento de la física cuántica, el panorama cambió drásticamente, tanto para los campos como para el éter. De hecho, el término mismo de éter se convirtió en obsoleto —quizá por gastado— y tuvo que cederle su lugar al de *vacío*. Pero este vacío está muy lejos de ser la nada; es, por lo contrario, un agitado océano de energía, tan rico que no sería una grave exageración decir que la física contemporánea es, en mucho, la física del vacío.<sup>9</sup>



El vacío cuántico está —o mejor, como veremos, los vacíos cuánticos están— en constante interacción con la materia ordinaria y determina a través de ello muchas de sus propiedades; es extraordinariamente complejo —muy distante conceptualmente de los modelos mecánicos newtonianos y del reposo— y quizá una yuxtaposición de varios sistemas, cada uno de los cuales puede tener incluso varios estados. Este vacío posee otra característica que lo diferencia esencialmente de sus ancestros precuánticos: a pesar de cualquier cosa que se le hiciera al viejo vacío, seguía siendo vacío; el nuevo, no. Por ejemplo, al darle suficiente energía en condiciones apropiadas, puede llegar a responder dando a cambio partículas y antipartículas.


En términos simples, la situación es la siguiente. Sabemos que la materia común sigue en realidad leyes cuánticas, lo que significa, entre otras muchas cosas, que aun libre, un electrón, digamos, tiene un comportamiento muy complejo y azaroso, aunque desde una perspectiva estadística se comporte con mucha regularidad; estadísticamente hablando, por ejemplo, cumple con precisión la ley de conservación de la energía; sin embargo, su energía instantánea podría diferir arbitrariamente de la que se seguiría de esta ley. Sucede que también los campos obedecen leyes cuánticas y con ellos ocurren cosas similares. Por ejemplo, es un hecho histórico que la primera ley cuántica la descubrió Max Planck (1858-1947) precisamente como una propiedad del campo electromagnético. Además; como en la teoría cuántica el comportamiento de un electrón está descrito por una función que tiene propiedades campales —es en efecto un campo electrónico— también ésta debe ser cuantizada a su vez, dando por resultado que, por ser cuánticos, ¡los electrones deben recuantizarse! (esto se conoce como *segunda cuantización*).

En todos los casos la cuantización otorga propiedades discretas al sistema, similares a las de sistemas compuestos por corpúsculos más o menos independientes, por lo que el lenguaje y la imagen más usados para referirse a estos efectos es el corpuscular. A estas estructuras se les llama *cuantos* (o *quanta*, si se prefiere el latinismo) del correspondiente campo. Por ejemplo, los cuantos del campo electromagnético son los fotones; los cuantos del campo de electrones-positrones pueden ser electrones o positrones, etc. Todos los sistemas cuánticos poseen un estado de mínima energía, a partir del cual pueden ir pasando a los diferentes estados físicamente posibles por acrecentamiento (continuo o discreto, según el caso) de su energía. El estado de mínima energía de un campo corresponde a la ausencia de sus corpúsculos (cero fotones, o cero electrones, etc.) y representa precisamente al *vacío* del campo en cuestión.

Por el hecho de que un campo cuántico se encuentre en su estado de mínima energía, sus propiedades no dejan de ser las características de los sistemas cuánticos; en particular, mantiene la propiedad de ser fluctuante, lo que significa que no *desaparece*. El campo de vacío está entonces en condiciones de interactuar con la materia y de imprimir sus huellas y reflejar su presencia a través del comportamiento de ésta. Si agregamos a esto la rica multiplicidad de vacíos característicos de la teoría cuántica, fácilmente podemos percibir la enorme riqueza y complejidad del mundo físico que suscita este cuadro. Como puede apreciarse, el tema es realmente importante, pero no lo desarrollaremos aquí más allá de algunos comentarios adicionales.

Un primer comentario se refiere al vacío del campo electromagnético. No es difícil convencerse de que se puede llegar a la idea de la posible existencia del vacío del campo de radiación de Maxwell por la vía clásica, es decir, sin recurrir a la teoría cuántica. Se sabe que las cargas aceleradas emiten radiación electromagnética —precisamente así generó Hertz las primeras ondas electromagnéticas intencionalmente producidas por el hombre, y así se siguen generando— Pensemos pues en cada electrón en el Universo como una minúscula antena, todos ellos estarán emitiendo y crearán colectivamente un campo electromagnético en cada punto del Universo, terriblemente complejo y violentamente fluctuante. En condiciones de evolución como las alcanzadas por el Universo, parece razonable suponer que este campo de fondo (llamado de punto cero) resulta estadísticamente estable y, por su carácter fluctuante e ineliminable, es el que se debe identificar con el vacío electromagnético. Aún se ha de completar el argumento, pues se debe tomar en cuenta que ahora cada electrón está inmerso en el campo de vacío que hay en su localidad, por lo que al interactuar y absorber energía de él, adquiere un movimiento aleatorio muy

complejo. Si resulta posible que para cada electrón la tasa media de emisión de energía sea igual a la de absorción, cada átomo se encontrará en equilibrio. Sin embargo, ahora el átomo resulta ser un sistema abierto con propiedades novedosas, en el que se dan permanentemente fenómenos aleatorios. Estas ideas han sido exploradas con cierto detenimiento en los últimos años y constituyen la base de una teoría denominada *electrodinámica estocástica*. Ha sido posible demostrar que muchas de las propiedades cuánticas de los átomos —y hay razones para pensar que podrían ser todas— son originadas por este mecanismo.

Para mostrar con un ejemplo simple algo de la física de estos sistemas, vamos a revisar el siguiente problema. Pensemos en un electrón que se mueve en el espacio libre de fuerzas y campos externos; la única acción que sentirá en este caso provendrá de su interacción con el vacío; consideremos a la del campo de radiación de punto cero como la más importante (lo que sería el caso normal). El electrón en movimiento respecto de este campo sentirá en general una fuerza de fricción proporcional a su velocidad, que tenderá a frenarlo.<sup>10</sup>  Pero, por otro lado, se sabe que este electrón debe mantener su velocidad, pues de otro modo se estaría violando el principio de inercia. ¿Cómo podemos hacer compatibles ambos puntos de vista? Un cálculo (no elemental, pero tampoco complicado) permite mostrar que la fuerza sobre el electrón (no relativista) debida al campo es de la forma

$$\mathbf{F} = -A \left( \boldsymbol{\rho} - \frac{1}{3} \boldsymbol{\omega} \frac{\partial \boldsymbol{\rho}}{\partial \omega} \right) \mathbf{v},$$

donde A es una constante que caracteriza el sistema en interacción con el campo,  $\mathbf{v}$  su velocidad y  $\boldsymbol{\rho}(\omega)$  es la densidad espectral de la energía del campo. El problema se resuelve si esta fuerza de fricción se anula, lo que ocurre si la densidad espectral del campo cumple con la condición  $\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\omega} \delta_{\boldsymbol{\omega}} \boldsymbol{\rho} = 0$ .


La solución de esta ecuación diferencial es  $\boldsymbol{\rho} = C\omega^3$ , lo que quiere decir que un vacío electromagnético con densidad espectral proporcional al cubo de la frecuencia garantiza el movimiento inercial de una carga a través de él. Como es previsible, éste es exactamente el espectro que tiene el campo de vacío, tanto en la electrodinámica cuántica como en la electrodinámica estocástica.

Bien, el electrón puede mantener su velocidad constante en el vacío; pero, ¿qué pasa si se mueve aceleradamente? La respuesta es muy interesante y constituye un tema al que se ha dedicado un esfuerzo considerable en los años recientes. Sucede que la densidad espectral del campo que el electrón ve cuando se mueve aceleradamente, deja de tener la forma simple anterior que corresponde al vacío —es decir, a temperatura nula— y toma la de una distribución de Planck a una "temperatura equivalente" determinada por la aceleración: parecería que el vacío efectivo del electrón acelerado se ha "calentado" y ha perdido su isotropía. Recordemos incidentalmente que en el espacio interestelar la radiación de fondo *no* es de temperatura nula, sino cercana a 3° Kelvin. Respecto de este campo de fondo que representa nuestro sistema natural de referencia, sí es posible determinar el movimiento de la Tierra. En el apéndice a este trabajo —que es de carácter más avanzado por las matemáticas empleadas ahí, pero cuya lectura no es indispensable— se muestra con un ejemplo adicional relativamente sencillo la complejidad que puede alcanzar el vacío al interactuar con la materia.

## APÉNDICE: EL VACÍO DEGENERADO

En este apéndice se muestra a vuelo de pájaro un fenómeno muy general e importante al que ya hemos hecho referencia:

el hecho de que las interacciones modifican (en ocasiones, incluso determinan) las propiedades de las partículas.<sup>11</sup>

 Vamos a ver, en particular, cómo dentro de las teorías contemporáneas llamadas de *norma* (tema que desarrolla Matías Moreno en su exposición), la masa de ciertas partículas surge como consecuencia de sus interacciones. Sin embargo, el lector debe tener presente que el material aquí presentado tiene un carácter matemático mucho más avanzado que el resto del texto y que su lectura es optativa.

Supongamos un campo clásico (es decir, no cuántico) complejo  $\phi$ ; una teoría típica de este campo se construye a partir de un lagrangiano como el siguiente:

$$L = (\delta_\mu \phi) (\delta^\mu \phi^*) - \mu^2 \phi \phi^* - \lambda (\phi \phi^*)^2 - \tau - \nu$$

El término  $\tau = (\delta_\mu \phi) (\delta^\mu \phi^*)$  (que es no negativo) representa la versión relativista de la energía cinética, mientras que

$$\nu = \mu^2 \phi \phi^* + \lambda (\phi \phi^*)^2 = \mu^2 \phi + \lambda \phi^2 \dots \phi = \phi \phi^*$$

es un potencial. Normalmente  $\mu$  representa la masa del campo  $\phi$ , por lo que  $\mu^2$  es real y positiva; sin embargo, podemos ser más generales y aceptar a  $\mu$  como un parámetro, lo que significa que debemos considerar valores positivos y negativos para  $\mu^2$ . El término  $\lambda^2 = \lambda (\phi \phi^*)^2$  describe una interacción del campo  $\phi$  consigo mismo, es decir, es un término que genera una fuente para el campo  $\phi$ , la cual depende del propio campo  $\phi$  (éste es un típico ejemplo de una teoría no lineal, con autointeracciones). Una característica muy importante de esta teoría es que  $L$  (y  $\tau$  y  $\nu$  por separado también) es invariante frente a la transformación *local* de norma ( $\theta$  es una constante)

$$\theta(\mathbf{x}) \rightarrow \theta'(\mathbf{x}) = e^{-i\theta} \phi(\mathbf{x}) \dots (1)$$

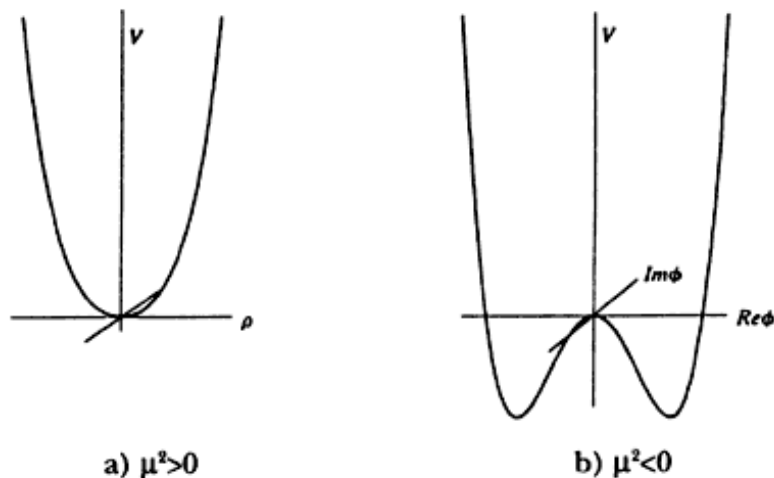
Considerado el potencial  $\nu$  como una función de  $\phi$ , posee mínimos sólo si  $\lambda > 0$ , que es el único caso que estudiaremos; entonces, si  $\mu^2 > 0$ ,  $\nu$  posee un mínimo para  $\phi = 0$ , es decir, para  $\phi \geq 0$ , lo que corresponde al estado base o vacío de este sistema, el que obviamente es invariante frente a la transformación de norma (1). Todo resulta normal, pero no se obtiene nada especialmente interesante. Consideremos, sin embargo, el caso  $\mu^2 < 0$ , por lo que  $\mu$  *no* es más una masa. En este caso,  $\phi = 0$  corresponde a un máximo, como puede apreciarse en la figura, y el mínimo está fuera del origen y ocurre para

$$\phi = -\mu / 2\lambda = R^2/2$$

De este resultado se sigue que el campo complejo  $\phi$  que corresponde al estado de vacío tiene la forma

$$\phi_{\text{vacío}} = (R/2) e^{i\zeta}$$

con  $\zeta$  una fase arbitraria. Hemos obtenido así, no uno sino un continuo de estados de vacío para este sistema (vacío degenerado); como la solución en el origen es inestable, éstos son los verdaderos vacíos del campo, cada uno de los cuales ha dejado de ser invariante frente a la transformación (1) de invariancia del lagrangiano. En otras palabras, el estado de vacío de este campo posee menos simetrías que el lagrangiano del cual se deriva y es degenerado; o bien, el estado de menor energía no es el más simétrico. Cuando esto sucede, se acostumbra decir que ha ocurrido una ruptura espontánea de la simetría."12



Los diferentes estados del campo  $\phi$  los podemos escribir ahora en la siguiente forma, separando sus partes real  $z$  e imaginaria  $X$  (esto equivale a tomar como vacío el que se encuentra sobre el eje real):

$$\phi(\mathbf{x}) = (1/2)(\mathbf{R} + \zeta(\mathbf{x}) + iX(\mathbf{x})),$$

donde los nuevos campos  $\zeta$  y  $X$  son reales y nulos en el estado base. Con esta escritura, el lagrangiano resulta (omitiendo términos constantes que son dinámicamente irrelevantes):

$$L = \frac{1}{2}(\delta\mu x)^2 + \frac{1}{2}(\delta\mu\zeta)^2 - \lambda R^2\zeta^2 - \lambda R\zeta(\zeta^2 + x^2) - \frac{1}{4}\lambda(\zeta^2 + x^2)^2$$

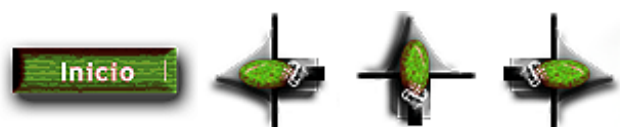
Esta expresión puede parecer muy complicada y casi incomprensible. Pero si comparamos con el lagrangiano original vemos que ella corresponde a un campo real  $x$  sin masa, mas un campo  $\zeta$  con masa:

$$m_\zeta = 2\lambda R^2,$$

los cuales interaccionan entre ellos y entre sí mismos. La teoría ha generado en esta forma, a partir de un campo  $\phi$  complejo sin masa, dos campos reales, uno sin masa y otro con masa, cuya ley de interacción queda determinada por la propia teoría. Nótese de manera particular que la masa  $m_\zeta$  está determinada por la constante de autoacoplamiento del campo inicial  $\lambda$ , y por el valor del vacío a través de  $R$ .

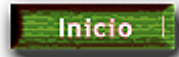
## BIBLIOGRAFÍA

- Boyer, T. H. "The Vacuum in Classical Physics". *Scientific American*, 253 (2), 70 (agosto de 1985).
- Braun, E. *Una faceta desconocida de Einstein*. Fondo de Cultura Económica-SEP, México, 1989, Colección La Ciencia desde México.
- Cetto, A. M. *La luz*. Fondo de Cultura Económica-SEP, México, 1989. Colección La Ciencia desde México.
- De la Peña, L. *Albert Einstein, navegante solitario*. Fondo de Cultura Económica-SEP, México, 1989, colección La Ciencia desde México.
- De la Peña, L. y A. M. Cetto, "Teorías estocásticas de la mecánica cuántica". *Rev. Mex. Fis.* 37 (1991), 17.
- Dodd, J. E. *The Ideas of Particles Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1984.
- Einstein, A. *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Editado y anotado por R. Fürth, Dover, 1956.
- Einstein, A. (1949) "Autobiographical Notes". En P. A. Schilpp. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, 1970.
- Faraday, M. (1831) *Experimental Researches in Electricity*. Dover, 1965.
- Lorentz, H. A., A. Einstein, H. Minkowski, y H. Weyl, 1923, *The Principle of Relativity* (anotado por A. Sommerfeld). Dover.
- Maxwell, J. C. (1891) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, 1954.
- Nersessian, Nancy J. *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Países Bajos, 1984. El autor ha descansado *in extenso* en esta obra durante la elaboración de las notas.
- Podolny, R. *Something Called Nothing*. Mir Publishers, Moscú, 1986.



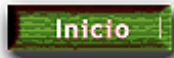
2. El primer trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano (que sometió como tesis a la Universidad de Zurich y, por ello, se publicó después de otros suyos sobre el mismo tema) se titulaba precisamente *Nueva determinación de las dimensiones de las moléculas*. La introducción a este trabajo concluye diciendo "... una determinación exacta de las dimensiones atómicas es así posible. Por otro lado, si las predicciones sobre este movimiento resultan incorrectas, se tendrá un argumento de peso contra la concepción cinético-molecular del calor".

---



3Esta imagen es cercana a la del astrónomo, físico y filósofo croata Rudjer Josip Boscovich (1711-1787) quien concebía a los átomos como centros rodeados de fuerzas atractivas y repulsivas.

---



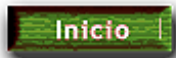
4 Nótese que este último es el principio de operación de los transformadores; cuando hay movimiento, se trata del principio de operación de los dínamos; ambos dispositivos fueron creados por vez primera por Faraday, al igual que el motor eléctrico.

---



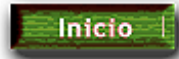
5 En este contexto, que corresponde al de la física clásica, un campo es una función continua, definida en todo el espacio, y que puede representar muy diversas cantidades físicas, como un flujo, una velocidad, una intensidad, etc. Por ejemplo, el calor en cada punto de una sala es un campo, y también lo es la velocidad con que fluye el agua de un río, o la presión oscilatoria del aire puesto en vibración por un sonido.

---



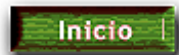
6 Desde el punto de vista de principios, la óptica se transforma en una rama "aplicada" del electromagnetismo. Esto no debe interpretarse, sin embargo, en un sentido reduccionista: la óptica continúa existiendo como una rama específica de la física, con sus propias leyes y metodología, productos de la complejidad, importancia y especificidad de los problemas que aborda. Algo análogo sucede, por ejemplo, con la hidrodinámica y tantas otras ramas de la mecánica.

---



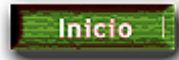
7 La explicación usual antes de la relatividad dependía de si se consideraba al imán fijo y al conductor en movimiento, o viceversa. Si se tomaba el imán en movimiento y al conductor en reposo (hoy añadiríamos "respecto a laboratorio"). se consideraba que el imán generaba a su alrededor un campo eléctrico, que producía una corriente en el conductor. Pero si suponemos al imán fijo y al conductor en movimiento, no hay campo eléctrico alrededor del imán, sino que se induce una fuerza electromotriz en el conductor, la que genera las corrientes observadas. Esta asimetría en la descripción Einstein la consideraba inadmisibile, pues ambas situaciones son enteramente equivalentes si se parte de la hipótesis —clara y natural para Einstein, como se aprecia en la lectura de su primer trabajo sobre la teoría de la relatividad— que sólo importa el movimiento *relativo* entre ambos cuerpos. Sin embargo, sí hay asimetría entre ambos casos —si se postula como Maxwell y Lorentz hacían— que el movimiento *debe* describirse respecto del éter.

---



8 En 1905 Einstein demostró su fórmula general  $E = mc^2$ , que asigna una masa  $m$  a la energía  $E$ , cualquiera que sea la naturaleza de esta última; puesto que los campos poseen energía, adquieren con ello masa y su concomitante inercia —e incluso generan con ella efectos gravitatorios.

---



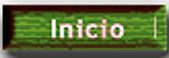
9 Esta afirmación puede ser injusta aunque no engañosa; no debe olvidarse que hay una intensa actividad de investigación también en ramas —como sistemas dinámicos clásicos— en las cuales la noción de vacío es irrelevante (al menos hasta hoy en día).

---



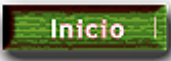
10 Esta fuerza se debe a que la energía de cada modo del campo depende de su frecuencia, que se modifica en forma diferente en la dirección del movimiento y en la opuesta, debido al efecto Doppler.

---



11 En la jerga de los físicos se dice que las interacciones *visten* a las partículas.

---



12 Otro ejemplo simple y muy conocido es una barra cilíndrica que, sujeta a una presión axial, acaba por doblarse en alguna dirección, rompiendo con ello la simetría axial; o bien, un material ferromagnético, cuyo estado base distingue una dirección definida debida a la magnetización, pero cuyo lagrangiano posee simetría esférica. Un ejemplo multinacional está dado por una pelotita de ping-pong en la cima de un sombrero de charro: el más leve soplo la hará descender hacia el valle formado por las alas, rompiéndose la simetría, pero alcanzándose una situación más estable. Este último ejemplo modela bien al potencial  $v$  analizado en el texto. Por otro lado, nótese el uso meramente convencional y un tanto inapropiado que se hace del término espontáneo.

---




# VI. LA CONTRIBUCIÓN DE FARADAY A LA TEORÍA DE DISOCIACIÓN ELECTROLÍTICA

JOSÉ L. CÓRDOVA F.

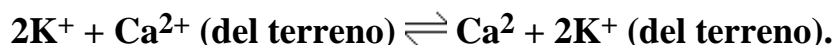
## RESUMEN

Se presentan los antecedentes científicos y filosóficos que llevaron a Faraday a proponer la disociación electrolítica en los términos del modelo de Boscovich. Se analizan y discuten someramente los conceptos y experimentos científicos que permitieron a Svante Arrhenius proponer, basado en la contribución de Faraday, la Teoría de Disociación Electrolítica. El trabajo concluye mencionando que las investigaciones de Faraday contribuyeron indirectamente al nacimiento de la fisicoquímica como ciencia.

## INTRODUCCIÓN

EN 1850, nueve años antes de que naciera Arrhenius, 17 años antes de que muriera Faraday, el *Journal of the Royal Agricultural Society of England* publicó dos artículos <sup>13</sup>  que describían el fenómeno del intercambio iónico en los terrenos de cultivo. En uno de ellos se mencionaba que el cloruro de potasio podía ser retenido por el terreno a pesar de las lluvias. El dispositivo experimental empleado para comprobarlo era muy sencillo: una caja con tierra y perforaciones en el fondo. Al analizar el líquido que salía de la caja después de verter solución de cloruro de potasio, se encontró que contenía cloro pero nada de potasio; éste había sido reemplazado por calcio y magnesio.

Hoy día se representa lo anterior con:



La explicación, como toda aquella de carácter científico, es resultado de la colaboración de muchos científicos. En este trabajo se intenta ilustrar el papel que en ello tuvieron dos de ellos: Faraday y Arrhenius.

En tiempos de Faraday (1820) era del dominio científico la existencia de dos tipos de electricidad, originalmente llamados vítrea y resinosa. Las reacciones químicas se podían explicar entonces en términos de atracción y repulsión eléctricas. Así, los polos de un circuito atraían a distancia los componentes de una molécula, destruyéndola.

## EL MODELO DE DISOCIACIÓN DE FARADAY

Michael Faraday notó experimentalmente que no era suficiente la cercanía de los polos eléctricos para producir una reacción química: hacía falta una descarga eléctrica. De una manera semejante había hallado que no se podía magnetizar agujas metálicas con polos eléctricos sino que se necesitaba una descarga. El experimento al que nos referimos consistió en colocar un papel filtro humedecido con solución de yoduro de potasio entre dos terminales cargadas eléctricamente. Cuando se libera yodo, el papel toma su característico color violeta, de forma que era fácil comprobar si había tenido lugar una reacción química. Sin embargo, repetimos, no bastaba la cercanía de los polos: debía producirse una descarga eléctrica para liberar el yodo.

A fin de interpretar el fenómeno, Faraday propuso que los componentes de las moléculas de yoduro de potasio emigraban en direcciones opuestas intercambiando continuamente de pareja hasta transformarse en especies químicas libres en los polos; la corriente eléctrica producía una perturbación a través de la solución química, que llevaba a la liberación de yodo.

Igual que su maestro H. Davy, Faraday conocía los trabajos de Gowin Knigh y del jesuita Roger Boscovich, cuyas obras capitales tienen títulos muy reveladores. La del primero es: *Intento de demostrar que todos los fenómenos en la naturaleza pueden explicarse por dos principios activos simples: atracción y repulsión*; y la de Boscovich: *Teoría de filosofía natural elaborada segun la única ley de las fuerzas existentes en la naturaleza*.

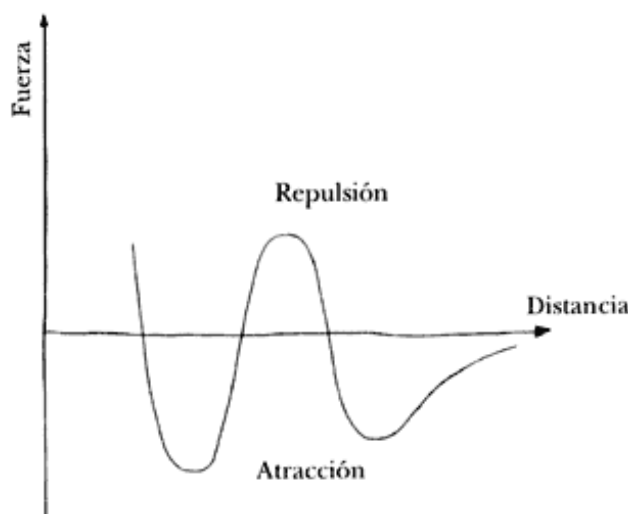
La unidad y convertibilidad de las fuerzas resultaba más consistente a las convicciones religiosas de Faraday, de manera que aceptó el modelo de Boscovich, del que se hablará a continuación.

## EL MODELO ATÓMICO DE BOSCOVICH

Boscovich elaboró en 1758 un modelo atómico que combinaba las fuerzas de atracción y repulsión de manera que el patrón de fuerzas de un átomo boscovicheano sería como el que se muestra en la figura VI. 1.

La fuerza entre los átomos resultaba repulsiva a ciertas distancias y atractiva a otras. Nótese que, a distancias grandes, la fuerza era atractiva, de acuerdo con la ley de la gravitación de Newton; además, cada punto de intersección de la curva con el eje X representaba un punto de equilibrio, necesario para la existencia de compuestos químicos.

El modelo atómico de Boscovich partía de unas cuantas suposiciones y bastaba un solo tipo de partículas para explicar la gran diversidad de sustancias, y emplear, además, una sola curva de fuerza interatómica; con ello, las fuerzas químicas y gravitacionales se reducían a una sola. Como podrá suponerse, este modelo era puramente cualitativo; no se habían desarrollado instrumentos, ni experimentales ni matemáticos como para hacer predicciones cuantitativas.



**Figura VI.1. Modelo atómico de Boscovich.**

Ya se mencionó que la adhesión de Faraday al átomo de Boscovich tuvo raíces ideológicas. La doctrina de la unidad y convertibilidad de las fuerzas de la naturaleza (la *Naturephilosophie* alemana del siglo XIX) contradecía al materialismo inglés y ofrecía un lugar al mundo del espíritu. Faraday era un hombre muy religioso y es probable que optara por el modelo boscovicheano porque hallaba en él más coherencia con la creación de Dios, quien no dejaría a los átomos materiales en interacción caótica.

Según el modelo de Boscovich, los compuestos químicos eran agregados de átomos cuyas propiedades eran resultado de patrones de fuerzas de partículas puntuales. Si se permite el anacronismo, los átomos debían entenderse como interpenetraciones de campos de fuerza. Según esto, los átomos de Faraday no eran bolas de billar atractivas o repulsivas, sino centros de un complejo nudo de fuerzas.

Volviendo a la disociación del yoduro de potasio, la explicación que Faraday propuso fue la transmisión de una vibración gracias a la interacción de los átomos; en vista de que las fuerzas entre los átomos eran atractivas a unas distancias y repulsivas a otras, la perturbación se trasmitía en la solución hasta producir yodo libre.

La aportación de Faraday a la teoría de disociación electrolítica se puede resumir en los siguientes puntos:

- 1) El cambio químico se debe al paso de electricidad y no a la simple atracción eléctrica.
- 2) El cambio químico se da en los electrodos. Sólo cuando el ion yodo llega al electrodo se transforma en átomo de yodo.
- 3) El paso de la corriente eléctrica se debe a un intercambio de partículas de distinta carga: los iones.

Debe subrayarse que, para Faraday los iones eran producidos por la diferencia de potencial eléctrico. Como se verá más adelante, Arrhenius propuso que para formar iones bastaba con la disolución de una sal en agua, *sin necesidad de polos eléctricos*.

## EL MODELO DE ARRHENIUS

Aproximadamente en 1857, Rudolph Clausius postuló que en una solución existía un pequeño número de iones producidos por las colisiones azarosas de las moléculas. Puesto que en una solución, como en los gases, las partículas se mueven a muy diferentes velocidades, era posible que algunas tuvieran suficiente energía como para romper las moléculas del compuesto en una colisión. Según Johann Wilhelm Hittorf las partículas resultantes de estas colisiones transportaban la carga eléctrica en las soluciones y eran los iones de Faraday.

Svante Arrhenius consideró las ideas anteriores al formular su teoría de disociación electrolítica que presentó en su tesis de doctorado (Universidad de Uppsala, 1884). No es ocioso decir que esta tesis recibió comentarios muy poco elogiosos por parte de sus profesores. Uno de ellos, Per Theodor Cleve (descubridor de los elementos holmio y tulio), afirmaba:

...no tiene ningún sentido decir que en una solución de cloruro de potasio el cloro y el potasio están separados el uno del otro...

Arrhenius proponía que al disolver el cloruro de potasio en agua, los iones cloro y potasio se formaban sin necesidad de corriente eléctrica. Para entonces, la idea que prevalecía al respecto entre los químicos era la de Faraday: los iones se producen por el paso de la corriente eléctrica a través del electrolito; precisamente la palabra electrolito significa "destruido por la electricidad".

A pesar de las oposiciones, la tesis de Arrhenius fue aprobada pero no se le autorizó para ser profesor de la universidad.

Obviamente no era Suecia el lugar donde podía consolidarse la teoría, de modo que Arrhenius escribió a Rudolf Clausius, Lothar Meyer, Wilhelm Ostwald y Jacobus van't Hoff y les envió copias de su tesis. El entusiasmo e influencias de Ostwald y Van't Hoff ayudaron a difundir la teoría de Arrhenius, a pesar de la oposición de científicos de la talla de Mendeleyev, Kahlenberg y Lodge. El rechazo llegó a darse en términos tan acres como los de Lodge:

el señor Arrhenius es demasiado generoso en la manipulación de datos imaginarios...de esta forma logra una enorme confusión de la cual puede obtener sus llamadas deducciones teóricas.

Sir Oliver Lodge sugirió, con 50 años de anticipación, la emisión solar de ondas de radio.


Ahora bien, entrando en materia, los experimentos hechos por Arrhenius para su tesis investigaban la conductividad de electrolitos empleando un depolarizador desarrollado poco antes. Este consistía en un conmutador manual que permitía cambiar el sentido de la corriente eléctrica varias veces por segundo, de manera que se evitaba la acumulación de cargas y, por consiguiente, la heterogeneidad de la solución. En otras palabras, con esta técnica Arrhenius logró, por primera vez, mediciones confiables de la conductividad de electrolitos.

Arrhenius trabajó además con soluciones muy diluidas (del orden de  $5 \times 10^{-4}$  equivalentes/litro), de manera que pudo llegar a conclusiones muy originales (aunque no totalmente fundamentadas). Por ejemplo:

- 1) Para soluciones muy diluidas, la conductividad específica de una solución salina es aproximadamente proporcional a su concentración en idénticas condiciones.
- 2) La conductividad de una solución diluida de dos o más sales es igual a la suma de las conductividades que tendrían las soluciones de cada sal a la misma concentración.
- 3) La conductividad de una solución es igual a la suma de las conductividades de soluto y solvente.
- 4) Si no se observan estas leyes esto se debe a que hay acción química entre soluto y solvente.
- 5) La resistencia eléctrica aumenta con el peso molecular del solvente.

Hoy día la quinta conclusión se considera incorrecta: la resistencia eléctrica aumenta con la constante dieléctrica del soluto (no con el peso molecular). Sin embargo, para las sustancias que Arrhenius empleó (agua, alcoholes, éteres), la constante dieléctrica aumenta con la masa molar.

La importancia de la tesis de Arrhenius, con todo, no radica tanto en las mediciones experimentales cuanto en las ideas que al respecto comenzó a elaborar. Por ejemplo:

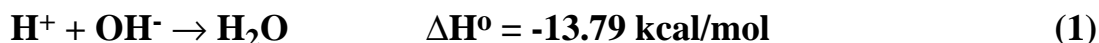
...la solución acuosa de cualquier hidrato<sup>14</sup>  se compone, además del agua por dos partes: una activa, electrolítica, y otra inactiva, no electrolítica. Estas tres sustancias están en equilibrio químico, de manera que al aumentar la dilución aumenta la parte activa y disminuye la inactiva.

A estas partículas submoleculares las llamó *iones*, empleando el mismo término que Faraday. Como mencionamos antes, la proposición de una parte activa y otra inactiva ya la había hecho Clausius al afirmar que los choques entre las partículas podían romper las moléculas. Nótese, por otro lado, que la formulación de Arrhenius empleaba el concepto de equilibrio químico para explicar el comportamiento de las soluciones acuosas.

Continuemos con la tesis de Arrhenius:

... el calor de neutralización liberado por la transformación de una base perfectamente activa y un ácido perfectamente activo es sólo el calor de actividad del agua, donde el calor de actividad es el calor empleado para transformar una sustancia del estado inactivo al activo.

El lector habrá observado que "perfectamente activo" significa completamente disociado, y que la reacción entre una base fuerte y un ácido fuerte es, simplemente:



Experimentalmente se encuentra que  $\Delta H^\circ$  es independiente de la naturaleza del ácido y la base, lo cual apoya fuertemente a la teoría de la disociación de Arrhenius. En efecto si  $\Delta H^\circ$  es constante es porque, posiblemente, siempre se tienen los mismos reactantes y los mismos productos. Considerando al ácido fuerte HA y la base fuerte BOH; si éstos, como afirma Arrhenius, están disociados completamente, dan lugar a:



y la reacción de neutralización es:



es decir



En resumen: la reacción de un ácido fuerte y una base fuerte es, simplemente, la reacción (1) y, en consecuencia, existen iones  $H^+$  y  $OH^-$  en solución sin necesidad de corriente eléctrica.

A fin de explicar las variaciones experimentales Arrhenius definió un "coeficiente de actividad" igual al cociente del número de iones realmente contenido en la solución y el número de iones que habría si el electrolito se transformara completamente en iones. Dicho de otra manera: mientras más fuerte fuese un ácido, base, etc., mayor sería su coeficiente de actividad y, de acuerdo con las ecuaciones de equilibrio químico, el coeficiente de actividad en la dilución infinita. Obviamente, las soluciones que empleó Arrhenius estaban muy diluidas (aproximadamente  $5 \times 10^{-4}$  equivalentes/litro).

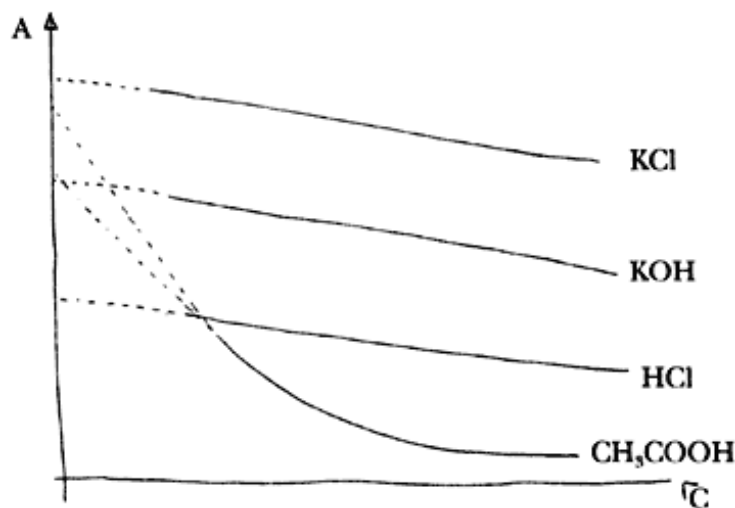
Arrhenius también consideró la ley de migración iónica independiente de Kohlrausch:

$$\Lambda = \alpha(m_+ + m_-)$$

donde  $\Lambda$  es la conductividad equivalente,  $m_+, -$  es un coeficiente de proporcionalidad (llamado "movilidad iónica") y  $\alpha$  es el "coeficiente de actividad" introducido por Arrhenius (hoy conocido como "grado de disociación").

Cuando Kohlrausch inició su investigación acerca de la capacidad de las soluciones para conducir corriente eléctrica, el tema era asunto de una gran controversia. Por ejemplo, se discutía la validez de la ley de Ohm para las soluciones, pues los resultados eran poco consistentes. Como se mencionó, la única corriente eléctrica disponible en el laboratorio era corriente continua, la cual produce polarización en los electrodos e influye en las mediciones, por Arrhenius se evitó ese problema utilizando un depolarizador.

También influían en las mediciones el tiempo empleado (pues se calentaba la solución), la intensidad de la corriente (afectaba la homogeneidad de la solución); sin embargo, a pesar de estas dificultades se pudo llegar a relaciones empíricas valiosas. Por ejemplo, la gráfica de conductividad equivalente de un electrolito ( $\Lambda$ ) contra la raíz cuadrada de la concentración en equivalentes/litro ( $\sqrt{c}$ ), de la figura VI.2 es, para unas sustancias, una recta, mientras que para otras es una curva. Las sustancias que dan lugar a rectas fueron llamadas "electrolitos fuertes" por su gran reactividad química: HCl, KOH, KCl. Las otras como el  $CH_3COOH$ , fueron nombradas "electrolitos débiles". Para los electrolitos fuertes, cuya gráfica es una recta, se pueden hacer extrapolaciones para dilución infinita; sin embargo, para los electrolitos débiles la extrapolación es poco precisa. El punto anterior es muy importante porque el comportamiento de una solución muy diluida es más predecible que el de una concentrada, pues las interacciones de las partículas del soluto son bajas.



**Figura VI.2. Conductividad equivalente vs  $\sqrt{c}$**

En 1876 Kohlrausch pudo señalar que en soluciones muy diluidas los iones tienen un movimiento independiente de su pareja. En una solución diluida cada especie electroquímica tiene una conductividad propia. (cuadro VI. 1) <sup>15</sup>

De hecho Kohlrausch proponía que la conductividad de la solución era igual a la suma de las conductividades de los componentes:

$$\Lambda = \lambda^+ + \lambda^-.$$

Se emplea  $\Lambda^\circ$  para indicar conductividad a dilución infinita, pues en este caso la concentración de soluto es igual a cero.

El cuadro VI.I muestra las conductividades de algunos electrolitos fuertes a dilución infinita<sup>16</sup> y  $\Delta$  representa la diferencia entre las conductividades de dos soluciones con un ion común, por ejemplo:

$$\Delta = \Lambda^\circ \text{KCl} - \Lambda^\circ \text{LiCl}$$

pero por la proposición de Kohlrausch:

$$\begin{aligned} \Delta &= \lambda^\circ \text{K}^+ + \lambda^\circ \text{Cl}^- - (\lambda^\circ \text{Li}^+ + \lambda^\circ \text{Cl}^-) \\ &= \lambda^\circ \text{K}^+ - \lambda^\circ \text{Li}^+ \end{aligned}$$

En el cuadro VI.1 se ve que el resultado  $\lambda^\circ \text{K}^+ - \lambda^\circ \text{Li}^+$  es independiente de las sales empleadas.

En el párrafo anterior se señaló la dificultad de determinar  $\Lambda$ , pues la curvatura de la línea hace poco confiable la extrapolación; sin embargo, la ley de Kohlrausch permite calcular  $\Lambda_0$  para el ácido acético.

$$\begin{aligned} \Lambda^\circ \text{HAc} &= \Lambda^\circ \text{NaAc} + \Lambda^\circ \text{HCl} - \Lambda^\circ \text{NaCl} \text{ (electrolitos fuertes)} \\ &= \lambda^\circ \text{Na}^+ + \lambda^\circ \text{Ac}^- + \lambda^\circ \text{H}^+ + \lambda^\circ \text{Cl}^- - \lambda^\circ \text{Na}^+ + \lambda^\circ \text{Cl}^- \\ &= \lambda^\circ \text{H}^+ + \lambda^\circ \text{Ac}^- \end{aligned} \quad (3)$$

Kohlrausch encontró cómo cuantificar una propiedad característica de las especies químicas que intervienen en el transporte de corriente en una solución. Esta propiedad es independiente del compuesto del cual procede y, evidentemente, no es afectada por el ion de carga opuesta. Sin embargo, para poder afirmar que los iones tienen existencia aun sin la corriente eléctrica hacían falta los trabajos de Raoult y las aportaciones teóricas de Clausius y Van't Hoff, que fueron sintetizados de manera elegante y completa por Arrhenius.

**Cuadro VI.1. Conductividades de electrolitos fuertes.**

<i>Electrolito</i>	$\Lambda_0$ <i>Conductividad (<math>\text{m}^2/\text{ohm}</math>)</i>	$\Delta = \lambda_0 \text{K}^+ - \lambda_0 \text{Li}^+$
KCl	0.014986	3.483 X 10 <sup>-3</sup>
LiCl	0.011503	
KClO <sub>4</sub>	0.014004	3.406 X 10 <sup>-3</sup>
LiClO <sub>4</sub>	0.010598	
	$\Lambda_0$	$\Delta = \lambda_0 \text{Cl}^- - \lambda_0 (\text{NO}_3)^-$
LiCl	0.01503	4.93 x 10 <sup>-4</sup>
LiNO <sub>3</sub>	0.011010	
KCl	0.014986	

KNO <sup>3</sup>	0.014498	4.90 x 10 <sup>-4</sup>
HCl	0.042616	
HNO <sup>3</sup>	0.042130	4.83 x 10 <sup>-4</sup>

## LAS PROPIEDADES COLIGATIVAS Y LA TEORÍA DE ARRHENIUS

Por los trabajos de Clemens Heinrich von Babo (1847) y Adolf Wullner (1856) era un hecho conocido que la presión de vapor de un solvente disminuía al agregar un soluto y que dicha disminución era aproximadamente proporcional al peso del soluto. Desde tiempos de Fahrenheit se hacía uso de este efecto: él mismo lo empleó (en 1722) para definir uno de los puntos de referencia de su escala termométrica: la temperatura de fusión de una solución de sal y agua. Fahrenheit había notado también el aumento en la temperatura de ebullición por la presencia de un soluto.

Obviamente, en las observaciones de Fahrenheit, de Von Babo o de Wullner no se incluía a la masa molar del soluto, pues no se había desarrollado este concepto. Por otro lado, al experimentar con sustancias electrolíticas se obtenían resultados poco consistentes, como se explicará más adelante.

Francois Marie Raoult, por el contrario, empleó principalmente sustancias orgánicas (que generalmente son no electrolíticas) para investigar las propiedades de las soluciones (presión de vapor, temperaturas de ebullición y congelación). Encontró que los cambios en esas propiedades eran aproximadamente proporcionales al peso del soluto (1880). Ya con el desarrollo del concepto de masa molar, Raoult pudo hallar que la disminución del punto de congelación de cualquier solución de concentración 1 g en 100 g de agua, multiplicada por la masa molar, era una constante

$$M \times \Delta t = k_1 \text{ constante} \dots \dots \dots (4)$$

**Cuadro VI.2.  $\Delta t_{\text{teor}}$  y  $\Delta t_{\text{exp}}$  para algunas soluciones.**

	<i>0.001 molal</i>		<i>0.01 molal</i>		<i>0.1 molal</i>	
	$\Delta t_{\text{teor}}$	$\Delta t_{\text{exp}}$	$\Delta t_{\text{teor}}$	$\Delta t_{\text{exp}}$	$\Delta t_{\text{teor}}$	$\Delta t_{\text{exp}}$
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	0.00186	0.00186	0.0186	0.0186	0.186	0.186
NaCl	0.00186	0.00366	0.0186	0.0360	0.186	0.348
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.00186	0.00528	0.0186	0.0501	0.186	0.432
K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	0.00186	0.00710	0.0186	0.0626	0.186	0.530

Esta relación se podía aplicar también a la temperatura de ebullición y a la presión del vapor. Sin embargo, cuatro años más tarde Raoult reportó que esa relación fallaba con electrolitos, pero se aplicaba a los radicales que componían las sales como si éstos estuvieran separados en la solución.

Raoult empleó la ecuación 4 para determinar las masas molares de azúcares y alcoholes, sin embargo no investigó el origen de las desviaciones de las sales, ejemplificados en el cuadro VI. 2.

La ecuación 4 puede reorganizarse considerando que implica concentración de 1 g por 100 g de agua:

$$\frac{m_1}{m_2} = k_2 \text{ (constante), (5)}$$

y dividiendo la ecuación 4 entre la 5, obtenemos

$$\frac{M \Delta t m_2}{m_1 k_2} = k_1$$

$$\Delta = \left( \frac{m_1}{M} \right) \left( \frac{k_1}{k_2 m_2} \right)$$

$$= k_3 n,$$

donde  $n$  es el número de moles de partículas de solutos y  $k_3$  una constante.

Es interesante observar que el valor  $\Delta t_{\text{teor}}$  para las tres sales se aproxima a  $\Delta t_{\text{exp}}$  cuando se multiplica respectivamente por 2, 3 y 4, respectivamente. Si el valor de  $\Delta t$  es función del número de partículas, como lo sugiere la ecuación 6, la conclusión será que hay 2, 3 y 4 veces el número teórico de partículas.

**Cuadro VI.3. coeficiente empírico  $i$ .**

molalidad=	0.001	0.01	0.1
NaCl	1.97	1.94	1.87
MgSO <sub>4</sub>	1.82	1.53	1.21
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.84	2.69	2.32
K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	3.82	3.36	2.85

El mismo problema encontró Van't Hoff al investigar la presión osmótica de soluciones electrolíticas; para resolverlo ideó un coeficiente empírico  $i$  que corregía los resultados teóricos (Cuadro VI.3).

De hecho ambos términos  $i$  y  $\alpha$ , están relacionados por la estequiometría de la reacción



En efecto, si consideramos la reacción 7 como reversible y en equilibrio químico, el número total de partículas ( $n$ ) en la solución es:

$$n = 2\alpha c^0 + (1 - \alpha)c^0 = c^0 (\alpha + 1) \text{ con } \alpha \gg i \dots\dots\dots (8)$$

donde  $c^0$  es la concentración molar inicial de la solución, y  $\alpha$  el coeficiente de actividad de Arrhenius, es decir:

$$\alpha = \frac{n_{A^+}}{N_{AB}^0} = \frac{n_{B^-}}{n_{AB}^0}.$$

Los valores experimentales de  $i$  y  $\alpha + 1$  fueron tan aproximados que Arrhenius no titubeó en hablar de disociación a fin de explicar las anomalías en las propiedades coligativas. Para ello bastaba atribuir diferentes grados de disociación a las soluciones, lo que dependía de la naturaleza y concentración de las especies químicas.

Tomando como ejemplo una solución 1 M de NaCl, cuya temperatura experimental de congelación es -3.39°C, si se considera la reacción de disociación total:



habrá el doble de partículas en solución (una concentración 2 M) y una temperatura de congelación teórica de -3.72°C, mayor que el valor experimental. Arrhenius propuso que la reacción de disociación de la sal es reversible:



en ella el equilibrio químico entre las tres especies produce un número menor de partículas que el debido a una disociación total. Como puede verse en el cuadro VI.2, al disminuir la concentración de la solución de NaCl, el coeficiente empírico  $i$  se acerca a 2.

Sin embargo, ¿cómo admitir que aumenta el número de partículas en una sal sin una corriente eléctrica?, ¿cómo explicar que una partícula de Cl en la solución tenga propiedades físicas y químicas tan diferentes a las del cloro gaseoso? Tales fueron las principales objeciones a la teoría de Arrhenius la cual, sin embargo, pudo explicar:

- a) las anomalías de la temperatura de congelación de electrolitos,
- b) la diferencia entre electrolitos fuertes y débiles,
- c) las anomalías en los valores de la presión osmótica de los electrolitos,
- d) las anomalías en la temperatura de ebullición de electrolitos,
- e) el valor constante del calor de neutralización de ácidos y bases fuertes.
- f) la variación en la presión de vapor de las soluciones electrolíticas.

En una carta a Van't Hoff (30 de marzo de 1877), Arrhenius presentaba un razonamiento similar al presentado en este trabajo. La respuesta de Van't Hoff fue:

Su carta me ha aclarado considerablemente la constitución de las soluciones. Puesto que los electrolitos se descomponen en sus iones, el coeficiente  $i$  debe estar entre 1 y el número correspondiente a la disociación. Con toda probabilidad los electrolitos se disocian completamente en diluciones extremas.

Sin embargo, a pesar de dar una interpretación elegante a una gran diversidad de fenómenos, la teoría de Arrhenius encontró muchas oposiciones. Como señalamos, Per Theodor Cleve, sinodal en el examen doctoral de Arrhenius, argumentaba que las cargas opuestas del cloro y del potasio impedían la separación de los iones. Arrhenius respondía que la atracción entre los iones era vencida por la de las moléculas del disolvente a los iones; si los iones no estaban hidratados (solvatados), no podían existir separados. Cleve preguntaba: ¿cómo podía existir cloro en una solución incolora e inofensiva de KCl siendo que el cloro es un gas amarillo verdoso y altamente oxidante?, ¿cómo podía existir potasio en tal solución sin liberar hidrógeno?

Hoy día tales preguntas parecen triviales (más por la familiaridad de los términos que por la comprensión de los conceptos); sin embargo, debe recordarse que en 1884 aún no se había descubierto el electrón. Sólo 16 años más tarde, con el concepto de electrón, pudo explicarse el origen de la carga eléctrica de los iones y la diferencia sustancial entre un átomo y su ion.

## CONCLUSIONES

Si bien hay diferencias notables entre las teorías de disociación de Faraday y la de Arrhenius no puede dejar de mencionarse la influencia de Faraday. Esta va más allá del concepto de ion como partícula eléctrica: incluye el intento de unificación de fenómenos eléctricos y magnéticos, de fenómenos físicos y químicos.

El valor de ambas teorías no radica sólo en la belleza con que explicaron hechos aparentemente inconexos sino, sobre todo, porque permitieron plantear nuevos experimentos y leyes. La influencia de Faraday, a través de Arrhenius, llevó a la creación de una nueva disciplina: la fisicoquímica.

Concluamos señalando que las objeciones y rechazos a la teoría de Arrhenius fueron explicados por él mismo cuando recibió el premio Nobel de química 1903.

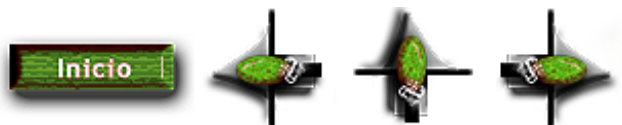
La nueva teoría tuvo la mala suerte de que nadie sabía dónde ubicarla: ni los químicos en la química, ni los físicos en la física. Se tuvo que construir un puente entre ambas ciencias.

## BIBLIOGRAFÍA

Córdova, J. L. "Equivalente químico". Contactos, vol. II, núm. 6, 1985, PP. 44-52.

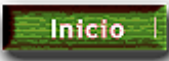
Córdova, J. L. "Teoría de disociación electrolítica. Un enfoque histórico". Contactos, vol. III, núm. 1, 1987, pp. 28-35.

Coulston, G. *Dictionary of Scientific Biography*. Ch. Scribner's Sons, Nueva York, 1976.



13 Uno del agricultor H. S. M. Thompson y otro del químico J. T. Way.

---



14 Arrhenius llamaba hidrato a cualquier compuesto de hidrógeno.

---

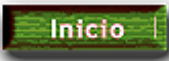


15 Hermann Kopp, poco antes, hizo una observación semejante: la solubilidad de una sustancia no es afectada por la presencia de otras, a no ser que ambas tengan un radical común. Kopp propuso que la solubilidad de una sustancia era función de la de los radicales en solución.

---



16 Obtenida por extrapolación.



# VII. FARADAY LAS TEORÍAS DE NORMA: LA UNIFICACIÓN DE LAS FUERZAS

MATÍAS MORENO

## RESUMEN

Se hace una presentación de la aportación científica de Michael Faraday haciendo hincapié en su contribución a la unificación de las fuerzas. Se destaca el papel central que la ley de inducción, descubierta por Faraday hace 130 años, desempeña en el entendimiento de las fuerzas fundamentales de la naturaleza.


## INTRODUCCIÓN

LA VIDA científica de Faraday se puede dividir en tres grandes periodos. El primero va desde su iniciación en la ciencia como asistente de Humphry Davy en 1812 e incluye su ingreso a la Royal Society de Inglaterra en 1824. El segundo periodo, sin duda el más espectacular de su carrera, corresponde a la década de 1830 a 1840. El tercer periodo abarca desde ese año hasta su retiro, en 1858. Podemos caracterizar estos periodos por los problemas que en ellos atacó.

## LA PRIMERA ETAPA: EL EFECTO ROMAGNOSI-OERSTED

Durante el primer periodo, la actividad central de Faraday fue estudiar, recopilar y verificar los experimentos que, si bien hechos por otros científicos, mostraban que los distintos tipos de electricidad correspondían a un mismo y único efecto. Así, él comprobó que los fenómenos de galvanismo y los voltaicos, los de electricidad producida por fricción y los eléctricos de origen biológico eran, en realidad, distintas manifestaciones de un mismo fenómeno eléctrico.

En la época el magnetismo y la electricidad se consideraban fenómenos distintos. El primero estaba asociado al comportamiento de imanes y brújulas; en cambio, la electricidad lo estaba a chispas, rayos, pilas de Volta (electricidad química) o a fuerzas entre objetos previamente frotados, como el caso de la atracción y repulsión entre un peine de plástico y un pedazo de papel. No fue sino hasta 1820 que se apreció la relación entre los fenómenos

eléctricos y magnéticos.<sup>17</sup>  Fue en ese año cuando el danés Hans Christian Oersted encontró que una corriente eléctrica era capaz de desviar la aguja imantada de una brújula.

Dos comentarios son pertinentes en relación con la observación de Oersted. En primer lugar, el experimento es realmente sencillo, al menos con la facilidad que tenemos hoy en día para producir corrientes eléctricas. Basta con conectar un alambre a un par de pilas de 5 volts (que en el mercado están marcadas como tipo C) y acercar el alambre a unos cinco o diez centímetros de una brújula para apreciar la desviación de la aguja. Conectando un foco pequeño se puede comprobar que hay una desviación de la aguja sólo cuando pasamos una corriente por el alambre. En segundo término, es curioso que Oersted hiciera el experimento para demostrarle a sus alumnos que podía haber una conexión entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos; el experimento durante la clase falló, pues el alambre de corriente fue colocado perpendicularmente a la brújula. Al finalizar la clase Oersted repitió el intento colocando el alambre paralelamente a la dirección de la brújula, con lo que obtuvo un efecto magnético producido a partir de una corriente eléctrica. Es éste un ejemplo clarísimo de la fuerza del método experimental. La principal tecnología que se obtuvo con este descubrimiento en esa época fue la de producir imanes con corrientes voltaicas: lo que hoy llamamos bobinas.

Una vez que el resultado de Romagnosi-Oersted fue conocido, se realizó una gran cantidad de experimentos para

comprobar si el efecto inverso también ocurría; esto es, si los imanes eran capaces de generar efectos eléctricos. Es sorprendente, en retrospectiva, que todos los intentos fallaran durante más de diez años. El mismo Faraday realizó algunos de estos experimentos fallidos, al grado de caer en la tentación de dedicarse a los negocios.

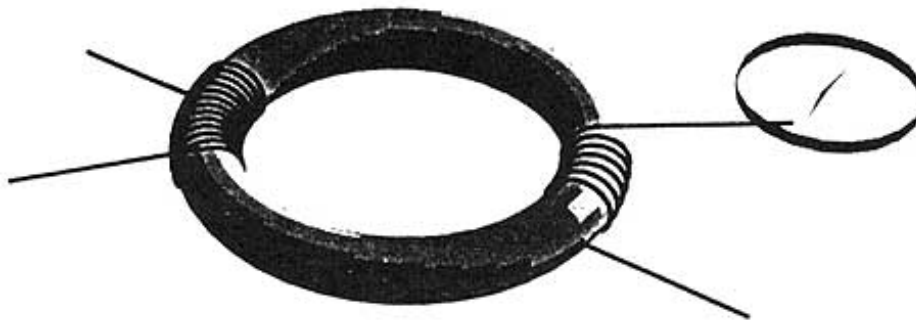
## UNIFICACIÓN DE LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO

Hoy sabemos la razón por la que fallaron todos los esfuerzos para inducir efectos eléctricos a partir de magnetismo en la década de 1820 a 1830. La razón es que todos los experimentos eran estacionarios; esto es, carecían de la variable que hace posible la inducción eléctrica: el tiempo. Cuando a Maxwell, décadas después, le preguntaron cuál era la característica más sobresaliente de Faraday, respondió que sin duda era la perseverancia. Un carácter menos firme que el de Faraday hubiera claudicado antes en su empeño por buscar la conexión completa entre los dos tipos de fenómenos.

Antes de describir el experimento que llevó a la ley de inducción de Faraday, es conveniente entender que desde el punto de vista conceptual no hay ninguna necesidad de que los imanes, o en general los fenómenos magnéticos, produzcan efectos eléctricos. Visto en términos modernos, si no introducimos al tiempo en las leyes del electromagnetismo, los fenómenos eléctricos y magnéticos se separan en electrostáticos y magnetostáticos. Las fuentes de la electricidad son las cargas eléctricas y la fuerza que generan está dada por la ley de Coulomb.

Por su parte, los fenómenos magnéticos (magnetostáticos de hoy en día) están descritos consistentemente en la ley de Ampere que se puede reexpresar a través del concepto de fuerza de Biot y Savart, que es el equivalente de la fuerza de Coulomb con las fuentes de fuerza magnética dadas por corrientes (electrostáticas), como observó Oersted. Aún más, tal como aparecían las leyes en este límite, eran consistentes con un principio que hoy consideramos fundamental: la conservación de la energía. Esta conservación se da por separado para ambos fenómenos: eléctricos y magnéticos. Visto así, con los prejuicios modernos, resultaría algo ocioso buscar una conexión como la que Faraday encontró. Afortunadamente, Faraday era un genio experimental y estos argumentos u otros apropiados a su época no lo inhibieron. En realidad, la conservación de la energía no era entonces un paradigma de la ciencia como lo es en nuestros días.

El dispositivo con el que Faraday encontró la inducción es el siguiente: en extremos opuestos de un anillo de hierro se enrollan un par de alambres conductores, aislados del anillo mismo; se hace pasar corriente eléctrica por uno de los alambres y se observa si en el segundo alambre se induce una corriente. La observación de la corriente inducida fue hecha por Faraday mediante una brújula, colocada cerca del segundo alambre (véase la figura VII.1). El anillo de hierro tiene como propósito guiar el magnetismo generado por la corriente en el primer alambre y maximizar así el posible efecto del campo magnético sobre el segundo alambre.



**Figura VII.1. Bobina de Faraday.**

Este sencillo dispositivo enseña que habrá una corriente inducida en el segundo alambre sólo cuando se modifica la corriente en el alambre original. El dispositivo original de Faraday generaba la corriente del primer alambre por medio de una pila voltaica, que en pocos instantes producía una corriente continua. El efecto de inducción de corriente eléctrica se observa solamente cuando se conecta o desconecta la corriente generada por la pila. Los experimentos realizados antes no detectaban la corriente transitoria y, por tanto, conducían a resultados negativos.

Los siguientes diez años de trabajo de Faraday fueron consagrados a buscar otros mecanismos de inducción de

efectos eléctricos debidos a cambios en la configuración magnética. Estas experiencias se resumen en la famosa ley de inducción de Faraday:

La fuerza electromotriz inducida en un circuito de corriente eléctrica es de igual magnitud, pero de sentido opuesto al cambio en el flujo del campo magnético.

## **FARADAY, PIONERO DEL CONCEPTO DE CAMPO**

Por esas fechas debió haber empezado a tomar forma en la mente de Faraday que las interacciones eléctricas y magnéticas se debían considerar como acarreadas de una partícula a otra por un campo y que la acción a distancia tal como se conceptualizaba en la mecánica newtoniana, por ejemplo en la fuerza de Coulomb y en la ley de Ampère, era un resultado aproximado. Por su insistencia en que los campos, aunque producidos por las cargas y las corrientes, eran independientes de ellas, Faraday puede ser considerado con justicia el padre de la teoría de los campos.

En su tiempo, Faraday no pudo convencer a sus colegas de que esta idea era más que una representación alternativa y, en consecuencia, un artificio. Pero dejó sembrada la inquietud en un físico teórico de primera línea como James Clerk Maxwell. Él tomó seriamente la idea de campo electromagnético y demostró que las leyes del electromagnetismo, como se postulaban entonces, eran incompatibles con la conservación de la carga eléctrica. Una modificación mínima propuesta por el mismo Maxwell fue modificar la ley de Ampère con un término que Maxwell denominó *corriente de desplazamiento*. Este nuevo término no fue sino el compañero del término de *inducción* que Faraday había descubierto experimentalmente 30 años antes. La corriente de desplazamiento implica que un cambio en el campo eléctrico producirá el mismo efecto que una corriente, esto es, un campo magnético.

## **ÓPTICA Y MAGNETISMO: EL EFECTO FARADAY**

En el último periodo de su vida Faraday se dedicó al intento de unificar los fenómenos magnéticos con los ópticos. Los resultados no fueron concluyentes. Si bien Faraday encontró que la polarización de la luz se veía afectada por la presencia de un campo magnético, efecto que se conoce como efecto Faraday, la conexión precisa entre los dos fenómenos no fue esclarecida sino hasta después, por Maxwell. Con las ecuaciones de Maxwell —que resumen nuestro conocimiento clásico (en el sentido de no cuántico) de los fenómenos electromagnéticos— se puede deducir que los campos eléctricos y los magnéticos satisfacen ecuaciones de ondas y que éstas deben viajar a una velocidad que coincide con la de la luz.


Fue el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, entre 1885 y 1889, quien dio con la prueba experimental de que la luz y las ondas producidas por medios electromagnéticos seguían las mismas leyes. Con ello se cimentó la gran unificación de los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos.

Se ve así que en los tres periodos en que se ha dividido la carrera científica de Faraday, la unificación de fenómenos diversos tuvo un papel central. Su contribución fundamental fue la de permitir que interviniera el factor tiempo en las leyes del electromagnetismo.

## **LAS TEORÍAS DE NORMA**

Se tienen que analizar ahora las consecuencias que para la comprensión actual de la naturaleza tiene su trabajo. Las interacciones fundamentales que se han encontrado hasta la fecha son la gravitacional, la electromagnética, la débil y la fuerte. El efecto más espectacular de la fuerza de la gravitación es mantenernos con los pies sobre la Tierra. De la interacción electromagnética se ha tratado en los párrafos anteriores. La fuerza fuerte es la responsable de mantener a los protones y neutrones unidos en núcleos atómicos a distancias características de unos cuantos fermis (un fermi es igual a  $10^{-15}$  metros, que resulta unas cien mil veces más pequeño que un átomo). La manifestación más común de la fuerza débil es desintegrar los mismos núcleos, sobre todo cuando en ellos hay exceso de neutrones. En particular, cuando un neutrón está libre, sin asociarse con un protón, se desintegra en un tiempo promedio de 888 segundos.

Las interacciones gravitacionales son comúnmente despreciables a las distancias más pequeñas a las que se tiene acceso experimental hoy en día. Estas distancias son de unos  $10^{-20}$  metros. Para apreciar un número de esta magnitud es útil la siguiente comparación: Los objetos más pequeños que se pueden ver a simple vista son de unos  $10^{-5}$  metros, un cienmilésimo del tamaño de una persona, en orden de magnitud; los átomos tienen una escala relativa a este pequeño tamaño de otro factor de un cienmilésimo: otro factor  $10^{-5}$ . Para ir a la escala nuclear hay aún otro cienmilésimo y la escala más pequeña, jamás medida es otro factor, un cienmilésimo más pequeña que los núcleos de los átomos. Cuatro factores de cienmilésimo en total.

Por otra parte, las fuerzas gravitacionales dominan la estructura de la materia a escalas cósmicas.<sup>18</sup>  La razón de este fenómeno es que las fuerzas gravitacionales siempre son atractivas. En cambio, las fuerzas de los otros tipos pueden ser tanto atractivas como repulsivas.

Esta peculiaridad ha hecho posible modelar tanto a las fuerzas débiles como a las fuertes en teorías que son, básicamente, réplicas del electromagnetismo. La diferencia cualitativa más grande entre las nuevas teorías y el electromagnetismo clásico es que el equivalente a la luz (los fotones de estas teorías) viene en varios tipos, a los que, por llamarlos de alguna forma, se les denomina con distintos colores y sabores. Adicionalmente, y a diferencia del electromagnetismo puro, en las nuevas teorías los distintos tipos de fotones pueden interactuar directamente unos con otros.

En mecánica se sabe que muchas de las fuerzas que conservan la energía se pueden derivar de un potencial. La rapidez de cambio del potencial con la distancia da la magnitud de la fuerza. En electrostática esta idea se traduce en que el campo eléctrico se puede deducir de un potencial eléctrico. En el magnetismo, por su parte, se conoce que el campo magnético se puede derivar de un potencial. La diferencia es que en el magnetismo se necesitan tres potenciales para describir su efecto, y que estos tres potenciales formen un vector. Las leyes del electromagnetismo son tales que siempre es posible sustituir el campo magnético y el campo eléctrico por los cuatro potenciales antes dichos. De los cuatro potenciales uno es arbitrario; fijar esta arbitrariedad se conoce como fijar la norma del potencial. Y una teoría de este tipo se conoce como una teoría de norma.

El nombre mismo requiere una explicación. Originalmente, el nombre se debe a Hermann Weyl, quien trataba de incorporar el electromagnetismo a la teoría general de la relatividad de Albert Einstein. Igual que en la teoría general de la relatividad, uno de los principios guía es que los fenómenos de la naturaleza deben ser independientes del marco de referencia que se elija. Weyl especuló sobre que el electromagnetismo estaba íntimamente relacionado con la libertad de escoger la escala de medida en cada punto del espacio y del tiempo; esto tiene que ver con la norma que se escoja para medir las cantidades físicas.

Aunque la teoría de Weyl resultó incorrecta, su idea fue recogida en la mecánica cuántica, donde la función de onda que describe el movimiento de una partícula está indeterminada hasta una fase. Si en mecánica cuántica se exige que se pueda escoger arbitrariamente la fase de la función de onda en cualquier punto del espacio y en cualquier tiempo, se estará obligado a introducir una interacción. La arbitrariedad en la fase local de la función de onda se puede absorber dentro de la norma de los potenciales, siempre que la partícula esté en interacción con el campo electromagnético.

Cuando existe más de un tipo de partículas en la teoría cuántica y entre ellas exista una simetría, las funciones de onda que describen cada tipo de partículas se pueden transformar unas en otras. Estas transformaciones de simetría describen la equivalencia o simetría de los distintos tipos de partículas.

Así por ejemplo, Werner Karl Heisenberg observó que a consecuencia de que ante interacciones fuertes el protón y el neutrón eran equivalentes, se podía introducir una nueva simetría; Heisenberg la llamó la simetría de isospín por su semejanza con la propiedad de espín de los protones y electrones.

En 1953, Chen Ning Yang y Robert L. Mills estudiaron bajo qué condiciones se podían realizar localmente las transformaciones de simetría entre los distintos tipos de partículas. Esto sería si fuera posible construir una teoría en que las funciones de onda que describen al protón y al neutrón se pudieran mezclar en forma distinta en cada punto del espacio y del tiempo. La sorprendente respuesta que ellos obtuvieron fue que esto era posible, si las partículas participantes interactuaban a través de un electromagnetismo generalizado.

Más relevante aún, es que las teorías así construidas pertenezcan a la exclusiva clase de teorías que han demostrado

ser consistentes, las llamadas teorías renormalizables; esto fue de mostrado por Gerald t'Hooft en 1974. Varios modelos que incorporaban estas ideas teóricas se habían propuesto en la década de 1960 por Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam para entender las semejanzas entre las interacciones electromagnéticas y las débiles. Las partículas que portan la interacción débil y que son los equivalentes del fotón, fueron descubiertas en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares, el CERN, en 1981. Las masas y propiedades de estas partículas están en impecable acuerdo con las teorías de norma.

La mejor teoría que se tiene, hasta ahora, sobre las interacciones fuertes se basa también en las teorías de norma: es la llamada cromodinámica cuántica (cuyas siglas en inglés, son QCD). Una de las predicciones de esta teoría ha explicado por qué los constituyentes del protón o del neutrón, los *quarks*, se comportan como partículas casi libres dentro del protón. Sin embargo, a grandes distancias de varios radios nucleares, los quarks interactúan tan fuertemente que resulta muy difícil, si no imposible, sacarlos del protón. La idea es que la energía para separarlos se vuelve tan grande que sería mucho más probable producir una partícula y una antipartícula para formar otros objetos compuestos.

Una parte importante de los intentos teóricos de nuestros días está concentrada en formular teorías que unifiquen en mayor grado las distintas interacciones. El panorama es aún nebuloso y hasta ahora no se tiene un buen candidato teórico. Con todo, la idea central de Faraday de que la diversidad de fenómenos físicos debía tener un origen común, sigue siendo un motor para los actuales.

## CONCLUSIÓN

Muestra de la tesonería y de la fuerza de sus convicciones es que Faraday intentó buscar en 1850 una conexión experimental entre la gravedad y la electricidad. Faraday concluyó su trabajo diciendo:

Aquí finalizan mis intentos por ahora. Los resultados son negativos. Ellos no hacen vacilar mi fuerte sentimiento de que existe una relación entre la gravedad y la electricidad, a pesar de que ellos no dan una prueba de que exista tal relación.

La búsqueda de esa conexión continúa hoy en día.

## Agradecimientos

Es un placer agradecer la invitación de los organizadores del Simposio Faraday para participar en el mismo. Asimismo, quiero agradecer la lectura crítica del manuscrito por parte de Gerardo Carmona, Rosa María Méndez-Moreno y Enrique Moreno; ellos detectaron un buen número de errores en las primeras versiones del manuscrito. Este se basa en mi plática durante el Simposio; sin embargo, en el manuscrito evité las fórmulas, para hacer el texto accesible a un público más amplio.

## BIBLIOGRAFÍA

Michael Faraday. "Experimental Researches in Electricity". En *Great Books of the Western World*, vol. 45, 261(1952). Editado por R. M. Hutchins, *Encyclopaedia Britannica*, Chicago, 1978.

"Biografía de Michael Faraday". *Encyclopaedia Britannica*, vol. 7, 1979, página 173.

D. K C. MacDonald, *Faraday, Maxwell y Kelvin*. EUDEBA, 1966. Traducción de Luis Fabricant, Nueva York, 1964.

L. B. Okun. *Particle Physics: The Quest for the Substance of Substance*. Harwood Academic Publishers, Suiza, 1985.

M. Moreno y A. Zepeda. *Gran unificación y supercuerdas*. Segunda Parte. Perspectivas en la Biología y la Física. Compilado por J. Flores y L. Estrada, Centro Universitario de Comunicación de la Ciencia, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1990, pp.31-54.

---

**Inicio**

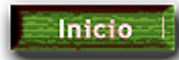


17 La primera observación de tal conexión fue hecha en 1802 por el jurista italiano Gian Domenico Romagnosi, pero su descubrimiento fue ignorado.



18 Si se acepta que la gravedad es una fuerza fundamental, y no una fuerza efectiva como la de Van der Waals, la gravedad debe tener un papel importante a distancias comparables a la longitud de onda de Planck, que es de unos  $10^{-35}$  m. Esta longitud resulta de formar una cantidad con unidades de longitud a partir de tres constantes fundamentales: la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de la gravitación universal.

---



### INTRODUCCIÓN

"POR mucho tiempo he sido de la opinión, que casi llega al grado de una convicción, de creer, en acuerdo con muchos otros estudiosos de la naturaleza que las varias formas bajo las cuales se ponen de manifiesto las fuerzas de la materia tienen un origen común; en otras palabras, que están relacionadas entre sí de manera tal que son mutuamente dependientes y son convertibles unas en otras, como si fueran y poseyeran equivalencias de potencia en su acción." Con este párrafo Michael Faraday, el notable físico y químico inglés, considerado por muchos como uno de los científicos experimentales más versátiles del siglo pasado, comienza su artículo titulado "Acción de los imanes sobre la luz", publicado en el *Philosophical Transactions* (Londres) en 1846 [1]. En este trabajo Faraday resume sus largas experiencias, iniciadas en 1831 que versan sobre la evolución de la electricidad, el magnetismo y que, entre otros descubrimientos, lo condujeron a entender el fenómeno de la inducción. El objetivo que se persigue aquí es explicar el éxito que se logró al describir la "electrificación y magnetización de un haz de luz y en iluminar una línea de fuerza magnética". Como preámbulo a la discusión subsecuente Faraday definió con toda precisión los términos que utilizaría para ello. La primera definición era la de *línea de fuerza magnética* como el efecto de la acción de un campo magnético sobre las líneas magnéticas, generalmente curvas y que igualmente pasan hacia, o a partir, de dipolos magnéticos o que forman círculos concéntricos alrededor de una corriente eléctrica. En seguida, Faraday define una *línea de fuerza eléctrica* como la fuerza ejercida a lo largo de las líneas que unen dos cuerpos, interactuando entre sí de acuerdo con los principios de inducción eléctrica (cita aquí su trabajo de 1837) y finalmente define lo que aquí nos concierne, *un diamagnético*, esto es, un cuerpo a través del cual pasan las líneas de fuerza magnética y bajo cuya acción no se adquiere el estado magnético usual del hierro ni de la calamita (piedra o roca imantada). Faraday fue el descubridor del fenómeno del diamagnetismo en cuanto a su diferenciación clara con el ferromagnetismo, y no sólo eso, sino que, como veremos en seguida, logró establecer de manera clara y objetiva el comportamiento diferente de la materia bajo la influencia de campos magnéticos.

Más adelante, en el trabajo ya referido, Faraday llegó a la conclusión un tanto inequívoca de que existen materiales, metales y algunas sales en particular que, bajo la acción de un campo magnético, no se comportan como imanes. Concluyó que la "condición molecular" de dichos cuerpos debía ser específicamente distinta a la del hierro magnetizado u otros similares y que por tanto "justifican una nueva condición magnética". Estos estudios lo llevaron a sospechar, y posteriormente a experimentar y probar que, con excepción de los materiales magnéticos y de sus sales, muchas otras sustancias incluyendo un vasto número de cuerpos opacos y metálicos, exhiben esta "nueva condición magnética" de la materia. Es curioso hacer notar aquí que debido a estas experiencias, Faraday consideró la posibilidad de construir una teoría general de la acción magnética basada en principios fundamentalmente simples. Este no es lugar para relatar los metódicos, cuidadosos y sistemáticos experimentos que Faraday llevó a cabo, pero en ese mismo trabajo reportaba ya que metales como el antimonio, bismuto, cadmio, cobre, oro, plomo, mercurio, plata, estaño y cinc no eran materiales ferromagnéticos; al final anunciaba a la Royal Society de Londres que intentaría ampliar este espectro y extender sus mediciones a gases y vapores.

En una comunicación recibida el 24 de diciembre de 1845, leída el 8 de enero de 1846 y que se incluye en el trabajo ya citado, Faraday introdujo sus intenciones de ampliar sus investigaciones con las siguientes palabras:

Las características magnéticas del hierro, el níquel y el cobalto son bien conocidas, así como el hecho de que a ciertas temperaturas pierden su propiedad habitual y se transforman, ante examen y observación, en metales no magnéticos; ingresan así a la lista de materiales diamagnéticos y actúan a la par que ellos.

¡Faraday, sin saber termodinámica y mucho menos transiciones de fase, había descubierto que existe lo que hoy conocemos como una temperatura crítica y una transición de fase! Es más, continúa diciendo:

Una investigación más minuciosa me ha indicado que, aun como materiales diamagnéticos, son muy diferentes a otros cuerpos, ya que todavía calientes, siendo inactivos sobre imanes comunes o ante otras pruebas, no lo son absolutamente, ya que retienen una fracción de su potencia magnética independientemente de su temperatura...

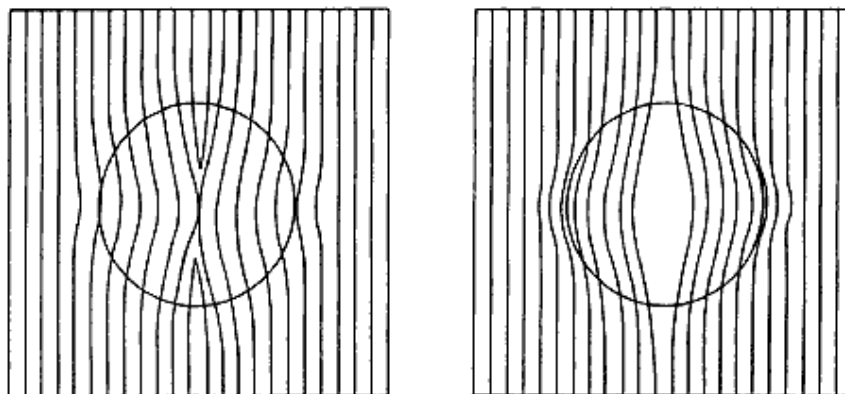
Faraday hizo notar así, con gran claridad, que incluso entre los materiales diamagnéticos había diferencias; y continuó sus experimentos con un método y una lógica inexorables. Incluyó también vapores (gases) y el aire para finalmente anunciar, el 7 de marzo de 1850, ante la Royal Society que su trabajo sobre sustancias diamagnéticas había llegado casi a su fin y que además había sido recibido muy favorablemente en otros lugares, principalmente en Alemania[2]. Particularmente, W. Weber había manifestado su mejor deseo de confirmar tales descubrimientos. Para el 28 de noviembre de ese mismo año, el resultado era ya

transparente: la palabra *magnético* debería emplearse para designar todos los efectos producidos por un campo de esa naturaleza, no obstante que en la subdivisión de materiales diamagnéticos fuera necesaria una diferencia entre aquellos materiales diamagnéticos *per se* y otros como los "imanes calientes" que retenían algunas propiedades de la magnetización —como imanes— y a los cuales, por consejo de un amigo cercano, había acordado llamar paramagnéticos. Más aún utilizó al  $O_2$  como un caso característico de material paramagnético. Faraday sugirió el esquema:



y recurrió al análisis de todo el arsenal experimental acumulado en esos años para establecer una diferenciación clara entre ellos[3].

Si se introduce un conductor paramagnético, por ejemplo una esfera de  $O_2$  en un campo magnético originalmente en el vacío, el material provocará que las líneas de fuerza del campo se concentren sobre él y su interior, de manera que el espacio ocupado por el material transmita más energía magnética que antes (figura VIII.1(a)). Si, por otra parte, se introduce una esfera de un material diamagnético en un campo similar, esto provocará una divergencia o separación entre las líneas en la dirección ecuatorial; por consiguiente, se transmitirá menos energía magnética en el espacio ocupado por el material que en el vacío (¡recuérdese el efecto Meissner en superconductividad!) (figura VIII.1.(b)).



**Figura VIII.1 (a) y (b).**

De esta forma, dichos cuerpos afectan primero la dirección de las líneas de fuerza —no sólo en el espacio ocupado por ellas, sino también en el espacio cercano hacia el cual se prolongan las líneas que pasan a través de ellos— y este cambio en el curso mismo de las líneas que los atraviesan ocurrirá, en ambos casos, en dirección opuesta. En segundo lugar, afectarán también la intensidad de la fuerza en cualquier parte del espacio dentro o cerca de ellos. El argumento subsecuente de Faraday es bien conocido pues utiliza el hecho de que la intensidad de campo en un punto, depende esencialmente de la densidad de líneas de fuerza que pasa cerca de dicho punto.

Estos argumentos condujeron a Faraday a un estudio exhaustivo y profundo sobre la naturaleza de los cuerpos paramagnéticos y diamagnéticos y sus interacciones mutuas, para esclarecer el concepto de conducción magnetocrisalina, de fenómenos magneto-ópticos, y de ahí Faraday llegó a la conclusión de que la atmósfera, estando formada en dos novenas partes por un compuesto altamente magnético, no estaba sujeta a grandes cambios en su carácter magnético por variaciones en la temperatura y condensación o enrarecimiento de la misma cambios producidos por variaciones anuales y diurnas en su relación con respecto al Sol y a las fuerzas magnéticas en la superficie terrestre. Los resultados que obtuvo de este estudio metódico y exhaustivo —características indiscutibles de su trabajo— se realizaron entre 1850 y 1851. El lector interesado puede consultar el trabajo original para mayores detalles [1].

## DIAMAGNETISMO

Después de los trabajos de Faraday sobre el diamagnetismo, este asunto pasó a ser un tema de rigor en el estudio de las propiedades electromagnéticas de la materia. En su bien conocido texto *A Treatise on Electricity and Magnetism* [4], escrito sólo unos pocos años después de la muerte de Faraday, el gran físico escocés J. C. Maxwell habla ya en términos matemáticos

de este gran descubrimiento. En el capítulo sobre magnetización inducida [5] dice textualmente:

Ahora estamos preparados para considerar a la teoría del magnetismo inducido de lo que yo pude captar como el punto de vista de Faraday. Cuando una fuerza magnética actúa sobre un medio, sea magnético, diamagnético o neutral, produce en él un fenómeno de inducción magnética, una "cantidad dirigida" de la naturaleza de un flujo y, este flujo satisface las mismas condiciones de continuidad que obedecen las corrientes eléctricas y otros flujos similares.

Como es bien sabido, si  $\vec{B}$  es el flujo magnético,  $\vec{H}$  la intensidad del campo magnético,  $\vec{M}$  la magnetización y  $k$  la susceptibilidad magnética, las ecuaciones

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} \quad (1)$$

$$\vec{M} = k \vec{H} \quad (2)$$

conducen a la relación

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (3)$$

donde  $\mu = 1 + 4\pi k$ . Para sustancias diamagnéticas  $k < 0$ , como hace ver Maxwell, y  $\mu < 1$ . Estos resultados son, hoy día, bien conocidos para cualquier estudiante de la teoría electromagnética.

Más aún, la vieja idea de Faraday de poder explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos a partir de hechos fundamentales simples empieza a tomar cierta forma. En 1850 el físico alemán W. Weber, gran admirador del trabajo de Faraday, había lanzado la teoría de que, contrario a lo que se suponía la teoría fenomenológica de Poisson [6], las moléculas de una sustancia ferromagnética como el Fe eran pequeños imanes, aun antes de estar sujetas a la aplicación de la fuerza magnetizante y que en estos materiales el eje magnético de las moléculas gira sin diferencia en cualquier dirección, de modo que el material en su conjunto no exhibe propiedades magnéticas. Cuando una fuerza magnética actúa sobre el material, tiene el efecto de orientar los ejes de todas las moléculas en una sola dirección y provocar que el material, como un todo, se convierta en un imán.

Sin embargo, pensando en términos de corrientes moleculares, alguna diferencia debe haber entre aquellas que constituyen los materiales no diamagnéticos y los diamagnéticos. En el penúltimo capítulo de su texto [7] Maxwell analiza la forma en que Weber los diferenciaba y como establecía un criterio matemático para distinguirlos. Pero tocó a los físicos de este siglo elaborar una teoría satisfactoria de este fenómeno. Usando el bien conocido teorema de Larmor [8] que describe la influencia de un campo magnético sobre el movimiento de una partícula cargada, se puede demostrar [9, 10] que la magnetización inducida en un material diamagnético arroja para la susceptibilidad magnética el valor

$$\mu = 1 - \frac{Ze^2 N r^2}{6mc^2} \quad (4)$$

donde  $Z$  es el número de electrones por átomo,  $e$  la carga del electrón,  $N$  los átomos por  $\text{cm}^3$ ,  $m$  la masa del electrón y  $c$  la velocidad de la luz. El problema central en la ecuación 4 es el factor  $r^2$ , que representa el promedio del cuadrado de la distancia perpendicular del electrón al eje del campo externo. De acuerdo con la mecánica clásica,  $r^2 = 0$  es el resultado del famoso teorema de Bohr-Van Leeuwen en una versión menos popular que la accesible a cualquier estudiante de mecánica estadística clásica: el fenómeno del diamagnetismo no existe, de acuerdo con las leyes de la física clásica [11].

De estos resultados se concluye que la idea de Faraday, totalmente intuitiva, de que todos los fenómenos electromagnéticos pueden obtenerse de hechos fundamentales simples no era incorrecta, pero su formulación precisa tuvo que esperar el advenimiento de la mecánica cuántica y de sus aplicaciones a sistemas formados por muchos átomos, para obtener resultados que pudiesen compararse con el experimento.

Este no es el lugar apropiado para abordar un estudio a fondo sobre la formulación del problema del diamagnetismo en el contexto de la mecánica cuántica. Hoy en día, esto es un tema obligado en los cursos avanzados de la materia y está tratado con todo detalle en los libros de texto convencionales [11-13]. El aspecto del diamagnetismo que concierne aquí es el que se conoce como diamagnetismo de Landau, en honor al físico soviético Lev Landau, quien calculó, por primera vez en 1930, cómo el diamagnetismo proviene de la cuantización de las órbitas de partículas cargadas en presencia de un campo magnético externo. Si se imagina un gas de electrones libres, despreciando al espín de los electrones contenidos en un recipiente (que por facilidad es un cubo cuyas aristas tengan longitud  $L$ ) y se aplica un campo externo constante  $H$  en la dirección del eje  $z$ , resulta que los valores discretos de la energía que pueden asumir los electrones están dados por

$$\epsilon(p_z, j) = \frac{p_z^2}{2m} = \hbar\omega_0 \left(j + \frac{1}{2}\right) \quad j = 0, 1, \dots \quad (5)$$

donde  $\omega_0 = eh/mc$  es la llamada frecuencia de ciclotrón,  $p_z$  es el valor del ímpetu del electrón en la dirección  $z$ ,  $\hbar = h/2\pi$ , donde  $h$  es la constante de Planck y el resto de los símbolos ya se definieron antes. Los niveles son degenerados; su grado de degeneración es igual a

$$g = - \frac{e}{\hbar c} H L^2, \quad (6)$$

donde  $g \propto L^2$  refleja el hecho de que la proyección de una órbita electrónica al plano puede estar centrada en cualquier punto del mismo sin que por ello se altere su energía. Los resultados 5 y 6 permanecieron cincuenta años como una mera ilustración de que hay ciertos efectos en sistemas formados por muchas partículas que exhiben propiedades que sólo pueden ser descritas por las leyes de la mecánica cuántica y no por las de la física clásica. No obstante, esa mera ilustración dio un giro notable en 1980 y éste es el tema de la última sección del trabajo.

## EL EFECTO HALL CUANTICO

El efecto Hall fue descubierto por el físico estadounidense E. T. Hall en 1879 [14]. Si se coloca un conductor en un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo de la corriente eléctrica dentro del conductor, se genera en su interior un campo eléctrico a consecuencia de la desviación de las trayectorias de las partículas cargadas que produce el campo magnético. Cuando la carga eléctrica acumulada en la dirección mutuamente perpendicular a la corriente y al campo magnético llegan a un cierto valor, el campo eléctrico inducido —llamado voltaje de Hall— cancela el efecto del campo magnético, las portadoras de carga se sujetan a una fuerza neta nula y el flujo cesa. En la figura VIII.2, donde  $H$ ,  $E_y$ , y  $v_x$  representan el campo magnético, el eléctrico y la velocidad de los portadores, esto tiene lugar cuando

$$E_y = \frac{j_x}{Nqc} H_z, \quad (7)$$

donde  $j_x = Nv_xq$  es la densidad de la corriente si  $N$  es el número de portadores de carga  $q$  por unidad de volumen. La cantidad

$$R_H = \frac{E_y}{j_x H_z} = \frac{1}{Nqc}, \quad (8)$$

se conoce como la resistencia de Hall y, es negativa si los portadores son electrones. En la física de semiconductores esta cantidad tuvo un papel muy importante en la identificación de portadores de carga positivos.

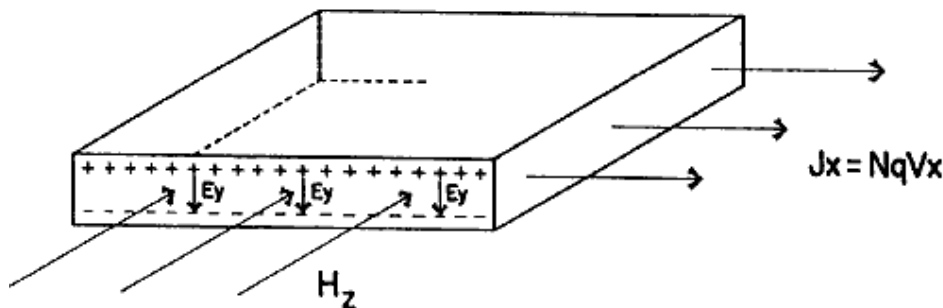
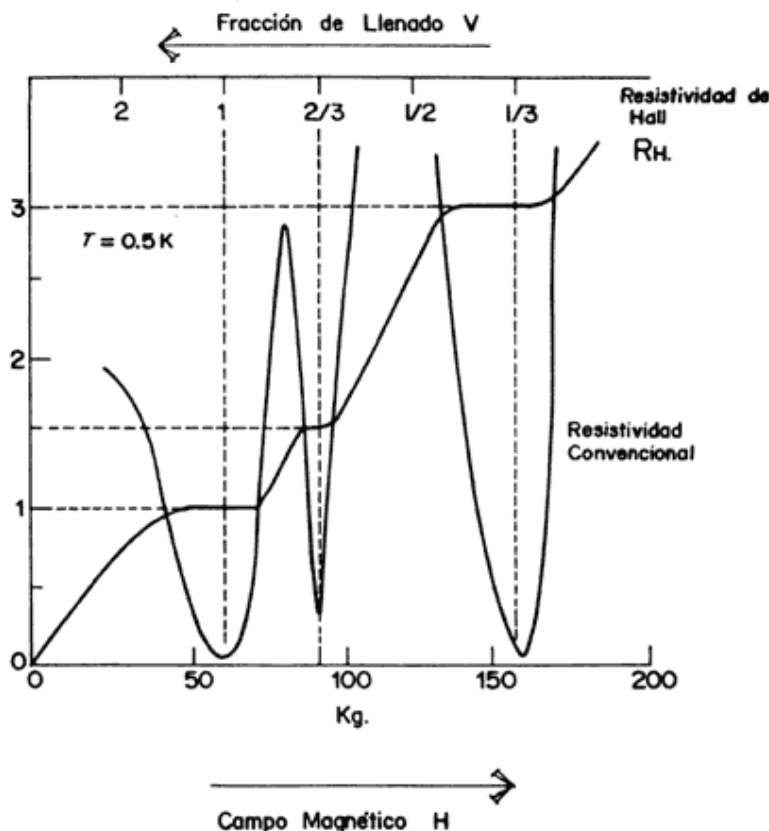


Figura VIII.2

Supóngase ahora la idea un tanto estrafalaria de que se tuviera, en lugar de un metal o un semiconductor sólido, una rebanada formada por un gas de electrones libres bidimensional —esto es, cuyo espesor fuera muy pequeño comparado con sus otras dos dimensiones— y que se le aplicara un campo magnético en dirección perpendicular al flujo de electrones. La idea suena rara por la dificultad de construir físicamente en el laboratorio un sistema con dichas características. Pero si se pudiera realizar, las

ecuaciones de Landau 5 y 6 podrían estar sujetas a una comprobación experimental que además corroboraría otros aspectos del viejo fenómeno del diamagnetismo. En 1980 esta alocada idea pudo ponerse en práctica, gracias a los grandes avances de la tecnología de transistores: se fabricó un sistema bidimensional de electrones libres inyectando electrones dentro de la interfase de una aleación y se pudieron confinar los electrones a una pequeña película de 500 Å de espesor. El experimento que realizaron el físico alemán Klaus von Klitzing y sus colaboradores [15] arrojó un resultado verdaderamente notable, como se muestra en la figura VIII.3 y cuya explicación todavía hoy constituye un reto para los físicos teóricos.



**Figura VIII.3 Resistividad de Hall y convencional.**

Lo notable del resultado fue que los niveles de Landau dados en la ecuación 5, no se llenaron de electrones en la forma en que lo sugeriría el principio de exclusión de Pauli. A medida que el campo magnético aumentaba, la degeneración de los niveles también aumentaba. La máxima densidad (bidimensional) de electrones permitida por nivel, para un valor dado del campo es  $2 \hbar e / hc$  de acuerdo con la ecuación 6, tomando en cuenta el espín. Si  $n$  es esa densidad, se puede definir un "factor de llenado" como

$$\nu = n \frac{hc}{He} \dots \dots \dots (9)$$

En el experimento original de von Klitzing, como se muestra en la figura VIII.3, la resistividad de Hall muestra valores constantes para  $\nu = 1, 1/3, 2/3$ , etc., y con valores iguales a  $\nu^{-1}$  en unidades de  $h/e^2$ . Por otra parte, la resistividad convencional ( $\zeta_{xx}$  en la figura) desciende a valores muy pequeños, lo que indica que en esos intervalos de valores  $\nu$  y  $H$ , el fluido formado por los electrones fluye como en un superconductor, casi sin resistencia. Un resultado particular se obtiene si  $\nu = 1$ , pues de las ecuaciones 8 y 9 se sigue de inmediato que la resistividad de Hall es

$$R_H = h/e^2, \quad (10)$$

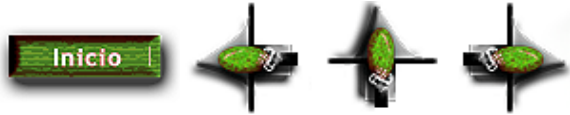
una constante universal! y que además es igual a una densidad de llenado proporcional a  $\phi_0 = hc/e$ , un fluxón o flujo magnético cuántico elemental. Los fluxones son consecuencia directa de un efecto netamente cuántico mediante el cual un electrón extendido en el espacio puede sentir la presencia de un campo magnético confinado a una región del espacio muy lejana a la que él ocupa. Este efecto, conocido como el efecto Bohm-Aharanov fue predicho teóricamente por estos físicos en 1959 y hoy está plenamente confirmado, ha tenido fuertes y profundas repercusiones en el entendimiento del mundo cuántico [17]. El efecto von Klitzing, hoy conocido como efecto Hall cuántico, le valió el premio Nobel de física en 1985 y ha sido tan importante que la ecuación 10 se toma, hoy en día, como un patrón internacional para determinar la unidad de resistencia

eléctrica. En efecto,

$$R_H = 25\,812.8056 \text{ ohmios},$$

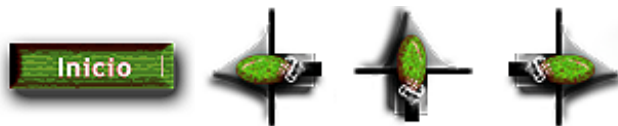
con una incertidumbre de 0.045 ppm [18].

Pero la historia no ha terminado [19]. Originalmente se pensó que en la secuencia de valores posibles para  $\nu$  sólo aparecían fracciones múltiplos de  $e_2/h$  con denominadores impares; y hasta 1985 se habían detectado valores  $1/3$ ,  $2/3$ ,  $1/5$ ,  $2/5$ ,  $2/7$ ,  $3/7$ ,  $4/9$ . Sin embargo, en 1987, R. Willett y sus colaboradores [19] reportaron un valor cuantizado para  $\nu = 5/2$ , el primero que se detectó para un denominador par [19]. Con la teoría para los casos de denominadores impares, todavía a medio camino, este nuevo efecto ha traído grandes problemas a los teóricos y hoy en día, constituye uno de los campos de investigación de mayor interés y actualidad en toda la física del estado sólido. El diamagnetismo descubierto por Faraday, claramente ejemplificado por el gas de electrones libres, plantea problemas fascinantes en un tema de la física que para muchos estaba ya agotado hace medio siglo.



## REFERENCIAS

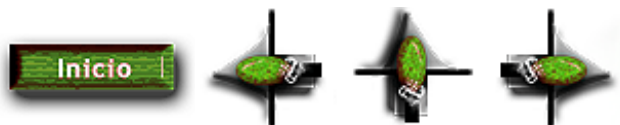
- [1] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978, Serie 19, p. 595.
- [2] M. Faraday, *op. cit.*, Serie 21, pp. 623 y ss.
- [3] M. Faraday, *op. cit.*, Serie 26, pp. 688-727.
- [4] J.C., Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, Nueva York, 1945, vol. II, cap. IV.
- [5] J.C. Maxwell, *op. cit.*, cap. IV, p. 55.
- [6] J.C. Maxwell, *op. cit.*, cap. IV, p. 57.
- [7] J.C. Maxwell. *pp. cit.* cap. XXII, p. 475.
- [8] H. Goldstein. *Classical Mechanics*. Addison-Wesley, Cambridge, Mass., 1953, pp.176-178.
- [9] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. 3a. ed. John Willey & Sons, 1967.
- [10] R. Becker y F. Sauter. *Electromagnetic Fields and Interactions*. Blaisdell, Nueva York, 1964, cap. C-III.
- [11] R. Kubo, H. Ichimura, T. Usui y N. Hashizumi. *Statistical mechanics*. North Holland, Amsterdam, 1965, p. 138.
- [12] R. K. Pathria. *Statistical mechanics*. Pergamon Press, Oxford, 1972.
- [13] K. Huang. *Statistical Mechanics*. 2a. ed. John Willey & Sons, Nueva York, 1987.
- [14] R. Resnick y D. Halliday. *Physics. Part. II* 3a. ed. John Willey & Sons, Nueva York, 1978, secs. 33-35.
- [15] K. von Klitzing. *Rev. Mod. Phys.*, vol. 53, núm. 3, 1986, pp. 519-532.
- [16] D. Bohm y Y. Aharanov. *Physical Review*, vol. 115, 1959, p. 485; véase también K Huang. *op. cit.*
- [17] Y. Imry y R. A. Webb. *Scientific American*, vol. 260, núm. 4, 1989, p.36.
- [18] E. Richard Cohen y B. N. Taylor. *Physics Today*. vol. 44, núm. 8, parte 2, 1991, p. BG9.
- [19] Véase *Physics Today*, vol. 44, núm. 1, 1988, pp. 17-20 y las referencias ahí citadas.



# COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de mayo de 1995 en la Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V., Calzada de San Lorenzo, 244, 09830 México. La formación y composición se hizo en el Taller de composición del FCE y estuvo a cargo de *Gabriela López Olmos*. Se tiraron 7000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



# CONTRAPORTADA

Con motivo del bicentenario del nacimiento de Michael Faraday, en 1991 se presentó en la Facultad de Ciencias de la UNAM una serie de conferencias que hoy se ofrecen aquí reunidas junto con una reseña biográfica de este singular científico, en la cual se hace un relato detallado de diferentes momentos de la evolución de sus investigaciones.

La singularidad de Faraday como científico radica en el hecho de que en sus investigaciones abarcó diversas áreas de la física y de la química y en que, en ambos casos, consiguió resultados innovadores que abrieron nuevos caminos para la ciencia: el descubrimiento de nuevos compuestos, de las leyes que describen la electrólisis —fenómeno que él mismo bautizó— y de la inducción electromagnética, además de sus experimentos en licuefacción de gases que constituyeron la base experimental del desarrollo futuro de la ciencia en este respecto. Estos temas, así como algunas nociones teóricas que guiaron sus investigaciones, se exponen en los artículos que conforman este libro, atendiendo de manera fundamental al contexto científico de la época, lo cual confiere a la obra un gran valor para todo aquel interesado en estas ciencias.

