

con la teoría uniformitaria en geología. Según ésta, la orografía actual era resultado de la acción de fuerzas orogénicas prácticamente constantes actuando sobre cientos de millones de años. Thomson no solo no admitía periodos de tiempo tan largos sino que también pensaba que la actividad orogénica habría sido mucho más violenta al principio y habría producido cambios drásticos y rápidos en la superficie terrestre.

La polémica adquirió un nuevo matiz cuando en 1859 se publicó *El Origen de las Especies* de Charles Darwin. Ahora era la selección natural la que requería enormes periodos de tiempo para producir la evolución de los organismos vivos. Thomson seguía pensando que decenas de millones de años atrás las condiciones de la Tierra eran totalmente inapropiadas para cualquier tipo de vida. Thomson no negaba directamente la idea de evolución, pero ésta solo podía ser una evolución dirigida por alguna voluntad divina y no una evolución por selección natural.

Aunque las posturas eran enfrentadas, la controversia discurría por unos cauces científicos exquisitos, lejos de la acritud del famoso debate entre Huxley y el Obispo Wilberforce. Curiosamente, George Darwin, hijo de Charles Darwin, era físico y consideraba a Thomson como su mentor, algo de lo que su padre Charles estaba profundamente orgulloso. De hecho, las investigaciones de George Darwin sobre las mareas y su influencia en la rotación terrestre seguían ideas del propio Thomson. George intentó una aproximación entre las posturas de su padre biológico y su padre científico pero, aunque la distancia se redujo algo, seguía siendo infranqueable.

El descubrimiento de la radiactividad a principios del siglo XX proporcionaba un mecanismo de generación constante de calor que podía dar cuenta de una duración mucho mayor del Sol y evitaba la necesidad de suponer un enfriamiento constante de la Tierra a partir de un es-

tado caliente primigenio. George Darwin, como el propio Rutherford en una famosa conferencia en la Royal Institution en presencia del propio Thomson, le ofrecieron a éste una salida airosa. Incluso convirtieron su rechazo en una muestra de visión profética, al resaltar que lo que Thomson había dicho exactamente era que sus estimaciones eran inevitables «a menos que el gran almacén de la creación disponga de fuentes ahora desconocidas para nosotros». Sin embargo, Thomson, aun aceptando el hecho de la radiactividad, se negó a aceptar que tuviera importancia a estos efectos.

Un biógrafo de Thomson dijo que éste había estado acertando durante la primera parte de su vida y equivocándose durante la segunda. La frase, sin matices, es algo dura: aunque equivocadas, las ideas de Thomson eran muy sugerentes y siempre generaban un debate esclarecedor. También se suele atribuir a Thomson la afirmación de que toda la física estaba ya completa y que la única tarea que quedaba consistía en llegar a una precisión de más cifras decimales. No está muy claro que Thomson dijera esto realmente. Sí esta documentada, en cambio, su conferencia de 1900 en la Royal Institution titulada «Nubes del siglo XIX sobre la teoría dinámica del calor y la luz». Una nube era el fracaso del principio de equipartición para explicar algunos calores específicos; la otra era el fracaso en detectar el movimiento de la Tierra con respecto al éter. Ambas se convertirían en nubarrones que iban a acabar con la física clásica, llevando a la teoría cuántica y a la relatividad especial, respectivamente. Pero Thomson apenas tuvo tiempo de verlo: murió el 24 de diciembre de 1907. Fue enterrado en la Abadía de Westminster, cerca de la tumba de Isaac Newton. No es mala compañía.

J. Javier García Sanz

Dpto. de Física Fundamental

Hertz (1857-1894) y las ondas hertzianas

PRIMEROS PLANTEAMIENTOS

La obra cumbre de Isaac Newton (1643-1727) conocida como *Principia* (*Philosophical naturalis principia mathematica*) fue publicada en Londres en 1687 y puede ser considerada como la obra que culmina la «primera revolución científica». Las palabras de Lagrange (1736-1813) expresan la trascendencia de este científico británico cuando dice que *fue el más grande genio que ha existido y también el más afortunado*

dado que sólo se puede encontrar una vez un sistema que rija el mundo. Las nuevas doctrinas newtonianas no llegaron al continente europeo hasta el siglo XVIII marginando las concepciones de los vórtices de Descartes (1596-1650) al imponer la idea de la acción gravitacional a distancia entre partículas o corpúsculos dotados de masa. Por otra parte, el concepto corpuscular de la luz enunciado por Newton tenía una aceptación mayor que las propuestas ondulatorias establecidas en el siglo XVII. Salvo escasas excepciones, el para-

digma de la *mecánica clásica* fundado en los trabajos de Galileo (1564-1642) y de Newton era mundialmente aceptado, hasta la segunda mitad del siglo XIX, en que cuando surge un nuevo paradigma con nuevos y decisivos planteamientos.

Los primeros pasos del nuevo camino se relacionan con los fenómenos eléctricos y magnéticos cuya explicación había sido una preocupación del mundo científico del momento con resultados importantes. Para nuestra historia fue decisiva la experiencia realizada



Figura 1. Retrato de Oersted (1777-1851).

por Oersted (1777-1851) cuando en 1820 consideró la interacción entre las corrientes eléctricas y los imanes. De ella se desprendieron consecuencias importantes explicadas recurriendo a procedimientos diferentes en el continente y en Gran Bretaña.

Así, por ejemplo, el científico francés Ampère (1775-1851) construyó una *teoría electrodinámica*¹ de clara inspiración newtoniana que consideraba los fenómenos magnéticos como una manifestación de la electricidad en movimiento y trataba de explicar tanto estos fenómenos como los eléctricos recurriendo a las acciones a distancia entre cargas eléctricas o como corrientes eléctricas. Se trataba de una teoría *electrodinámica* en la que el magnetismo lo explicaba recurriendo a las corrientes eléctricas, pues considera a los imanes como un conjunto de corrientes circulares. De esta manera, los fenómenos se pueden explicar mediante una única ley que facilita la fuerza atractiva o repulsiva entre «corrientes» o «elementos de corriente». Ampère estaba convencido de la bondad de su propuesta dada su analogía con las leyes de Coulomb o de Newton, donde las cargas

eléctricas o masas venían a ser sustituidas por los citados elementos de corriente, donde además de intervenir la distancia entre ellos consideraba la orientación relativa.

Esta teoría tuvo una buena aceptación en el mundo científico alemán, que fue capaz de desarrollar una nueva *teoría electrodinámica*² con el definitivo esfuerzo de Weber (1804-1891), cuando en 1846, partiendo de la teoría de Ampère, enuncia una teoría aparentemente sencilla para explicar estos fenómenos recurriendo a fuerzas newtonianas entre corpúsculos eléctricos que, lógicamente, dependían de las características cinemáticas de los mismos. Según este modelo, la corriente eléctrica es producida mediante pares de partículas opuestas que avanzan a lo largo de un conductor en sentidos opuestos con la misma velocidad, esta velocidad viene dada por el número de unidades electrostáticas de carga transmitidas por unidad de intensidad de corriente en la unidad de tiempo.

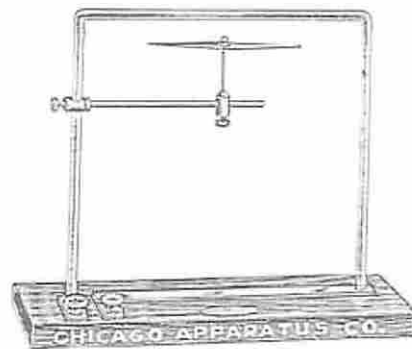


Figura 2. Montaje experimental de Oersted.

Se puede considerar que esta ley integraba o resumía todos los fenómenos conocidos en esa época y tuvo una buena aceptación pues, dada su analogía con la ley de Newton, parecía gozar de cierta garantía científica. La ley de Weber dominó el mundo científico en el continente hasta las aportaciones de Hertz pero, enseguida, puso de manifiesto la necesidad de diferenciar

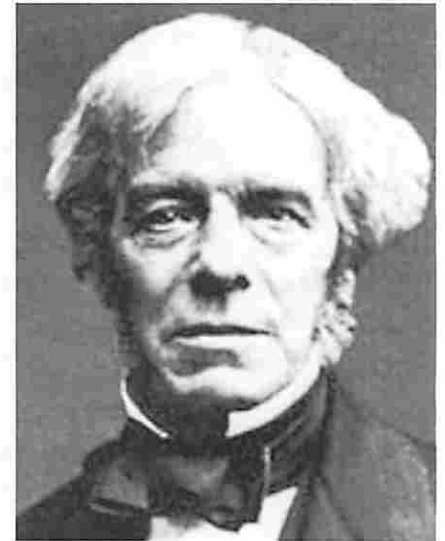


Figura 3. Retrato de Faraday (1791-1867).

entre *fuerzas electrostáticas* y *fuerzas electrodinámicas*.

La situación en Gran Bretaña era diferente pues parecía existir cierto propósito en olvidar los planteamientos de Newton. En efecto, Faraday (1791-1867) al conocer los trabajos de Oersted consigue demostrar que cuando la bobina de un hilo conductor es recorrida por una corriente eléctrica puede girar de forma continua alrededor de un imán. Así, concluye que era posible obtener efectos mecánicos de una corriente interactuando con un imán. Estaba más interesado en explicar la naturaleza de las interacciones entre corrientes e imanes que en las aplicaciones prácticas inmediatas, por eso en 1831 establece la *inducción magnética*, produciendo corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos móviles o variables, fenómeno que, en cierta manera, es inverso al descubierto por Oersted. Faraday³ pone de manifiesto que el efecto magnético cuando atraviesa una bobina, induce una corriente eléctrica en una segunda bobina.

Para explicar estos resultados definió el concepto de flujo magnético a través de una superficie y lo hace de forma análoga a la presen-

¹ En 1827 publica *Memoria sobre la teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos, deducida exclusivamente de la experiencia*, donde resume la comunicación presentada a la Académie des Sciences de París con motivo de la experiencia de Oersted (1820).

² Es conocida como «Ley básica general de la acción eléctrica».

³ Faraday, M., *Experimental Researches in Electricity* (3 vol), Dover, New York, 1965.

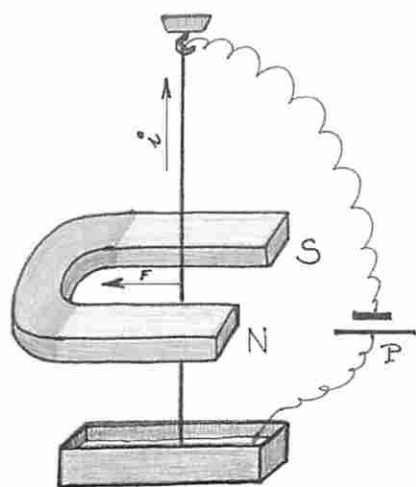


Figura 4. Montaje experimental de Faraday.

tada por la ley de Gauss en electrostática y concluye que «realmente» debe cambiar o variar el flujo respecto al tiempo para que se «induzca» una corriente eléctrica en el flujo magnético originado a través de la superficie que delimita el circuito⁴.

La habilidad y capacidad experimental de Faraday pone de manifiesto de manera inequívoca que el magnetismo producía electricidad y, por tanto, se reforzaba la idea de que considerar por separado la electricidad y el magnetismo era inadecuada para formular una doctrina coherente y racional. Nace, en definitiva, la necesidad de abordar un campo más amplio que se denominó *electromagnetismo*. Desde la perspectiva experimental, el avance proporcionado por Faraday en el estudio de los fenómenos electromagnéticos era necesario completarlo y formular una *teoría electromagnética*, tarea que debía abordar un científico de características diferentes.

Surge la figura de James Clerk Maxwell (1831-1879) que supo recoger las conclusiones aportadas por Faraday y acompañarlas de una formulación matemática que permitía generalizar sus resultados aportando algunas concepciones nuevas (por ejemplo, las relacionadas con la idea de campo y el comportamiento de la materia). Motivo que

pone de manifiesto el mérito de Maxwell más allá de la formulación matemática de los experimentos de Faraday, al que reconoce y admira. Algunos aspectos ponemos de manifiesto a continuación.

En efecto, en 1855, Maxwell publica su primer trabajo sobre estas cuestiones «On Faraday's Lines of Force», donde desarrolla matemáticamente algunas de las ideas de Faraday. Considera al *éter* como un fluido sometido a las leyes newtonianas y las líneas de fuerza las explica recurriendo a un modelo hidrodinámico, por lo que sustituye a las líneas de fuerza por «tubos de corriente» que aumentaban o disminuían con la variación del flujo del campo. Este modelo permite explicar, tanto el sentido de las fuerzas como el de la corriente, situación que le permite introducir el concepto de intensidad relacionado con la mayor o menor «cantidad» del fluido.



Figura 5. Retrato de Maxwell (1831-1879).

En 1861, redacta su segundo trabajo, «On Physical Lines of Force», en el que enuncia un modelo de *éter* (con características análogas a la masa y a la elasticidad), asigna una velocidad finita de la inducción, en coherencia con los fenómenos eléctricos y magnéticos entonces conocidos. Así, la fuerza magnética tiene un carácter de *vórtice* y se representa por unos *rodillos* que giran sobre un eje. Éste es un modelo mecánico del



Figura 6. Maxwell y su esposa.

campo electromagnético de Maxwell que, aunque puede ser considerado como imaginativo, es poco verosímil. Así el *éter* permite unificar la electricidad estática, la corriente eléctrica, la inducción y el magnetismo y le permitió a Maxwell deducir las ecuaciones del campo electromagnético con imaginación pero no exenta de complejidad.

Maxwell intenta dejar claro que las ideas de Faraday, relacionadas con la existencia de las líneas de fuerza magnética, debían venir acompañadas de *ciertas tensiones* o *singularidades* en el espacio. Le preocupa las condiciones del espacio para mostrar esta situación y para ello recurre a las propuestas de W. J. M. Ranking (1820-1872) y W. Thomson (lord Kelvin, 1824-1907) para elaborar una nueva teoría de las líneas de fuerza física. Aporta una transformación de las ideas existentes al considerar que la electricidad se puede *diseminar a través del espacio* y, en consecuencia, no es necesario considerarla como un fluido limitado a los conductores. Para Maxwell es un *descubrimiento asombroso*, pues las vibraciones apreciadas en el medio por el que se transmite permiten, además de

⁴ Situación que sería conocida como «Ley de inducción de Faraday».

$$\begin{aligned}\epsilon_0 \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} &= q \\ \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} &= 0 \\ \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i \\ \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\frac{d\Phi_B}{dt}\end{aligned}$$

Maxwell's Equations

Figura 7. Ecuaciones de Maxwell.

explicar las líneas de fuerza magnética, reflejar unas propiedades semejantes a las de la luz. Por último, concluye que la luz consiste en determinadas *ondulaciones transversales* del mismo medio que causa los fenómenos eléctricos y magnéticos⁵. Sobre esta base Maxwell elaboró su teoría electromagnética y reconoce que su propuesta coincide sustancialmente con la realizada por Faraday, aunque justifica su estancamiento o poca difusión en el hecho de no disponer de procedimientos para medir la velocidad de propagación de la luz.

En «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field», que aparece en 1865, Maxwell formula las cuatro ecuaciones del campo electromagnético, prescindiendo de los modelos mecánicos. Los conceptos físicos utilizados permiten definir un campo electromagnético que lo forman cuatro magnitudes vectoriales: *campo eléctrico*, *inducción eléctrica*, *campo magnético* e *inducción magnética*. Para relacionar estas magnitudes Maxwell recurre a un formalismo matemático así como a algunos conceptos electromagnéticos clásicos (densidad de carga, densidad de corriente y constantes materiales).

Las cuatro ecuaciones de Maxwell⁶ adquieren una expresión sencilla y simétrica cuando describen un campo sin cargas y sin corrientes en el vacío o en un medio dieléctrico, permite explicar que, aún en el vacío, una perturbación electromagnética producida en un punto se propaga a los puntos circundantes. Por otra parte, su velocidad de propagación se calcula con facilidad y viene a ser una constante universal, resultado de relacionar magnitudes electromagnéticas, coincidiendo con la velocidad de la luz. Este resultado es un poderoso argumento para asignar a la luz un significado electromagnético y, en consecuencia, su velocidad de propagación se encuentra ligada a las características físicas del medio en el que se transmite.

UNA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

La comunidad científica recibió la nueva teoría de Maxwell con alguna frialdad. En primer lugar, por la representación matemática utilizada al expresarla pues no estaba al alcance de todos los científicos de la época e, incluso, incorporaba nuevos conceptos físicos difíciles de entender (por ejemplo, la existencia de la corriente de desplazamiento y el concepto de onda electromagnética). Por otra parte, la nueva teoría electromagnética suponía abandonar definitivamente la idea de acción a distancia establecida por Newton, paradigma suficientemente asentado durante mucho tiempo en el mundo de la ciencia. En definitiva, se avecinaba una revolución científica, un nuevo paradigma científico, gracias a la confirmación de la existencia de las ondas electromagnéti-

cas que sucedería ocho años después del fallecimiento de Maxwell, consecuencia del esfuerzo y dedicación de Heinrich Hertz (1857-1894). Antes de considerar el trabajo realizado por Hertz, parece razonable hacer una referencia a la situación de esta «revolución científica»⁷ a finales del siglo XIX, impulsada por Faraday, Maxwell y Hertz.

Existe un reconocido acuerdo entre los historiadores que de todos los avances revolucionarios que tuvieron lugar en el siglo XIX la que mayor impacto global fue la revolución darwiniana⁸, tanto en su vertiente científica como desde el punto de vista ideológico. Los avances revolucionarios de la física también fueron importantes. Así, por ejemplo, nos podemos referir a cuestiones tan diferentes como la energía y su conservación, teoría cinéticas de gases, teorías sobre el magnetismo y el electromagnetismo, entre otras muchas. Pero, como hemos apuntado, tal vez la revolución científica más profunda es la que se nucleó en torno a las teorías de Maxwell, cuya trascendencia se justifica con las aportaciones de Faraday y Hertz. Su importancia radica en que supuso la revisión fundamental no sólo de las teorías de la electricidad, el magnetismo y la luz, sino también, insistimos, por afectar a la estructura newtoniana de la Física.

Comprender los aspectos de la revolución científica puede presentar algunas dificultades y puede ser conveniente delimitar las aportaciones de los tres científicos que habitualmente ocupan un lugar protagonista y son responsables de la misma. Un primer problema radica en la dificultad que supone comprender la teoría de Maxwell asentada en las ideas de Faraday, de importancia indiscutible, pues incluye

⁵ En 1846 Faraday se había aproximado a este planteamiento de Maxwell, aunque parece ser que pasó desapercibidos para los primeros estudiosos de estas cuestiones. En efecto, en «Thoughts on Ray-vibrations» que apareció en *Philosophical Magazine*, Faraday especula al asociar la radiación con cierta vibración en las líneas de fuerza.

⁶ En la actualidad las cuatro ecuaciones de Maxwell se conocen como *Ley de Gauss de la electrostática*, *Ley de Gauss del magnetismo*, *Ley de Ampère-Maxwell* y *Ley de Faraday*.

⁷ Según Kuhn, con revolución científica se refiere a aquellos episodios de desarrollo no acumulativo en los que un paradigma antiguo se ve sustituido en todo o en parte por otro nuevo incompatible con él. Kuhn, T.S., *Las estructuras de las revoluciones científicas* (Nueva traducción e introducción de C. Solís), FCE, 3ª edición, México, 2006.

⁸ Darwin, C., *El origen de las especies*, Akal, Madrid, 1985.

el concepto de campo magnético (representado por líneas de fuerza) y de la percepción de que las transmisiones tanto eléctricas como magnéticas no son instantáneas. Lamentablemente, sus razonamientos no eran cuantitativos y, por lo tanto, no venían acompañados del valor numérico que expresase el «tiempo de transmisión». Maxwell rinde homenaje a las ideas originales de Faraday y lo señala en varias ocasiones en su *Treatise*⁹ y lamenta que «no fuera matemático de profesión» por lo que recurrió a un «lenguaje natural, no técnico». En otro momento, cuando presenta su tratado, Maxwell expresa que lo aborda «con la intención de convertir estas ideas en la base de un método matemático».

El aporte de Maxwell a la Física supone aspectos fundamentales fundados en experimentos para mostrar la realidad enunciada. No obstante, como hemos apuntado, la mayor innovación es considerar las *ondas de luz* resultado de la confluencia de campos eléctricos y magnéticos y, sobre todo, que estas *ondas electromagnéticas* se propagan en el espacio con un valor próximo al de la velocidad de la luz. Añade que tanto la luz como el magnetismo son manifestaciones de la «misma sustancia» y que la luz es una perturbación electromagnética que se propaga a través del espacio conforme lo establecido por las leyes electromagnéticas. Se trataba de un nuevo paradigma que entusiasmó al mundo de la ciencia de ese momento. Así, por ejemplo, Max Planck (1858-1947)¹⁰, dice que la mejor manera de valorar la teoría de Maxwell está en explicar fenómenos muy distintos de aquellos sobre los cuales se basó, lo considera como *el mayor triunfo del esfuerzo intelectual humano*, pues a partir del trabajo de Maxwell se puede tratar cada fenómeno óptico como un problema electro-

magnético. Concluye que *el campo de la óptica, que durante más de cien años había resultado inabordable desde el campo de la mecánica, fue conquistado de un solo golpe por la teoría electrodinámica de Maxwell*.

En este momento científico era imprescindible producir ondas electromagnéticas y comprobar que se propagan con la velocidad de la luz. Como se ha apuntado, esta tarea la emprendió Heinrich Hertz de manera que en 1888 pudo confirmar experimentalmente los pronósticos de Maxwell. Demostró que las ondas electromagnéticas eran similares a las de la luz y verifican las propiedades de reflexión, refracción y polarización. Para muchos historiadores la importancia de Hertz se encuentra en ser la primera demostración de la primera propagación finita de una supuesta acción a distancia. Debido a estos trabajos, se abandona la concepción del electromagnetismo como una acción a distancia y se acepta la posición de Maxwell en la que los procesos electromagnéticos se producen en el dieléctrico y el éter electromagnético se puede considerar semejante al antiguo *eter lumínico*. La aceptación de la teoría maxwelliana, sobre todo, en el continente se asentó en las propuestas de Hertz.

Son muchos los historiadores y científicos que aportan sus ideas acerca de la trascendencia de la revolución científica protagonizada por Faraday, Maxwell y Hertz; escogemos la opinión de Albert Einstein (1879-1955) sobre este momento estelar de la ciencia por considerarla muy ilustrativa. Así, con motivo del centenario del nacimiento de Maxwell, se refiere al profundo cambio que se produjo en la Física del siglo XIX. Dice *se produce el gran cambio, que para siempre estará asociado a los nombres de Faraday, Maxwell y Hertz. En esta revolución, la parte del león*



Figura 8. Retrato de Hertz (1857-1894).

*corresponde a Maxwell. Demostró que el conjunto de lo que por entonces era conocido acerca de la luz y de los fenómenos electromagnéticos se podía expresar mediante su conocido doble sistema de ecuaciones en derivadas parciales, en las que los campos eléctrico y magnético aparecen como variables dependientes*¹¹. En otro momento apunta que se trata del *primer avance fundamental en la física teórica desde Newton*.

Nuestro propósito es dedicar una especial atención al trabajo realizado por Hertz, pero hemos considerado necesario inscribirlo en su contexto científico para facilitar su comprensión. Ahora, tras una breve reseña biográfica nos ocuparemos de sus aportaciones científicas con algún detalle, pero antes completamos esta presentación con alguna referencia acerca de la participación de Hertz en esta revolución. Tal vez fue destacable su esfuerzo en clarificar la teoría de Maxwell dedicada a los científicos contemporáneos que se declaraban maxwellianos y para ello eliminó ciertos aspectos físicos de la teoría que complicaban el formalismo empleado para su expresión que consideraba innecesarios. Concluye que la «teoría de Maxwell» solamente es el

⁹ Maxwell, J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism* (2 vol), Dover, Nueva York, 1954 (la primera edición fue realizada en 1873 y 1891). Una selección de ensayos de carácter general y de electromagnetismo, traducidos al castellano, en *Escritos Científicos* (Edición J.M. Sánchez Ron), CSIC, Madrid, 1998.

¹⁰ Nos referimos a una publicación de Planck de 1931, en su artículo «Maxwell's influence in Germany» que apareció en *James Clerk Maxwell a commemoration volume 1831-1931*, University Press, Cambridge, 1931.

¹¹ Einstein, A., «La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de la realidad física» en Einstein, A., *Mis ideas y opiniones*, Antoni Bosch, Barcelona, 1981.

denominado sistema de ecuaciones de Maxwell, de manera que la aceptación de la nueva teoría por el mundo de la ciencia se ajusta a los planteamientos sugeridos por Hertz y así se comprende la inclusión de su nombre en los estudios posteriores¹². A modo de resumen, podemos señalar que durante varios años la nueva doctrina revolucionaria no fue sino una revolución en los papeles, y sólo se convirtió en una revolución de la ciencia gracias a los trabajos de Hertz.

APUNTE BIOGRÁFICO DE HERTZ

Heinrich Hertz nació en Hamburgo el 22 de febrero de 1857 en el seno de una familia acomodada y tradicional, de ascendencia judía, ejercía la abogacía y llegó a ser senador. Su madre Anna Elisabeth Pfefferkorn se caracterizó por tener inquietudes culturales y artísticas que intentó trasladar a sus hijos con desigual fortuna. De este matrimonio nacieron cuatro hijos (tres varones y una mujer).

A la edad de seis años Heinrich inicia los estudios primarios en la escuela de Richard Lange de Hamburgo, donde permanece hasta 1872 cuando inicia sus estudios secundarios, también en Hamburgo, en el *Johanneum Gymnasium*.

Finaliza los estudios secundarios en 1875 y en el transcurso de los mismos pone de manifiesto su buena predisposición para los estudios al tiempo que desarrolla cierta vocación artística, tal vez por la influencia materna, así como bastante facilidad para los idiomas (en horario extraescolar asiste a clases de árabe y griego). También parece tener una buena predisposición por las matemáticas y una especial destreza para las actividades manuales, por lo que se inclina en realizar los estudios de

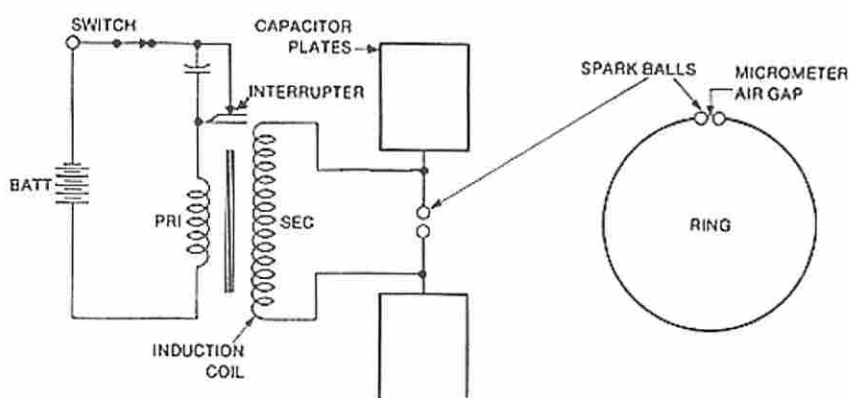


Figura 9. Montaje experimental de Hertz.

ingeniería. Los inicia en 1876 en el Politécnico de Dresden tras preparar el ingreso en Frankfurt. Los estudios universitarios los concluye en la Universidad de Berlín, tras pasar por la Universidad de Munich y la interrupción de un año para cumplir sus obligaciones militares¹³. Su interés por finalizar sus estudios en la Universidad de Berlín es posible que estuviese motivada por la existencia de un moderno y completo laboratorio de Física, dirigido por F.W. von Bezold (1837-1907), con el que entra en contacto y, entonces, decide dedicarse profesionalmente a la ciencia y a la vida académica.

Es evidente de que se trata de una decisión importante para la que se precisaba una buena formación previa más allá de la que podría conseguir en sus estudios universitarios. Parece tener una mayor inclinación por la Física aunque, desde el primer momento, tiene clara la conveniencia de combinar su formación teórica con la experimental que, por otra parte, era el modelo para la formación de un físico en la Alemania de la época. Las orientaciones de P.G. von Jolly (1809-1884), en esa época, fueron interesantes para conseguir sus iniciales propósitos.

En 1878 llega a Berlín donde en-

tra en contacto con Hermann von Helmholtz (1821-1894), iniciando una relación profesional y personal que se prolongaría durante el resto de su vida. Precisamente en el momento de su llegada a Berlín, Helmholtz le informa de la convocatoria de un premio establecido por la Facultad de Filosofía (en ella se alojaban los estudios de ciencias) de esa ciudad para encontrar una solución a un problema experimental relacionado con la inercia eléctrica, tarea que desarrolla en el laboratorio de Física que dirigía Helmholtz. En 1879 considera finalizadas sus investigaciones sobre «si la electricidad en los cuerpos se mueve con masa inerte», merecedoras del premio ofrecido, los resultados son publicados en *Annalen der Physik*, un año después, constituyendo su primera publicación.

Terminado este trabajo tiene conocimiento por parte de Helmholtz de la convocatoria de un nuevo premio, esta vez por parte de la Academia de Ciencias de Berlín, para la realización de un experimento crítico acerca de la teoría de Maxwell¹⁴. Hertz declina el ofrecimiento y se dedica a escribir su «disertación doctoral», teórica, que titula «Sobre la inducción electromagnética en es-

¹² La simplificación de las ecuaciones de Maxwell corresponde a Oliver Heaviside (1850-1925), así se documenta en la correspondencia mantenida con Hertz, en torno a 1888.

¹³ Las cumple en Berlín en el regimiento de ferrocarriles desde 1876 a 1877.

¹⁴ La convocatoria de este premio era para «Establecer experimentalmente alguna relación entre las fuerzas electrodinámicas y la polarización eléctrica de los aislantes»

¹⁵ Retrato de cuestiones tratadas por otros autores, desde Arago (11786-11853) y Faraday (1791-1867) hasta Emil Jochmann (1833-1871) y Maxwell (1831-1889).

feras conductores que giran»¹⁵. Es redactada en tres meses, la presenta en la Universidad de Berlín (el 5 de febrero de 1880) con la calificación *magna cum laude*, calificación no habitual en las «tesis teóricas». Escribe, tras la lectura de su tesis: *quedaba en pie mi ambición de encontrar más tarde...la solución al problema entonces planteado*.

De lo dicho se desprende que los comienzos científicos de Hertz los realiza al amparo de Helmholtz y, enseguida, se transforma en su asistente, sin duda, por ser un estudiante brillante e inteligente. Desde el primer momento pone de manifiesto una gran disciplina para el trabajo y su esfuerzo en conjugar las leyes de la naturaleza con la lógica humana. Así mismo, siempre tuvo una especial paciencia en su trabajo hasta el punto de no regatear tiempo para determinar o encontrar un posible error.

Los tres años que permanece como asistente de Helmholtz asume tanto tareas docentes como de investigación. Se lamenta de la mucha dedicación a sus obligaciones docentes y el escaso tiempo dedicado a sus investigaciones que, por otra parte, en estos momentos iniciales se caracteriza por su dispersión al ocuparse de varias cuestiones: dureza en sólidos elásticos, tubos Geissler, descarga catódica y fenómenos de descarga eléctrica, entre otros.

Finalizada esta etapa inicial es nombrado *Privatdozent* (profesor no numerario) en la Universidad de Kiel en la que tras pronunciar su lección inaugural sobre «la teoría mecánica del calor» se dedica al estudio de los rayos catódicos que le conducen a reflexionar sobre la teoría electromagnética de la luz (es posible que desde en 1884 comience su preocupación por estas cuestiones). Los más importantes trabajos son realizados por Hertz durante su

permanencia en Kiel (desde 1883 a 1886) son recogidos bajo el título «Sobre las relaciones entre ecuaciones fundamentales de la termodinámica maxwelliana y las ecuaciones fundamentales de la electrodinámica opuesta» (1884). La universidad de Kiel era pequeña y no existía laboratorio de Física, carencia que Hertz suplió montando un pequeño laboratorio que, pese a sus limitaciones, no le impidieron abordar cuestiones importantes que le preocupaban desde antes de llegar a esa ciudad. Desde esta perspectiva fue una época frustrante, tal vez, por eso rechaza, en 1885, una plaza de profesor asociado que le ofrece esta universidad.

En 1885 es nombrado catedrático en la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, donde permanece hasta 1889, siendo su lección inaugural sobre el balance energético de la Tierra. Su estancia en Karlsruhe la considera provechosa en todos los aspectos, pues existía un laboratorio bien dotado donde inicia los estudios experimentales que le dieron fama mundial. Además, el 31 de julio de 1886 contrae matrimonio con Elisabeth Doll hija de un colega. De esta matrimonio nacieron dos hijas, Johanna y Mathilde¹⁶.

Los cuatro años que permaneció en esta ciudad confirma la existencia y propagación de las ondas eléctricas en el aire, aportación definitiva a la teoría de Maxwell que se publicaría en *Annalen der Physik*. La variedad de trabajos pone de manifiesto su capacidad de trabajo: «Sobre oscilaciones eléctricas muy rápidas» (1886); «Experimentos relativos al futuro efecto fotoeléctrico» (enero-mayo, 1887)¹⁷; «Experimentos relativos al premio propuesto por la Academia de Berlín» (1879); «Experimentos negativos y positivos sobre la velocidad de propagación finita de la acción electrodinámica» (1887); «Sobre ondas electromagnéticas en el aire y su re-

flexión» (1888); «Las fuerzas de oscilación eléctricas tratadas según la teoría maxwelliana» (1888); «Sobre rayos de fuerza eléctrica» (1888).

Cuando se inicia la última década del siglo XIX las publicaciones y trabajos de Hertz habían tenido una buena difusión y aceptación en el mundo de la Física de la época. Esta situación viene acompañada del reconocimiento por parte de las más importantes sociedades científicas europeas, debe atender numerosas investigaciones y compromisos para participar en seminarios, pronunciar conferencias y numerosas ofertas de trabajo en las más importantes universidades alemanas (incluida la oferta de Helmholtz para regresar a Berlín en su nuevo y más grande laboratorio) y extranjeras (por ejemplo, Clark University en Worcester, Massachussets, para dirigir un importante laboratorio de Física). También visita destacados laboratorios en Londres y Cambridge, estableciendo contactos con importantes científicos maxwellianos (G.F. Fitzgerald (1851-1901), O.J. Lodge (1851-1940) y W. Thomson (lord Kelvin), entre otros).

En la primavera de 1889 decide incorporarse a la universidad de Bonn, tal vez por entender que iba a tener más tiempo disponible para dedicarlo a la investigación. Se establece con renovadas ilusiones en Bonn, donde ocupa la casa de su antecesor, Rudolf Clausius (1822-1888) y crea un Instituto de Física que, en poco tiempo, se transforma en un competitivo laboratorio en el que trabajan científicos que luego alcanzarían indudable prestigio¹⁸.

Al mismo que continúa sus investigaciones, Hertz aborda lo que habría de ser su última obra científica, ajena a su preocupación fundamental, *Los Principios de la Mecánica, presentados en nuevo contexto*, cla-

¹⁶ En 1937 su esposa y sus dos hijas tuvieron que abandonar la Alemania nazi para establecerse en Cambridge (England).

¹⁷ El efecto fotoeléctrico fue preocupación de algunos científicos posteriores, entre ellos su discípulo Lenard, correspondiendo a Einstein la explicación definitiva por la que recibió el Premio Nobel, en 1921, por su explicación del efecto fotoeléctrico y sus numerosas contribuciones a la física teórica, y no por la formulación de la teoría de la relatividad, entonces controvertida en el mundo de la ciencia.

¹⁸ Por ejemplo, entre otros con Hertz trabajaron Herman Minkowski, entonces *privatdozent* en Matemáticas, y Philipp Lenard (1862-1947), que en el año 1905 sería galardonado con el Premio Nobel y, más adelante, convencido miembro del Partido Socialista Nacional de Hitler, fue considerado «jefe de la Física alemana».

ramente inspirada en la obra de Helmholtz. Su redacción fue interrumpida pues su salud comenzó a deteriorarse, sufre diferentes intervenciones quirúrgicas y la concluye definitivamente en los primeros días del mes de diciembre de 1893. Su última clase la imparte el 9 de diciembre de ese año y fallece el 1 de enero de 1894, en Bonn, a causa de una septicemia. Tenía 36 años.

LOS EXPERIMENTOS DE HERTZ

En primer lugar, recordamos que la obra de Hertz se debe inscribir en el contexto de la electrodinámica general de Helmholtz, enmarcada en su particular polémica científica con Weber y su reinterpretación de la teoría maxwelliana. En efecto, en 1870, se incorpora a la cátedra de Física en Berlín (hasta entonces lo había sido de Medicina) y se propone esclarecer las diversas teorías electrodinámicas, que le permite redactar el artículo «Sobre la teoría de la electrodinámica: Sobre las ecuaciones del movimiento de la electricidad para cuerpos conductores en reposo», donde llega a los resultados encubiertos incluidos por Maxwell en su obra capital. Sin duda, los trabajos de Helmholtz fueron una buena ayuda para difundir la teoría maxwelliana y, dada la relación personal y científica de éste y su discípulo, es fácil de entender la postura con que inicia sus trabajos Hertz.

Los trabajos de Hertz dedicados a la existencia y naturaleza de las ondas hertzianas u ondas electromagnéticas se presentan en cuatro trabajos, los tres primeros publicados inicialmente en *Annalen*. El primero «Sobre oscilaciones eléctricas muy rápidas» (1887) en el que describe sus experimentos iniciales y explica el funcionamiento del conocido como *oscilador de Hertz*¹⁹. El segundo trabajo se titula «Sobre ondas electrodinámicas en el aire y su



Figura 10. Experimento del oscilador de Hertz.

reflexión» (1888) en el que muestra las ondas electromagnéticas estacionarias producidas por interferencia entre ondas hertzianas emitidas por un oscilador reflejadas sobre una superficie metálica colocada adecuadamente. Estos dos trabajos se pueden considerar que reflejan la conversión de Hertz al nuevo concepto de ondas hertzianas, es decir, abandona la mentalidad electrodinámica (inspirada en Ampère, Weber y Helmholtz) para aceptar la idea de campo electromagnético (de Faraday y Maxwell).

Como hemos dicho, esta situación supone pasar de considerar los fenómenos eléctricos como producidos por cargas eléctricas —en reposo o en movimiento— a la consideración de fenómenos que se pueden producir en todo el espacio, incluido el espacio vacío. Los trabajos realizados por Hertz en Karlsruhe todavía encajan en la mentalidad electrodinámica, por eso, es necesario apuntar el esfuerzo mental y científico realizado pues suponía romper con los fenómenos realizados en los materiales conductores, en los que las cargas se mueven libremente, a un espacio ausente de cargas eléctricas y pasa a considerar a los materiales dieléctricos en los que demuestra la existencia de corrientes de desplazamiento, al tiempo que concibe el espacio vacío como un dieléctrico cualquiera.

Para aclarar lo dicho en el anterior párrafo, se puede decir que los trabajos realizados por Hertz en Karlsruhe están relacionados con la propuesta realizada por Helmholtz cuando era estudiante en Berlín pues, entonces, parecía defender una mentalidad electrodinámica. Fue, precisamente, el primero en recibir los logros de las investigaciones de Hertz como *acción inductiva de una corriente rectilínea abierta sobre otra corriente rectilínea abierta*. Los experimentos realizados en 1887 ponen de manifiesto algunos fenómenos de inducción debidos a corrientes de desplazamiento en los dieléctricos. Así, se muestra la necesidad de una reinterpretación electrodinámica de la teoría de Maxwell y le sugieren la realización de nuevos experimentos, como es, producir interferencias entre ondas eléctricas transmitidas por un conductor así como las transmitidas por el aire. Pretendía medir la velocidad en ambos casos que, según Maxwell, debían ser iguales y de valor próximo a la velocidad de la luz. Los primeros resultados son confusos aunque ponen de manifiesto que era una velocidad finita.

El artículo tercero es «Las fuerzas de oscilaciones eléctricas, tratadas según la teoría de maxwelliana» (1888) que representa gráficamente y calcula el proceso de formación de ondas en el seno de un campo electromagnético. El último trabajo, se puede considerar como una recopilación de los trabajos realizados en Karlsruhe bajo el título «Sobre rayos de fuerza eléctrica» y fue presentado en la Academia de Ciencias de Berlín en 1888; es la comprobación definitiva de la existencia de ondas electromagnéticas de naturaleza semejante a la de la luz. Tal vez el artículo que mayor difusión alcanzó en el mundo científico del momento.

Estos experimentos son considerados por Hertz como *simples y contundentes* pues le permiten *la confir-*

¹⁹ Es un circuito abierto en el que oscila una corriente alterna y se induce una corriente en otro circuito próximo sintonizado con el primero. En definitiva, se trata de un emisor y de un receptor.

mación de la hipótesis fundamental de la hipótesis fundamental de la teoría de Faraday-Maxwell y parece que se pueden abandonar, definitivamente, las fuerzas a distancia manejadas por Ampère y Weber.

Las *Obras Completas* de Hertz, «Gesammelte Werke», fueron editadas en tres volúmenes apareciendo la primera edición en Leipzig (1895) por Johann Ambrosius Barth. El primer volumen lo integran una recopilación de diferentes artículos sobre cuestiones varias. Entre ellos se incluye la famosa conferencia «Sobre la relación entre luz y electricidad» (Heidelberg, 1889) que Hertz redactó para divulgar su interés sobre las investigaciones electromagnéticas y las conclusiones obtenidas. El segundo volumen nace por iniciativa de Wiedemann, editor de *Annalen*, con la intención de recopilar los trabajos de Hertz sobre las «ondas eléctricas». Se incluyen 12 artículos tal como habían sido publicados en *Annalen*, entre los que se encuentran los cuatro a los que nos hemos referido con anterioridad y se completan con un artículo de Bezold que lo considera como precursor. Este volumen se inicia con una *Sinopsis introductoria* redactada para la ocasión, en la que presenta un itinerario de sus investigaciones («los experimentos») así como sus concepciones teóricas («la teoría»). El tercer volumen se dedica a su obra póstuma *Los principios de la mecánica*, que no tiene especial interés para nuestro tema. Las obras completas de Hertz fueron traducidas al inglés, tal vez, la que mayor difusión e interés despertó fue la que corresponde al volumen segundo que aparece con el título de *Electric Waves*²⁰ en 1893.

En 1927 se publicó una obra en alemán que facilita una visión completa de la persona y del trabajo realizado por Hertz, bajo el título de *Recuerdos, cartas y diarios*, recopilación realizada por su hija Johanna Hertz, reeditadas en una traducción



Figura 11. Retrato de Marconi (1874-1937).

inglesa por su hija menor Mathilde con la colaboración del profesor Charles Süsskind (Physik Verlag, Weinheim & San Francisco Press, San Francisco, 1977).

FINAL

Como hemos dicho, los trabajos de Hertz confirmaron la existencia de las ondas electromagnéticas y su propagación en el espacio. La única preocupación e interés del ilustre profesor alemán era científica, ajena a cualquier posible aplicación tecnológica que surgió al difundirse sus experimentos. No obstante, enseguida aparecen algunas iniciativas encaminadas a desarrollar la idea que estaba latente en sus investigaciones: su utilización como medio de comunicación. Estos desarrollos se inician a partir de 1890 cuando el estado de Hertz era delicado y el poco tiempo disponible parecía dedicarlo a la redacción del que habría de ser el tercer volumen de sus *Obras completas*. Ésta puede ser la justificación de su no participación en esta tarea que desde los primeros momentos se aventuraban interesantes.

Rastreando en sus escritos parece que desde su estancia en Karlsruhe, Hertz había reparado en la posible importancia de la transmi-

sión a distancia de las ondas electromagnéticas, pero parece aparcarlos y dedicar su esfuerzo a completar teórica y experimentalmente sus teorías. Por otra parte, para abundar en este planteamiento, podemos recordar los contactos que Hertz tuvo con un colega que pasado el tiempo iba a tener una importante participación en esta tarea, Karl Ferdinand Braun (1850-1918), profesor de Física en Karlsruhe, muy interesado con las cuestiones relacionadas con el electromagnetismo y que, precisamente, fue sustituido por Hertz. También se tiene constancia de que resolvió algunas preguntas formuladas por el ingeniero alemán Heinrich Huber para resolver cuestiones técnicas relacionadas con su trabajo en una central eléctrica holandesa.

Fue el italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) el que, después de algunos intentos de escasa fortuna, en 1895 establece un «sistema para la propagación de las ondas en el aire». Intenta patentarlo en Italia y, al no conseguirlo, se traslada a Inglaterra donde consigue trasladar las ondas a una distancia de nueve millas y, finalmente, en 1897, consigue patentar su descubrimiento. Poco tiempo después, Marconi diseña un emisor y un receptor que se pueden sintonizar, los buenos resultados en las pruebas realizadas le hacen crear su propia empresa²¹ que le permite a finales de 1901 emitir señales desde la costa este de Inglaterra hasta Canadá, tras el fracaso

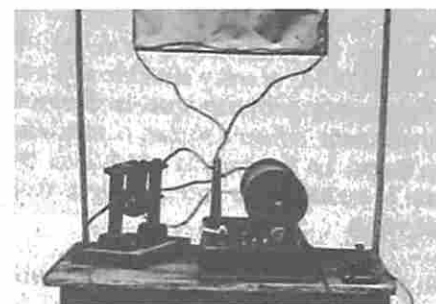


Figura 12. Montaje experimental de Marconi.

²⁰ Hertz, H., *Electric Waves*, Dover Publications, New York, 1962. En castellano existe Hertz, H., *Las ondas electromagnéticas*, Publicaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona (ediciones UPC), Bellaterra; es una selección y edición anotada de algunos artículos contenidos en el volumen segundo de las obras completas, por M. García Doncel y X. Roqué.

²¹ *The Wireless Telegraph*, que pronto pasaría a llamarse *Marconi's Wireless Telegraph*.

del intento de llegar a Nueva York a consecuencia de una gran tormenta. Así se superan todas las dudas que habían surgido de hacer este tipo de transmisiones a través del Atlántico a consecuencia de la curvatura de la Tierra. En 1907 se establece la primera línea comercial a través del Atlántico y, veinte años después, el sistema de comunicación por onda corta se extendió a todo el globo terrestre.

Marconi recibió el Premio Nobel en 1909 compartido, con el ante-

riormente citado K.F. Braun, entonces director del Instituto de Física de Estrasburgo.

BIBLIOGRAFÍA

Además de la bibliografía reseñada en el texto señalamos:

Baird, D. (ed.): *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, BPS (Boston Studies in the Philosophy of Science), vol 198. Hughes

and Alfred Nordmann, Kluwer Academic Publishers (Great Britain), 1998.

O'Hara, J.G., Pricha, W.: *Hertz and the Maxwellians*, Peter Peregrins Ltd, Londres, 1987.

McCormmach, R.: «Hertz, Heinrich Rudolf», en *Dictionary of Scientific Biography*, Gillispie, Ch.G. (ed.), Charles Scribner's Sons, New York, 1954.

Joaquín Summers Gámez
Dpto. de Física de los Materiales

Stark (1874-1957) y el desdoblamiento de los niveles atómicos

El día 21 de junio del año 2007 se cumplió medio siglo del fallecimiento del físico alemán Johannes Stark, descubridor en 1913 del efecto que lleva su nombre y por lo que le dieron el Premio Nobel de Física en 1919. Su descubrimiento contribuyó al triunfo de la teoría cuántica y produjo un gran avance en espectroscopía atómica.

Los niveles energéticos del átomo de hidrógeno libre son debidos al campo coulombiano que liga el electrón al protón. Sus energías están definidas por el número cuántico principal n y están degenerados con relación a los números cuánticos l y m . Cuando el átomo pasa de un nivel energético a otro se producen las líneas de emisión o de absorción que constituyen su espectro y pueden ser clasificadas en series. La más sencilla de todas, la serie de Lyman, corresponde al dominio ultravioleta del espectro electromagnético. Su línea α ($\lambda = 121,6$ nm) proviene de la transición entre el estado fundamental ($n = 1; l = 0; m = 0$) y el primer estado excitado. Éste último está compuesto por los siguientes niveles electrónicos: ($n = 2; l = 0; m = 0$), ($n = 2; l = 1; m = 1$), ($n = 2; l = 1; m = 0$) y ($n = 2; l = 1; m = -1$) que, en el átomo libre, tienen la misma energía, por lo que, dejando a un lado las reglas de selección, la transición entre el primer estado excitado del átomo de hidrógeno libre y el estado fundamental sólo proporciona una línea espectral.

Stark se propuso separar los niveles del estado excitado aplicando un campo eléctrico estático. Llevó a cabo el experimento utilizando un tubo de rayos catódicos lleno de hidrógeno gaseoso. Al ser excitado éste por colisión con los electrones emitía las líneas de sus diferentes series, que eran observadas con un espectroscopio de mucha resolución. Cuando aplicaba un campo eléctrico continuo de un millón de voltios por metro, la línea α se descom-

ponía en tres líneas equidistantes que correspondían a transiciones luminosas polarizadas paralela o perpendicularmente a dicho campo. La separación entre las líneas era del orden de la milésima de nanometro. Es decir, la relación $\Delta\lambda/\lambda$ era de una cienmilésima.

Una primera interpretación de este experimento se debe a K. Schwarzschild (1874-1916) y a P.S. Epstein (1886-1966) quienes, de manera independiente, proporcionaron en 1916 una explicación semiclásica del fenómeno. Más tarde, en 1926, E. Schrödinger (1887-1961) daría una interpretación rigurosa del mismo utilizando un hamiltoniano perturbado por la interacción dipolar debida al acoplamiento del átomo con el campo eléctrico externo.

El efecto Stark ha sido comprobado en multitud de átomos y su interpretación cuantitativa es uno de los grandes logros de la Física Cuántica.



Retrato de Stark.

Manuel Yuste Llandres
Dpto. de Física de los Materiales