

Espacio-Tiempo y Átomos. Relatividad y Mecánica Cuántica

José Manuel Sánchez Ron

Digitalización: maplewhite@gmail.com

Índice general

Introducción	1
Espacio-tiempo y relatividad	3
La teoría de la relatividad especial	4
Hermann Minkowski y el espacio-tiempo	7
Teoría general de la relatividad	8
Recepción de la teoría especial de la relatividad	10
Cosmología y expansión del universo	12
Átomos y física cuántica	18
Nuevas radiaciones: Röntgen y los rayos X	18
De los rayos X a la radioactividad	22
Modelos atómicos: Thomson, Rutherford y Bhor	26
El modelo atómico de Rutherford	28
Max Planck y la primera discontinuidad cuántica	29
Albert Einstein y la segunda discontinuidad cuántica	32
El modelo atómico de Bohr	33
La mecánica cuántica	37

La mecánica matricial	38
La mecánica ondulatoria	41
Explorando el mundo cuántico	44
Altas energías para conocer el microcosmos: La «Gran Ciencia»	45

Introducción

La segunda mitad del siglo XIX fue una época de gran interés para aquellos que deseaban conocer cómo «funciona» la Naturaleza. Los avances llevados a cabo en química orgánica resultaron especialmente importantes para mostrar que la materia guardaba dentro de sí todavía muchas sorpresas, que al desvelarse podrían aumentar, además de nuestro conocimiento de esa Naturaleza, el bienestar humano. Los tintes y la agricultura figuran —más aquéllos que ésta— entre los principales beneficiados. De hecho, se puede decir que de la mano de la química comenzó entonces la auténtica institucionalización de las ciencias físico-químicas, un proceso que tendría enormes consecuencias para la historia social, política y económica de todo el siglo XX.

La física, que disponía de un esquema teórico (la síntesis mecánica desarrollada por Isaac Newton en los *Principia*) mucho más perfecto que la química, también guardaba sus sorpresas. Gracias, en especial a los trabajos de Oersted, Ampère, Faraday y Maxwell, electricidad y magnetismo se revelaron como apartados, interrelacionados, de un campo *electromagnético común*; la luz, además, resultó ser también parte de ese campo. En consecuencia, de tener que hablar de electricidad, magnetismo y óptica como tres ramas diferentes de la física, se pasó a una única teoría electromagnética.

El avance experimentado por la ciencia del electromagnetismo a lo largo del siglo XIX estuvo acompañado por el desarrollo de un buen número de industrias que se aprovechaban de las posibilidades abiertas por semejante conocimiento; las comunicaciones y el alumbrado fueron especialmente importantes en este sentido. Al igual que la química orgánica, el electromagnetismo sirvió para favorecer la profesionalización de la actividad científica, hasta no hacía mucho, más un pasatiempo que una *profesión*.

En un plano puramente científico, la teoría electromagnética, según fue desarrollada por James Clerk Maxwell en la década de los sesenta y comienzos de los setenta, planteaba numerosos problemas: ¿Cómo, por ejemplo, interaccionaban campo electromagnético y cargas? ¿Era ese campo (o éter) el moderno sustituto del espacio absoluto de Newton? Se extendió, incluso, la creencia de que la masa en la que Newton había basado su mecánica, no era sino una especie de «conglomerado de campo electromagnético». La visión mecanicista de la Naturaleza, que pretendía explicar el mundo perceptible en base a partículas moviéndose según fuerzas a distancia newtonianas, fue sustituida por una visión electromagnética, cuyo objetivo era edificar una teoría en la que el campo electromagnético reinase sin rivales. La teoría de la relatividad especial propuesta por Albert Einstein en 1905 pondría orden en este confuso universo en el que dos teorías, aparentemente fundamentales, la mecánica newtoniana y el electromagnetismo maxwelliano, pugnaban entre sí.

En el ámbito de la experiencia el electromagnetismo facilitó, con los instrumentos y perspectivas a que dio origen, el descubrimiento de nuevos y sorprendentes fenómenos, como los rayos X y la radiactividad. Estos hallazgos, junto a desarrollos de índole teórica, como el que llevó a Max Planck a introducir los cuantos de luz, terminarían produciendo la mecánica cuántica, la teoría que dio sentido al mundo del microcosmos.

En consecuencia, y a pesar de que tanto la relatividad (la especial al igual que la general) como la mecánica cuántica introdujeron aspectos radicalmente nuevos dentro de la física, hasta el punto de que no sea totalmente injustificado hablar —como se hace a menudo— de «revoluciones científicas», existe una evidente conexión orgánica entre las dos nuevas teorías y la física (clásica) de los siglos XVII, XVIII y XIX.

Espacio-tiempo y relatividad

Tal y como acabo de señalar, la electrodinámica maxwelliana poseía propiedades que eran incompatibles con elementos básicos de la mecánica newtoniana. Así, fueron creciendo las evidencias de que la velocidad de la luz en el vacío, c , es la misma en todos los sistemas inerciales —sistemas de referencia que se mueven con velocidad constante—, independientemente del movimiento relativo entre fuente emisora de luz y observador (los experimentos de Albert A. Michelson en la década de los ochenta, especialmente el que realizó en colaboración con E. W. Morley en 1887, fueron fundamentales en este sentido). Este hecho era de difícil acomodo dentro del contexto de la dinámica de Newton, en la que la ley de composición de velocidad impone que $c' = c + v$: si un observador, S' , se mueve con velocidad v con respecto a otro, S , y éste mide para la velocidad de la luz el valor c , entonces para S' la luz debería tener una velocidad c' , distinta de c .

Diversos físicos intentaron encontrar algún modo de escapar de este problema. La hipótesis que más éxito alcanzó fue la propuesta en 1889 por el físico irlandés George F. FitzGerald. En una nota publicada en la entonces oscura revista norteamericana *Science* (elegida aparentemente porque Michelson y Morley eran estadounidenses), FitzGerald afirmaba que la única forma de reconciliar los resultados de estos dos científicos con la abundante experiencia de un éter estacionario era que «la longitud de los cuerpos materiales cambie, si se mueven a través del éter, en una cantidad proporcional al cuadrado del cociente entre sus velocidades y la de la luz». La idea era que tal vez fuese posible que el resultado del experimento de Michelson-Morley, en el que no se detectaba ningún efecto al dirigir un interferómetro en sentidos opuestos al movimiento de la Tierra (supuestamente, a su vez, moviéndose sobre un éter que bañaba el universo), se debiese a que los bra-

zos del interferómetro variasen de longitud debido a esa traslación; al fin y al cabo la forma y dimensiones de un sólido están determinadas en última instancia por la intensidad de las fuerzas moleculares, y por tanto no se debía descartar que el movimiento con respecto a ese éter estacionario afectase a esas fuerzas electromagnéticas intermoleculares... si es que tal éter existía, naturalmente.

Fueron otros, no obstante, los que desarrollarían realmente la hipótesis de la «contracción de longitudes». El principal fue el físico holandés Hendrik A. Lorentz, que no supo de la aportación de FitzGerald hasta que ya había compuesto el contenido básico de su memoria de 1895, en la que, entre otras cuestiones, estudiaba detenidamente la misma idea propuesta seis años antes por el irlandés. Lorentz (1895-1904) —al igual que Joseph Larmor (1900), que también se distinguió en estos trabajos— encontró ecuaciones para las transformaciones entre sistemas de referencia inerciales que permitían explicar, hasta segundo orden de aproximación, el resultado del experimento de Michelson-Morley. El contexto en el que se movían estos científicos era claramente el de la visión electromagnética de la Naturaleza; esto es, lo que pretendían era utilizar la electrodinámica maxwelliana para explicar los resultados experimentales. En *Eter y materia* (1900), Larmor expresó con claridad este hecho:

El resultado negativo de Michelson apoya la conclusión, ampliamente defendida, de que la principal parte de las acciones, químicas y de otro tipo, entre moléculas y entre las partes constituyentes de las moléculas, es de tipo electromagnético.

La teoría de la relatividad especial propuesta en 1905 por Albert Einstein modificaría sustancialmente esta situación.

La teoría de la relatividad especial

Albert Einstein es uno de los grandes genios de la ciencia de todos los tiempos. Sin embargo, el inicio de su carrera científica fue difícil. Al finalizar, en julio de 1900, sus estudios en la Escuela Politécnica Federal de Zurich, fue incapaz de conseguir un puesto de ayudante, el primer escalón en la carrera

universitaria (los otros tres estudiantes que pasaron los exámenes al mismo tiempo que él sí pudieron colocarse). Al comprobar que sus esfuerzos por lograr algún puesto universitario fracasaban, tuvo que aceptar, en junio de 1902, un empleo como «técnico experto de tercera clase» en la Oficina de Protección de la Propiedad Intelectual de Berna. Permanecería en esa Oficina de Patentes hasta el 15 de octubre de 1909, fecha en que fue nombrado profesor asociado de la Universidad de Zurich.

En Berna, Einstein se las apañaba para compatibilizar su trabajo profesional con sus investigaciones científicas, que ya había iniciado antes. Así llegó 1905, su *annus mirabilis*. Fue entonces cuando publicó en el *Annalen der Physik* tres trabajos que conmoverían los cimientos de la física. Me estoy refiriendo a, citados por orden de aparición, «*Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz*», del que hablaré al estudiar la física cuántica: «*Sobre el movimiento requerido por la teoría cinético-molecular del calor para partículas pequeñas suspendidas en fluidos estacionarios*», en el que a través de un análisis teórico del movimiento browniano, «hacía visibles a los átomos», por decirlo de alguna manera, y «*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*», el artículo de la relatividad especial.

Con este último trabajo Einstein dio un giro radical al planteamiento seguido por los físicos que, como Lorentz y Larmor, se ocupaban del problema de cómo describir teóricamente los movimientos de cuerpos cargados. Einstein aceptó como uno de sus elementos de partida, como uno de los axiomas de su teoría, el que la luz tiene la misma velocidad en todos los sistemas de referencia, y a partir de ahí desarrolló una cinemática que fuese consistente con este requisito. De esta manera llegó a las mismas ecuaciones de transformación entre sistemas inerciales que habían obtenido antes Lorentz y Larmor, aunque ahora consideradas como exactas, no meras aproximaciones hasta segundo orden en (v/c) . Es importante señalar que Einstein no había recurrido para nada al electromagnetismo; desarrolló un esquema previo a cualquier dinámica, una serie de requisitos cinemático-geométricos que deberían obedecer toda ley de fuerzas que pretendiese describir las interacciones físicas. Tales requisitos son, en esencia, lo que denominó «teoría de la relatividad especial».

He aquí cómo el propio Einstein describió los puntos básicos de su teoría en un manuscrito cuya fecha y contexto se ignoran, depositado en la actualidad en la *Schwadron Collection* de la Biblioteca Nacional de Jerusalén:

Teoría especial de la relatividad. Esta teoría tiene sus orígenes en la convicción, reforzada por diversos hechos empíricos, de que la velocidad de la luz tiene el mismo valor constante en todos los sistemas inerciales. Partiendo de este principio llegamos al resultado de que las coordenadas de un punto y el tiempo están sujetos a diferentes leyes de transformación (para la transición de un sistema inercial a otro) de lo que se había supuesto tácitamente con anterioridad (transformación de Lorentz). El contenido de la teoría es la contestación a la pregunta: ¿cómo se deben modificar las leyes de la naturaleza para tener en cuenta el postulado de la constancia de la velocidad de la luz? De esto surgió en particular el que el tiempo no es «absoluto», esto es, independiente de la elección de un sistema inercial. Además, surgió una ley de movimiento que difería de la de Newton en el caso de velocidades comparables con la velocidad de la luz (c). También resultaba ese teorema ($E = mc^2$) para la equivalencia de la masa inercial m y la energía E de un sistema, que se ha convertido en particularmente importante para la teoría de los elementos químicos y procesos radiactivos.

Con la relatividad especial el electromagnetismo dejaba de ser, al menos a nivel de primeros principios (en 1905 todavía se suponía que sólo existían dos interacciones en la Naturaleza: la electromagnética y la gravitacional), el núcleo central de la física. El éter no corría mejor suerte, como denota la siguiente frase de «*Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*», en la que se puede apreciar la diferencia que separaba a la nueva teoría de formulaciones previas:

La introducción de un «éter lumífero» demostrará ser superflua en tanto que la visión desarrollada aquí no requiere un «espacio absoluto estacionario».

En la sección 10 del artículo que estoy mencionando, Einstein calculó la energía cinética de un electrón en un campo electrostático externo. El resultado que se obtenía implicaba ya la famosa equivalencia entre la masa y la energía, $E = mc^2$, que iba a ser básica en el desarrollo de la física nuclear, así como el soporte en el que se apoyarían desarrollos de tanta trascendencia

social en nuestro siglo como las bombas atómicas y los reactores nucleares. Sin embargo, aparentemente, Einstein no se dio cuenta ni del significado ni de la importancia del resultado que había obtenido de manera implícita hasta poco después, cuando escribió el artículo titulado «*¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido energético?*». Las frases finales de este trabajo muestran que Einstein había comprendido por fin las implicaciones de la expresión matemática que había obtenido, y de su conexión con la aparentemente inagotable energía que emanaba de los cuerpos radiactivos:

La masa de un cuerpo es una medida de su contenido energético; si la energía cambia un valor L , entonces la masa varía en el mismo sentido un valor $(L/9) \cdot 10^{20}$...

No es imposible que se pueda comprobar con éxito la teoría con cuerpos cuyo contenido energético es altamente variable (por ejemplo con sales de radio).

Hermann Minkowski y el espacio-tiempo

Una de las características más llamativas de la teoría de la relatividad especial es su formulación cuatridimensional. El que se pueda dejar de hablar de un espacio tridimensional, para pasar a referirse a un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, es algo que no ha dejado de atraer la atención.

Sin embargo, la interpretación cuatridimensional, espacio-temporal, de la relatividad restringida no estaba contenida en el artículo de Einstein de 1905, sino que se debe al matemático Hermann Minkowski, uno de los maestros de Einstein en el Politécnico de Zurich. El gran sentido geométrico de Minkowski se plasmó, en lo que a la teoría einsteniana se refiere, el 21 de septiembre de 1908, cuando pronunció una conferencia titulada «*Espacio y tiempo*» ante el 80 Congreso de Científicos y Médicos Alemanes, reunidos en Colonia. En aquella ocasión, Minkowski pronunció estas ya célebres frases:

A partir de ahora el espacio por si mismo y el tiempo por si mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará su independencia.

La formulación espacio-temporal de la relatividad especial permitió visualizar con mayor facilidad consecuencias de la teoría como la dependencia del concepto de simultaneidad del sistema inercial al que está asociado el observador, o las contracciones y dilataciones de tiempos y longitudes. Además, el esquema geométrico desarrollado por Minkowski, resultó ser un elemento imprescindible para poder construir la teoría de la relatividad general.

Teoría general de la relatividad

Al contrario que la relatividad especial, cuya estructura básica fue desarrollada por Einstein en forma definitiva en un solo trabajo, la relatividad general —la teoría relativista gravitacional que sustituyó a la gravitación universal de Newton— exigió un período mucho más largo para su elaboración, aproximadamente de 1911 a 1915, aunque ya en 1907 Einstein formulase la esencia del problema. Aquel año Johannes Stark —que años más tarde, siendo un ferviente nazi, se opondría agriamente a Einstein y a sus teorías— pedía a Einstein que escribiese un artículo para la revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, de la que era editor, en el que recopilase todo lo referente al «principio de relatividad». En una de las secciones de este artículo, Einstein escribía:

Hasta ahora hemos aplicado el principio de relatividad —es decir, la suposición de que las leyes de la naturaleza son independientes del estado de movimiento del sistema de referencia— solamente a sistemas de referencia no acelerados. ¿Es concebible que el principio de relatividad sea válido también para sistemas acelerados entre sí?

El problema era evidente y, por consiguiente, Einstein no podía abstenerse «de tomar posición en esta cuestión». Para ello pasaba a considerar dos sistemas de referencia en movimiento, S y S' , suponiendo que el primero estaba acelerado en la dirección del eje x , y que g era el valor —constante— de esta aceleración.

Supongamos —señalaba— que S' está en reposo, pero situado en un campo gravitacional homogéneo, que imparte una aceleración $-g$ en la dirección del eje x a todos los objetos. Por lo que sabemos, las leyes físicas con respecto a S no difieren de aquéllas con respecto a S' ;

esto proviene del hecho de que todos los cuerpos son acelerados de la misma forma en un campo gravitacional [experimento de Galileo]. Por consiguiente, en base a nuestra experiencia actual, no tenemos ninguna razón para suponer que los sistemas S y S' puedan ser distinguidos entre sí de alguna manera, y por tanto supondremos que existe una equivalencia física completa entre el campo gravitacional y la correspondiente aceleración del sistema de referencia.

Vemos cómo en estos párrafos Einstein relacionaba de una manera auténticamente genial la descripción teórica de la interacción gravitacional con su deseo de generalizar el principio de relatividad especial, de manera que englobase una clase más amplia de sistemas de referencia que los inerciales. El vínculo de unión es un dato que aparece como una no explicada coincidencia en la mecánica newtoniana: la proporcionalidad —igualdad si se eligen sistemas de unidades adecuadas— entre la masa inercial y la masa gravitacional. Dicha equivalencia entre campos gravitacionales y sistemas de referencia acelerados se denomina «principio de equivalencia» y fue la única pieza de todas las que formaban su «rompecabezas gravitacional» que en ningún momento abandonó Einstein durante los años que empleó en buscar una teoría de la relatividad general.

Fue precisamente explotando el principio de equivalencia, que Einstein se dio cuenta, en 1912, de que la teoría relativista de la gravitación que buscaba debería edificarse sobre un sustrato geométrico curvo o, en otras palabras, que los campos gravitacionales curvan el espacio-tiempo relativista (a esto se debe el que la relatividad especial no se pueda aplicar, salvo en casos límites, a la interacción gravitacional).

En este punto, hay que señalar que no habría sido posible desarrollar la teoría de la relatividad general si no hubiese sido porque durante el siglo XIX la geometría experimentó una dramática renovación. En efecto, los repetidos esfuerzos encaminados a demostrar que el quinto postulado de los *Elementos* de Euclides era una pieza superflua en la estructura de la obra, que podía deducirse de otros axiomas, llevaron, durante el primer tercio del siglo XIX, a la sorprendente conclusión de que no solamente era realmente independiente, sino que de su negación no se deducían contradicciones; esto es, que se puede sustituir por otros postulados alternativos que conducen a geometrías diferentes de la euclidea, pero lógicamente correctas. Me estoy refiriendo a

las geometrías no euclídeas, asociadas primordialmente a los nombres de Carl Friedrich Gauss, Nicolai Ivanovich Lobachewsky y Janos Bolyai.

Inicialmente, el descubrimiento de las geometrías no euclídeas no atrajo excesivo interés, pero una combinación de sucesos relanzó su estudio. En primer lugar, la publicación, entre 1860 y 1865, de la correspondencia de Gauss con Heinrich C. Schumacher, con su referencia favorable al trabajo de Lobachewsky. En segundo lugar, la demostración de Eugenio Beltrami, en 1868, de que la geometría de Lobachewsky podía interpretarse como la geometría de una superficie de curvatura constante y negativa. Finalmente, la tesis de habilitación de Bernhard Riemann (1854), titulada «*Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría*».

Una vez que Einstein dio el paso de identificar la geometría «curva» como el soporte geométrico adecuado para construir una teoría relativista de la gravitación, y con la ayuda de su antiguo compañero de estudios en Zurich y ahora también colega en el Politécnico, Marcel Grossmann, que le instruyó en la utilización del cálculo diferencial absoluto (que Ricci y Levi-Civita habían formalizado a finales de siglo), e identificando geometría con campo gravitacional, Einstein tardaría todavía dos años más en llegar a las ecuaciones finales del campo gravitatorio. El 25 de noviembre de 1915 Einstein, ya en Berlín, presentaba a la Academia su teoría general de la relatividad, de la que derivó tres predicciones fundamentales: el desplazamiento del perihelio (punto de la órbita más cercano al Sol) de los planetas (efecto especialmente manifiesto en el caso de Mercurio), un problema que había permanecido sin resolver en la teoría newtoniana durante más de un siglo; el desplazamiento de las líneas espectrales; y la curvatura de los rayos de luz debido al campo gravitacional.

Recepción de la teoría especial de la relatividad

La cuestión de la recepción dada a las teorías relativistas einstenianas es un tema complejo. Desde luego, la relatividad especial tardó un cierto tiempo en ser reconocida. Varios factores influyeron en este hecho: lo contraintuitivo de uno de los postulados en que se basaba (el que afirma que la velocidad de la luz es independiente del estado de movimiento de su emisor)

no ayudaba a creer en ella. Por otra parte está el que Einstein era en 1905 un personaje totalmente desconocido en la comunidad científica; su nombre no animaba a que otros físicos se fijasen en su artículo de los *Annalen*. Además, hay que tener en cuenta que muchos científicos no supieron ver las profundas diferencias conceptuales existentes entre el nuevo marco cinemático desarrollado por el empleado de la Oficina de Patentes de Berna, y las aportaciones de Lorentz o del matemático y físico-matemático francés Henri Poincaré.

Lorentz, con el que ya nos hemos encontrado, era una figura enormemente respetada por la comunidad científica internacional y, como vimos, había llegado en 1904, esto es, antes que Einstein, a algunos de los resultados obtenidos por éste (ecuaciones que relacionan las transformaciones de un sistema de referencia a otro; variación de la masa con la velocidad; contracción de longitudes). No es sorprendente, por consiguiente, que muchos físicos pensasen que no había diferencias apreciables entre sus puntos de vista. El propio Lorentz contribuyó a esta idea cuando escribió en su libro *La teoría de los electrones*, basado en un curso que dio en 1906 en la Universidad de Columbia:

No puedo hablar aquí de las muchas y muy interesantes aplicaciones que Einstein ha hecho [del principio de relatividad]. Sus resultados referentes a los fenómenos electromagnéticos y ópticos... coinciden en lo principal con lo que yo he obtenido en las páginas precedentes, la diferencia principal estriba en que Einstein simplemente postula lo que yo he deducido, con alguna dificultad y no del todo satisfactoriamente, a partir de las ecuaciones fundamentales del campo electromagnético.

Más tarde, sin embargo, en algún momento entre 1909 y 1915, el año en que se publicó la segunda edición de *La teoría de los electrones*, Lorentz se dio cuenta de la originalidad aportada por Einstein. Añadió entonces una nota en la que decía:

Si tuviese que escribir ahora este último capítulo, sin duda que daría un lugar más prominente a la teoría de la relatividad de Einstein, en la que la teoría de los fenómenos electromagnéticos en sistemas de movimiento gana una simplicidad que yo no fui capaz de conseguir. La causa principal de mi fracaso estuvo en mi fijación a la idea de que sólo la variable t puede ser considerada como el tiempo verdadero y que

mi tiempo local t' no deba considerarse más que como una cantidad matemática auxiliar.

El caso de Poincaré, una de las cumbres mundiales de la ciencia matemática de todos los tiempos, es también ilustrativo. Casi al mismo tiempo que Einstein, Poincaré escribió un artículo, «*Sobre la dinámica del electrón*», que envió el 23 de julio de 1905 a la revista matemática italiana *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo* (aparecería publicado en 1906). En algunos sentidos (el matemático sobre todo), el trabajo de Poincaré era más perfecto que los de Lorentz y Einstein, y por supuesto contenía muchos de los resultados obtenidos por éste. Tal vez por tal motivo, Poincaré rechazó posteriormente la relatividad en el sentido einsteniano.

En conjunto, cuando se repasa la historia de los primeros años de la relatividad especial, uno se encuentra que poco a poco ésta se fue abriendo camino. En un principio se pueden encontrar tanto científicos (la mayoría, probablemente) que no conocían la existencia de los trabajos de Einstein, otros que conociéndolos no los aceptaban, por una u otra razón, e incluso, por supuesto, los que creyeron rápidamente en la relatividad especial (Max Planck, por ejemplo). Aunque se ha intentado encontrar rasgos «nacionales» en la recepción dada a la relatividad restringida, especialmente en los casos de Alemania, Estados Unidos, Inglaterra y Francia, cuando se profundiza en el estudio de las reacciones dentro de esos países se va encontrando que los rasgos que se creía diferenciaban a una nación de otra terminan difuminándose. En todas hubo algunos científicos influyentes que se ocuparon, de alguna manera, de la nueva teoría. Parece cierto que en Alemania, la nación líder en investigación física, abundaron más estos personajes. En Gran Bretaña escasearon algo más, oponiéndose al principio a ella algunos físicos destacados; pero ello no quiere decir, por ejemplo, como se ha llegado a afirmar, que la característica *abrumadoramente* extendida de la reacción de los físicos británicos fuera su rechazo a la teoría einsteniana por su apego al concepto del éter.

Cosmología relativista y expansión del universo

La fuerza dominante en las grandes distancias que caracterizan al universo es la gravitacional. Por este motivo, no es excesivamente sorprendente

que al tener a su disposición la relatividad general, una teoría del campo gravitacional, Einstein pretendiese construir una teoría del universo, una cosmología.

Fue en 1917 cuando Einstein fundó esta nueva subdisciplina: la cosmología relativista. Aquel año publicó un artículo en el que aplicaba la relatividad general a la construcción de un modelo de universo homogéneo e isótropo (con las mismas propiedades en todas las direcciones y puntos de referencia). Además de estas hipótesis geométricas, Einstein supuso que la densidad media del universo era constante y distinta de cero, y que no cambiaba con el tiempo; esto es, que el universo era estático. En principio, estas propiedades eran razonables, pero no parecía que un modelo de estas características pudiese ser solución de las ecuaciones de la relatividad general, ya que al ser la interacción gravitatoria siempre aditiva (todas las masas se atraen) no se podía llegar a un modelo estático. Einstein fue capaz, sin embargo, de solucionar este problema añadiendo un nuevo término en las ecuaciones de la relatividad general: el denominado término cosmológico, que introducía, esencialmente, un campo repulsivo que podía compensar la atracción gravitacional.

Visto retrospectivamente, el mérito principal de Einstein fue el de abrir un nuevo campo, que hasta entonces generalmente había estado en manos de especuladores ajenos al mundo de la ciencia. En cuanto al modelo de universo que propuso, tuvo menos suerte. Ya en 1917 se vio que la solución de Einstein distaba de ser única: el astrónomo holandés Willem de Sitter demostró que también existían soluciones de la teoría relativista para universos sin ningún contenido material; esto es, vacíos. En principio puede parecer paradójico que existan semejantes soluciones, ya que ¿de dónde surge la gravitación si no hay materia que la produzca? El que, a pesar de todo, «exista gravitación» es consecuencia de la no linealidad de las ecuaciones de la relatividad general y del hecho de que, debido a la relación $E = mc^2$, cuando se tiene un campo (incluso un campo libre, no asociado a fuentes, como, por ejemplo, ocurre en electromagnetismo), la energía de éste es equivalente a masa, a su vez una fuente de gravitación; en otras palabras: el propio campo gravitacional genera gravitación.

Pero el golpe definitivo al universo de Einstein vino a partir de 1922-1923,

cuando el físico meteorólogo ruso, Alexander Alexandrovich Friedmann, demostró que era posible encontrar soluciones que representan universos no estáticos. El trabajo de Friedmann era bastante matemático, lo que tendía a ocultar su significado físico. Semejante «defecto» no se le puede achacar, sin embargo, al físico y matemático belga Georges Lemaître, que en 1927 publicó un artículo titulado «*Un universo homogéneo de masa constante y de radio creciente que da cuenta de la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas*».

Los trabajos de Friedmann y de Lemaître no atrajeron apenas atención en un principio. Se trataba de especulaciones teóricas que interesaban a muy pocos. El que la situación cambiase fue debido a los descubrimientos observacionales realizados por los astrofísicos.

Con la introducción de las técnicas espectrográficas desarrolladas durante, especialmente, la segunda mitad del siglo XIX, la astronomía se convirtió en astrofísica y la capacidad humana de escudriñar el cosmos aumentó de manera radical. Pronto (hacia el cambio de siglo) comenzaron a construirse —en particular en Estados Unidos— grandes telescopios que permitían «ver» más lejos. Fue en este contexto en el que se terminó esclareciendo un problema que había permanecido abierto desde al menos el siglo XVIII: si nuestra galaxia, la Vía Láctea, agota todo el universo, o si, por el contrario, existen otras unidades astronómicas (otras galaxias) de naturaleza similar separadas de ella por grandes distancias. Se puede decir que este largo debate terminó hacia 1924, siendo decisiva la utilización de unos magníficos indicadores de distancias, las estrellas cefeidas, denominadas así por su prototipo «Delta Cephei».

Las cefeidas son unas estrellas de luminosidad variable, descubiertas en 1908 por Henrietta Leavitt, del Observatorio de Harvard. Leavitt observó que cuanto mayores eran los períodos de variación de la luminosidad de estas estrellas, mayores eran también sus luminosidades. Cuatro años más tarde estableció que la relación entre el logaritmo de los períodos y las intensidades de la luminosidad era casi lineal. Con semejante resultado, que Ejnar Hertzsprung extendió poco después, se podían buscar cefeidas en agrupaciones estelares (una tarea no fácil, en la que el tamaño y la calidad de la lente del telescopio era fundamental); a continuación medir (observando en

los telescopios) sus períodos, lo que permitiría deducir, con la relación lineal mencionada, las luminosidades intrínsecas. Midiendo luego la luminosidad aparente, se podía deducir la distancia a la que se encontraba la cefeida, con lo que se caracterizaba también la distancia de la agrupación estelar (una galaxia, por ejemplo) a la que pertenecía.

Este método de determinación de distancias fue empleado por el astrónomo estadounidense Harlow Shapley, del Observatorio de Monte Wilson (California), para determinar las distancias de los cúmulos globulares que rodean a la Vía Láctea, en los que abundan las cefeidas. En 1918 anunció que las distancias que nos separan de esos cúmulos alcanzan los 200000 años-luz, lo que significaba que la Vía Láctea tenía unos 300000 años-luz de diámetro. En consecuencia, nuestra galaxia pasaba a tener un tamaño alrededor de diez veces mayor de lo supuesto hasta entonces. Esto implicaba que aumentaba la capacidad de la Vía Láctea de acoger en su seno objetos celestes, lo que iba en contra de la idea de que existiesen otros universos-islas (galaxias) en su «exterior». Por decirlo de otra manera: se reforzaba la idea de que las «fronteras» de nuestra galaxia constituían las distancias mayores existentes en el universo.

En 1921 Shapley dejó Monte Wilson para pasar al Harvard College Observatory, del que a los pocos meses fue nombrado director. De esta manera se alejó del principal centro de los estudios de galaxias espirales, perdiendo la oportunidad de extender sus estudios a este tipo de galaxias, que iban a resultar claves. Probablemente no creyese que fuese posible identificar allí estrellas individuales (cefeidas en particular). Que estaba equivocado es algo que demostraría Edwin Hubble, que había entrado a formar parte del Observatorio de Monte Wilson en 1919.

A partir de 1921 Hubble comenzó a tomar fotografías de la nebulosa irregular NG 6822 con el telescopio de 2,5 metros. En 1924 ya tenía más de 50 placas y 11 cefeidas, estableciendo la distancia de la nebulosa en 700000 años-luz, una distancia mucho mayor que la estimación más extremada de los límites de nuestra galaxia. Al mismo tiempo que estudiaba NG 6822, Hubble se ocupaba de galaxias espirales, encontrando —de nuevo con la ayuda de cefeidas— que también ellas se hallaban a distancias superiores a las del tamaño de la Vía Láctea. De esta manera quedaba sentenciado el

antiguo debate sobre la estructura del universo.

Una vez que Hubble hubo determinado la distancia de varias galaxias espirales, fue capaz de demostrar la existencia de una relación extremadamente importante entre la velocidad con que se mueven esas galaxias y su distancia. En este estudio, que comenzó en 1928. Hubble se vio influido en parte por el hecho de que el modelo de universo de de Sitter también predecía un desplazamiento hacia el rojo de la radiación procedente de partículas de prueba (las galaxias simbólicas de esa solución), un efecto que los astrónomos ya habían observado hacía tiempo. En realidad, la relación entre el universo de de Sitter y el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las galaxias era relativamente conocida. En su ampliamente estudiado tratado, *La teoría matemática de la relatividad* (1923), Arthur Eddington escribía:

Uno de los problemas de la cosmogonía que más sorprenden es el de la gran velocidad de las nebulosas espirales. Sus velocidades radiales medias son de 600 kilómetros por segundo, y predominan ampliamente las velocidades de recesión con respecto al sistema solar... La teoría de de Sitter ofrece una doble explicación de este movimiento de recesión.

Lo que hizo Hubble, con la ayuda de Milton Humason, fue lo siguiente: conocía la distancia de cinco galaxias (y una sexta compañera) a partir de cefeidas. Con estas nebulosas calibró la magnitud media de la estrella más brillante en una galaxia, dato que utilizó para determinar la distancia de otras 14 galaxias. Empleó entonces estas 20 para calibrar la magnitud media de una nebulosa, utilizando el resultado para estimar la distancia de otras 4. Con las distancias de 24 de las 46 nebulosas extragalácticas para las que se habían determinado sus velocidades radiales, Hubble pudo demostrar la existencia de una relación lineal entre distancias y velocidades radiales (que conocía midiendo el desplazamiento —un efecto tipo Doppler— de los espectros de la radiación procedente de esas galaxias). El trabajo de Hubble tenía una interpretación directa: cuanto más alejadas se encontraban las galaxias, más rápidamente se alejaban (entre sí): *alejaban* puesto que el desplazamiento observado era hacia el rojo, no hacia el azul. La interpretación más inmediata era que el universo se encontraba en expansión, una conclusión apoyada por los modelos cosmológicos de Friedmann y Lemaitre, que —ahora sí— atrajeron la atención, siendo, se puede decir, redescubiertos.

Y si el universo se expandía, esto también quería decir que debió existir en el pasado (estimado en unos diez mil millones de años) un momento en el que toda la materia hubiese estado concentrada en una pequeña extensión: el «átomo primitivo» de Lemaitre, o, una idea que tuvo más éxito, el «Big bang» (Gran estallido). Nacía así una visión del Universo que nos ha acompañado desde entonces, cada vez con más evidencias (como la radiación de fondo) en su favor.

Pero no avancemos más en el tiempo. Es el momento de retroceder, para describir los descubrimientos y desarrollos que, al mismo tiempo que se establecía la relatividad, se estaban produciendo en el dominio de la estructura de la materia y la radiación; en el mundo del microcosmos.

Átomos y física cuántica

Nuevas radiaciones: Röntgen y los rayos X

Entre los nuevos fenómenos descubiertos a finales del siglo XIX a la sombra del electromagnetismo figuran 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 1 de enero de 1896 ya disponía de separatas, que envió, junto a copias de sus famosas fotografías, en especial la de la mano de su esposa (tomada el 22 de diciembre), a los principales científicos europeos.

En una entrevista que concedió a un periodista. Röntgen dio algunos datos relacionados con su descubrimiento, que merece la pena reproducir:

Desde hace ya bastante tiempo venía interesándome por los rayos catódicos, en la forma en que habían sido estudiados por Hertz y especialmente por Lenard en un tubo de vacío. Con gran interés había seguido sus experimentos, así como los de otros físicos, y me había propuesto realizar yo mismo algunos ensayos al respecto en cuanto tuviera tiempo. A fines del mes de octubre de 1895 lo conseguí. No hacía mucho que había comenzado con mis ensayos, cuando observé algo nuevo.

Trabajaba con un tubo de Hittorf-Crook envuelto completamente en un papel negro. Sobre la mesa, al lado, estaba colocado un pedazo de papel indicador de platinocianuro de bario. Hice pasar a través del tubo una corriente y noté una curiosa línea transversal sobre el papel...

El efecto era tal que, con arreglo a las ideas de entonces, solamente podía resultar de la radiación de la luz. Pero era totalmente imposible que la luz proviniera de la lámpara, puesto que, indudablemente, el papel que la envolvía no dejaba pasar luz alguna, ni siquiera la de una lámpara de arco.

Como se ve, 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.

Por razones que sería largo de explicar, 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 adquiría 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 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 el 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 catódicos fuesen partículas cargadas eléctricamente; en su opinión, eran ondas de algún tipo. Pero en 1895 Jean Perrin mejoró las técnicas de Hertz y demostró que estos rayos depositaban carga eléctrica negativa en un colector de carga introducido en el interior de un tubo de rayos catódicos. Finalmente, fue Joseph John Thomson, director del Laboratorio Cavendish de Cambridge desde 1884, 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 a Thomson, así, en su libro *Electricidad y materia* (1904) escribía:

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. Puesto que pueden obtenerse corpúsculos análogos en todos los conceptos por muy distintos agentes y materiales, y puesto que la masa de los corpúsculos es menor que la de cualquier átomo conocido, se colige que el corpúsculo debe ser un constituyente del átomo de muy dife-

rentes 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.

Un poco después de estos trabajos, en 1989, y utilizando técnicas desarrolladas por un antiguo alumno suyo, C. T. R. Wilson, al estudiar la propiedad que tienen los electrones de condensar sobre ellos gotitas líquidas procedentes de un vacío sobresaturado, Thomson fue capaz de medir por separado la carga del electrón. Obtuvo un valor de $3 \cdot 10^{-10}$ unidades electrostáticas. Recurriendo al valor ya conocido de e/m , dedujo la masa del electrón.

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 interferencia, pero, desgraciadamente, sin éxito, acaso solamente por su débil intensidad...; 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-quadist*?»

A pesar del gran número de físicos y de médicos que trabajaban en, o, simplemente, con rayos X, no se avanzó demasiado en el conocimiento de su naturaleza hasta 1912. La solución vendría de la mano de la difracción de los rayos X.

El 21 de abril de 1912 y en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Munich dirigido por Arnold Sommerfeld, Walter Friedrich y Paul Knipping observaban, siguiendo una propuesta de Max von Laue, la difracción de rayos X por un cristal. La idea de Laue fue la de asociar experimentalmente estructuras cristalinas con rayos X, para clarificar así la naturaleza de ambos. Si los rayos X eran ondas electromagnéticas de longitud de onda pequeña, y si los cristales estaban formados por átomos distribuidos de ma-

nera irregular, entonces, al ser las distancias interatómicas comparables a la de esa longitud de onda, se debían producir interferencias al hacer incidir los rayos sobre el cristal. Midiendo entonces distancias entre máximos y mínimos de intensidad, se podría calcular, como se hacía en la óptica ordinaria, la longitud de onda de los rayos X.

Además de resolver el problema de la estructura de los rayos X, von Laue había dado con una herramienta extremadamente precisa para el estudio de los cristales. Años más tarde, las técnicas de difracción de rayos X serían desarrolladas hasta el extremo de poder ser aplicadas al estudio de la estructura de macromoléculas. Sin duda, el éxito más celebrado en este campo fue la utilización de la difracción de rayos X en el descubrimiento, en 1953, de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN), la molécula de la herencia. Tal hallazgo, auténticamente fundamental, fue debido a James Watson y Francis Crick, quienes trabajaban en el mismo laboratorio Cavendish en el que Thomson había estudiado el electrón (fue tras el fallecimiento de Rutherford, al ser elegido William Lawrence Bragg como nuevo director, cuando las investigaciones de estructuras cristalinas y moleculares se introdujeron en este laboratorio).

De los rayos X a la radioactividad

Como no podía ser menos, las noticias del descubrimiento de los rayos X circularon con cierta rapidez por toda Europa. Así describía en 1911 Arthur Schuster, director del laboratorio de Física de la Universidad de Manchester, la reacción que se dio en su entorno:

Se puede imaginar el interés que suscitó en el mundo científico el descubrimiento y la sensación que creó en todas partes; pocos fueron los laboratorios en los que no se intentó en seguida repetir el experimento... Casi inmediatamente, la posibilidad de aplicaciones prácticas atrajo al público y muy especialmente a la profesión médica. Estaba claro que se tenía un método de gran utilidad para el diagnóstico de fracturas complicadas, o para localizar cuerpos extraños en el cuerpo. Para mí esto tuvo una consecuencia desafortunada. Mi laboratorio se vio inundado por médicos que traían a sus pacientes, de los que se sospechaba que tenían agujas en distintas partes de sus cuerpos, y durante una sema-

na tuve que emplear la mayor parte de tres mañanas en localizar una aguja en el pie de una bailarina de ballet.

En Alemania, el 4 de enero de 1896 Emil Warhurg mostró algunas de las fotografías tomadas por Röntgen en una reunión de la Sociedad de Física de Berlín. El día siguiente, la agencia de noticias Wiener Presse transmitía la historia del descubrimiento, y el 6 la información circulaba por todo el mundo. El corresponsal del *London Daily Chronicle* en Viena, por ejemplo, enviaba a su redacción el siguiente texto: «Los rumores de una alarma de guerra no deben distraer la atención del maravilloso triunfo de la ciencia que acaba de comunicarse en Viena. Se anuncia que el profesor Röntgen de la Universidad de Wurzburg ha descubierto una luz que, al efectuar una fotografía, atraviesa la carne, el vestido y otras sustancias orgánicas.» Hasta el propio Kaiser Guillermo II le solicitó una demostración en la Corte; que Röntgen efectuó el día 13.

En Francia la noticia también apareció pronto en los periódicos. Por su parte, la Académie des Sciences dedicó su reunión del 20 de enero de 1896 a estudiar el tema. Uno de los asistentes a aquella sesión fue Antoine Henri Becquerel, desde 1891 catedrático de física en el Musée d'Histoire Naturelle de París, la misma cátedra que antes que él habían ocupado su padre y su abuelo.

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 comunica-

ción de Becquerel, esta vez con un contenido mucho más sorprendente. El día 26 de febrero se había visto obligado a interrumpir sus experiencias con 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 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, haciéndolos conductores; un hallazgo que permitía medir la «actividad» de una muestra.

El descubrimiento del científico francés no atrajo excesiva atención; los rayos X seguían en la cresta de la ola de la popularidad. Hubo que esperar a los trabajos de Marie y Pierre Curie para que este nuevo fenómeno recibiese la atención que indudablemente merecía.

Cuando Marie, una estudiante polaca que en 1895 había contraído matrimonio con Pierre, profesor de la *École de Physique et de Chimie de París*, decidió, a finales de 1897 (poco después del nacimiento de su primera hija, Irene), intentar conseguir el título de doctor, eligió como tema de su tesis el estudio de los rayos uránicos de Becquerel. Con la ayuda del electrómetro de cuarzo piezoeléctrico desarrollado unos años antes por Pierre junto a su hermano Jacques, pronto encontró que el torio ejercía sobre una placa fotográfica el mismo efecto que el uranio. Asimismo, constató que la radiactividad (nombre que acuñaría para la nueva radiación) de los compuestos de uranio y torio estaba ligada a los átomos de estos metales (la intensidad de la radiación era proporcional a la cantidad de uranio o torio, e independiente del tipo de composición química). El paso siguiente fue examinar la radiactividad de yacimientos naturales. Sorprendentemente, encontró que algunos minerales tenían una radiactividad mucho mayor que lo que su contenido en uranio o torio hacía prever. La explicación que se le ocurrió fue que los materiales que manejaba debían contener algún elemento químico más radiactivo

que el uranio o el torio.

Para comprobar esta hipótesis, Marie y Pierre Curie unieron sus fuerzas; Pierre ocupándose preferentemente de los aspectos físicos (estudio de las propiedades de las radiaciones) y Marie de los químicos (separación y purificación de los elementos radiactivos). El 18 de julio de 1898 anunciaban el descubrimiento del polonio; el 11 de diciembre hacían lo propio con el radio. A partir de aquel momento la radiactividad sería tema obligado de investigación de numerosos laboratorios en diferentes países.

Uno de los investigadores que pasaron a ocuparse de la radiactividad fue un joven neozelandés llamado Ernest Rutherford, que desde septiembre de 1895 trabajaba con una beca en el laboratorio de J. J. Thomson. El tema seleccionado por Rutherford fue el de la estructura de la radiación emitida por las sustancias radiactivas.

Los primeros estudios de Rutherford sobre la ionización producida por los rayos uránicos le llevaron a concluir que «la causa y origen de la radiación emitida continuamente por el uranio y sus sales todavía continúa siendo un misterio. Todos los resultados obtenidos apuntan hacia la conclusión de que el uranio emite tipos de radiación que, en lo que a su efecto sobre gases se refiere, son similares a los rayos Röntgen y a la radiación secundaria emitida por los metales cuando inciden sobre ellos rayos Röntgen». Nótese que el joven neozelandés señalaba que el uranio emitía diversos tipos de radiación.

En sus estudios Becquerel se había dado cuenta de que la radiación descubierta estaba formada por rayos con diferente capacidad de penetración. Rutherford avanzó en el estudio de esos dos tipos de radiación, que denominó α y β . Midiendo el cociente e/m pronto se comprobó que los rayos β eran electrones que se movían a gran velocidad. Averiguar la naturaleza de la radiación α fue un problema mucho más complicado, que Rutherford sólo pudo comenzar a resolver hacia 1903, ayudado por trabajos de Marie Curie, Robert. J. Strun, el futuro cuarto barón Rayleigh, y William Crookes. Visto retrospectivamente, un elemento importante del problema era que al ser los rayos a partículas de una masa mayor que los electrones, era difícil apreciar su curvatura cuando pasaban por campos eléctricos o magnéticos.

En 1904 Rutherford ya consideraba abiertamente la posibilidad de si las partículas α eran o no átomos de helio. No obstante, hasta 1908 no estuvo lo suficientemente seguro como para escribir: «como una partícula α es un átomo de helio».

Si se observa con cuidado, Rutherford empleaba la expresión «átomos de helio» para lo que hoy sabemos son «núcleos del átomo de helio». No es sorprendente este «error», toda vez que la estructura atómica de la materia constituía un problema abierto. Sería el mismo Rutherford quien daría el paso fundamental en esta dirección, utilizando, precisamente, las partículas α y β como instrumento de análisis.

Modelos atómicos: Thomson, Rutherford y Bhor

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 *Un tratado del movimiento de los anillos vorticiales*, 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, durante una buena parte de la primera década del nuevo siglo, Thomson se convirtió en el principal defensor de un modelo que incorporaba ideas desarrolladas en 1878 por A. M. Mayer, pero introduciendo el electrón. En su libro *Electricidad y materia*, Thomson se refirió a este modelo señalando que en él los electrones (todavía «corpúsculos» en su terminología) se encontraban en «una esfera de electrificación uniforme positiva que produce una fuerza atractiva radial en cada corpúsculo proporcional a su distancia al centro de la esfera». El átomo de hidrógeno lo representaba mediante una esfera cargada positivamente, de radio unos 10^{-8} cm. con un electrón oscilando en el centro. A partir de allí la

situación se complicaba, ya que había que disponer los electrones en la esfera correspondiente de manera que estuviesen en equilibrio bajo la atracción que suponía su interacción con la carga positiva de la esfera, en la que se encontraban sumergidos, y la repulsión producida por otros electrones con el mismo signo de carga, teniendo en cuenta, naturalmente, el movimiento de los propios electrones. En el caso de que fueran sólo dos los electrones el problema era de fácil solución y Thomson daba la distancia a que se encontraban. Con tres electrones existiría equilibrio cuando estuviesen situados en los vértices de un triángulo equilátero, mientras que con cuatro sería un tetraedro regular con su centro en el de la esfera. El problema se hacía realmente difícil cuando crecía el número de electrones:

Un cálculo matemático demuestra que, a menos de que el número de corpúsculos sea muy pequeño, siete u ocho a lo más, esta disposición es inestable y no puede persistir nunca. Cuando el número de corpúsculos es más grande que este límite, los corpúsculos se rompen en dos grupos. Un grupo que contiene el menor número de corpúsculos está en la superficie de un pequeño cuerpo concéntrico con la esfera; los restantes están en la superficie de un cuerpo concéntrico mayor. Cuando el número de corpúsculos crece se obtiene un estado donde el equilibrio no puede ser estable aun con dos grupos, y los corpúsculos se dividen en tres grupos, dispuestos en las superficies de hojas concéntricas; y a medida que crece el número se pasa por estados en que más grupos son necesarios para el equilibrio. Con cualquier número considerable de corpúsculos, el problema de hallar la distribución de equilibrio es demasiado complejo para el cálculo; y debemos recurrir a la experimentación y ver si podemos hacer un modelo en que las fuerzas que producen el equilibrio son análogas a las que hemos supuesto existen en los electrones.

En este punto Thomson recurría a los experimentos con imanes de Mayer, pero para lo que pretendo ya es más que suficiente puesto que lo que me interesaba era que se apreciase que los esfuerzos del director del laboratorio Cavendish se basaban completamente en la física del siglo XIX, en la que ahora denominamos «física clásica». Pretendían, por supuesto, poner en relación estos átomos con fenómenos como la radiactividad, las propiedades periódicas de los elementos químicos, o las líneas espectrales observadas, pero en base únicamente a la teoría física tradicional, y tenían la virtud

—desde el punto de vista de lo que había de venir— de introducir «capas» electrónicas en los átomos. La solución al problema de la constitución y estabilidad de la materia vendría, no obstante, por otro camino y en él, como indiqué antes, Rutherford, el antiguo estudiante de Thomson, desempeñaría de nuevo un papel importante.

El modelo atómico de Rutherford

Hemos visto que en el curso de sus investigaciones Rutherford se había familiarizado con las partículas α y β . No es de extrañar, por consiguiente, que pensase que podría utilizarlas como herramienta de análisis atómico. En 1909 dos investigadores de su laboratorio de Manchester, Hans Geiger y Ernest Marsden, lanzaban partículas α contra placas delgadas de diversos metales. Para sorpresa de todos, encontraban que «la dirección de una pequeña fracción [una de entre 8.000] de las partículas α que llegan a una placa metálica es modificada de tal manera que vuelve a aparecer de nuevo en el lugar de partida». A Rutherford le pareció que para que una partícula a cambiase su trayectoria en un ángulo de 90 grados o más hacían falta campos eléctricos mucho más intensos de los que podían suministrar los modelos que Thomson manejaba, y en abril de 1911 consiguió desarrollar una teoría que explicaba las grandes al igual que las pequeñas desviaciones observadas. El modelo atómico que utilizó consistía de un núcleo central (una esfera de menos de $3 \cdot 10^{-12}$ cm de radio) que podía estar cargada positiva o negativamente, rodeado de «una estera de electrificación», de unos 10^{-8} cm de radio, con la misma carga pero signo opuesto que el núcleo. En realidad este modelo ya había sido propuesto antes, en 1904, por el físico de la Universidad de Tokio Hantaro Nagaoka, pero con pretensiones diferentes (el propio Rutherford lo reconocía en su artículo). Nagaoka, en efecto, pretendía explicar los espectros observados, así como el fenómeno de la radiactividad, mientras que la problemática y base experimental de que partía Rutherford era muy diferente.

El modelo atómico de Rutherford tenía grandes atractivos, pero también grandes inconvenientes. Si se pensaba en él como una especie de mini-sistema planetario gobernado por fuerzas electromagnéticas, entonces existía un problema obvio: los electrones que orbitaban en torno al núcleo estarían acele-

rados (su movimiento era circular), y por tanto deberían emitir radiación, lo que implicaba que perderían energía. Esto produciría que se fueran acercando al núcleo, al que terminarían cayendo irremediabilmente. En otras palabras, este modelo atómico carecía de estabilidad.

Era preciso, por consiguiente, encontrar otro modelo atómico, un modelo que incorporase, no obstante, aquellos rasgos que habían servido a Rutherford para explicar la difusión con partículas α y β . La solución no tardó en llegar, de la mano de un joven físico de Copenhague, Niels Bhor. Ahora bien, Bohr añadió al átomo de Rutherford elementos ajenos a la física clásica. Cuantizó las órbitas posibles de los electrones, siguiendo el espíritu, aunque no la letra, de otras dos cuantizaciones que habían aparecido en la física en 1900 y 1905, de la mano, respectivamente, de Max Planck y Albert Einstein. Es necesario, por consiguiente, que nos ocupemos de estas cuantizaciones antes de pasar al modelo atómico de Bohr.

Max Planck y la primera discontinuidad cuántica

La historia de la teoría cuántica está unida indisolublemente a la introducción de los cuantos de energía, llevada a cabo en 1900 por Max Planck, catedrático de la Universidad de Berlín. Como veremos inmediatamente, la aparición de elementos discretos de energía en la física teórica vino asociada al descubrimiento de una nueva ley para la distribución de la densidad de energía de radiación de un cuerpo negro (radiación que está en equilibrio con la materia y que por tanto absorbe y emite la misma cantidad de energía para cualquier longitud de onda), ley que también propuso Planck. Ahora bien, ¿cómo es que un físico como Planck, formado en el estudio de los escritos de Clausius, y cuyo programa de investigación se centraba en los principios de la termodinámica, y más concretamente en el segundo, el del crecimiento de la entropía, terminó asociando su nombre a un problema como el de la ley de distribución de la energía de un cuerpo negro? La respuesta a esta pregunta no es difícil: Planck no dudaba en absoluto de la universalidad del crecimiento de la entropía total, pero quería, no obstante, relacionar esta irreversibilidad con otras leyes también fundamentales. En concreto quería desarrollar una teoría microscópica basada en la termodinámica y el electromagnetismo, esperando obtener el principio de irreversibilidad como parte

de esa teoría. Y el problema de la radiación del cuerpo negro se prestaba de manera magnífica para semejante propósito. En primer lugar, lo que se tiene en este caso es un proceso de interacción entre ondas electromagnéticas y materia (la cavidad que aloja a las ondas). En segundo lugar, Planck tenía a su disposición el resultado obtenido en 1859 por Gustav Robert Kirchhoff, que asegura que la distribución de radiación en equilibrio es independiente del sistema con el que interacciona la radiación. Era obvio, por su sencillez, considerar entonces a la cavidad del cuerpo negro como formada por una colección de osciladores armónicos cargados.

El problema se planteaba, por consiguiente, en términos del estudio de la interacción entre ondas electromagnéticas y osciladores, para tratar de entender así, mediante procesos de difusión, cómo se obtiene el estado de equilibrio para la radiación del cuerpo negro. Planck esperaba que la simetría temporal de partida en las interacciones electromagnéticas desapareciese a lo largo del proceso, generando de esta manera la irreversibilidad contenida en el segundo principio, que quedaría así «explicado» al estudiar la termodinámica (la entropía, por ejemplo) de la radiación.

Que Planck no fuese capaz de desarrollar este programa, aunque en algún momento creyese que lo había conseguido, es algo que no nos interesa demasiado. Lo importante es señalar que sus investigaciones le prepararon para cuando, en octubre de 1900, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum, colegas de Planck en Berlín, llevaron a cabo en el *Physikalisch Technische Reichsanstalt*, el laboratorio nacional alemán, experimentos con los que demostraban que para longitudes de onda grandes la hasta entonces aceptada —aunque con reparos— ley de Wien no era correcta. Planck reaccionó entonces inmediatamente generalizando heurísticamente lo que hasta entonces había hecho. La modificación que introdujo en sus desarrollos le llevó a una nueva ley de distribución de la radiación del cuerpo negro, ley que presentó en la reunión de la Sociedad de Física Alemana que se celebró en Berlín el 19 de octubre de 1900. El día siguiente Rubens le informaba que sus cálculos demostraban que la nueva fórmula se ajustaba perfectamente a los resultados experimentales. Casi inesperadamente, como por sorpresa, Planck se encontró con que disponía de una aparentemente correcta ley de distribución para la radiación del cuerpo negro, cuya explicación teórica, sin embargo, ignoraba.

Naturalmente, Planck se dedicó inmediatamente a la tarea de explicar teóricamente esa ley, lográndolo poco después, en diciembre. Más de treinta años después, en una carta que escribió el 7 de octubre de 1931 al físico estadounidense Robert Williams Wood, recordaba que

Resumido brevemente, se puede describir lo que hice como un acto de desesperación. Por naturaleza soy pacífico y rechazo toda aventura dudosa. Pero por entonces había estado luchando sin éxito durante seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que este problema tenía una importancia fundamental para la física; también conocía la fórmula que expresa la distribución de la energía en los espectros normales. Por consiguiente, había que encontrar, costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que a partir de un cierto momento toda la energía será transferida de la materia a la radiación. Para evitar esto se necesita una nueva constante que asegure que la energía se desintegre. Pero la única manera de averiguar cómo se puede hacer esto es partiendo de un punto de vista definido. En mi caso, el punto de partida fue el mantener las dos leyes de la termodinámica. Hay que conservar, me parece, estas dos leyes bajo cualquier circunstancia. Por lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante un equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio entre la materia y la radiación, se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación, suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Esta fue una suposición puramente formal y en realidad no pensé mucho en ella.

El «acto de desesperación» al que se refería Planck fue, en efecto, adoptar la formulación estadística de la entropía propuesta por Ludwig Boltzmann en 1877. Para este físico austríaco la entropía de un sistema venía dada por la expresión $S = k \cdot \ln(W)$, donde k es una constante (introducida precisamente por Planck posteriormente y denominada «constante de Boltzmann») y W la probabilidad de que tenga lugar el estado en cuestión. Doblearse ante semejante planteamiento, aceptar que el crecimiento de la entropía estaba asociado con probabilidades y que, por consiguiente, no era tan universal como él pensaba, debió ser doloroso para un físico del talante de Planck, dolor

sólo mitigado haciendo de este paso una «suposición meramente formal».

El hecho, en cualquier caso, es que combinando su ley de radiación con los procedimientos estadísticos de Boltzmann, Planck se vio conducido a que los osciladores cargados que suponía formaban la cavidad que contenía la radiación de cuerpo negro, intercambiaban energía con la radiación de manera discontinua, a saltos. La expresión matemática para ese intercambio es la ya célebre fórmula de Planck:

$$\text{Energía} = \text{constante} \cdot \text{frecuencia}$$

La «constante» en cuestión vino a denominarse «constante de Planck», siendo representada por la letra h . Si hay algo que caracteriza a la teoría cuántica es esta constante.

Albert Einstein y la segunda discontinuidad cuántica

A pesar de que la naturaleza de sus contribuciones más populares (las dos teorías de la relatividad) tienda a ocultarlo, Einstein fue un auténtico maestro de la termodinámica y la física estadística. Junto con Boltzmann y Gibbs forma el gran triunvirato de finales del siglo XIX y comienzos del XX en este campo. Y fue precisamente gracias a su maestría en dichas disciplinas como Einstein introdujo, en un artículo publicado en 1905 en *Annalen der Physik* y titulado «*Un punto de vista heurístico acerca de la creación y transformación de la luz*», «la segunda», la más radical, «discontinuidad cuántica», la de la radiación. (Planck sólo había introducido la discontinuidad en el intercambio de energía entre osciladores y radiación; esta última podía continuar estando descrita por las ondas continuas del electromagnetismo.)

En la introducción de su trabajo, Einstein señalaba que «las observaciones asociadas con la radiación del cuerpo negro, fluorescencia, producción de rayos catódicos mediante luz ultravioleta y otros fenómenos relacionados, todos ellos conectados con la emisión o transformación de la luz, se entienden más fácilmente si uno supone que la energía de la luz está distribuida espacialmente de forma discontinua». Para llegar a esta conclusión, Einstein

obtenía en primer lugar, a partir de consideraciones termodinámicas muy generales y utilizando la ley de Wien (esto es, suponiendo radiación de baja densidad), la expresión que da la variación de entropía de una radiación monocromática de energía fija, cuando se pasa de un volumen V_0 a V . Una vez conseguido esto, señalaba que se obtiene el mismo resultado cuando se calcula, utilizando la ley de Boltzmann, la variación de entropía que experimenta un gas ideal (colección de N partículas) cuando éste pasa de un volumen V_0 a V . La conclusión era inevitable, aunque pocos se hubieran atrevido a sugerirla: la entropía de la radiación monocromática depende del volumen «como si la radiación fuese un medio discontinuo consistente de cuantos de energía independientes». Resultado que sugirió a Einstein la idea heurística de dar «el paso obvio» de investigar «si las leyes de la emisión y transformación de la luz son también de tal naturaleza que se pueden interpretar o explicar suponiendo que la luz está formada por tales cuantos de energía». Fue entonces, sólo entonces, cuando Einstein analizó el efecto fotoeléctrico. Así nació la «segunda discontinuidad cuántica», la de la estructura de la radiación.

Un problema evidente del trabajo de Einstein residía en el hecho de que se utilizaba la ley de Wien, válida únicamente en un caso límite. Pero la dificultad más importante derivaba de la propia radicalidad de la hipótesis, que contradecía las ideas aceptadas sobre la estructura de la radiación (no se dudaba que ésta estaba formada por ondas —continuas— electromagnéticas). Para que nos hagamos una idea de las actitudes que generaba la hipótesis de los cuantos de luz einstenianos hasta citar la siguientes palabras de Robert Millikan (1949):

Me pasé diez años de mi vida comprobando la ecuación de Einstein de 1905 [la del efecto fotoeléctrico], y contrariamente a todas mis expectativas me vi obligado en 1915 a proclamar su indudable verificación experimental, a pesar de lo irrazonable que era, ya que parecía violar todo lo que sabíamos acerca de la interferencia de la luz.

El modelo atómico de Bohr

En 1903 un joven danés, Niels Henrik David Bohr, comenzaba a estudiar física en la Universidad de su ciudad natal, Copenhague. Ocho años más

tarde obtenía el grado de doctor. La investigación que le permitió obtener este título académico significó de hecho el primer paso de un proceso que en poco más de dos años le llevaría a ampliar sustancialmente las perspectivas de la discontinuidad cuántica.

La tesis doctoral de Bohr estuvo dedicada a la teoría electrónica de los metales. Esta teoría, que en esencia representaba al estado metálico como un gas de electrones que se mueven más o menos libremente en el potencial creado por átomos cargados positivamente situados en una estructura regular, se remontaba a trabajos de W. Weber (1875) y E. Riecke (1898), aunque fue Paul Drude quien más había trabajado en el tema (en 1900). El mayor triunfo de Drude había sido deducir —utilizando entre otros recursos la teoría cinética de los gases— la ley (empírica) de Wiedemann-Franz para el cociente entre las conductividades eléctrica y térmica de los metales. Drude había supuesto que en los metales, que eran globalmente neutros, se movía un gas de partículas con cargas negativa sobre un fondo uniforme positivo; cinco años más tarde Hendrik A. Lorentz refinaba ese modelo suponiendo que las partículas negativas eran electrones, los mismos para todos los metales.

A pesar de sus éxitos, la teoría de Drude-Lorentz era, obviamente, muy limitada; no se podían, por ejemplo, determinar por separado las conductividades eléctricas y térmicas, ni explicar el por qué los electrones, aunque participando en el movimiento térmico, parecían no contribuir a los calores específicos medidos; esto es, no se podía comprender algo tan básico como las propiedades eléctricas y térmicas de los metales.

Para clarificar la naturaleza de las dificultades de la teoría, Bohr desarrolló en sus tesis métodos generales que le permitían deducir directamente los rasgos principales de los fenómenos a partir de supuestos básicos. De esta manera pudo entender el porqué de los fracasos de la teoría: la insuficiencia de los propios principios clásicos. Se puede decir que el rigor de su análisis condujo a Bohr, cuando apenas comenzaba su carrera científica, a la firme convicción de que era necesario modificar radicalmente la electrodinámica clásica si se querían describir los fenómenos atómicos.

Teniendo en cuenta la naturaleza de sus intereses científicos, no nos debe extrañar que finalizada su tesis doctoral el joven Niels se trasladase, a

comienzos de octubre de 1911, al laboratorio Cavendish de Cambridge, en donde se encontraba J. J. Thomson, no sólo el descubridor del electrón, sino también —como hemos visto— uno de los principales «buscadores» de modelos atómicos. La elección no resultó especialmente afortunada, ya que Bohr, con su mal inglés y la tesis redactada en danés, no logró atraer la atención de Thomson. No obstante, los meses que pasó en Cambridge le sirvieron para entrar en contacto con la problemática de los modelos atómicos.

En la primavera de 1912 Bohr se trasladó a Manchester para formar parte del grupo de Rutherford, junto a físicos y químicos del calibre del H. Geiger, E. Marsden, E. J. Evans, A. S. Russell, K. Fajans, H. G. J. Moseley, G. Hevesy, J. Chadwick y C. G. Darwin. En esta Ocasión la elección no pudo ser más satisfactoria. Tras el artículo de 1911 de Rutherford con el modelo planetario, era el momento apropiado para intentar ir más allá en la explicación de la estructura de la materia.

«El objeto principal de las discusiones del grupo de Manchester era las consecuencias inmediatas del descubrimiento del núcleo atómico», escribía Bohr pocos años antes de morir. Pues bien, a este proyecto se unió, con una rapidez inusitada, el físico danés. En concreto, lo que hizo fue proponer una teoría de la constitución de los átomos y moléculas.

Naturalmente, es imposible pretender reconstruir aquí de manera completa la contribución de Bohr. Me limitaré, por consiguiente, a señalar algunos puntos particularmente importantes.

- 1.- Bohr se dio cuenta de que para construir un modelo atómico satisfactorio tenía que incluir de alguna manera el cuanto de energía de Planck-Einstein. En el artículo en el que presentó sus ideas escribió: «Cualquiera que sea la modificación en las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir en las leyes en cuestión una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esto es, la constante de Planck.» Para llegar a semejante conclusión, sin duda que los resultados de sus tesis le ayudarían, pero hay que tener en cuenta que esta idea era ya algo que algunos físicos aceptaban. John William Nicholson, por ejemplo, propuso en 1911-1912 un modelo de átomo de Rutherford, que pretendía explicar los espectros de la luz procedente de objetos astronómicos, en el que h desempeñaba

un cierto papel (Nicholson imponía la cuantificación, $h/2c$ del momento angular). Bohr conocía este modelo, aunque sus intenciones diferían sustancialmente de las de Nicholson.

En efecto, lo que Bohr pretendía en principio era describir los átomos en su estado de menor energía posible, mientras que, al estar interesado en los espectros procedentes de estrellas, Nicholson se veía forzado a considerar átomos excitados (átomos «continuamente rompiéndose y volviéndose a formar», escribía Bohr a Rutherford en una carta el 31 de enero de 1913). Todo esto quiere decir también que su motivación venía más de la química de los elementos que de la espectroscopía. Sin embargo, sería en esta última en donde su modelo se mostraría más fructífero inicialmente.

- 2.- El siguiente paso fue crucial. En él Bohr consideró que el átomo de hidrógeno está formado por un núcleo de carga e , en torno al cual gira, siguiendo una órbita circular y a una distancia r (a determinar), un electrón ($-e$). Combinando la mecánica clásica con la electrostática, e introduciendo una expresión que cuantizaba (esto es, permitía sólo ciertos valores, múltiplos de h) el momento angular de las órbitas electrónicas, Bohr obtenía, entre otras expresiones, una fórmula que daba r en función de $A \cdot h$ donde A era un número entero. Por consiguiente, el radio de las órbitas no podía disminuir (ni aumentar) gradualmente, sino de manera discontinua, cuántica. Se había eliminado, por tanto, la dificultad antes aludida de la inestabilidad electromagnética del átomo de Rutherford.
- 3.- Uno de los principales logros del modelo atómico de Bohr fue su capacidad de explicar las relaciones matemáticas correspondientes a diferentes grupos de líneas espectrales, descubiertas más o menos jugando con números por Johann Jacob Bahner y Johannes Robert Rydberg, relaciones que la física anterior a Bohr se había mostrado incapaz de explicar.

Fue en febrero de 1913 cuando el físico danés descubrió la última pieza de su rompecabezas, una pieza que le haría pasar de considerar estados fundamentales a tratar estados excitados; una pieza, en suma, que insertaría los cuantos de luz einstenianos en la misma raíz de la materia, en los átomos. El

elemento en cuestión fue una fórmula que había sido propuesta en 1885 por Balmer, un maestro de escuela suizo, y que daba cuenta de las regularidades observadas en la distribución de las líneas espectrales de la luz emitida por el hidrógeno. «En cuanto vi la fórmula de Balmer, todo se me hizo claro», diría más tarde el propio Bohr. Y esta especie de revelación repentina se puede comprender (en parte) sin más que comparar las expresiones que había obtenido previamente con la fórmula de Balmer. Lo que hizo Bohr fue calcular la energía que pierde un átomo cuando un electrón pasa de una órbita superior, a otra inferior, y a continuación suponer que esta energía es emitida bajo la forma de un cuanto de radiación, con lo cual viene descrita por la fórmula de Planck. Igualando ambas expresiones, la de la variación de la energía y la de Planck, se obtiene una expresión que da frecuencias en función de parejas de números (los asociados a cada una de las órbitas). En consecuencia, saltos entre diferentes órbitas producen diferentes frecuencias (esto es, líneas espectrales). La espectroscopía se reducía a la física atómica.

La mecánica cuántica

Aunque el propósito de Bohr era proporcionar una teoría general de la constitución de todos los átomos y moléculas, en la práctica su formulación solamente explicaba el átomo de hidrógeno. Todos sus intentos de ir más allá fracasaron; ni siquiera pudo extender su teoría al espectro del helio, con sus dos electrones. Transcurriría una docena de años antes de que se encontrase esa teoría. Entre todos los episodios de la historia de la ciencia en los que la gestación de una teoría aparece como un proceso largo y doloroso, el de la génesis de la teoría del movimiento de los objetos microscópicos, de la mecánica cuántica como se terminó denominando, destaca como el más trabajoso. Durante esa docena de años se sucedieron descubrimientos experimentales de todo tipo y desarrollos teóricos no menos numerosos o chocantes. Los experimentos de James Franck y Gustav Hertz (1914) y Otto Stern y Walter Gerlach (1922), que demostraban, respectivamente, la existencia de los estados estacionarios postulados por Bohr y la cuantización espacial; la generalización de Sommerfeld del modelo atómico de Bohr, empleando recursos procedentes de la relatividad especial (1916); la introducción de las probabilidades en la dinámica cuántica por Einstein

(1916-17); la formulación del principio de correspondencia a cargo de Bohr (1918); las fórmulas semiempíricas de Alfred Landé para explicar el efecto Zeeman anómalo (1921); los multipletes descubiertos en Londres por Miguel Catalán (1922) y «explicados» introduciendo un nuevo número cuántico por Sommerfeld (1922); el experimento de Arthur Holly Compton (1923) que reafirmaba los aspectos corpusculares de la luz que Einstein había puesto en evidencia en 1905; la dualidad onda-corpúsculo de Louis de Broglie (1923-24); la estadística desarrollada por S. N. Bose y Einstein (1924), o el principio de exclusión de Wolfgang Pauli (1925). Estos avances culminaron en la formulación, en 1925, de una mecánica cuántica por un joven estudiante de Sommerfeld de 24 años, Werner Heisenberg.

La mecánica matricial

Veamos cómo, muchos años después de realizar su descubrimiento, explicó el propio Heisenberg los pasos que le llevaron al umbral de la nueva mecánica cuántica:

En el semestre de invierno de 1924-25 había vuelto a trabajar en Copenhague y, junto a Kramers, a seguir desarrollando la teoría de la dispersión. En relación con esto habían aparecido en las fórmulas del efecto Raman ciertas expresiones matemáticas que en la teoría clásica eran productos de la serie de Fourier, mientras que en la teoría cuántica había que sustituirlas evidentemente por análogos productos de series que tenían que ver con las amplitudes teórico-cuánticas de las líneas de emisión y absorción... Tras regresar a Gotinga en el semestre de verano de 1925, una de las primeras discusiones con Born nos llevó a la conclusión de que yo debería intentar adivinar las amplitudes e intensidades correctas del hidrógeno a partir de las correspondientes fórmulas (según el principio de correspondencia) de la teoría clásica... Pero al profundizar resultó que el problema era demasiado complicado, al menos para mis habilidades matemáticas, por lo cual busqué sistemas mecánicos más sencillos en los que dicho método prometiese más éxito. Al mismo tiempo tenía la sensación de que debía renunciar a cualquier descripción de las órbitas electrónicas, de que incluso debía reprimir conscientemente tal idea. Quería fiarlo todo a las reglas semiempíricas para la multiplicación de series de amplitudes, cuya validez se había probado en las teorías de la dispersión.

A finales de mayo y en la isla de Helgoland, a la que se había trasladado para evitar la fiebre de heno que padecía, Heisenberg pudo aplicarse más a fondo a sus investigaciones. Estudiando el oscilador no armónico unidimensional, sustituyó la coordenada posición por una tabla de amplitudes que debía corresponder a la serie de Fourier clásica, y llegó a la ecuación de movimiento del sistema; había, en otras palabras, desarrollado un cálculo para las amplitudes de transición entre diferentes niveles energéticos. Le sorprendió encontrar que en las multiplicaciones de amplitudes que debía realizar $A \times B$ no fuese igual a $B \times A$; sólo tiempo después se enteró por Max Born, catedrático y director del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Gotinga desde 1921, de que lo que había estado haciendo, sin saberlo, era manejar y multiplicar matrices (conjuntos ordenados de números: las diferentes amplitudes de transición entre niveles). Hubo, naturalmente, que cumplir más requisitos para ver si el formalismo que había desarrollado podía aspirar a ser una mecánica cuántica, pero al final todos se verificaban. Para Heisenberg, «cabía la esperanza de haber encontrado la base de una mecánica cuántica». Cuando Born leyó el correspondiente manuscrito quedó «fascinado». El artículo fue, por consiguiente, enviado para su publicación.

La mecánica cuántica matricial contenida en aquel primer artículo estaba todavía por desarrollar y formalizar. Tal tarea, en la que las habilidades matemáticas de Born, formado con David Hilbert y Félix Klein, fueron de gran ayuda, las realizó Heisenberg en colaboración con el propio Born y Pascual Jordan. El principal producto de aquella colaboración fue un artículo denominado posteriormente el de los «tres hombres», en el que la mecánica matricial tomó su forma más acabada. (También hay que tener en cuenta que faltaban todavía elementos importantes de la física cuántica, como el número cuántico denominado espín, una especie de momento angular interno introducido para el electrón en octubre de 1925 por dos jóvenes físicos holandeses, George E. Uhlenbeck y Samuel A. Goudmiste.)

La formulación de Heisenberg-Born-Jordan, altamente matemática y abstracta (recordemos que la imagen física de órbitas no figuraba entre los constructos de la teoría), no suscitó simpatías entre algunos físicos alemanes, especialmente entre los de Berlín que, con «admiración y desconfianza a la vez, observaban el desarrollo de la mecánica cuántica». Esta postura de los

«caballeros del continuo», como Heisenberg los llamaba con cierta picardía en sus cartas a Pauli, se debía al carácter excesivamente abstracto de la teoría, que se había formulado prescindiendo de todo tipo de modelo para la descripción de los procesos atómicos. A Einstein, el representante más prominente de los físicos de la capital alemana, el formalismo matricial de Heisenberg le parecía un «alfabeto mágico muy ingenioso, protegido por su complejidad contra cualquier intento de falsación». Más repelente aún les parecía a estos físicos la forma como el británico Paul Dirac, que desarrolló su propia versión de la teoría cuántica, solía presentar sus resultados. Einstein la comparaba con «un balanceo sobre un sendero vertiginoso entre ingenio y locura; nada de lo cual puede cogerse con las manos». De tono parecido eran los juicios emitidos por Laue cuando se quejaba del «monstruoso tratamiento» que Pauli había dado al problema del átomo de hidrógeno utilizando el método matricial de Heisenberg.

Estas dificultades de tipo matemático aumentaron cuando se descubrió —gracias a Eugene Wigner especialmente— que la teoría de grupos resultaba ser particularmente útil para la nueva mecánica cuántica. La publicación en 1928 del libro que Hermann Weyl dedicó a estos temas, *Teoría de grupos y mecánica cuántica*, suscitó el siguiente comentario de Schrödinger:

Queridos matemáticos: Todos sabemos cuán útiles pueden ser para nosotros sus puntos de vista. Pero deben intentar presentarnos estas herramientas en una forma más fácil, no relacionada con conceptos demasiado nuevos. Solamente podremos obtener una comprensión completa con la ayuda de ideas sencillas que puedan entenderse de un vistazo.

Ante los sentimientos de repulsa y frustración que los trabajos de los físicos «matriciales», Heisenberg y Pauli, en especial, suscitaban entre los famosos físicos berlineses, se puede comprender el alivio que éstos —y otros— experimentaron cuando Erwin Schrödinger presentaba, menos de medio año después del descubrimiento del formalismo matricial, una mecánica ondulatoria que prometía un retorno a la más familiar física del campo, entendiendo por tal, como señalaba Hans Thirring en un artículo publicado en 1928, «la esencia de todas aquellas teorías que describen los fenómenos físicos en for-

ma causal mediante ecuaciones en derivadas parciales en el espacio y en el tiempo».

La mecánica ondulatoria

El 29 de noviembre de 1924 Louis de Broglie presentaba su tesis doctoral, titulada *Investigaciones sobre la teoría de los cuantos* en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París. En ella se introducía firmemente la famosa dualidad onda-corpúsculo que ya había atisbado Einstein en 1909.

Una manera de entender el resultado de de Broglie era que había obtenido la mecánica (ondulatoria, en tanto que asociaba ondas al movimiento de partículas) de electrones libres, que no interactuaban. Se podía pensar que, siguiendo por el camino que había abierto, se llegaría a obtener una mecánica cuántica —ondulatoria de nuevo— general. Entre los que creyeron en el enfoque del físico francés se encontraba Erwin Schrödinger, un austriaco que ocupaba una cátedra en Zurich desde 1921. En una serie memorable de artículos publicados en 1926, Schrödinger desarrolló esa mecánica cuántica ondulatoria. Un rasgo que distinguía de entrada a la mecánica de Schrödinger de la de Heisenberg era su significado físico; al contrario que la mecánica matricial, la ondulatoria se podía visualizar. Y en cuanto a aparato matemático, lejos del entonces poco conocido cálculo matricial, las ecuaciones de Schrödinger eran las familiares ecuaciones en derivadas parciales, que tan bien recogía el recién publicado (1924) libro de Richard Courant y David Hilbert *Métodos de física matemática*.

La idea física que subyacía inicialmente en los trabajos de Schrödinger fue resumida adecuadamente por Lorentz en una carta que dirigió al físico austriaco el 27 de mayo de 1926:

Su conjetura de que la transformación que tendrá que experimentar nuestra dinámica será similar a la transición de la óptica de rayos a la óptica ondulatoria suena muy tentadora, pero tengo algunas dudas acerca de ella. Si le he entendido correctamente, entonces una «partícula», un electrón por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas que se mueve con la velocidad de grupo.

Aquellos a los que repugnaba renunciar a la máxima clásica «*natura non*

facit saltus», los «caballeros del continuo» mencionados antes, recibieron con entusiasmo las contribuciones e ideas de Schrödinger. Einstein estaba convencido de que había «realizado un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, de la misma manera que estoy convencido de que el camino abierto por Heisenberg-Born es erróneo»; Planck leyó sus artículos de 1926 «igual que un niño curioso escucha en suspense la solución de un rompecabezas que le ha preocupado durante mucho tiempo, y también estoy encantado con las bellezas que son evidentes a la vista»; y Lorentz señalaba que si «tuviese que escoger ahora entre su mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, daría preferencia a la primera, debido a su mayor claridad intuitiva».

Pronto, sin embargo, se descubrió que la interpretación de Schrödinger no se podía mantener (uno de los problemas, señalado por Lorentz, era la dispersión de los paquetes de ondas, que hacía casi imposible el sostener la interpretación de las partículas —electrones— como ondas en un sistema de más de una partícula). Los problemas con la interpretación física de Schrödinger de la mecánica ondulatoria no significaban, sin embargo, que el formalismo de la teoría fuese incorrecto, solamente que había que descartar esa interpretación particular. Esto fue confirmado por el descubrimiento, debido al propio Schrödinger, de la «identidad matemática, formal» de la mecánica ondulatoria (que resaltaba lo continuo) y la mecánica matricial (que destacaba lo discontinuo).

Al principio, los partidarios de la mecánica matricial no recibieron con agrado la idea de que la mecánica ondulatoria representaba, en el fondo, la misma realidad física que la matricial. Heisenberg, en particular, fue muy reacio a aceptar la nueva formulación. Sin embargo, la teoría de Schrödinger terminaría imponiéndose con bastante rapidez, debido a ser mucho más fácilmente manejable. Y los antiguos proponentes del esquema alternativo terminarían también, no sólo «pasándose al bando contrario», sino contribuyendo a configurar su interpretación física, una interpretación que sería muy diferente a la que Schrödinger y los caballeros del continuo habían deseado.

La interpretación probabilista realizada por Born de la función de ondas, Φ (el objeto que describía los entes cuánticos) consideraba a $|\Phi|^2$ como una medida de la densidad de probabilidad de que el sistema se encuentre

en el estado representado por Φ . Heisenberg demostró en 1927 sus célebres relaciones de incertidumbre, que afirman que magnitudes canónicamente conjugadas (como la posición y el momento, o la energía y el tiempo) sólo se pueden determinar simultáneamente con una indeterminación característica (la constante de Planck): $\Delta q \cdot \Delta p \geq h$. A partir de este resultado, al final de su artículo, Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance: «No hemos supuesto que la teoría cuántica es, al contrario de la física clásica, una teoría esencialmente estadística en el sentido de que sólo se pueden inferir conclusiones estadísticas de datos exactos. Ya que tal suposición se ve refutada, por ejemplo, por los conocidos experimentos de Geiger y Bothe. Sin embargo, en la formulación fuerte de la ley causal “Si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro”, no es la conclusión, sino más bien la premisa la que es falsa. No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles.» Y Heisenberg concluía: «En vista de la íntima relación entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción, se puede sugerir que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo “real” regido por la causalidad. Tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. Ya que la física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones.»

Con tales elementos —rechazados firmemente por físicos como Einstein o Planck— Bohr elaboraría la denominada «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica, cuya discusión, aunque enormemente interesante, nos llevaría desgraciadamente demasiado lejos. Baste decir que esta interpretación defiende que en la teoría atómica tenemos que considerar al observador como especialmente importante, porque la propia teoría toma su carácter peculiar en gran medida de la interferencia del observador (y sus «útiles de medida») con el objeto físico que se investiga. El que el resultado de la observación dependa de la elección de la preparación del experimento (de la situación experimental) entra en conflicto, evidentemente, con el punto de vista de que el universo «está ahí», independientemente de todos los actos de observación.

Explorando el mundo cuántico

La formulación de la mecánica matricial y de la mecánica ondulatoria constituyó un paso importantísimo en el conocimiento del mundo microscópico, pero en más de un sentido no fue sino el primer momento de una carrera que estaba comenzando. Se suponía, por ejemplo, que los constituyentes elementales que forman los átomos (esto es, la materia) eran sólo dos: electrones y «protones», entendidos estos últimos como asociados, de una manera no demasiado clara, a la carga positiva que indudablemente existía en el núcleo de Rutherford-Bohr (de hecho, inicialmente la mecánica cuántica era realmente una teoría de los «sistemas electrónicos», que nadie aplicaba al núcleo). Cuando en su célebre *Bakerian Lecture* de 1920 Rutherford comenzó a manejar la idea de lo que terminaría siendo el «neutrón» (un término introducido en realidad por William Sutherland en 1899), pensaba en él como compuesto esencialmente de un electrón y un protón, una «especie de doblete neutro». Aunque a instancias de Rutherford la búsqueda de esta hipotética partícula (o «estado») comenzó inmediatamente en el Cavendish, no sería hasta 1932 cuando James Chadwick lo descubriría. E incluso entonces se dudó durante algún tiempo si entenderlo como una partícula tan fundamental como el electrón y el protón, o como un doblete «electrón-protón». En favor de que el núcleo contuviese electrones estaba la desintegración β ya que se había demostrado que los rayos β eran electrones, aunque por otra parte también causaba problemas el incluirlos en el núcleo; en 1929 Walther Heitler y Gerhard Herzberg habían señalado que en el caso de que el núcleo contuviese protones y electrones, la molécula de nitrógeno, N_2 debería contener 14 protones y 7 electrones, demostrando al mismo tiempo que obedecía a la estadística de Bose-Einstein; poco después, sin embargo, Wigner probaba que toda partícula compuesta (tal como la molécula de nitrógeno) debía obedecer a la estadística de Fermi-Dirac si contenía un número impar de partículas, y a la de Bose-Einstein en caso contrario. Esto implicaba que N_2 debía seguir a la estadística de Fermi-Dirac, en contra del resultado de Heitler y Herzberg.

La incertidumbre existente es patente incluso en los tres artículos seminales publicados por Heisenberg poco más de tres meses después de que Chadwick anunciase su descubrimiento. En estos artículos, que contienen la

teoría atómico-nuclear que se aceptó durante mucho tiempo, e incluso en la actualidad hasta cierta aproximación, Heisenberg trataba en ocasiones al neutrón como una partícula independiente y en otras como una partícula compuesta por protones y electrones. Pero el caso es que en un período relativamente corto el neutrón se aceptó, aunque ocasionalmente se siguiese resucitando la vieja idea.

Antes incluso de que se demostrase la existencia del neutrón, ya se habían encontrado otras partículas: en mayo de 1931 Dirac había propuesto la idea del electrón cargado positivamente, o positrón, que en diciembre Carl Anderson descubría exponiendo una cámara de niebla a la radiación cósmica, aunque sólo se reconocería como tal en marzo de 1933. Y a finales de 1929 había comenzado a circular entre la comunidad de físicos la idea de Pauli del neutrino, con la que pretendía explicar el equilibrio energético en la desintegración β . Pocos años más tarde empezaron a llegar los mesones; el primero de los cuales fue previsto teóricamente en 1935 por el físico japonés Hideki Yukawa (hacia 1947 se aceptaba que los mesones eran en realidad de dos tipos: el π , o pión, y el μ muón).

Altas energías para conocer el microcosmos: La «Gran Ciencia»

Para poder ahondar más en los secretos de la estructura de la materia, los físicos se dieron cuenta muy pronto que necesitaban «golpear», «perturbar» a los átomos con cuanta más fuerza mejor. En 1911 Rutherford había conseguido elaborar su modelo atómico ayudándose con un proyectil de cierta energía: las partículas α . Durante mucho tiempo estas partículas constituyeron el único medio de perturbar de manera controlada el mundo del microcosmos; pero para su producción se estaba a merced de elementos que fuesen radiactivos de manera natural. Esta limitación se hizo más notoria en 1919 cuando Rutherford abrió otro campo, el de las transformaciones nucleares, al estudiar la reacción $N^{14} + \alpha \rightarrow O^{17} + p$ (esto es, un núcleo de nitrógeno absorbe una partícula α emitiendo un protón y transformándose en un núcleo de oxígeno). Las fuentes radiactivas accesibles eran demasiado débiles para seguir penetrando en los misterios de los núcleos atómicos. Un gramo de radio producía, aparte de otros productos de su desintegra-

ción, 37000 millones de partículas α por segundo, de las cuales una de cada 100000 llevaba a una transformación; demasiado pocas para que se pudiesen separar químicamente las sustancias generadas y examinar así los productos. Además, las energías de estas partículas α eran apenas suficientes para que fuesen capaces de superar la repulsión eléctrica de los núcleos a los que se dirigían. Era urgente conseguir máquinas que aumentasen el número y velocidad (energía) de las partículas. Y como estaban cargadas, una forma era someterlas a fuertes diferencias de potencial.

Antes de la Primera Guerra Mundial no se disponían de medios técnicos para avanzar mucho en semejante dirección. A partir de la década de 1920 ya comenzaron a aparecer algunos aparatos. En Cambridge, John Cockcroft y Ernest Walton utilizaron un multiplicador voltaico que les proporcionó los 125 kV (1 kV=1000 V) que necesitaron para ser los primeros en observar, en 1932, la desintegración artificial de átomos de litio en dos partículas α . En el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington, Merle Tuve empleó, hacia 1928, un transformador inventado por Nikola Tesla, con el que alcanzó los tres millones de voltios. En colaboración con Gregory Breit, Tuve utilizó este método para acelerar protones y electrones. Tras trabajar durante un breve período de tiempo en una planta eléctrica en Alabama, Robert J. Van de Graaff diseñó su generador electrostático, y después de permanecer un año en Oxford con una beca, lo adaptó en Princeton —adonde llegó en 1928— para la aceleración de partículas. Pronto su prototipo alcanzó los 80 kV, llegando en 1931 a los 750 kV, y utilizando dos esferas se podía conseguir una diferencia de potencial de 1.5 MV (1 MV = 1000 kV). En 1937 ya existían generadores de Van de Graaff, de cerca de cinco metros de altura, que alcanzaban los cinco millones de voltios. En 1933 Tuve y su grupo utilizaron un generador de Van de Graaff de un millón de voltios junto al tubo de descarga que ellos mismos habían perfeccionado y observaron la desintegración del litio y del boro. Pero la iniciativa más importante, la que terminaría desarrollándose más y marcando una época de la física, fue la asociada al nombre del físico estadounidense Ernest Orlando Lawrence.

Después de graduarse en Tale, Lawrence fue contratado como profesor asociado de física por Berkeley en 1928. El año siguiente, mientras ojeaba la revista *Archiv für Elektrotechnik*, se encontró con un artículo del ingeniero

noruego Rolf Widerøe que le sugirió la idea de un acelerador de partículas. El ciclotrón —como se denominó esta máquina— de Lawrence se basaba en la idea de utilizar campos magnéticos para que partículas cargadas se moviesen siguiendo trayectorias circulares. Añadiendo un campo eléctrico que invirtiera su polaridad cada media vuelta para que el empuje tangencial fuera el adecuado, se conseguía que las partículas fuesen aumentado su energía con cada revolución. Naturalmente, al ir moviéndose más deprisa las partículas también deberían describir círculos más amplios cada vuelta, pero independientemente de lo rápido que se movieran resultaba que siempre tardaban el mismo tiempo en cada revolución, lo que permitía mantener la misma frecuencia de inversión del voltaje, que así siempre estaba en resonancia con los ciclos de la partícula. Este «principio de resonancia» fue en realidad lo que posibilitó la construcción del ciclotrón.

Con ayuda de un estudiante graduado, Lawrence construyó un prototipo de unos 10 cm de diámetro, que parecía funcionar. A continuación, anunciaba que esperaba poder alcanzar el millón de voltios de energía, e incluso más, si se le facilitaba la construcción de su aparato.

A partir de aquel momento, y con el apoyo de su universidad, comenzó una de las carreras más intensas y, en diversos sentidos, innovadora de la historia de la ciencia. Innovadora no tanto por las ideas científicas a que hubo que recurrir —aunque en ocasiones sí que se tuvo que recurrir a ellas—, sino por la metodología, por el talante con que hubo que afrontar la empresa de la construcción de ciclotrones. En la dirección que la Naturaleza impuso a la investigación científica en el dominio de las «partículas elementales», de la «altas energías», las cualidades de Lawrence resultaron ser tremendamente convenientes, ya que lejos de agotarse con electrones, protones, neutrones, fotones, positrones, neutrinos y mesones, la materia continuó reaccionando (hasta la fecha), ante cada nuevo «asalto» energético por parte de los físicos mostrando nuevos elementos, nuevas partículas «elementales». Se necesitaba una «Naturaleza» como esa para imponerse la tarea de construir máquinas cada vez más poderosas, más grandes (la Gran ciencia), pero también científicos como Lawrence para establecer el modelo de cómo dirigir, de cómo manejar, esa, en ese sentido, nueva ciencia.

En la primavera de 1931 Lawrence consiguió una beca de 1000 dólares

del National Research Council. En febrero de 1932, y en colaboración con su estudiante M. Stanley Livingston, lograba poner en funcionamiento el primer ciclotrón (de poco menos de 30 cm de diámetro) que, tal y como había prometido, alcanzaba el millón de voltios. Pocas semanas después llegaba la noticia de que en el Cavendish, Cockcroft y Walton habían conseguido la primera desintegración artificial, para la que habían necesitado únicamente 125000 voltios, un voltaje que hacía mucho estaba al alcance del grupo de Berkeley; la diferencia es que para Lawrence la meta era alcanzar el millón de voltios, no estando todavía interesado en utilizar su máquina con potencias menores. No obstante, Lawrence reaccionó rápidamente y pocos meses después se utilizaba el ciclotrón para observar desintegraciones, publicándose los primeros resultados en octubre de 1932.

El mismo mes que entraba en funcionamiento el primer ciclotrón de Berkeley, Harold Urey y sus colaboradores (F. G. Brickwedde y G. M. Murphy) de la Universidad de Columbia, en Nueva York, demostraban la existencia de un isótopo (variedad de un elemento con el mismo número de protones y de electrones, pero no de neutrones) del hidrógeno dos veces más pesado que el ordinario, al que se le llamó deuterio. Este descubrimiento también tuvo repercusiones para el programa de Lawrence, ya que aunque no se trata de una partícula «elemental», el deuterón puede, al igual que las partículas α , ser utilizado como «desintegrador» nuclear. En marzo de 1933 Gilbert N. Lewis, colega de Lawrence en Berkeley, que disponía del mayor depósito de agua pesada (compuesta de deuterones) del mundo, proporcionó a Lawrence muestras suficientes para producir (mediante un proceso de electrolisis) deuterones para utilizar como proyectiles en el nuevo ciclotrón que ya antes de que funcionase el de 30 cm estaba planeando. Este nuevo ciclotrón —de 70 cm— entraría en funcionamiento en diciembre de 1932 y al utilizar los deuterones en él, dirigiéndolos hacia un blanco de litio, se encontró que eran diez veces más poderosos como desintegradores que los protones. Para aprovechar todo esto se abrió un amplio programa de investigación basado en los deuterones, que de hecho llevó a que en 1936 —el mismo año en que la Universidad de California creó oficialmente, para Lawrence y sus aparatos, un Radiation Laboratory como una entidad independiente del Departamento de Física— se modificase el ciclotrón aumentándole hasta alcanzar un tamaño de casi un metro. Con esta nueva máquina se midió el momento

magnético del neutrón y se produjo, aunque inadvertidamente, el primer elemento artificial, el tecnecio (denominado así para simbolizar la «técnica» que había hecho posible producirlo artificialmente).

En 1939, el año en que comenzó la Segunda Guerra Mundial, Berkeley ya contaba con un ciclotrón de metro y medio de diámetro en el que los electrones podían alcanzar los 16 MV. Y en septiembre de ese año Lawrence anunciaba planes para construir uno nuevo que llegase a los 100 MV. Mientras Lawrence proseguía su carrera en pos de aceleradores más potentes, lo que exigía cada vez mayores recursos financieros (en abril de 1940 la Rockefeller Foundation le otorgó 1'4 millones de dólares para la construcción del acelerador de 100 MV que, con sus 4'5 m de diámetro, sería el último de sus ciclotrones), en Europa continuaban realizándose nuevos hallazgos con medios más modestos. El más importante fue el descubrimiento de la fisión del uranio, que tuvo como responsables a Otto Hahn y a Fritz Strassmann y que se llevó a cabo en 1939 en el Instituto de Química Kaiser Wilhelm de Dahlem, situado en las afueras de Berlín. La fisión atómica, que casi inmediatamente fue interpretada por Lise Meitner (durante muchos años colaboradora de Hahn en Dahlem, y ahora exiliada en Suecia debido a la política racial seguida por Hitler) junto con su sobrino, Otto R. Frisch, abriría un nuevo y extremadamente fecundo campo de investigaciones en el dominio de la física nuclear, un campo que se desarrollaría con particular intensidad durante la Segunda Guerra Mundial, a través del Proyecto Manhattan, destinado a construir bombas atómicas. La «gran ciencia» promovida por Lawrence desde California, el alto nivel que ya había alcanzado la física, así como la industria, estadounidense, la ayuda prestada por la llegada a Estados Unidos (y Gran Bretaña) de eminentes científicos centroeuropeos exiliados, se combinó magníficamente con las condiciones políticas existentes a mediados de la década de los cuarenta, para que el control y explotación de la energía nuclear avanzase de manera dramática. Aunque atenuadas por la distancia temporal, por los cambiantes escenarios políticos y por la evolución de cómo la comunidad internacional percibe las necesidades energéticas y riesgos ecológicos, las consecuencias de semejante progreso todavía no nos han abandonado.

Cronología

1887. Experimento de A. A. Michelson y E. W. Morley, con el que se pretendía detectar el movimiento de la Tierra con respecto a un éter estacionario.

1895. W. C. Röntgen descubre los rayos X.

1896. A. H. Becquerel descubre la radiactividad.

1897. J. J. Thomson identifica los electrones, componentes comunes de todos los átomos, midiendo el cociente en su carga y su masa.

1900. M. Planck introduce la «discontinuidad cuántica» para explicar la ley de la radiación de un cuerpo negro.

1905. Artículos de A. Einstein sobre la teoría de la relatividad especial y cuantización de la luz.

1908. H. Minkowski presenta públicamente sus ideas acerca del espacio-tiempo. Observaciones de cefeidas a cargo de H. Leavitt.

1911. Modelo atómico de E. Rutherford.

1912. Difracción de rayos X. Propuesta teórica de M. von Laue y experimentos de W. Friedrich y P. Knipping.

1913. Modelo atómico de N. Bohr, en el que ya se incluye la cuantización.

1915. Teoría de la relatividad general de A. Einstein.

1917. A. Einstein crea la cosmología relativista con su modelo estático del universo. W. de Sitter desarrolla otro modelo cosmológico que, al contrario que el de Einstein, representaba un universo vacío.

1919. La expedición británica dirigida por F. Dyson y A. S. Eddington comprueba en un eclipse de Sol que se verifica la predicción einsteniana de la curvatura de los rayos de luz.

1922. Primer artículo en que A. A. Friedmann introdujo un nuevo modelo cosmológico, no estático.

1924. L. de Broglie presenta su tesis sobre la dualidad onda-corpúsculo. Estadística de Bose-Einstein. E. Hubble logra suficientes evidencias como para concluir que la Vía Láctea no comprende todo el universo.

1925. Mecánica cuántica matricial de W. Heisenberg. Principio de exclusión de W. Pauli. G. E. Uhlenbeck y S. A. Goudsmit introducen un nuevo número cuántico: el espín.

1926. Mecánica cuántica ondulatoria de E. Schrödinger. Interpretación de M. Born del cuadrado de la función de ondas como una medida de probabilidad. Artículos de E. Fermi y de P. A. M. Dirac en los que se introduce la estadística de Fermi-Dirac.

1927. W. Heisenberg descubre las relaciones de incertidumbre. En el Congreso Internacional de Como N. Bohr presenta sus ideas sobre la «complementariedad», que terminarían llevando a la denominada «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica. Artículo de G. Lemaitre sobre el universo en expansión.

1931. E. Hubble concluye que el universo se encuentra en expansión. En mayo P. A. M. Dirac propone la idea del positrón, que C. Anderson detecta en diciembre. E. O. Lawrence pone en funcionamiento el primer ciclotrón.

1932. Chadwick descubre el neutrón.

1939. O. Hahn y F. Strassmann descubren la fisión del uranio. L. Meitner y O. R. Frisch dan poco después una interpretación teórica del nuevo fenómeno.