

# FARADAY

*Miguel Sancho Ruiz*

Departamento de Física Aplicada III  
Universidad Complutense de Madrid

Michael Faraday fue una figura clave en el desarrollo de la Física y en la evolución de las ideas científicas. Fue uno de los más importantes filósofos experimentales de todos los tiempos y, de manera sorprendente, combinó esa habilidad experimental con una intuición física propia de las mejores mentes teóricas. Fue el iniciador de un nuevo modelo del mundo físico: la teoría de campos. A continuación seguiremos la evolución de su pensamiento que estuvo ligada a sus descubrimientos experimentales, comenzando con las rotaciones electromagnéticas, la inducción electromagnética, el estudio del electromagnetismo en la materia, –incluyendo las propiedades dieléctricas y el diamagnetismo– la interacción magnetoóptica y sus últimos experimentos tratando de verificar la unidad de las fuerzas.

## **La física y la química a comienzos del s. XIX**

En el siglo XIX el florecimiento de la actividad científica y técnica, surgido a partir del espíritu ilustrado del siglo anterior, alcanza su máximo esplendor. La ciencia se institucionaliza y la actividad científica se convierte en una profesión. La ciencia se convierte en fuerza productiva con la revolución industrial y se beneficia de las condiciones económicas favorables: el comercio colonial en Francia y Gran Bretaña y el importante desarrollo industrial en Estados Unidos y Alemania.

La creación y transmisión de los nuevos conocimientos exige el desarrollo de sistemas de enseñanza e investigación adecuados. Se renuevan las universidades, dando la mayor importancia al conocimiento científico y se crean otras instituciones que van a jugar un papel esencial en la nueva manera de hacer ciencia. Entre ellas, en Gran Bretaña, se crea en 1799

la Royal Institution, a propuesta de Benjamin Thomson, conde de Rumford, con el objeto de «[...] difundir el conocimiento y facilitar [...] la aplicación de la ciencia a las finalidades comunes de la vida». Bajo la influencia de Humphry Davy adquiriría un carácter fundamentalmente enfocado al desarrollo de la ciencia. En ella Davy desarrollaría la primera teoría coherente de la acción electroquímica y Faraday llevaría a cabo sus descubrimientos.

Las teorías y explicaciones físicas se enmarcan siempre en algún tipo de cosmovisión que les da sentido y sirve como guía en la elaboración de modelos y formulación de leyes. La cosmovisión dominante a principios del S. XIX era la de Newton. En la forma en que la interpretaban sus seguidores consistía en una imagen en la que el mundo está constituido por «corpúsculos» sólidos, extensos, y espacio vacío. Cada corpúsculo puede actuar a distancia, ejerciendo así fuerzas de tipo central, sobre otros cuerpos. La gravitación y la mecánica newtoniana estaban desarrolladas sobre esta base.

Frente a la cosmovisión newtoniana existían otros sistemas que formaban una base de oposición, no generalizada pero persistente, al universo de Newton. En especial Faraday iba a ser atraído por las ideas de Rudjer Bosovich (1711-1787). La doctrina de Bosovich se basaba en un atomismo puntual. Sus «átomos» o partículas primarias son todos idénticos y estables, y se mantienen a distancia unos de otros, de manera que cualquier objeto material contiene un número finito de ellos. Estas partículas puntuales tienen «tendencias» atractivas y repulsivas que producen aceleraciones relativas, variables en signo y magnitud con la distancia. Las interacciones así manifestadas explicarían todos los fenómenos físicos, por ejemplo, gravitación, cohesión, cambios de estado, etc.

A comienzos del S. XIX la palabra «Física» empezaba a adquirir un nuevo significado. Dejaba de utilizarse como sinónimo de «filosofía natural» y tomaba una acepción más precisa y parecida a la actualmente en uso, para indicar el estudio de la mecánica, los fenómenos térmicos, la electricidad y la óptica. La Química seguía estando asociada a la Física a través del estudio de los fenómenos térmicos y eléctricos que aparecían en la materia. Solamente la mecánica ofrecía una teoría cuantitativa y satisfactoria. El calor y la electricidad se explicaban como manifestaciones de «atmósferas» o de fluidos imponderables y de las fuerzas que las partículas de estos fluidos ejercían sobre la materia. Representativa de esta ciencia es la figura de Laplace. Él y sus seguidores desarrollaron una teoría de las fuerzas intermoleculares interpretadas siempre como fuerzas centrales, análogas a las gravitatorias, como fundamento para explicar tanto la mecánica como los fenómenos ópticos, térmicos y eléctricos.

No obstante existían visiones alternativas, como el atomismo de Dalton en química, que planteaba una cuantificación de los pesos relativos de los elementos en vez de una teoría de las fuerzas químicas. Benjamin Thomson rechazó la idea del calórico basándose en que esta teoría no podía explicar la generación de calor por fricción. Para explicar la naturaleza de la luz se fue imponiendo la teoría ondulatoria frente al modelo corpuscular laplaciano gracias a los trabajos de Young y Fresnel.

La electricidad representaba un reto para una visión unitaria de la Física. El desarrollo de instrumentos y máquinas para producir, almacenar o medir la electricidad había propiciado en gran medida el avance del conocimiento, todavía muy fragmentario, en esta materia. Potentes generadores de fricción, basados en discos de vidrio rotatorios como el de Winter, habían sustituido a las primeras máquinas de azufre. Se había inventado la botella de Leyden o condensador (Ewald Jürgen von Kleist, 1745) y el electroscopecio de hojas de oro (Abraham Bennet, 1787). En 1800, Volta, motivado por las investigaciones de Galvani sobre electricidad animal, anunció su invención de la primera batería química, consistente en una serie de discos de metales diferentes separados por tejido humedecido con un ácido débil, que producía

una corriente continua. Fue uno de los desarrollos más importantes en la historia de la electricidad y se difundió enseguida a ambos lados del Atlántico.

Todos estos descubrimientos permitieron disponer de fuentes potentes de electricidad y también cuantificarla de una manera sencilla. Anteriormente a la invención del electroscopio y los generadores rotatorios los experimentadores usaban como referencia la sensación dolorosa de la descarga en la mano o la lengua. La separación de las hojas de oro o simplemente un número determinado de vueltas en la máquina daban una medida mucho más precisa y conveniente. Surgió así en la última parte del S. XVIII una intensa actividad experimental sobre los fenómenos eléctricos.

En esa época Charles Coulomb estableció las bases de la electrostática cuantitativa. Propuso la existencia de dos fluidos eléctricos, positivo y negativo, midió las fuerzas con su célebre balanza de torsión y estableció la ley del inverso del cuadrado de la distancia en 1785. También desarrolló teóricamente las consecuencias de su ley para el equilibrio de ciertas configuraciones de conductores. Los británicos en general preferían la hipótesis de un único fluido eléctrico, idea propuesta por Benjamin Franklin, en la que la electricidad positiva o negativa son la consecuencia de un exceso o defecto de tal fluido. No había diferencia en cuanto a las predicciones cuantitativas de ambas de modo que cualquiera de las dos teorías podía explicar perfectamente los resultados experimentales. Algunos incluso evitaban la hipótesis de fluidos y sobre todo la idea de que actuaran a distancia.

Tras el descubrimiento de Volta, Nicholson y Carlisle efectuaron la descomposición electrolítica del agua que Cruickshank extendió a disoluciones de sales metálicas. Estos experimentos interesaron a Davy, en ese tiempo profesor de Química en la Royal Institution. Diseñó y construyó una sucesión de grandes voltaicas; la última de ellas, construida en 1808 constaba de 2000 pares de placas de zinc y cobre, cada una de 6 pulgadas cuadradas. Con estas baterías Davy fue capaz de fundir el platino, el cuarzo y el zafiro y vaporizar el diamante. También descompuso álcalis, extrayendo los nuevos elementos sodio y potasio. De manera similar obtuvo el calcio, el magnesio, el estroncio y el bario. Davy, a partir de sus numerosos experimentos de descomposición eléctrica de líquidos, manifestó la idea de que las fuerzas eléctrica y química eran probablemente la misma.

### **Primeros años de Faraday. Incorporación como ayudante a la Royal Institution**

Faraday había nacido en Newington al sur de Londres, en 1791. Su padre era un herrador de caballos, emigrado desde Yorkshire en busca de mejor fortuna –que no llegó a conseguir– y su madre hija de un granjero. Ambos pertenecían a la iglesia de los sandemanianos, pequeña secta protestante.

Hasta los trece años, Faraday recibió una educación básica. Después, en 1804, se empleó como recadero y repartidor de periódicos en la tienda de un librero, George Riebau. Pronto ascendió a aprendiz de encuadernador. En sus ratos libres leía los libros científicos que caían en sus manos, entre ellos las *Conversaciones de Química* de Marquet y los artículos sobre electricidad de la *Enciclopedia Británica*. Construyó una máquina eléctrica de fricción y otros instrumentos y empezó a repetir algunos experimentos. Desde estos primeros ensayos, el joven Faraday hizo uso de sus investigaciones de una manera que iba a ser característica en él: el experimento era tanto una vía de conocimiento como un instrumento de crítica hacia las teorías propias o ajenas. Ya en 1800, se sirvió de los experimentos realizados con sus escasos medios y aparatos primitivos para criticar la teoría de la electricidad mantenida por el autor del artículo de la *Enciclopedia Británica*.

Otro tipo de lecturas que según el propio Faraday le influyeron en su primera juventud fueron *Las Mil y una Noches*, que le despertaron la imaginación y la *Mejora de la Mente* de Isaac Watts, libro que según él, «le enseñó a pensar». Watts expresaba una tradición cultural derivada de las ideas de John Locke que daba un papel central a la memoria en los procesos de adquisición de conocimiento. El conocimiento según él se construye por el almacenamiento de sensaciones e ideas y por tanto se basa en la memoria. Faraday no tenía buena memoria; más de una vez repetiría un experimento que ya había hecho y aparentemente olvidado. Eso le iba a llevar a desarrollar durante su vida científica una serie de recursos de ayuda, entre ellos un *Diario* (que comenzaría en 1820) o conjunto de volúmenes encuadernados donde registró su actividad de laboratorio, observaciones, deducciones teóricas..., con todas sus entradas numeradas secuencialmente; en los libros de ideas registró especulaciones, posibles experimentos, reflexiones teóricas, etc. y, por último, se conservan sus notas u hojas sueltas con recordatorios y anotaciones, que solía clasificar y utilizar para organizar sus experimentos y artículos. Este tipo de estructura organizativa de la información, variada y meticulosa, refleja la propia estructura ordenada de su pensamiento.

En 1810 Faraday se incorporó a un grupo de jóvenes inquietos que habían constituido la City Philosophical Society, celebrando reuniones y conferencias científicas en casa de uno de ellos. También asistió a un ciclo de cuatro conferencias de Davy en la Royal Institution con invitaciones que le había regalado uno de los clientes de la librería.

En 1812, Faraday terminó su aprendizaje y entró a trabajar como oficial en un taller de encuadernación. Pero el trabajo no le atraía sobre todo en comparación con el atractivo que para él tenía la ciencia. Escribió a sir Joseph Banks, presidente de la Royal Society, quien no le contestó. Se dirigió entonces a Humphry Davy, adjuntándole encuadernadas las notas que había tomado en sus conferencias. Davy quedó favorablemente impresionado. El científico había tenido un accidente en el laboratorio que había afectado a sus ojos y, pensando en emplearle como amanuense, le ofreció un puesto temporal de ayudante. Dos meses más tarde, por recomendación de Davy, se contrató a Faraday como ayudante de laboratorio de la Royal Institution.

Después de varios meses de intenso trabajo y aprendizaje de las técnicas de laboratorio, Davy invitó a Faraday a acompañarle en un viaje científico por el continente, en calidad de ayudante de laboratorio y ayuda de cámara. Partirían en octubre de 1813 y el viaje duraría 18 meses, llevándoles por Francia, Suiza, Italia, Alemania y Bélgica. Para Faraday, que pudo establecer relación con los científicos más influyentes del continente y visitar los laboratorios europeos más importantes, fue una experiencia crucial en su formación. Visitaron París, donde Davy, ayudado por Faraday, hizo un importante descubrimiento al identificar al yodo, obtenido de las cenizas de algas marinas, como un nuevo elemento químico. En Ginebra conocieron a De la Rive e hicieron experimentos con el pez torpedo eléctrico. En Italia visitaron a Volta, viajaron al Vesubio y realizaron un experimento en el que Davy quemó un diamante con la luz concentrada por una gran lente del Duque de Toscana, demostrando que era carbono puro.

A su vuelta a Londres, trabajó mucho, colaborando en la preparación de demostraciones y charlas de los conferenciantes de la Royal Society, realizando análisis químicos y participando en sus investigaciones. Faraday ocuparía el puesto de ayudante durante los diez años siguientes. Durante este periodo realizó análisis de muestras de agua de diferentes regiones de Gran Bretaña y ayudó a Davy con su invención de una lámpara de seguridad para las minas. En 1820 se casó con Sarah Barnard, hija de un pastor sandemaniano. Pocas semanas después hizo su confesión de fe en esta iglesia. Leía la *Biblia* diariamente, asistía a la iglesia el sábado, a veces (cuando tuvo el cargo de notable) tenía que predicar en ella, y estaba obligado a atender a los miembros necesitados de la congregación, donando parte de sus

ganancias. Mientras, sus primeros trabajos originales fueron el análisis de la cal viva de Toscana y su identificación de dos cloruros de carbono.

En esta etapa, Faraday formó su habilidad práctica y sus ideas teóricas a través de Davy que era un científico brillante además de un divulgador excelente. Un aspecto fundamental en el que las ideas de Davy diferían de la ortodoxia dominante era respecto al origen de las cualidades, tanto físicas como químicas, de la materia ponderable, un problema que había preocupado a los filósofos desde la antigüedad. Davy había demostrado mediante análisis químicos y experimentos que el diamante era carbono puro. ¿Cómo era posible que el diamante y el grafito ordinario fuesen idénticos, teniendo propiedades tan distintas? Existían dos teorías para explicar las cualidades diferentes de las sustancias: o bien los átomos tenían formas diferentes o bien eran las agregaciones de átomos las que adoptaban esas formas diferentes, lo que explicaría las cualidades particulares. Por ejemplo, los ácidos tendrían puntas agudas que penetran en los poros de otros cuerpos, incluso densos como los metales, atacándolos. Pero la teoría atómica convencional, basada en la gravitación como única fuerza responsable de la cohesión, solo podía predecir la agregación compacta de la materia pero no la cristalización según patrones geométricos regulares. Aquí es donde Davy encontró la teoría de Bosovich especialmente aplicable. Según ella, los elementos estaban compuestos de átomos puntuales y sus cualidades químicas eran el resultado de los patrones complejos de fuerzas producidas por la asociación de esos átomos. La teoría tenía una sutileza que los átomos tipo *bola de billar* de Dalton no poseían y parecía aportar al menos un marco explicativo necesario para el avance de la química analítica. Por otra parte, ofrecía un modelo del mundo físico que eliminaba muchas de las dificultades de las teorías de fluidos con su acción a distancia asociada, al reducir la realidad a fuerzas, aspecto que resultaba atrayente a Faraday y sobre el que volveremos más adelante.

## 1820-1829. Descubrimiento de las rotaciones electromagnéticas

En 1819, Oersted, en una demostración durante una de sus clases, colocó una aguja imanada cerca de un alambre recorrido por una corriente. La aguja se movió, situándose perpendicularmente a la dirección de la corriente. Tras varias observaciones, utilizando una batería más potente, Oersted describió la acción del «conflicto eléctrico» producido por la corriente en el alambre sobre la aguja imanada, estableciendo que actuaba a través del espacio y solo sobre partículas magnéticas de la materia. Ésta atravesaba sin modificación los cuerpos no magnéticos y actuaba en círculos.

La noticia de las investigaciones de Oersted se extendió rápidamente en esa época de auge de conocimiento científico. Poco después, André-Marie Ampère anunció su descubrimiento de que dos alambres recorridos por corrientes se atraían o repelían según las corrientes fuesen en el mismo sentido o en sentidos opuestos. También Jean-Baptiste Biot y Félix Savart repitieron los experimentos de Oersted y determinaron la ley de fuerza que explicaba ese efecto. De acuerdo con su ley, la fuerza producida por cada elemento de corriente dependía del inverso del cuadrado de la distancia al polo magnético, pero a diferencia de la gravitación actuaba perpendicularmente tanto a la dirección de la corriente como a la dirección de la línea trazada entre el polo magnético y el elemento de corriente. Ampère y Biot interpretaban estos fenómenos como acciones debidas a fuerzas básicamente newtonianas.

Richard Phillips, amigo de Faraday de su época en la City Philosophical Society, y ahora editor de *Annals of Philosophy*, le pidió que escribiera una revisión sobre los trabajos de electromagnetismo de Oersted, Ampère, Biot y Savart. Faraday, como sería característico en él,

repitió la mayor parte de los experimentos sobre los que escribió. Según sus palabras: «[...] fui siempre incapaz de aceptar un hecho sin verlo». Entre otras, reprodujo las observaciones de Davy, quien había obtenido, usando una batería más potente que la de Oersted, que el alambre atraía un extremo de la aguja y repelía el otro. Pero llevó a cabo una variación metódica de la posición del alambre y observó que la atracción se tornaba repulsión cuando el alambre pasaba más allá de un cierto punto situado no muy lejos del extremo de la aguja. Concluyó que los polos de la aguja imanada no estaban en sus extremos. Además imaginó mentalmente que un alambre libre se movería en círculo alrededor de un polo magnético. Por ensayo y error pudo encontrar pronto un dispositivo experimental en que el alambre rotaba alrededor de un polo magnético. Dado que la acción debía ser recíproca, también construyó el dispositivo en que el polo magnético rotaba alrededor del alambre recorrido por una corriente.

Estos experimentos fueron claves en la elaboración teórica que Faraday iría desarrollando del electromagnetismo. De acuerdo con ellos, el énfasis para él se situaba en el espacio alrededor de los alambres e imanes como asiento de las acciones electromagnéticas. Faraday veía en el espacio alrededor de los alambres patrones circulares de fuerza. El concepto unificador básico como centro del que emanaban las acciones era el de «potencia» (*power*). La interacción entre un polo y un alambre implicaba tres potencias: la del polo magnético y las dos del alambre. Así vio el espacio lleno de potencias y rotaciones virtuales; en cambio no se definió sobre el estado interno del imán o del alambre con corriente, no queriendo adelantar ninguna teoría sobre la naturaleza del magnetismo o de la corriente eléctrica. Esta interpretación era completamente alejada de la de Ampère, con quien mantuvo una correspondencia llena de polémica. Éste buscaba la unificación de la electricidad y el magnetismo bajo la hipótesis de que éste último era debido a corrientes moleculares en la materia imanada. El hecho simple esencial era para él la interacción entre elementos de corrientes por fuerzas análogas a la de gravitación.

Entre ambos existían además importantes diferencias de estilo. Ampère, a quien Maxwell definió como «*el Newton de la electricidad*», había basado su electrodinámica en un razonamiento especulativo, fundado en la analogía newtoniana y apoyado fuertemente en el formalismo matemático. Faraday, por el contrario, aunque guiado por ideas metafísicas, trataba de evitar especulaciones ateniéndose a los hechos, poniéndolos cuidadosamente «unos al lado de los otros». Hacia esta época, Faraday resumió sus ideas de lo que debía ser un filósofo; sus palabras parecen adecuadas para describir su actitud y su propia vida: «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 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». Por otra parte, Faraday desconfiaba de las teorías matemáticas cerradas, negándoles en gran medida valor predictivo y mostrándose orgulloso de su método experimental frente a la especulación matemática formal.

En esta misma época, Faraday realiza otros importantes descubrimientos, como la licuefacción de los gases. Ocurrió en 1823 cuando estaba analizando hidrato de cloro por encargo de Davy. Éste sugirió que calentara el tubo sellado con la muestra. El hidrato se descompuso, la presión aumentó y produjo la licuefacción del cloro. Después Faraday licuaría otros muchos gases, llegando a producir temperaturas de hasta  $-110^{\circ}\text{C}$ . En 1825, tratando de resolver un problema de combustión del gas del alumbrado en Londres, descubrió un hidrocarburo nuevo, al que más tarde se le llamaría benceno.

Otra faceta de Faraday es la de divulgador. En 1826 se ocupó de ampliar el programa de la Royal Institution para la difusión de la ciencia. Fundó las Charlas de los Viernes y al año siguiente las Conferencias Juveniles de Navidad. Faraday adquiriría tal fama de buen conferenciante que muchos miembros de la nobleza y realeza asistirían a sus charlas, lo que le valió cierta influencia entre los políticos victorianos.

En 1823 Phillips quiso presentar a Faraday como miembro de la Royal Society. Wollaston aceptó encabezar la lista de los proponentes pero Davy, entonces presidente de la Sociedad, se opuso enérgicamente a su ingreso. A pesar de ello, en votación secreta en enero de 1824, con un solo voto en contra, Faraday fue admitido. Las relaciones con Davy no volverían a ser nunca lo que habían sido.

En 1824 recibió el encargo de formar parte de una comisión, junto con el astrónomo John Herschel y el fabricante de instrumentos George Dollan, para mejorar la calidad de los vidrios de los instrumentos ópticos. El trabajo le ocupó buena parte de su tiempo durante los seis años siguientes, sin producir grandes resultados.

### **1829-1831. La inducción electromagnética**

A diferencia de Davy, Faraday siempre manifestó su aversión por el poder, la fama y la política. Expresó a menudo su desaprobación por los honores que se concedían en Gran Bretaña, por ejemplo los nombramientos de caballero, porque pensaba que se concedían por influencias; en cambio aceptaba los concedidos por Francia y Prusia en los que consideraba que se premiaban los méritos. En 1864 rechazaría la presidencia de la Royal Society, el puesto científico más importante de Gran Bretaña, que había ocupado Newton, y un título de nobleza que le ofreció la reina. Lo único que aceptó fue una pequeña pensión y la casa de Hampton Court donde pasaría los últimos años de su vida. Tras el fallecimiento de Davy en mayo de 1829, y la finalización de sus trabajos sobre el vidrio óptico, Faraday vuelve a sus investigaciones en electromagnetismo. En 1831, también decidió renunciar a sus encargos como asesor técnico para dedicarse por entero a la investigación.

Oersted había mostrado que la electricidad produce magnetismo; era probable entonces el efecto inverso: una potencia magnética debía inducir una corriente eléctrica en conductores. Así, casi todos los investigadores sobre los temas de electricidad y magnetismo habían manejado la posibilidad de la inducción electromagnética. Algunos, incluyendo el propio Faraday la habían buscado sin conseguirlo y unos pocos produjeron el efecto sin reconocerlo.

Los antecedentes de su descubrimiento podemos buscarlos en tres fases concretas de su evolución. La primera fase se sitúa en la época y el contexto de su controversia con Ampère. Ya en 1822 escribió en su cuaderno de notas: «convertir magnetismo en electricidad». En 1825 Faraday colocó dos alambres paralelos, como había hecho Ampère, separados solo por el espesor de un papel y conectó uno de ellos a una batería y el otro a un galvanómetro. Según el modelo de Ampère en el alambre primario la acción de la batería descompondría el éter luminífero que permea los alambres, produciendo flujos en direcciones opuestas de los fluidos positivo y negativo y una distribución de carga transitoria en el alambre con separación de cargas positiva y negativa. Ese «estado» en el alambre primario debería lógicamente, inducir un «estado» similar, con cargas opuestas, en el otro. Faraday no detectó efecto ninguno sobre la aguja, concluyendo que no había ningún efecto visible de inducción. Curiosamente, el resultado del experimento habría sido otro si Faraday hubiese cerrado antes el circuito secundario que el primario, en cuyo caso habría detectado el efecto transitorio de corriente inducida en aquél, con un galvanómetro suficientemente sensible.

En la segunda fase de su evolución, Faraday buscaba una solución al problema de cómo se transmitía la electricidad a través del alambre de un circuito, dado que le parecía inaceptable la hipótesis de fluidos imponderables moviéndose por el circuito. El trabajo de Fresnel sobre la teoría ondulatoria de la luz y sus propios experimentos sobre la propagación de ondas de sonido le iban a dar una posible respuesta.

Hacia 1827 se publicaron en el *Quarterly Journal of Science*, de la Royal Institution, una serie de artículos que eran traducción al inglés por Young de la teoría de Fresnel de la luz. Fresnel demostraba que todos los fenómenos ópticos podían explicarse suponiendo que la luz se propagaba por ondas y no por corpúsculos, a través del espacio.

Faraday se interesó por las ondas y, como en casi todas las materias que estudiaba, experimentó intensamente sobre ellas. Dio conferencias sobre los estudios de Charles Wheatstone referidos al sonido y reprodujo las figuras de Chladni que forma la arena sobre una placa de metal o vidrio cuando se toca una nota con un violín próximo. Este fenómeno muestra la inducción acústica, en la cual el aire actúa como medio transmisor de la vibración de la cuerda de violín hasta la lámina con arena. Las intensas investigaciones sobre las figuras de Chladni, que le fascinaban, le ocuparon seis meses, justo antes de su experimento sobre la inducción. Faraday no mencionó la posible influencia de estos estudios de las ondas acústicas sobre su investigación de la inducción electromagnética, pero la analogía entre la transmisión de fuerza por las ondas de sonido, capaz de crear un estado estacionario sobre una placa vibrante separada de otra, y la transmisión de las fuerzas magnéticas entre dos circuitos, parece que difícilmente pudo haber escapado a Faraday en esa época.

La tercera fase, la que le motivó a montar su experimento del anillo fue simplemente una noticia sobre el efecto del hierro dulce para transmitir la acción magnética. Se trató del anuncio de Joseph Henry de la elaboración de un potente electroimán que podía levantar 300 kilogramos de hierro. Al invertir la polaridad, el peso permanecía suspendido un corto tiempo, lo que indicaba que la acción magnética residía en el hierro dulce. Faraday estaba cada vez más convencido de que las acciones eléctrica y magnética se propagaban como ondas en un medio material.

En agosto de 1831 diseñó un nuevo dispositivo que aprovechaba el efecto concentrador del hierro. Dispuso alambres de cobre aislados, enrollados alrededor de los lados opuestos de un anillo de hierro. Conectó luego los extremos del arrollamiento secundario a un galvanómetro constituido por una aguja imanada suspendida y un alambre paralelo. Cuando conectó el primario a la batería, observó un efecto claro pero transitorio. Cuando rompió la conexión con la batería de nuevo observó desviación de la aguja, en sentido contrario. Que el efecto fuera transitorio le sorprendió. La analogía con la inducción electrostática y el que el efecto inverso de acción magnética por la electricidad se produjera con una corriente estacionaria, hacía esperable un efecto también estacionario. Sin embargo, tal como Faraday lo describió, la corriente inducía una corriente similar en el otro circuito, pero que duraba solo un instante, «más parecida a la ola de electricidad de una botella de Leyden que a la corriente de una batería voltaica».

Faraday, con su flexibilidad para aceptar nuevos hechos, captó enseguida el significado de la desviación del galvanómetro y lo que otros habrían considerado como un efecto parásito a descartar, para él fue objeto de atención y análisis cuidadoso hasta explorar completamente todas sus implicaciones.

Si la inducción de corriente transitoria al cerrar el circuito primario era sorprendente, la producción de corriente al abrirlo parecía inexplicable. Era difícil admitir un fenómeno que iba en contra de la idea de gradación entre causa y efecto: una disminución de corriente en el primario producía una corriente en el secundario que podía ser mucho mayor que aquella; era

necesario que hubiese algún mecanismo intermedio que produjese ese efecto inesperado. Faraday supuso que durante el paso de corriente el alambre conductor adquiere un estado «tónico» que mantiene en tanto existe la corriente y se relaja al desaparecer ésta, dando lugar a la corriente transitoria inversa. Faraday le llamó «estado electrotónico». De esta forma podía dar una interpretación de las corrientes inducidas, explicar la inducción de un estado por otro estado análogo y proporcionar una base para explicar la naturaleza de las corrientes eléctricas.

Faraday trató de encontrar una confirmación experimental de ese estado electrotónico. Pensó que en éste, el conductor debía mostrar una potencia magnética o una variación de su potencia conductora. Los intentos para detectar cualquier variación de cualidades eléctricas o magnéticas fueron infructuosos. Poco tiempo después sustituiría la hipótesis por una explicación diferente de la inducción pero seguiría aferrado durante toda su vida científica a la idea del estado electrotónico.

Después de sus experimentos con imanes y alambres, Faraday se dedicó a analizar el fenómeno que Arago había descrito en 1822. Arago había descubierto que el movimiento rotatorio de un disco de cobre se amortiguaba por el efecto de un imán próximo. La explicación comúnmente aceptada del fenómeno fue una imanación temporal del cobre. Ahora, a la luz de sus descubrimientos, Faraday pensó que el amortiguamiento podía estar causado por fuerzas sobre las corrientes inducidas en la placa. Sobre un disco de cobre que giraba entre las armaduras de un gran imán colocó dos cuchillas colectoras, en puntos distintos del disco, las conectó a un galvanómetro y pudo observar que pasaba corriente y que su sentido se invertía cuando el disco giraba en sentido contrario. Había ideado la primera dinamo o generador eléctrico.

El descubrimiento de la inducción provocó enseguida gran interés en los ámbitos científicos. Jean Hachette leyó ante la Academia de París, sin permiso de su autor, una carta en la que Faraday le resumía sus experimentos. El informe se publicó en una revista y dos investigadores italianos, L. Nobili y V. Antinori, experimentaron sobre el tema y publicaron sus resultados, antes de que Faraday hubiera hecho pública la memoria de su descubrimiento. Ello irritó a Faraday, que a pesar de su amabilidad tenía a veces un carácter explosivo y le hizo reaccionar con fuertes críticas hacia el trabajo y la actitud de esos autores.

Él comunicó sus resultados en un primer artículo, leído a la Royal Society en Noviembre de 1831. En él utiliza por primera vez la frase «líneas de fuerza magnéticas» para referirse a las líneas a lo largo de las cuales se disponen las limaduras de hierro alrededor de los polos de un imán. Faraday demostró que la inducción magnética se producía en un circuito siempre que éste cortase las líneas de fuerza magnética emanadas por un imán o por otra corriente. Empezó a utilizar este concepto de las líneas de fuerza, primero como un auxiliar descriptivo y después dotándole de un significado físico cada vez mayor para interpretar fenómenos y ayudarse en el diseño de nuevos experimentos.

Sin embargo, Faraday no dejó que la teoría impusiera prejuicios sobre sus investigaciones. Aunque las ideas previas como el estado electrotónico o la inducción de un estado similar al estado inductor jugaron un papel para orientar su investigación, siempre fueron esquemas generales flexibles que no dejaba que invadieran el campo de los hechos. En este sentido hay una diferencia fundamental entre los métodos científicos de Faraday y Ampère, como ya comentamos en relación con las rotaciones electromagnéticas. Ampère construyó su teoría a partir de la tradición laplaciana, con una fuerte base matemática y utilizó en su mayoría los experimentos, diseñados rígidamente, para comprobar las predicciones teóricas; ello fue la causa, sin duda, de que no llegara a descubrir la inducción electromagnética, que

prácticamente anticipó en un experimento ideado para comprobar la existencia de las corrientes moleculares, ya en 1821.

Faraday no dejó desviar su atención por las aplicaciones prácticas de sus descubrimientos. Como él mismo mencionó, estaba seguro de la importancia de los mismos y dejaba a otros la tarea de llevar a cabo la exploración de sus posibilidades. En una charla de 1817, en una sociedad londinense, sobre el elemento cloro, refiriéndose a la cuestión de las aplicaciones, dijo: «apuntaré una respuesta a aquéllos que tienen la costumbre de preguntar ante todo nuevo descubrimiento: ¿cuál es su utilidad? El Dr. Franklin les dijo: ¿cuál es la utilidad de un recién nacido? La respuesta del científico fue: Esfuérzate para hacerlo útil».

Ésta fue una época de actividad febril tanto experimental como especulativa. Faraday pensaba que estaba en la antesala de un descubrimiento fundamental. Dos reflexiones suyas de esta época son especialmente interesantes. En la nota sellada que depositó en marzo de 1832 en la Royal Society para reclamar la primacía sobre sus ideas, sugería que la acción inductiva del magnetismo «procede gradualmente desde los cuerpos magnéticos y requiere tiempo para su transmisión» y que, igualmente, la inducción electrostática «se realiza de un forma progresiva similar»; establecía una analogía con las vibraciones en la superficie del agua o del sonido en el aire y predecía que «la teoría de las vibraciones se aplicará a estos fenómenos como se aplica al sonido y muy probablemente a la luz». La segunda especulación se refiere a la interconversión de las fuerzas en la inducción y aparece en su diario de laboratorio también en marzo del mismo año. Faraday indica que la relación mutua entre la electricidad, el magnetismo y el movimiento se puede representar «mediante tres líneas que se cortan perpendicularmente». La acción de cualquiera de dos de ellas producirá la tercera. Estas especulaciones reflejan que Faraday tenía formado ya un modelo de la propagación de las acciones eléctricas y magnéticas mediante vibraciones u ondas y de la relación entre las potencias eléctrica y magnética.

### **1833-1839 Identidad de las diferentes formas de electricidad. Electroquímica. Dieléctricos**

La mente de Faraday buscaba siempre poner orden en su comprensión de la naturaleza. La electricidad podía tener diferentes orígenes (fricción, pila de Volta, pez torpedo o gimnoto, termoelectricidad y ahora se añadía la magnetoelectricidad), y según esos orígenes se denominaba de forma diferente. Ya Wollaston en 1801 había realizado experimentos para demostrar la identidad entre la electricidad friccional y la voltaica. Pero el tema aún permanecía en debate; por ejemplo Davy cuestionaba la identidad de la electricidad animal y la voltaica. Faraday, en cambio, pensaba que todas ellas eran manifestaciones de una única potencia eléctrica, pero había que verificarlo. Empezó un estudio exhaustivo, repitiendo muchos experimentos e ideando otros nuevos. Analizó sistemáticamente los efectos que podían producir cada una de las formas de corriente: sensación fisiológica, calor, magnetismo, descomposición química.

Faraday presentó su conclusión sobre la *Identidad de las electricidades* ante la Royal Society en Enero de 1833. A continuación se dedicó a una caracterización también cuantitativa de esas electricidades, al tiempo que investigaba la relación entre electricidad y materia y la naturaleza misma de la corriente eléctrica.

Sobre la conducción en electrolitos existían opiniones divergentes. Davy y Grotus, en la primera década de 1800, la habían interpretado como un proceso de descomposiciones y recomposiciones en la sustancia. Para ellos la acción era desencadenada por la influencia

directa o indirecta de los polos. Más tarde, Biot y De la Rive sostuvieron que la descomposición era debida a la atracción de los polos y tenía lugar solamente en ellos, produciéndose después la migración de las partículas cargadas.

Faraday emprendió una serie de investigaciones sistemáticas. Utilizando dos trozos de papel humedecido con ácido e indicadores ácido/base, sobre los que colocaba dos alambres de platino, y separándolos por una cuerda húmeda como conductor intermedio, comprobó que la descomposición electrolítica era independiente de la distancia entre los polos. Después vio que si sobre los lados de uno de los trozos de papel colocaba el polo positivo de platino y el extremo de una cuerda húmeda conectada al negativo de la batería, seguía ocurriendo la descomposición, a pesar de la ausencia de un verdadero polo negativo.

Finalmente, dispuso una serie de pares de papeles indicadores ácido/base que proporcionaban una visualización de la descomposición interna del electrolito a lo largo del camino de la acción eléctrica, de una manera parecida a la manifestación de las líneas de acción magnética mediante las limaduras de hierro.

De esta forma llegó a la firme conclusión de que la descomposición electrolítica tenía lugar en el interior de la disolución y que el resultado observado de que los productos solo aparecieran en los extremos era debido a que en el interior ocurría una recomposición al mismo ritmo. Esto descalificaba las teorías anteriores sobre el papel de los polos y reafirmaba su idea del estado electrotónico.

Buscando una confirmación independiente de ese estado especial de la disolución en descomposición/recomposición, hizo pasar un haz de luz polarizada a través del electrolito conductor, pero no encontró ningún efecto sobre la luz.

Para cuantificar el efecto electroquímico construyó el «volta-electrómetro» o «voltámetro», basado en la cantidad de gas producido en la descomposición electrolítica del agua. Tras una investigación cuidadosa, resolviendo numerosos problemas secundarios, obtuvo las dos conclusiones que constituyen sus importantes leyes de la electroquímica:

1. La suma de descomposición química es constante para cualquier sección tomada en el electrolito, independientemente de la distancia a los polos.

2. Para una cantidad constante de electricidad, independientemente de la naturaleza del conductor (agua salada, soluciones salinas, ácidos, sustancias fundidas, etc.), la cantidad de acción electroquímica es constante.

El que los equivalentes electroquímicos resultaran coincidir con lo químicos parecía confirmar las ideas de Davy y Berzelius de que las fuerzas químicas son de origen eléctrico, es decir, según Faraday, que la afinidad química ordinaria es una simple consecuencia de las atracciones eléctricas de las partículas que constituyen las diferentes clases de materia.

Es paradójico que a pesar de estos resultados que podían considerarse como una confirmación de la constitución atómica de la materia, Faraday siguió manteniendo una actitud escéptica hacia la teoría atómica, actitud que había heredado de Davy y que se basaba en que dicha teoría no podía explicar todos los fenómenos conocidos e iba por otra parte, mucho más allá de la experiencia. Como escribió en 1844 «[...] toda nuestra percepción y conocimiento del átomo, incluso en nuestra imaginación, se limita a la idea de sus cualidades. Una mente que considerara por primera vez el tema, encontraría difícil pensar en las cualidades de la materia independientemente de algo separado a lo que llamar materia, pero es aún mucho más difícil pensar en o imaginar esa materia, independientemente de sus cualidades. Ahora bien, las cualidades las reconocemos en cada fenómeno de la creación, la materia abstracta en ninguno. ¿Para qué entonces suponer la existencia de lo que ignoramos, nos resulta inconcebible y de lo que no hay, además, necesidad filosófica?»

## Dieléctricos. Capacidad inductiva específica

En el curso de sus investigaciones electroquímicas Faraday descubrió que el hielo no dejaba pasar la corriente y lo mismo ocurría a los electrolitos en estado sólido, en general, lo mismo que sucedía en la inducción electrostática en dieléctricos. De ello, en palabras de Faraday, «empecé a sospechar que la inducción electrostática es en todos los casos una acción entre partículas contiguas y que nunca se da la acción eléctrica a distancia». La teoría le hacía presagiar a Faraday la posibilidad de la unificación de todos los fenómenos eléctricos, en especial de los efectos estáticos y dinámicos.

De acuerdo con la intuición de Faraday, el dieléctrico bajo inducción electrostática está en un estado de polarización, de manera que cualquier porción imaginada de él tiene un extremo positivo y otro negativo, tal como los polos norte y sur de un imán. La inducción es el estado previo de la conducción. Un conductor no puede mantener la polarización y sufre un colapso progresivo que constituye la corriente eléctrica. La carga eléctrica es simplemente el extremo de la línea de polarización. La carga debe residir en la superficie del aislante en contacto con el conductor, pero no en éste. El aislador es el elemento esencial en la teoría al ser el lugar donde reside la carga. Faraday le llamó el «eléctrico», para convertirse en dieléctrico por sugerencia de su amigo Whewell.

Faraday ideó tres clases de experimentos diferentes para poner a prueba su teoría frente a los modelos usuales. En primer lugar, si conseguía crear carga de un signo sin crearla también del opuesto, su teoría quedaría refutada. En la teoría de fluidos en cambio, las cargas positiva y negativa podían aparecer en cantidades diferentes. Faraday experimentó con conductores huecos cargados y encontró que en la parte interna del conductor no existía carga, no importa cuán electrificado estuviera el conductor globalmente. Esto significaba que una parte de un conductor solo puede estar cargada si se relaciona inductivamente con otra parte de un conductor con carga opuesta. En enero de 1836 Faraday construyó un cubo conductor de 3.5 m de lado, con madera y lámina de estaño, lo cargó mediante un generador electrostático y permaneció en su interior comprobando con electrómetros que no existía carga interna. Concluyó que no existe carga absoluta, pues la carga siempre se relaciona por inducción con una carga igual y opuesta.

En segundo lugar Faraday trató de encontrar efectos sobre la luz polarizada al atravesar una lámina muy fina, bajo inducción electrostática, es decir trató de detectar el estado polarizado (o electrotónico) de la materia. No pudo medir ese efecto que sería más tarde descubierto y llamado «efecto Kerr».

Por último, cualquier influencia de la naturaleza del dieléctrico en el fenómeno de inducción indicaría que la carga se debe al estado de tensión en el dieléctrico, y no a partículas de fluido eléctrico en los conductores. Hay que señalar que Coulomb ya había realizado un experimento de este tipo, comparando la tensión a la que se cargaba un cable cuando estaba desnudo y cuando estaba aislado, tras conectarlo a cuerpos con la misma cantidad de carga. Coulomb no encontró diferencia. Whewell había escrito en uno de sus libros que esa constancia de la capacidad inductiva específica era un axioma de la electricidad.

Faraday, con su independencia de criterio que no aceptaba autoridad ninguna si iba en contra de su intuición, pensó que el resultado del experimento de Coulomb podía deberse a la debilidad del aislante. Hacia final de 1836 diseñó con cuidado un dispositivo experimental consistente en dos esferas conductoras concéntricas, cuyo espacio intermedio podía rellenarse con un aislante. Hizo medidas de la capacidad inductiva a partir de la caída de tensión que se producía al poner en contacto dos ejemplares de sus aparatos, uno de ellos cargado y con dieléctrico y el otro descargado y vacío.

El experimento era extraordinariamente delicado y le llevó más de un año el obtener resultados fiables. La descripción del mismo en su libro *Experimental Researches* ocupa más de veinte páginas. Para sólidos y líquidos Faraday encontró capacidades inductivas que alcanzaban 50 veces la del aire. En cambio, para los gases y el aire enrarecido, las diferencias apenas resultaron significativas.

Estos experimentos con dieléctricos fueron esenciales para la visión de Faraday sobre la potencia eléctrica. Ésta era la misma, se tratase de corriente en un electrolito, en un conductor, en una descarga, en el «viento eléctrico» o incluso en la acción inductiva. En 1836 y 1837 trabajó con descargas en gases a distintas presiones, visualizando las «líneas de inducción eléctrica», como él las llamó, para diferentes formas de conductores. La teoría de Faraday, aunque no libre de dificultades, permitía explicar los hechos mejor que las teorías rivales. Para él, ningún aislador es perfecto, y cuando la tensión es muy grande las partículas del dieléctrico se disocian y comunican su fuerza por conducción. Esa reacción en cadena constituye la descarga eléctrica.

Faraday terminó su informe sobre estas investigaciones llamando la atención sobre la diferencia esencial entre su teoría y la de acción a distancia y la importancia de decidir entre una u otra.

### **1845-1848. Efecto magnetoóptico. Diamagnetismo. Líneas de fuerza**

En 1839, probablemente debido al exceso de trabajo y a la situación de aislamiento intelectual, Faraday cayó en un estado de depresión, del cual no se llegaría a recuperar totalmente. Durante los siguientes cinco años no pudo concentrarse en su investigación sobre electromagnetismo y se dedicó a las labores de la Royal Institution y, de nuevo, a la condensación de los gases.

En 1845 recibió una carta de William Thomson, en la que le comentaba su tratamiento matemático de las líneas de fuerza, y le sugería la posibilidad de que un dieléctrico transparente, polarizado por un campo eléctrico, tuviera alguna influencia sobre la luz que lo atraviesa, como ocurre con un trozo de vidrio sometido a tensiones. Esto animó a Faraday, que retomó sus investigaciones de 1821 sobre un posible efecto de los electrolitos sobre la luz polarizada, tratando de poner de manifiesto el estado electrotónico de la materia. Esta vez no abandonó el problema tras los primeros resultados negativos y una semana más tarde trató con vidrio transparente polarizado y después con diferentes objetos bajo la acción de la fuerza magnética. Finalmente, una clase especial de vidrio, de los fabricados por Faraday en su época de trabajo sobre los vidrios ópticos, dio un resultado «positivo» en el experimento, produciéndose una rotación del plano de polarización cuando el rayo de luz era paralelo a las líneas de fuerza magnética. Éste es el efecto magnetoóptico o efecto Faraday.

El resultado confirmó sus expectativas y le entusiasmó: «Al fin he tenido éxito», escribió, «en iluminar una curva magnética o línea de fuerza y en imanar un rayo de luz».

Comprobó que una corriente eléctrica circular alrededor del rayo de luz producía el mismo efecto que un imán. Faraday imaginó que quizás las corrientes amperianas en el imán (o las corrientes circulares en el solenoide) inducían corrientes circulares análogas en el vidrio (o al menos un estado de tensión equivalente) que a su vez eran la causa de la rotación de la luz. El experimento venía a ser un apoyo más a su idea de la unidad esencial de todas las fuerzas: la electricidad, el magnetismo, la luz y la interconversión entre ellas. También, para Faraday, suponía una prueba de la realidad del estado electrotónico, que se manifestaba capaz de

afectar a la propagación de la luz. Si la materia era así alterada por la fuerza magnética, probablemente jugaba un papel para comunicarla.

Diseñó entonces otras pruebas que no tuviesen que ver con la luz. En noviembre de 1845 suspendió de un trozo de seda el vidrio con el que había observado la rotación del plano de polarización de la luz y lo introdujo entre los polos de un electroimán potente. Descubrió que el trozo de vidrio se orientaba perpendicularmente a las líneas de fuerza magnética entre los dos polos. Utilizó otros materiales y encontró que algunos, como la laca, al colocarlos entre los polos tenían un comportamiento magnético, alineándose paralelamente a las líneas de fuerza, pero la mayoría se orientaban transversalmente como el vidrio y les llamó diamagnéticos, en analogía con los dieléctricos.

Examinó el comportamiento de una barra de bismuto en el «campo magnético» (empezó en esta época a llamarle así en sus notas) y encontró que este material, al igual que las otras sustancias diamagnéticas, tendía a moverse hacia regiones de menor fuerza magnética, independientemente de la polaridad del campo.

Pensó en dos posibles explicaciones de las orientaciones y fuerzas sobre la materia en un campo magnético: la primera de ellas basada en el modelo amperiano del magnetismo. Los dos tipos de materiales en esta idea corresponderían en primer lugar a aquellos en que las corrientes inducidas tienen el mismo sentido que en el imán o solenoide (materiales magnéticos) y en segundo lugar a aquellos en los que se inducen corrientes en sentido contrario (diamagnéticos). Esta hipótesis se denominó de «polaridad invertida». La segunda explicación posible, en línea con su idea de la acción por contigüidad, se basaba en la diferente potencia conductora (que hoy llamaríamos permeabilidad magnética) para la acción magnética del aire y el cuerpo diamagnético; se trataría de un efecto diferencial. Faraday se resistía a admitir el modelo amperiano de corrientes moleculares como hipótesis y mantuvo una disputa enconada, durante bastantes meses, con Weber, científico alemán partidario de la idea de la polaridad invertida. En realidad ambas hipótesis eran equivalentes y podían formularse matemáticamente de la misma forma, como se demostraría mucho más tarde.

En 1847 tuvo noticias de que un científico italiano había demostrado que los imanes actuaban sobre una llama. Repitió esos experimentos con chorros de gases y después introduciendo pompas de jabón rellenas de diferentes gases en un campo magnético diseñado especialmente para eliminar las corrientes de aire. Encontró que algunos gases, como el oxígeno, eran atraídos al espacio entre los polos del electroimán, mientras que la mayoría eran repelidos. Para Faraday estos efectos derivaban de la diferente potencia conductora de la fuerza magnética de los cuerpos. Los diamagnéticos conducían menos y los paramagnéticos más que el vacío o el aire, pero estos últimos, a diferencia de los ferromagnéticos, no podían ser imanados (la terminología fue de nuevo elegida con ayuda de Whewell). Los mejores conductores «se situarían en el lugar de la acción más intensa».

## **Reflexiones sobre las vibraciones de los rayos y las líneas de fuerza**

En 1846, en plena investigación sobre el diamagnetismo, Faraday dio una conferencia en la Royal Society, con el título «Reflexiones sobre la vibración de los rayos». En ella proponía la idea de que la luz podía consistir en vibraciones transversales de las líneas de fuerza, bien fueran eléctricas, magnéticas o incluso gravitatorias, que así adquirirían un carácter físico. Esta hipótesis que evitaba las dificultades que encontraban las teorías del éter para explicar la ausencia de vibraciones longitudinales en la luz, serviría más tarde a Maxwell para su teoría electromagnética de la luz. En ese artículo exponía de manera muy clara su cosmovisión

científica: «[...] en ninguna parte del espacio, ya esté ocupado por materia o vacío (para utilizar términos comunes), puedo percibir otra cosa que fuerzas y las líneas por las que se ejercen [...]». Faraday explica que se trata de destituir al éter y remplazarlo por campos de fuerza y sus vibraciones. Aquí los centros de fuerza dejan ya de ser lo importante y ceden su lugar a las líneas de fuerza. El énfasis es sobre el espacio como medio transmisor de los esfuerzos.

La comunidad científica aunque respetaba y apreciaba a Faraday como un gran científico experimental, prestaba poca atención a sus teorías. Éstas iban a contracorriente del paradigma newtoniano de acción a distancia, inspirándose más en la *Naturphilosophie* alemana que en cualquier otra corriente de pensamiento; y esa tendencia filosófica era en general tildada de romántica y poco científica. Por otra parte, las ideas de Faraday, a pesar de su simplicidad y gran unidad, no tenían el apoyo de la formulación matemática. Sus teorías rivales, en cambio, aunque fragmentarias, podían explicar prácticamente todos los hechos, con una construcción matemática rigurosa y cuantitativa.

Faraday, en esta etapa de su vida, seguro ya de sus ideas, emprendió la tarea de explicarlas con mayor claridad y de tratar de diseñar experimentos de gran alcance para demostrarlas. Definió con precisión su concepto de línea de fuerza magnética como aquella cuya tangente sigue la dirección de la fuerza magnética; para dotarla de un carácter cuantitativo estableció que la densidad de líneas de fuerza en una región mide la intensidad de la fuerza en ella. Demostró la regla de la inducción electromagnética de que la corriente inducida es directamente proporcional al número de líneas de fuerza cortadas por el circuito. También demostró que en un imán las líneas de fuerza pasan por el interior del imán y que, en realidad, no hay polos sino solo puntos por donde las líneas entren o salen. La teoría explica (al igual que la de Ampère, pero no así la de los fluidos) el que no existan polos norte o sur separados.

En su artículo siguiente: «Sobre el carácter físico de las líneas de fuerza», insistió en llamar la atención sobre la utilidad de sus ideas, tanto para arrojar luz sobre los conceptos y leyes como para descubrir nuevos fenómenos. Para él hay dos hechos que demostrarían la realidad física de las líneas de fuerza: uno, el que las líneas se curven, y el segundo, que tardan un tiempo en propagarse. La curvatura de las líneas era un aspecto bien conocido –podía incluso visualizarse con limaduras de hierro entorno a los imanes– pero no era una razón concluyente. En cambio, la propagación retardada sí era un argumento de peso, y como señaló Faraday, el mismo que se utilizó para asegurar la propagación de la luz a través del espacio. Este sería el experimento clave y a su intento dedicó Faraday sus últimos años.

En su *Diario* razonó sobre las dificultades de un experimento de ese tipo: los tiempos implicados serían probablemente muy cortos, como en el caso de la luz; se requeriría entonces un gran recorrido de la acción magnética. Ello llevaría aparejado una disminución de la acción debido a la distancia. Además haría falta una fuente «instantánea» de energía para que el rápido efecto de propagación no quedase enmascarado; la inversión de polaridad de un electroimán sería demasiado lenta, pero posiblemente una chispa o descarga eléctrica serviría; igualmente serían necesarios indicadores «instantáneos» de la acción magnética, no sirviendo los galvanómetros ordinarios. Faraday anota cuantos métodos ingeniosos se le ocurren para superar esas dificultades. Intentaría numerosos experimentos sin éxito. La comprobación experimental de la propagación de las acciones electromagnéticas no se lograría hasta 1887 en que Hertz logró demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas, justamente utilizando como fuente una descarga eléctrica oscilante.

## 1849-1860. Unidad de las fuerzas. Búsqueda del efecto gravieléctrico

Entre 1830 y 1851 Faraday fue profesor de Química en la Royal Military Academy, en Woolwich. El Almirantazgo le pidió frecuentemente consejo en asuntos diversos. Durante la Guerra de Crimea entre la coalición formada por Gran Bretaña, Francia, el Reino de Cerdeña y el Imperio Otomano, por una parte, y Rusia por otra, el gobierno le consultó sobre el proyecto de usar gas venenoso a gran escala. Faraday respondió que era posible pero se negó a tomar parte en el mismo por razones éticas.

Desde el comienzo de sus investigaciones Faraday se había convencido de que las diferentes potencias de la Naturaleza –electricidad, magnetismo, afinidad química, cohesión– estaban íntimamente relacionadas y que la cantidad total de potencia debía conservarse. De todas ellas, para Faraday, la electricidad era la más fundamental de las fuerzas. Así en una conferencia en la Royal Institution en 1836 proclamó que la electricidad era no solo la más importante potencia física conocida sino que «es la fuente universal de todas las otras potencias, excepto quizás la gravitación»

Con esta reserva, Faraday expresaba que la gravedad era la única fuerza que no parecía interactuar con otras y planteaba un reto a la teoría de la unidad de las fuerzas. Para Faraday los términos «fuerza» y «potencia» eran prácticamente sinónimos y no se corresponden con nuestros conceptos actuales de fuerza o energía. Las potencias o fuerzas para Faraday eran causas que expresaban la capacidad de acción de la materia. Su razonamiento en relación a la gravedad era el siguiente: cuando dos cuerpos se acercan la fuerza entre ellos aumenta según la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Esta variación de la fuerza gravitatoria debe implicar un cambio en la fuerza eléctrica o magnética.

Faraday siguió enfatizando en muchas ocasiones las diferencias entre gravitación y las otras fuerzas, especialmente la electricidad: la gravitación solo es atractiva y no polar, actúa en línea recta y a grandes distancias, de forma prácticamente instantánea y no se ve afectada por un medio interpuesto. Sin embargo, volvió frecuentemente al tema de la relación con las otras fuerzas y en marzo de 1849 empezó a concretar un programa de investigación sobre el asunto. En esa fecha escribió en su *Diario*: «Gravedad. Seguramente debe ser posible relacionar experimentalmente esta fuerza con la electricidad, magnetismo y otras fuerzas de modo que se ligue a ellas en relación recíproca y equivalente. Considerar por un momento cómo abordar este tema mediante hechos y pruebas». Trató en primer lugar de conceptualizar la gravedad como una fuerza polar. Imaginó un cuerpo de prueba como positivo cuando se mueve hacia la tierra y negativo cuando se aleja de ella. Estos movimientos debían entonces corresponderse con estados eléctricos de carga opuesta. Al subir o bajar una hélice de alambre conectada a un galvanómetro debían inducirse corrientes eléctricas de sentidos opuestos en el circuito. Fue consciente de que cualquier efecto «de ser posible, sería extremadamente pequeño; pero si fuera posible, es decir, si fuera verdadero, no habría palabras para expresar la importancia de la relación que se estableciera». Realizó el experimento con resultados negativos, sin embargo esto no modificó su firme creencia en la relación entre electricidad y gravedad.

Estas ideas de Faraday que expresó en dos Charlas de los Viernes en 1855 y 1857 no recibieron buena aceptación y fueron criticadas por varios científicos. Alguno argumentó que era la energía y no la fuerza la que debía conservarse. Científicos entrenados en el uso de las matemáticas debían considerar inaceptable la incapacidad de Faraday para entender y manejar los conceptos dinámicos de la teoría de Newton; esta incapacidad derivaba no sólo de la falta de educación formal de Faraday sino especialmente de su antipatía hacia la visión mecanicista y matemática del mundo. Maxwell también expresó algunas diferencias con la

visión de Faraday en ese sentido pero le apuntó que las líneas de fuerza gravitacionales podrían curvarse y ser afectadas por el medio, tal como lo eran las eléctricas y magnéticas. Estos comentarios animaron a Faraday.

En 1859, a los 68 años, prosiguió su búsqueda bajo la idea de que se necesitaría emplear una masa muy grande y una altura considerable para detectar cualquier efecto. Escogió una torre en Lambeth (Londres) de más de 50 metros de altura e hizo caer una gran esfera de plomo buscando posibles variaciones de su carga. Investigó también posibles variaciones de la temperatura de un cuerpo al subir o bajar éste. El 9 de julio de 1859 dejó constancia en su *Diario* de su última visita a Lambeth y del reconocimiento de que sus investigaciones no habían producido el resultado buscado.

En el verano de 1860 preparó un informe para la Royal Society, informando del resultado negativo de sus experimentos y manteniendo su convicción de que la fuerza gravitacional debía ser convertible en electricidad. George Gabriel Stokes, profesor de Matemáticas en Cambridge, fue el censor de su artículo y opinó que no debía ser publicado en las *Philosophical Transactions* de la Sociedad, no solo por el resultado negativo, sino porque, según él, no daba ninguna razón convincente por la que la gravedad debiese afectar al estado eléctrico o a la temperatura de un cuerpo. Después de recibir los comentarios de Stokes, Faraday retiró el artículo.

Aún en 1862 hizo su última investigación, intentando hallar el efecto de un campo magnético sobre la luz de una llama a la que inyectó sales de sodio y potasio para estudiar su espectro. Años más tarde, en 1896, esta investigación sería retomada con instrumentos más precisos por Pieter Zeeman quien descubrió su famoso efecto de desdoblamiento de las líneas espectrales.

La última conferencia de Faraday fue también en 1862. Se retiró y murió unos años después, en 1867.

## Contribuciones científicas de Faraday

Faraday contribuyó a nuestro conocimiento de la Naturaleza con aportaciones comparables a las de los más importantes científicos del pasado como Galileo o Newton. Tres descubrimientos le sitúan entre los mayores inventores de todos los tiempos: un aparato con el que efectuaba las rotaciones electromagnéticas de un imán o un alambre –el primer motor eléctrico– un dispositivo en el que creaba por inducción una corriente en un circuito secundario a partir de una corriente primaria –el primer transformador– y una máquina que producía corriente mediante el movimiento de un circuito en un campo magnético –la primera dinamo o generador eléctrico–. La tecnología resultante de estos descubrimientos iba a revolucionar la industria, el transporte y las comunicaciones desde entonces hasta nuestros días.

Las investigaciones físicas de Faraday incluyeron, además de las rotaciones electromagnéticas y la inducción, el efecto magnetoóptico, el comportamiento dieléctrico y el diamagnetismo. Sus trabajos en Química dieron lugar a importantes descubrimientos como el del benceno, la formulación de las leyes de la electroquímica o el estudio de suspensiones coloidales de oro.

Faraday formuló una teoría unificada de la electricidad estática, la corriente eléctrica y el magnetismo. La electricidad estática consistía en una tensión en el medio. No existía diferencia radical entre conductores y aislantes. Los dieléctricos soportaban la tensión y solo a muy alto voltaje la relajaban; en cambio los conductores liberaban la tensión fácilmente. La corriente no es más que una sucesión de estados de tensión (el estado electrotónico) seguidos de liberación

o descarga. En el caso de la conducción electrolítica y en la conducción en gases, la relajación ocurre por descomposición de la sustancia. En conductores, Faraday no llega a explicitar el mecanismo, pero de algunas de sus especulaciones puede deducirse que pensaba en la transmisión de una vibración u onda. Por otra parte, hay un comportamiento análogo de las líneas de fuerza en el caso estático y en el dinámico; en el primero existe una presión entre líneas que las mantiene separadas; para dos alambres recorridos por corrientes la fuerza magnética entre ambas, que tiende a separarlas en el caso de corrientes opuestas, es análoga a esa presión eléctrica.

Su visión del mundo evolucionó hasta hacerse radicalmente distinta de la de sus contemporáneos. Identificaba materia y fuerzas, reduciendo la realidad a un campo de fuerzas. Rechazaba la idea de acción a distancia y afirmaba la acción contigua de las fuerzas. Creía en la realidad de las líneas de fuerza basándose en la naturaleza polar o dual de todas ellas. Explicaba el comportamiento eléctrico o magnético de la materia basándose en la hipótesis de la conducción de la electricidad o el magnetismo. Creía en la unidad de las fuerzas o potencias y de la conversión de unas formas en otras, así como en la indestructibilidad o conservación de la fuerza.

Como parte de su teoría de acción contigua, Faraday pensaba que las acciones eléctricas y magnéticas tardaban un tiempo en propagarse. Sugirió que la propagación de vibraciones u ondas en las líneas de fuerza magnéticas constituían de hecho la luz. Se mostró especialmente seguro de ello cuando descubrió la interacción entre la luz y el magnetismo en el efecto magnetoóptico.

Con estas ideas Faraday sentó las bases de un programa de investigación que iba a dar sus frutos en años posteriores por investigadores que recogerían su herencia.

En vida Faraday alcanzó la admiración de sus coetáneos como gran científico experimental, pero en general sus ideas no fueron aceptadas, sobre todo por carecer de un soporte matemático. Hubo sin embargo un científico escocés, James Clerk Maxwell, que en 1857 escribió a Faraday para decirle que el concepto de líneas de fuerza ofrecía una manera espléndida de interpretar el mundo físico. En 1860 Maxwell publicó su artículo sobre las líneas de fuerza de Faraday que sería el punto de partida para una teoría general del electromagnetismo. Irónicamente, esta aportación de naturaleza teórica fue el más importante legado de Faraday a la Física: su contribución al nacimiento de la teoría de campos, parte esencial de la visión de la realidad en la física actual. En palabras de Einstein, la teoría de Faraday-Maxwell fue «[...] el cambio más importante [...] en nuestra concepción de la naturaleza de la realidad desde el inicio de la física teórica por Newton».

## Bibliografía básica

- DÍAZ HELLÍN, José Antonio. *El gran cambio en la Física. Faraday*. Nivola. 2001.
- DARRIGOLD, Olivier. *Electrodynamics from Ampere to Einstein*. Oxford University Press. New Cork. 2005.
- HARMAN, P. M. *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la Física del siglo XIX*. Alianza Universidad. Alianza Editorial. Madrid. 1990.
- HIRSHFELD, ALAN W. *The Electric Life of Michael Faraday*. Walker and Company. New York. 2006.
- CANTOR, G., GOODING, D. y JAMES, F. A. L. *Faraday*. Alianza Universidad. Alianza Editorial. Madrid. 1994.
- TYNDALL, J. *Faraday as a Discoverer*. London: Longmans, Green, and Co., 1868. Puede descargarse de <<http://www.gutenberg.org/etext/1225>>.
- BERKSON. *La teoría de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Alianza Universidad. Alianza Editorial. Madrid. 1981.
- WHITTAKER, E. *A history of the theories of aether and electricity*. Dover. New York. 1980.
- Escritos de Faraday. Desde la página <[http://en.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](http://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)>, que incluye un resumen de la vida de Faraday, hay enlaces para la descarga de buena parte de sus escritos, como *Experimental Researches in Electricity*, o su famosa conferencia *A Course of Six Lectures on the Chemical History of a Candle*.