



LA CRISIS DE FIN DE SIGLO: LA PÉRDIDA DE LA CERTIDUMBRE

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON
Universidad Autónoma de Madrid

El siglo XIX fue, desde el punto de vista del desarrollo científico, una gran centuria, no en vano, en ella vivieron pensadores de la talla de Faraday, Darwin, Maxwell, Helmholtz, Bolyai, Lobachevski, Riemann, Lyell, Virchow o Pasteur, por citar algunos. Fue el siglo de la teoría de la evolución de las especies, del final del vitalismo y el gran desarrollo de la fisiología, del electromagnetismo, de las geometrías no euclídeas, del principio de la conservación de la energía, de la química orgánica y, en otro orden, de la afirmación de la institucionalización de la ciencia. Experimentaron avances radicales las ciencias naturales, la matemática, la fisiología, la química y la física. Ocurre, no obstante, que la mayoría de estas disciplinas vivieron, por decirlo de alguna manera, un final de siglo relativamente feliz, en el que los problemas internos producidos por su desarrollo no se hicieron lo suficientemente evidentes como para amargar su adiós al Ochocientos. Sin embargo, en la física fue diferente:



problemas de las teorías ya existentes, así como nuevos y sorprendentes descubrimientos empañaron el final del siglo, produciendo una auténtica crisis. La certidumbre del pasado, la creencia de que sólo sería necesario desarrollar lo conocido, avanzar con las herramientas (teorías) disponibles, fue disolviéndose. La imagen, mecanicista, del mundo newtoniano cedió su lugar a una nueva visión, electromagnética, de la Naturaleza, pero ¿tendría ésta el vigor y posibilidades de la newtoniana? ¿resolvería las nubes que oscurecían el horizonte de la física de finales del siglo?

EL SIGLO DEL ELECTROMAGNETISMO

Cuando se contempla, desde la perspectiva de la física, el conjunto del siglo XIX, se observa que fue en el dominio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, fenómenos que pronto se relacionaron, permitiendo hablar de «electromagnéticos», en donde se produjeron más –y más radicales– avances. Los descubrimientos y contribuciones de Oersted, Ampère, Faraday, Kelvin o Maxwell produjeron una «electrodinámica», cuya expresión más acabada son las célebres ecuaciones de Maxwell, que describen las propiedades del campo electromagnético y que permitieron incluir a la óptica como una parte del electromagnetismo.

Las ecuaciones de Maxwell no significaron, sin embargo, el final, siquiera momentáneo, de la búsqueda de una teoría electromagnética. Se conocía cómo se comportaba el campo electromagnético, ¿pero todavía se ignoraba como interactuaba con los cuerpos cargados que se encontraban en movimiento? (en reposo era diferente; para eso se tenían leyes como la de Ohm; electrostática). No se disponía, en definitiva, de una electrodinámica de los cuerpos en movimiento.

Uno de los problemas era que no se sabía muy bien cómo eran los cuerpos cargados, cuál era su estructura. Pero éste no fue a la postre un problema excesivamente importante; y desde luego, no condujo a ninguna crisis. Hendrik Antoon Lorentz, la gran figura en la búsqueda de la conexión teórica entre campo, fuentes de ese campo y cuerpos sumergidos en él, siempre supuso que se podía hablar de «electrones», de partículas con carga (de ahí que él hablase de una «teoría del electrón»). Tales partículas serían identificadas, midiendo, en 1897, el cociente entre su carga y masa, por Joseph J. Thomson en el laboratorio Cavendish de Cambridge.

Un problema especialmente grave fue el surgido de los experimentos llevados a cabo por el físico estadounidense Albert A. Michelson, en particular el realizado en colaboración con E. W. Morley en 1887. Estos experimentos estaban diseñados para detectar el movimiento (entendido en el sentido previsto por la mecánica newtoniana).



na) de la Tierra, con respecto al sistema en el que el éter electromagnético estaba en reposo. Sorprendentemente, los resultados parecían indicar que no existía semejante movimiento.

Que el resultado del experimento de Michelson-Morley se veía entonces como una sombra importante dentro del cuerpo de la física de finales de siglo, es algo que se comprueba al repasar escritos de la época. Veamos algunos.

Comencemos por Joseph Larmor, profesor lucasiano (la antigua cátedra de Newton) en la Universidad de Cambridge. Junto a Lorentz, Larmor es uno de los científicos que llegaron, antes que Einstein, a formular lo que denominamos en la actualidad «transformaciones de Lorentz». Pues bien, en su gran libro, *«Aether and Matter»*, premio Adams de la Universidad de Cambridge y publicado precisamente en 1900, cuando comenzaba a andar el nuevo siglo, se encuentran numerosos pasajes indicativos.¹

Sobre el experimento de Michelson y Morley, Larmor comentaba (pp. 63-4):

«Un experimento de interferometría sobre la diferencia del tiempo de propagación a lo largo de dos trayectorias cíclicas, originalmente propuesto por Maxwell, ha sido llevado a cabo por Michelson y Morley, con el resultado negativo anticipado en todas las teorías en lo que se refiere al primer orden. Se les ocurrió [a Michelson y Morley] que con la ayuda de mejoras muy precisas en los dispositivos experimentales se podrían examinar con éxito los términos de segundo orden ...; el resultado de los experimentos, que han sido repetidos recientemente con todavía mayor precisión y cuidado, ha sido el hacer razonablemente cierto que los términos de segundo orden también se anulan, que, de hecho, el tiempo de propagación es independiente del movimiento de la Tierra, no solamente a primera aproximación sino también a un orden superior. La teoría, tal y como ha sido desarrollada hasta el presente, en términos de constantes físicas de los medios materiales, no tiene nada que decir sobre este resultado, ya que no está en situación de asignar los cambios de segundo orden que produce el movimiento de la Tierra en las constantes físicas de los medios materiales y en los dispositivos experimentales.»

¹ Joseph Larmor, *Aether and Matter* (Cambridge University Press, Cambridge 1900)



Pero el resultado puramente negativo es en sí mismo una clave importante hacia una extensión de la teoría al segundo orden, en el que debemos tratar necesariamente con la estructura molecular del medio».

En este punto, Larmor comenzaba a plantearse cómo afectaba el movimiento con respecto al éter a las fuerzas entre electrones. Al igual que Lorentz, veía claro que se *«infiera que el resultado negativo de Michelson apoya la ampliamente mantenida conclusión de que la principal parte de las acciones, químicas o de otro tipo, entre moléculas y entre las partes constituyentes de las moléculas, es de tipo electrodinámico; que si la gravitación y posiblemente algunas acciones de cohesión se encuentran fuera de ese tipo, su importancia, considerada con relación a las relaciones moleculares, es pequeña comparada con la de las acciones eléctricas»* (pp. 54-59).

Aunque las frases anteriores apoyan la interpretación de que Larmor se encontraba muy próximo a la interpretación electromagnética de la naturaleza, vemos aquí que se daba cuenta de que podía existir una diferencia esencial entre fuerzas electromagnéticas y gravitacionales, una diferencia que Albert Einstein instalaría en el seno de la física de manera permanente hasta el presente, cuando desarrolló, en la primera mitad de la década de 1910, la teoría de la relatividad general. Es interesante detenerse un momento en este punto, ya que mientras que hasta el presente es un lugar común en la historiografía de la física el mencionar las dificultades que existían a finales de siglo con las fuerzas electromagnéticas, prácticamente nunca se ha hecho referencia a la interacción gravitacional, cuya historia a lo largo del siglo XX es descrita desde coordenadas muy diferentes (citando, si acaso, los problemas nacidos del movimiento anómalo del perihelio de Mercurio). El comentario de Larmor apunta en la dirección de que también se observaban dificultades básicas en esa fuerza.

Otro ejemplo en este sentido es el de Paul Langevin, en su intervención en el Congreso sobre Artes y Ciencias, celebrado en 1904, dentro del conjunto de actividades de la Exposición Universal de San Luis en 1904.² La conferencia de Langevin estuvo dedicada a repasar las relaciones de la física de los electrones con otras ramas de la física, y en uno de sus apartados nos encontramos con el siguiente comentario (p. 217/143):

² Paul Langevin, «The relations of physics of electrons to other branches of science», *Congress of Arts and Science. Universal Exposition St. Louis, 1904*, Howard J. Rogers, ed. (The Riverside Press, Cambridge, Mass. 1906), vol. IV, pp. 121-156. Reproducido en *Physics for a New Century*, Katherine R. Sopka, ed. (American Institute of Physics, Nueva York 1986), pp. 195-230



«La gravitación permanece obstinadamente fuera de nuestra síntesis electromagnética; las fuerzas newtonianas no sólo no parece que se propaguen con la velocidad de la luz, sino que también parece difícil encontrarlas en el electromagnetismo sin modificar profundamente nuestras ideas fundamentales con respecto al campo y cantidad de electricidad y la posibilidad de una agregación de electrones neutrales por otra agregación de la misma naturaleza.

Parece probable que la gravedad resulte de un modo de actividad del éter y de una propiedad de los electrones completamente diferente del modo electromagnético, y debemos admitir además de las energías eléctrica y magnética, una tercera forma distinta, la de la gravitación».

Desde esta perspectiva, todavía a explorar más completamente, nos encontraríamos con que la «prehistoria», por decirlo de esta forma, de la relatividad general comenzaría antes, y de manera diferente, de como se supone normalmente (recordemos que sus orígenes se relacionan con el desarrollo de la relatividad especial y con la proporcionalidad entre masa inercial y masa gravitacional).³

En cuanto a Larmor, para no abandonarle demasiado apresuradamente, es razonable suponer que semejante «limitación» (no englobar a las fuerzas gravitacionales) de las fuerzas electromagnéticas no debía plantear serias dificultades, ya que para él el pilar fundamental de la física se encontraba no en el electromagnetismo, sino en el «Principio de mínima acción», como también se apunta en el capítulo VI («Dynamical theory of electrical actions») de *«Aether and matter»*,⁴ aunque probablemente con mayor claridad en otros lugares.

Volviendo al experimento de Michelson-Morley, un último ejemplo es el de Lord Kelvin, una de las cumbres de la física del siglo XIX. En 1901 aparecía en el *«Philosophical Magazine»* un artículo de Kelvin titulado «Nubes del siglo

³ Ver, por ejemplo, José M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad* (Alianza, Madrid 1985).

⁴ « Si las leyes de cualquier... departamento de la física se pueden formular con un teorema de mínimo o variacional, entonces ese tema ha sido reducido virtualmente al tipo dinámico; y sólo restan aquellas interpretaciones, explicaciones y desarrollos que relacionen la integral que es el tema de la variación con las correspondientes integrales relacionadas con sistemas dinámicos conocidos. Estos desarrollos tomarán habitualmente la forma de buscar analogías entre el sistema físico en consideración y sistemas dinámicos que pueden ser construidos directamente en base a funciones lagrangianas de la misma clase; pero no añaden nada lógicamente a la completitud y suficiencia de la especificación análtica del sistema, aunque al ser captada por la mente de manera más intuitiva y ser de tipo más familiar, a menudo llevan a otros perfeccionamientos y desarrollos que conducen a nuestros puntos de vista teóricos hacia niveles superiores y más completos» (*«Aether and matter»*, p. 83).



XIX sobre la teoría dinámica del calor y la luz», en el que enumeraba lo que consideraba las dos grandes dificultades («nubes») que oscurecían, en su opinión, «*la belleza y claridad de la teoría dinámica, que afirma que el calor y la luz son modos de movimiento*».⁵

En su selección, Kelvin identificó correctamente los problemas de cuya solución brotarían las dos grandes teorías que marcarían la física en el futuro: la relatividad, que resolvería la primera nube (que afectaba al «movimiento relativo del éter y los cuerpos ponderables»), y la mecánica cuántica, que disolvería la segunda (que se refería a la «doctrina de Maxwell Boltzmann relativa a la partición de la energía»).

La primera nube se basaba para Kelvin en los problemas que surgían para que el éter pudiese dar cuenta de fenómenos como la aberración de la luz y experimentos como el de Michelson-Morley, que obligaban a dotar al éter de una estructura difícil de aceptar. «*Está claro –señalaba Kelvin (pp.2-3)– que ni Fresnel ni Young tenían idea de que el éter de su teoría ondulatoria de la luz, con sus vibraciones transversales, es esencialmente un sólido elástico; esto es, materia que resiste el cambio de forma con una fuerza permanente o sub-permanente. Si se hubiesen dado cuenta de esta idea, habrían advertido la enorme dificultad que representa la laceración que debe sufrir el éter si se mueve a través de poros o intersticios entre los átomos de la materia*».

En cuanto al experimento de Michelson-Morley, no veía ningún problema en su ejecución, pero «una posibilidad de escapar de la conclusión que parece probar puede encontrarse en una brillante sugerencia hecha independientemente por FitzGerlad y Lorentz... al efecto de que el movimiento del éter a través de la materia puede alterar ligeramente sus dimensiones lineales [las del interferómetro]. Nos encontramos aquí con la célebre idea de la contracción de longitudes, que surgió de manera natural dentro del contexto de la visión electromagnética de la materia, y a la que, acaso de manera no tan directa, también se refería Larmor en la cita utilizada anteriormente. Ahora bien, esta vía de escape, que tomó firmemente Lorentz,⁶ no era para

⁵ Lord Kelvin, «Nineteenth century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light», *Philosophical Magazine* 2, 1-40 (1901).

⁶ El caso de Lorentz ha sido estudiado repetidamente. Entre las muchas citas posibles, veamos una tomada del vol. E [«Aether theories and aether models (1901-1902)»] de sus *Lectures on Theoretical Physics* (MacMillan, Londres 1927), basado en los cursos de Física Teórica que dictaba en la Universidad de Leyden. «Podemos explicar el resultado negativo del experimento de Michelson –escribía Lorentz allí (p.23)– suponiendo que cambia la longitud de los brazos del aparato cuando se le gira en un ángulo recto ... Esta dependencia de las dimensiones de la orientación con respecto al movimiento de la Tierra no es tan extraña como podría parecer a primera vista. De hecho, las dimensiones son determinadas por fuerzas moleculares, y como éstas son transmitidas a través del éter, sería bastante sorprendente si su estado de movimiento no influyera en las dimensiones de los cuerpos. No conocemos la naturaleza de las fuerzas moleculares. No obstante, si suponemos que son transmitidas a través del éter de la misma manera que las fuerzas eléctricas, podemos desarrollar la teoría de esta contracción y encontrar entonces para su valor justo lo que se necesita para explicar el efecto nulo del experimento de Michelson».



Kelvin suficiente como para que no concluyese señalando que «*Me temo que debemos considerar todavía la Nube nº 1 como muy densa*» (p. 7).

La segunda nube mencionada por William Thomson se refería al principio de la equipartición de la energía. Este es un tema, estrechamente enraizado con los orígenes de la mecánica cuántica, pero que me llevaría demasiado lejos desarrollar en esta ocasión. Lo trataré, sin embargo, brevemente, antes de abordar otros aspectos de la crisis de fin de siglo que terminarían conduciendo también a la física cuántica.

Kelvin (p.10) centraba su análisis inicial en las contribuciones de Maxwell, quien «*extendió el teorema de la igualdad de las energías cinéticas medias a cualquier sistema de un número finito de puntos materiales... actuando entre sí, según cualquier ley de fuerza, y moviéndose libremente entre ellos*», y dio una demostración con coordenadas generalizadas lagrangianas en un sistema arbitrario, con un número de grados de libertad finito o infinitamente grande.⁷ «*La única suposición que es necesaria para la demostración directa [del teorema] –había escrito Maxwell– es que el sistema, dejado libre en su actual estado de movimiento, pasará (infinitamente cerca), más pronto o más tarde por toda fase que sea consistente con la ecuación de la energía*».

Ahora bien, esta suposición maxwelliana no estaba clara para Kelvin («nunca he visto la validez de la demostración en la que Maxwell basó su afirmación y siempre me ha parecido improbable que pudiese ser cierta»). No lo estuvo tampoco para muchos otros, y de hecho cuando se estudia la historia de la física cuántica, el principio de la equipartición de la energía aparece como uno de los principales puntos oscuros identificados.

Una de las dificultades que producía era la siguiente: contemplado desde un punto de vista teórico, cada línea espectral representa una vibración particular del átomo, y cada vibración debe tener, según el teorema de equipartición de la energía, una energía igual a RT . Por consiguiente, un gas con n líneas en su espectro debe tener una energía nRT por átomo únicamente. Pero la energía total de, por ejemplo, el hidrógeno es solamente $(5/2)RT$ por molécula, cuando su espectro, conocido perfectamente por entonces, contiene un elevado número de líneas.

En su influyente «*Report and the Quantum-Theory*» (primera edición 1914), James Jeans señalaba otras dificultades (p.48): «*La incapacidad de la mecánica clásica para explicar las líneas espectrales se hace evidente si fijamos nuestra atención en el átomo de hidrógeno, que está formado solamente por dos cargas, una positiva y otra negativa, y sin embargo da lugar al altamente complicado espectro asociado*

⁷ J. C. Maxwell, "On Boltzmann's theorem on the average distribution of energy in a system of material points", «*James Clerk Maxwell's Collected Papers*», vol. ÉÉ, pp. 713-741 y «*Camb. Phil. Trans.*», 6 de mayo de 1878.



con el hidrógeno. Nos vemos conducidos inmediatamente a preguntarnos ¿cómo puede producir un sistema tan simple un espectro conteniendo tantas líneas? El número de grados de libertad del sistema es solamente seis, tres de los cuales representan su capacidad para moverse en el espacio. ¿Cómo, entonces, pueden ser posibles tantas vibraciones? y, de nuevo, ¿porqué no aparece la energía de estas vibraciones en la medida de los calores específicos?»

NUEVOS FENÓMENOS DESCUBIERTOS A LA SOMBRA DEL ELECTROMAGNETISMO

Entre los nuevos fenómenos descubiertos a finales del siglo XIX a la sombra del electromagnetismo se encuentran los rayos X, una radiación que abrió una nueva ventana a la naturaleza física, ventana que muy pronto se ensancharía con la radiactividad.

Los rayos X fueron observados por primera vez por Wilhelm Conrad Röntgen, director del Instituto de Física de la Universidad de Wurzburg, el 8 de noviembre de 1895. Inmediatamente después de darse cuenta de que había detectado una nueva radiación, se dedicó, durante seis semanas, a estudiar sus misteriosas propiedades (podía atravesar cuerpos opacos). El 28 de diciembre presentaba su célebre primera memoria («Sobre una nueva clase de rayos») ante la Sociedad Física y Médica de Wurzburg.

El descubrimiento de Röntgen estuvo vinculado a los rayos catódicos; conviene, por consiguiente, ofrecer algunos datos relativos a esta radiación, que tan importante papel jugó en el desarrollo de la física contemporánea.

Las descargas eléctricas a través de gases comenzaron a ser investigadas durante el último cuarto del siglo pasado. Para estos experimentos se utilizaban tubos en los que se conseguían buenos vacíos, y en cuyo interior se colocaban, además de un determinado gas, dos electrodos (el positivo, o ánodo, y el negativo, o cátodo) unidos a una batería. Durante sus investigaciones espectroscópicas, Julius Plücker, de Bonn, encontró, en 1858-59, que según se iba extrayendo el gas del tubo la luminosidad que lo llenaba en un principio (producida por la diferencia de potencial existente entre los electrodos) disminuía progresivamente hasta que el cátodo aparecía rodeado por una delgada «envoltura» luminosa, de color variable según la naturaleza del gas introducido en el tubo, y separada del cátodo por un espacio oscuro, tanto más extenso cuanto mayor era el enrarecimiento de la atmósfera. Cuando la presión del gas llegaba a una millonésima de atmósfera, el espacio oscuro invadía todo el tubo, no observándose otra cosa que un pequeño círculo de luz violada en el extremo del cátodo, a



la vez que el vidrio adquiriría una intensa fosforescencia en la parte opuesta. Este fenómeno se denominó en principio emisión catódica; más tarde, cuando fue atribuido a la existencia, dentro del tubo, de radiaciones especiales emanadas directamente del cátodo, recibió el nombre de Cathodenstrahlen (rayos catódicos).

Hoy sabemos que los rayos catódicos son corrientes de electrones. Proyectados desde el cátodo por repulsión eléctrica, navegan a través del espacio casi vacío del interior del tubo, golpean al cristal aportando energía a sus átomos, energía que se reemite entonces en forma de luz visible, siendo finalmente atraídos hacia el ánodo, a través del cual vuelven a la fuente de electricidad. Pero todo esto estaba lejos de la comprensión de los físicos cuando se descubrieron. Así, diferentes investigadores adoptaron distintas interpretaciones de este fenómeno. ¿Era, por ejemplo, la nueva radiación de naturaleza corpuscular u ondulatoria? Eugen Goldstein se inclinaba por la segunda opción, pero el británico William Crookes, uno de los científicos que más estudió la nueva radiación catódica, pensaba, por el contrario, que los rayos eran moléculas del gas encerrado en el tubo, que habían logrado adquirir una carga eléctrica negativa del cátodo, lo que hacía que éste las repeliese violentamente. Experimentos llevados a cabo por Heinrich Hertz en 1883 y 1891 parecían descartar la idea de que los rayos depositaban carga eléctrica negativa en un colector de carga introducido en el interior de un tubo de rayos catódicos. Finalmente, fue J.J. Thomson, quien en 1897 detectó una desviación de los rayos catódicos, instada por las fuerzas eléctricas producidas por dos placas metálicas electrizadas colocadas dentro del tubo. Las medidas de la desviación permitieron a Thomson calcular el cociente (e/m) entre la carga y la masa de los «corpúsculos» —éste es el nombre que utilizó Thomson; hoy los llamamos electrones— que constituyen los rayos catódicos. En sus artículos de 1897, Thomson incluyó otra notable observación: aquellos corpúsculos (electrones) que componían los rayos catódicos eran siempre los mismos, independientemente de cual fuese la composición del cátodo, del anticátodo o del gas del tubo. Las consecuencias de semejante hecho no se le ocultaban; así en su libro *«Electricity and Matter»* (1904) escribía:⁸

«Hemos visto que si engendramos los corpúsculos por rayos catódicos, luz ultravioleta o metales incandescentes, sean cuales fueren los metales y gases presentes, obtenemos siempre la misma clase de corpúsculos análogos en todos los conceptos por muy distintos agentes y materiales, y puesto que la masa de los

⁸ He utilizado la traducción al castellano de Blas Cabrera de este libro: J.J. Thomson, Electricidad y materia (Adrián Romo, Madrid 1909), p. 83.



corpúsculos es menor que la de cualquier átomo conocido, se colige que el corpúsculo debe ser un constituyente del átomo de muy diferentes sustancias. Que, en suma, los átomos de estas sustancias tienen alguna cosa común».

En otras palabras: los indicios apuntaban en el sentido de que se estaba ante un componente universal de la materia.

Al igual que ocurría con los rayos catódicos, la naturaleza de los rayos X fue intensamente debatida desde un principio. La mayor parte de los físicos pensaba que eran algún tipo de radiación electromagnética. El propio Röntgen era de esta opinión. Sin embargo, existían evidencias que apuntaban en la dirección de que no se comportaban como los rayos de luz ordinaria: «He tratado de varias maneras —escribía Röntgen en su primer artículo— detectar en los rayos X fenómenos de interferencias; pero, desgraciadamente, sin éxito, acaso solamente por su débil intensidad...; y tampoco puede ser polarizada por ninguno de los métodos ordinarios». Ante tal situación, no es extraño encontrarse con que el 1 de febrero de 1896 Kelvin preguntase a Stokes: «*Con respecto a los rayos X de Röntgen ¿eres un longitudinalista un ultravioletista, o un tertium-quidist?*»⁹

Al igual que muchos otros científicos (físicos, químicos y médicos, principalmente) a lo largo del mundo, Becquerel se puso inmediatamente a estudiar las propiedades de la nueva radiación. En particular, se dedicó a intentar comprobar si los cuerpos fluorescentes generaban rayos X, una hipótesis formulada por Henri Poincaré en la mencionada sesión de la Académie. Los primeros resultados fueron negativos, pero insistió con sales de uranio, cuya fluorescencia ya había estudiado en otras ocasiones.

El 24 de febrero, es decir poco más de un mes después de la reunión de la Académie, y casi cuatro del descubrimiento de Röntgen, Becquerel presentaba una comunicación a la Académie des Sciences en la que señalaba que los «*rayos emitidos por la sal de uranio expuesta a la luz solar impresionan a través de una espesa envoltura de papel- una placa fotográfica*». Parecía, efectivamente, que la fluorescencia iba acompañada de rayos X. Sin embargo, una semana más tarde, el 2 de marzo, la Académie recibía otra comunicación de Becquerel, esta vez con un contenido mucho más sorprendente. El día 26 de febrero se había visto obligado a interrumpir sus experiencias en las sales de uranio debido a que estaba nublado y no salió el Sol. Como tenía la placa fotográfica protegida por una envoltura y la sal de uranio preparada, las guardó

⁹ «*The correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs*», vol. 2 («1870-1901»), David B. Wilson, ed. (Cambridge University Press, Cambridge (1990), p. 632.



en un cajón, esperando que el día siguiente saliese el Sol y pudiese exponer la sal a su luz. Como el tiempo no cambió en varios días, el 1 de marzo Becquerel optó por revelar la placa fotográfica, esperando encontrar imágenes débiles. Sorprendentemente, encontró siluetas muy fuertes. Sin la intervención de la luz solar, sin ninguna fluorescencia visible, el compuesto de uranio había emitido una radiación capaz de impresionar la placa. Casi inmediatamente, el 9 de marzo Becquerel encontró que además de oscurecer placas fotográficas, la nueva radiación ionizaba los gases, haciéndoles conductores; un hallazgo que permitía medir la «actividad» de una muestra.

Aunque el descubrimiento de Becquerel no atrajo inicialmente tanta atención como el de Röntgen, tampoco pasó desapercibido. Es interesante ver qué pensaban de él algunos científicos. El 12 de marzo de 1896, George Stokes escribía a su amigo Kelvin.¹⁰ Refiriéndose al descubrimiento realizado por Silvanus Thompson de que «fósforo solar expuesto durante bastante tiempo a luz ordinaria era una fuente de rayos de Röntgen, o al menos de rayos que atraviesan sustancias opacas» (Stokes a Kelvin, 9 de marzo de 1896), un descubrimiento en el que se le había adelantado Becquerel, Stokes manejaba la siguiente explicación posible:

«Me parece que este resultado presenta una analogía sorprendente con la calorescencia. En la calorescencia, el agente activo son vibraciones etéreas de frecuencia tan baja que se sitúan más allá del rojo. Presumiblemente estas [vibraciones] producen en primera instancia vibraciones moleculares de período similar, o casi, pero el movimiento excitado de esta manera en grupos moleculares o moléculas, al participar él mismo en grupos moleculares o moléculas, próximas da lugar a movimientos moleculares de período corto, que comunica al éter vibraciones de tal período que caen dentro del espectro visible.

Ahora en el fósforo solar tenemos grupos moleculares comparativamente restringidos capaces de ser excitados en primera instancia por vibraciones etéreas de frecuencias relativamente altas, cuyo efecto se acumula hasta que se produce una considerable agitación molecular que sin embargo no se comunica fácilmente a grupos moleculares más amplios. Cuando se establece esta considerable pero localizada agitación, puede

¹⁰ The correspondence between ..., o. c., p. 649.



ser que en el estado permanente existan algunas vibraciones moleculares de alta frecuencia pertenecientes al sistema de agitación, que exciten vibraciones etéreas a las que el papel negro sea transparente».

Como vemos, los «físicos clásicos» se afanaban por encontrar explicaciones dentro del ámbito del mundo científico en el que habían crecido, el de la física clásica. Pero las propiedades de las sustancias radiactivas se hicieron, como sabemos, cada vez más «extrañas». *«Hace dos días –escribía Kelvin a Stokes el 25 de febrero de 1897– recibí de [Ferdinand Frédéric] Moissan una muestra de uranio, y he visto con mis propios ojos su efectividad para descargar un conductor electrificado, lo que es más como magia de cualquier cosa que yo haya visto u oído jamás en Ciencia».*¹¹

EL PROBLEMA DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Una posibilidad de entender fenómenos como las sorprendentes propiedades de los rayos uránicos (radiactividad) recientemente descubiertos se encontraba, obviamente, en el conocimiento de la estructura de la materia. Entremos, por tanto, en esta cuestión.

El problema de explicar la estructura de la materia en función de «unidades» elementales adquirió nuevo vigor durante la segunda mitad del siglo XIX. Una de las posibilidades, que llegó a desarrollarse con cierto detalle desde el punto de vista teórico, fue la de los anillos vorticiales (estructuras en forma de anillo que se dan en fluidos, y que debido a sus propiedades de estabilidad tienen algunas características similares a las que, en principio, se asocian a los átomos). *«En A Treatise on the Motion of Vortex Rings»* (MacMillan, Londres 1883), obra con la que ganó el premio Adams de la Universidad de Cambridge en 1882, J. J. Thomson intentó avanzar por ese camino. Sin embargo, tras sus trabajos sobre el electrón Thomson perdió interés en este tipo de modelos en los que era difícil incorporar al portador de unidad de carga eléctrica que con tanto esfuerzo había identificado. De hecho, desde finales de siglo y una buena parte de la primera década del nuevo siglo, Thomson se convertiría en el principal defensor de un modelo que incorporaba ideas desarrolladas en 1878 por A.M. Mayer, pero introduciendo el electrón, que permitía ahondar en la idea de que los áto-

¹¹ *Ibid.*, p. 683.



mos de los elementos químicos están compuestos por elementos más sencillos.

En la última década del siglo XIX, esta idea había encontrado apoyo en evidencias como la que suministraba la estructura del espectro de los elementos en el mismo grupo de la serie periódica, y en particular en los trabajos que mostraban la existencia en los espectros de líneas cuyas frecuencias aparecían ligadas por relaciones numéricas definidas. El fenómeno de la radiactividad iba en la misma dirección. Veamos, en este sentido, lo que señalaba J. J. Thomson en su libro *«Electricity and Matter»*.

Thomson pensaba que había que *«afrentar el problema de la constitución del átomo y ver si podemos imaginar un modelo que posea la potencialidad de explicar las notables propiedades demostradas por las sustancias radiactivas»*, una tarea en la que no sería *«superfluo el considerar la relación de la existencia de los corpúsculos con el problema de la constitución del átomo»*¹².

El modo como Thomson abordó el problema, fue proponiendo un modelo atómico eminentemente clásico, de hecho, uno que ya había manejado Kelvin (el «átomo Aepinus de lord Kelvin», escribía Thomson [p. 88]). Se trataba de una *«esfera de electrización uniforme positiva, ejerciendo, por tanto, una fuerza eléctrica radial proporcional a la distancia al centro en un punto interior, y que los corpúsculos negativamente electrizados, mucho más pequeños, se mueven alrededor de su centro en el interior de él»*. Del número y estado de movimiento de los «corpúsculos» (electrones) dependería la posición en que se encontrarían, en una configuración de equilibrio.

En el caso, por ejemplo, de tres corpúsculos, éstos se colocaban en los vértices de un triángulo equilátero, cuyo centro coincidía con el de la esfera. Ahora bien, la distancia del centro dependería de la fuerza centrífuga, y ésta de su velocidad. Así podría llegar un momento en el que alcanzasen la superficie de la esfera; *«incrementos posteriores de la velocidad hacen primero que gire fuera de la esfera, y por último, la abandona por completo cuando el átomo se rompe»* (p. 89). Por consiguiente, el átomo de Thomson no era permanente, algo muy conveniente en un momento en que comenzaban a conocerse las propiedades de la radiactividad. Su estabilidad dependía de la velocidad de los corpúsculos, o lo que es lo mismo, de si su energía cinética (que Thomson denominaba «temperatura corpuscular») excedía un cierto valor.

Este modelo atómico, permitía a Thomson diseñar incluso una cierta visión cosmogónica (pp. 93-95):

¹² Electricidad y materia, o.c., p. 85.



«Supongamos que el primer escalón [aquél en el que los diferentes elementos químicos se han formado por la “agregación de unidades primordiales”] se ha alcanzado y que tenemos un cierto número de sistemas formados por una unión de dos unidades. Cuando se forma el primero de estos sistemas binario, como podemos llamarle, los corpúsculos en el sistema tendrán una cantidad considerable de energía cinética; puesto que, cuando las dos unidades se han fundido, deberá producirse una cantidad de energía cinética igual a la disminución de la energía potencial por la incorporación de las dos unidades. Como estos sistemas binarios tienen en su origen una temperatura corpuscular elevada, no se combinarán probablemente unos con otros o con una nueva unidad; antes de que puedan hacerlo, la energía cinética de los corpúsculos debe reducirse».

De esta manera se irían formando sistemas más complejos, en un proceso que coexistía con la desaparición de otros más simples. Así, *«a medida que el universo envejece, puede esperarse que aparezcan elementos de peso atómico cada vez mayor. Su aparición, sin embargo, no envuelve la anulación de los elementos de más bajo peso atómico. El número de átomos de los últimos sin duda disminuiría, puesto que los elementos más pesados se edifican por hipótesis con materiales suministrados por los más ligeros. La totalidad de los átomos de estos últimos no podrán, sin embargo, gastarse de una vez y así tendremos un gran número de elementos que existen juntos y al mismo tiempo».*

Un hecho importante a tener en cuenta era la caída continua en la temperatura corpuscular debida a la radiación (electromagnética), causada por el movimiento de los electrones. Para Thomson, en algunos átomos, «con pesos atómicos especiales», este enfriamiento, inicialmente muy lento, podía llegar a producir inestabilidad en el átomo y determinar tal incremento en la energía cinética de los corpúsculos que dé lugar a un fuerte incremento en la radiación y pueda desprenderse una porción del átomo. La radiactividad, como apunta Thomson, era un fenómeno en el que ocurría precisamente algo de este tipo.

Nos encontramos, en definitiva, con que todavía se pensaba que la solución se encontraba en una revisión de la vieja física, según las líneas sugeridas por la visión electromagnética de la naturaleza. Como apuntaba Carl Barus, decano del Graduate Department de Brown University en el Congreso de San Louis, tras pasar revista a los grandes avances experimentados en la «teoría electrónica» durante el último lus-



tro del siglo XIX (rayos X, radiactividad, efecto Zeeman, medida de la relación entre carga y masa del electrón:¹³

«Las manifestaciones físicas que acompañan a la ruptura de la estructura atómica, sorprendentemente variadas como se está viendo que son, adquieren una importancia fundamental cuando se comprende que la última cuestión implicada aquí es nada menos que una reconstrucción completa de la dinámica en una base electromagnética». Indicios como los resultados de Kaufmann y Abraham, que Barus, al igual que muchos de sus contemporáneos interpretaban como prueba de que «la masa del electrón es completamente de naturaleza electromagnética», apoyaban semejante idea. Lejos estaba de imaginar que en tales resultados se encontraban los gérmenes de una radicalmente nueva teoría física: la mecánica cuántica.

¹³ C. Barus, «The progress of physics in the nineteenth century», Congress of Arts and Science. Universal Exposition, St. Louis, 1904, Howard J. Rogers, ed., vol IV, pp. 29-65 (The Riverside Press, Cambridge, Mass. 1906). Reproducido en *Physics for a New Century*, Katherine R. Sopka, ed. (American Institute of Physics, Nueva York 1986), pp. 107-143; pp. 64/142