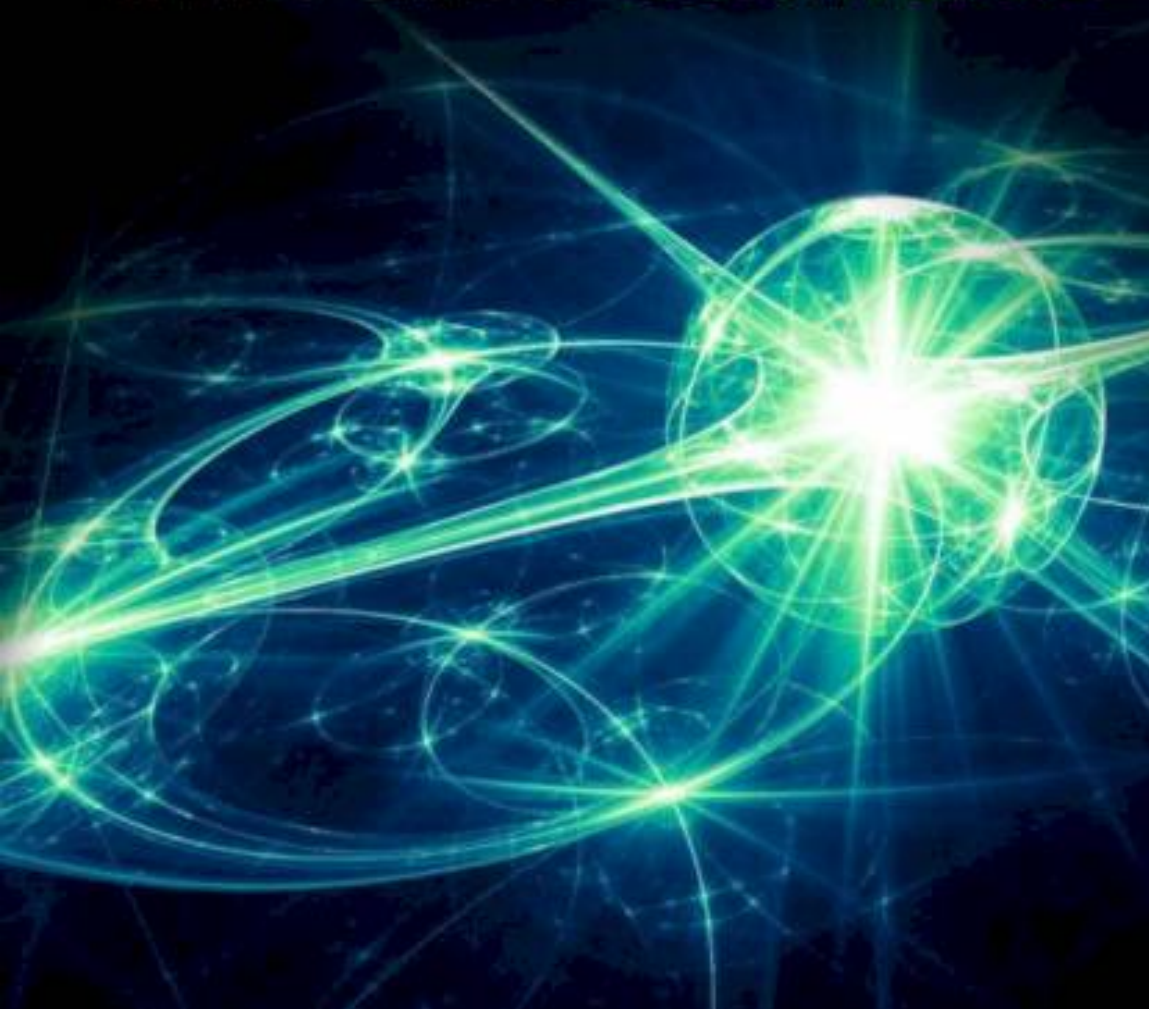


BRIAN COX Y JEFF FORSHAW

el universo cuántico



(y por qué todo lo que puede suceder, sucede)

¿Qué es la física cuántica? ¿Cómo nos ayuda a entender el mundo? ¿Dónde deja a Newton y a Einstein? Y sobre todo, ¿por qué podemos estar seguros de que es una buena teoría? Brian Cox y Jeff Forshaw ofrecen un modelo concreto de la naturaleza que es comparable en esencia a las leyes del movimiento de Newton, la teoría electromagnética de Maxwell y la teoría de la relatividad de Einstein. A través de analogías con la vida cotidiana, que demuestran que los extraños fenómenos cuánticos tienen una explicación, logran transformar principios científicos fundamentales en algo fascinante y accesible a todo el mundo. Un recorrido por la teoría científica actual de la materia que permite explicar las sorprendentes propiedades de las partículas subatómicas o por qué si los átomos están prácticamente vacíos no atravesamos el suelo que está bajo nuestros pies.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias a los muchos colegas y amigos que nos ayudaron a «hacer las cosas bien» y nos ofrecieron valiosos consejos y sugerencias. En particular, queremos expresar nuestro agradecimiento a Mike Birse, Gordon Connell, Mrinal Dasgupta, David Deutsch, Nick Evans, Scott Kay, Fred Loebinger, Dave McNamara, Peter Millington, Peter Mitchell, Douglas Ross, Mike Seymour, Frank Swallow y Niels Walet.

Tenemos para con nuestras familias —Naomi e Isabel, y Gia, Mo y George— una enorme deuda de gratitud por su apoyo y su aliento, y por lidiar tan bien con nuestras obsesiones.

Por último, queremos agradecer a nuestro editor y a nuestras agentes (Sue Rider y Diane Banks) su paciencia, sus ánimos y su muy competente apoyo. Nuestro editor, Will Goodlad, merece sin duda un agradecimiento especial.

1

Aquí pasa algo raro

Cuántico. La palabra es al mismo tiempo evocadora, desconcertante y fascinante. Dependiendo de cuál sea su punto de vista, es la constatación del profundo éxito de la ciencia o un símbolo del limitado alcance de la intuición humana en nuestra lucha con la innegable extrañeza del dominio subatómico. Para un físico, la mecánica cuántica es uno de los tres grandes pilares en los que se basa nuestra comprensión del mundo natural, junto con las teorías especial y general de la relatividad de Einstein. Las teorías de Einstein abordan la naturaleza del espacio y del tiempo, y la fuerza de la gravedad. La mecánica cuántica aborda todo lo demás, y podría decirse que no importa en absoluto si es evocadora, desconcertante o fascinante: es simplemente una teoría física que describe cómo se comportan las cosas. Según esta pragmática vara de medir, su precisión y su capacidad explicativa son deslumbrantes. Existe una prueba de la electrodinámica cuántica, la más antigua y mejor comprendida de las teorías cuánticas modernas, que consiste en medir el comportamiento de un electrón en las proximidades de un imán. Durante años, armados de lápiz, papel y ordenadores, los físicos teóricos trabajaron intensamente para predecir el resultado de los experimentos. Los físicos experimentales construyeron y llevaron a cabo delicados experimentos para dilucidar los detalles más menudos de la naturaleza. Ambos bandos obtuvieron de forma independiente resultados de una gran precisión, equivalentes a me-

dir la distancia entre Manchester y Nueva York con un margen de error de unos pocos centímetros. Sorprendentemente, el número al que llegaron los experimentalistas concordaba de manera precisa con el que habían calculado los teóricos: mediciones y cálculos estaban en perfecto acuerdo.

Esto es algo impresionante, pero también extravagante, y si el único objetivo de la teoría cuántica fuese trazar un mapa de lo diminuto, sería razonable preguntarse a qué viene tanto lío. La ciencia, como es evidente, no tiene necesariamente por qué ser útil, aunque muchos de los cambios tecnológicos y sociales que han revolucionado nuestras vidas tienen su origen en la investigación fundamental que llevan a cabo los exploradores de nuestros días, cuya única motivación es llegar a comprender mejor el mundo que los rodea. Estas exploraciones movidas por la curiosidad a través de todas las disciplinas científicas han dado lugar a un aumento de la esperanza de vida, a los viajes aéreos intercontinentales y a las telecomunicaciones modernas, nos han permitido liberarnos de las penurias de la agricultura de subsistencia y nos han ofrecido una visión integradora e inspiradora, y toda una lección de humildad sobre el lugar que ocupamos en el infinito mar de estrellas. Pero, en cierto sentido, esto no son más que subproductos. Exploramos porque somos curiosos, no porque tratemos de construir grandiosas representaciones de la realidad o mejores artilugios.

La teoría cuántica quizá constituya el mejor ejemplo de cómo lo infinitamente extravagante acaba siendo profundamente útil. Extravagante, porque describe un mundo en el que una partícula puede realmente estar en varios lugares al mismo tiempo, y se mueve de un sitio a otro explorando de manera simultánea el universo entero. Y útil, porque entender el comportamiento de los componentes más pequeños del universo es la base sobre la que se erige nuestra comprensión de todo lo demás. Esta afirmación raya en la

arrogancia, porque el mundo está repleto de fenómenos diversos y complejos. Pero, a pesar de esta complejidad, hemos descubierto que todas las cosas están construidas a partir de un puñado de diminutas partículas que se comportan según las reglas de la teoría cuántica. Tales reglas son tan sencillas que se pueden resumir en unas pocas líneas. Y el hecho de que no sea necesaria una biblioteca entera para explicar la naturaleza esencial de las cosas es uno de los mayores misterios.

Aparentemente, cuanto más entendemos sobre la naturaleza fundamental del mundo, más simple parece. A su debido tiempo explicaremos cuáles son estas reglas básicas y cómo los minúsculos componentes se alían para formar el mundo. Pero, para evitar que nos deslumbre la simplicidad fundamental del universo, conviene dejar clara una cosa: aunque las reglas básicas del juego son sencillas, no siempre es fácil calcular sus consecuencias. Nuestra experiencia cotidiana del mundo está marcada por las relaciones entre enormes conjuntos de billones de átomos, y tratar de derivar el comportamiento de las plantas y las personas a partir de los principios fundamentales sería una locura. Reconocerlo no resta importancia al hecho de que en la base de todos los fenómenos se encuentra la mecánica cuántica de partículas diminutas.

Piense en el mundo que tiene a su alrededor. Tiene en sus manos un libro hecho de papel, fabricado a su vez a partir de la pulpa machacada de un árbol.^[1.1] Los árboles son máquinas capaces de tomar un suministro de átomos y moléculas, descomponerlos, y reordenarlos para crear colonias cooperativas compuestas por muchos billones de partes individuales. Para hacerlo, utilizan una molécula llamada clorofila, compuesta por más de cien átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno retorcidos en una intrincada forma, salpicada aquí y allá con unos pocos átomos de magnesio y nitrógeno. Este conjunto de partículas es capaz de capturar la luz que ha atravesado los 150 millones de kilómetros que

nos separan de nuestra estrella, un horno nuclear cuyo volumen es un millón de veces mayor que el de la Tierra, y transferir esa energía al corazón de las células, donde se emplea en fabricar moléculas a partir de dióxido de carbono y agua, en un proceso en el cual se emite oxígeno, tan importante para la vida. Son estas cadenas moleculares las que forman la superestructura de los árboles y de todos los seres vivos, y también del papel de su libro. Puede leer el libro y entender las palabras que contiene porque posee ojos capaces de convertir la luz que reflejan las páginas en impulsos eléctricos que se interpretan en el cerebro, la estructura más compleja de la que tenemos constancia en el universo. Hemos descubierto que todas estas cosas no son más que conjuntos de átomos, y que la gran variedad de átomos que existen están compuestos únicamente por tres partículas: electrones, protones y neutrones. También hemos descubierto que los protones y los neutrones están a su vez formados por entidades más pequeñas llamadas quarks, y hasta ahí llega nuestro conocimiento, al menos hasta donde sabemos a día de hoy. En la base de todo esto se encuentra la teoría cuántica.

La representación que nos ofrece la física moderna del universo que habitamos es, por lo tanto, una imagen de simplicidad subyacente: fenómenos elegantes que escapan a nuestra mirada, y de los que emerge la diversidad del mundo macroscópico. Este es quizá el culmen de la ciencia moderna: la reducción de la tremenda complejidad del mundo, incluidos los seres humanos, a una descripción del comportamiento de apenas un puñado de minúsculas partículas subatómicas y de las cuatro fuerzas que actúan entre ellas. Las mejores descripciones con que contamos de tres de estas fuerzas, las fuerzas nucleares fuerte y débil que operan en las profundidades del núcleo atómico, y la fuerza electromagnética que mantiene unidos los átomos y las moléculas, nos las proporciona la mecánica cuántica. Únicamente la gravedad, la más débil pero probablemente tam-

bién la más conocida de las cuatro, carece a día de hoy de una descripción cuántica satisfactoria.

Hemos de reconocer que la teoría cuántica tiene cierta fama de rara, y en su nombre se han escrito muchas tonterías. Gatos que pueden estar al mismo tiempo vivos y muertos; partículas capaces de estar en dos lugares a la vez; Heisenberg diciendo que todo es incierto. Todo esto es verdad, pero la conclusión que tan a menudo se extrae de ello —que, puesto que algo raro sucede en el mundo microscópico, estamos rodeados de misterio— en absoluto lo es. Percepción extrasensorial, sanación mística, pulseras vibratorias que protegen de la radiación, y tantas otras cosas por el estilo se introducen subrepticamente en el reino de lo posible bajo el manto de la palabra «cuántico». Estos disparates nacen de una falta de claridad de pensamiento, voluntarismo, incompreensión genuina o malintencionada, o alguna desafortunada combinación de todo lo anterior. La teoría cuántica describe el mundo con precisión, utilizando leyes matemáticas tan concretas como cualquiera de las que propusieron en su tiempo Newton o Galileo. Esta es la razón por la que sabemos calcular la respuesta magnética de un electrón con una precisión tan exquisita. La teoría cuántica proporciona una descripción de la naturaleza que, como descubriremos, posee una inmensa capacidad predictiva y explicativa para una enorme variedad de fenómenos, desde los chips de silicio a las estrellas.

Al escribir este libro, nuestro objetivo es desmitificar la teoría cuántica, un marco teórico que ha demostrado ser notoriamente confuso, incluso para sus pioneros. Para ello, adoptaremos una perspectiva moderna, que aproveche un siglo de experiencia y desarrollos teóricos. Sin embargo, para preparar el terreno, nos gustaría comenzar nuestro recorrido a principios del siglo XX, y repasar algunos de los problemas que llevaron a los físicos a abandonar de manera tan radical la dirección anterior.

A la teoría cuántica se llegó, como sucede a menudo en la ciencia, por el descubrimiento de fenómenos naturales que los paradigmas científicos de la época no podían explicar. En el caso de la teoría cuántica, estos fenómenos fueron muchos y variados. Una sucesión de resultados inexplicables generaron excitación y confusión, y catalizaron un período de innovación experimental y teórica verdaderamente digno del más usado de los clichés: fue una era dorada. Los nombres de los protagonistas están grabados en la conciencia de cualquier estudiante de física, y presiden los cursos universitarios en la materia incluso a día de hoy: Rutherford, Bohr, Planck, Einstein, Pauli, Heisenberg, Schrödinger, Dirac. Muy probablemente, nunca habrá otro momento en que tantos nombres se asocien con la grandeza científica en la búsqueda de un solo objetivo: una nueva teoría de los átomos y las fuerzas que componen el mundo físico. En 1924, al recordar las primeras décadas de la teoría cuántica, Ernest Rutherford, el físico de origen neozelandés que descubrió en Manchester el núcleo atómico, escribió: «El año 1896 [...] marcó el comienzo de lo que, con razón, se ha denominado la era heroica de la Ciencia Física. Nunca antes en la historia de la física se pudo asistir a un período de tan intensa actividad, durante el que se sucedieron con vertiginosa rapidez descubrimientos de una importancia fundamental».

Pero antes de viajar al París del siglo XIX y al nacimiento de la teoría cuántica, ¿qué podemos decir de la propia palabra «cuántica»? El término entró en la física en 1900, a través del trabajo de Max Planck. Planck estaba interesado en la descripción teórica de la radiación que emiten los objetos calientes —la denominada «radiación del cuerpo negro»—, al parecer porque había recibido el encargo de estudiarla por parte de una compañía de iluminación eléctrica; en ocasiones, las puertas del universo se abren por los motivos más prosaicos. Hablaremos de la gran idea de Planck en detalle más adelante en este libro, pero para los

propósitos de esta breve introducción bastará con decir que llegó a la conclusión de que solo podía explicar las propiedades de la radiación del cuerpo negro si suponía que la luz se emite en pequeños paquetes de energía, que llamó «cuantos». Así pues, la palabra significa literalmente «paquetes» o «discretos». En un primer momento pensó que esto no era más que un truco matemático, pero el trabajo posterior de Albert Einstein en 1905 sobre un fenómeno denominado efecto fotoeléctrico aportó una mayor consistencia a la hipótesis cuántica. Estos resultados eran sugerentes, porque los pequeños paquetes de energía se podían entender como el equivalente de las partículas.

La idea de que la luz está compuesta por un flujo de pequeñas balas contaba con una historia larga e ilustre, que se remontaba a Isaac Newton y al nacimiento de la física moderna. Pero parecía que el físico escocés James Clerk Maxwell había disipado cualquier duda que pudiese existir al respecto cuando, en 1864, publicó una serie de artículos que Albert Einstein describiría más tarde como «los más profundos y fructíferos que la física haya conocido desde la época de Newton». Maxwell demostró que la luz es una onda electromagnética que atraviesa el espacio, por lo que la idea de la luz como una onda gozaba de un immaculado y, aparentemente, intachable pedigrí. Sin embargo, en una serie de experimentos realizados entre 1923 y 1925 en la Universidad Washington en Saint Louis, Arthur Compton y sus colaboradores lograron producir choques entre cuantos de luz y electrones. Ambos se comportaban como bolas de billar, lo que constituía una evidencia concluyente de que la conjetura teórica de Planck tenía una base firme en el mundo real. En 1926, los cuantos de luz recibieron el nombre de «fotones». La evidencia era incontrovertible: la luz se comporta como onda y como partícula. Esto marcó el fin de la física clásica, y el final del principio de la teoría cuántica.

2

Estar en dos lugares a la vez

Ernest Rutherford señalaba 1896 como el comienzo de la revolución cuántica porque ese fue el año en que Henri Becquerel descubrió la radiactividad en su laboratorio de París. Becquerel estaba intentando utilizar compuestos de uranio para producir rayos X, descubiertos tan solo unos meses antes por Wilhelm Roentgen en Würzburg. Pero lo que descubrió fue que los compuestos de uranio emiten «les rayons uraniques», capaces de oscurecer placas fotográficas incluso envueltas en papel grueso que la luz no podría atravesar. Ya en 1897, el gran científico Henri Poincaré reconocía la importancia de los rayos de Becquerel en un artículo en el que, refiriéndose al experimento, escribió premonitoriamente: «Cabe pensar que nos permitirá acceder a un nuevo mundo cuya existencia nadie sospechaba». Lo desconcertante de la desintegración radiactiva, que acabó siendo una indicación de lo que estaba por venir, era que no había nada que desencadenase la emisión de los rayos: simplemente surgían de las sustancias de manera espontánea e impredecible.

En 1900, Rutherford indicó cuál era el problema: «Todos los átomos creados al mismo tiempo deberían durar un intervalo determinado. No obstante, esto contradice la ley de transformación observada, según la cual la vida de los átomos toma todos los valores entre cero e infinito». Esta aleatoriedad en el comportamiento que exhibía el micromundo resultó muy sorprendente porque, hasta ese momento, la

ciencia había sido resueltamente determinista. Si, en algún momento, uno conocía todo lo que es posible conocer sobre determinado objeto, entonces se creía que podría predecir con una certeza absoluta lo que le sucedería en el futuro. La destrucción de este tipo de predictibilidad es una de las características fundamentales de la teoría cuántica: en lugar de certezas, trata con probabilidades, y no porque carezcamos de un conocimiento absoluto, sino porque ciertos aspectos de la naturaleza se rigen intrínsecamente por las leyes del azar. Así pues, ahora sabemos que es imposible predecir cuándo se desintegrará un determinado átomo. La desintegración radiactiva supuso el primer encuentro de la ciencia con los dados de la naturaleza, y provocó una duradera confusión en muchos físicos.

Sin duda, en el interior de los átomos sucedía algo interesante, aunque su estructura interna era completamente desconocida. Fue Rutherford quien en 1911 llevó a cabo el descubrimiento fundamental al utilizar una fuente radiactiva para bombardear una finísima lámina de oro con un tipo de radiación conocida como partículas alfa (que, ahora lo sabemos, son núcleos de átomos de helio). Rutherford, con sus colaboradores Hans Geiger y Ernest Marsden, descubrió, para su absoluta sorpresa, que aproximadamente una de cada 8.000 partículas alfa no atravesaba el oro, como cabía esperar, sino que salía rebotada directamente hacia atrás. Más adelante, Rutherford describiría ese momento con su característico lenguaje expresivo: «Era lo más increíble que me había pasado en toda mi vida. Era casi tan increíble como si disparásemos un proyectil de 15 pulgadas contra un trozo de papel y rebotase». Según quienes lo conocieron, Rutherford era un individuo agradable y con sentido común: una vez describió a un alto cargo que se las daba de importante como «un punto euclidiano: tiene posición, pero no magnitud».

Rutherford calculó que sus resultados experimentales solo se podían explicar si el átomo consistía en un núcleo

muy pequeño en el centro, con los electrones orbitando a su alrededor. Por aquel entonces, probablemente tenía en mente algo parecido a las órbitas de los planetas alrededor del Sol. El núcleo contiene casi toda la masa del átomo, y esta es la razón por la que era capaz de detener sus partículas alfa «de 15 pulgadas» y hacer que rebotasen. El hidrógeno, el elemento más simple, posee un núcleo formado por un solo protón, con un radio de aproximadamente $1,75 \times 10^{-15}$ m. Por si no está familiarizado con esta notación, equivale a 0,00000000000000175 metros, o, expresado en palabras, a algo menos de dos milésimas de millonésima de millonésima de metro. Hasta donde sabemos en la actualidad, el electrón es, como el alto cargo al que criticaba Rutherford, puntual, y orbita alrededor del núcleo de hidrógeno con un radio unas 100.000 veces mayor que el diámetro nuclear. El núcleo posee carga eléctrica positiva, mientras que la del electrón es negativa, lo que significa que entre ambos existe una fuerza atractiva análoga a la fuerza de la gravedad que mantiene a la Tierra en órbita alrededor del Sol. Lo cual a su vez significa que los átomos son en su mayor parte espacio vacío. Si imaginamos que el átomo tuviese el tamaño de una pelota de tenis, entonces el diminuto electrón sería más pequeño que una mota de polvo y orbitaría a un kilómetro de distancia. Estos números son muy sorprendentes, porque desde luego no da la impresión de que la materia sólida esté muy vacía.

El átomo nuclear de Rutherford presentaba un sinfín de problemas para los físicos de la época. Por ejemplo, era bien sabido que el electrón debería perder energía al trazar su órbita alrededor del núcleo atómico, porque todos los objetos con carga eléctrica irradian energía si describen una trayectoria curva. Esta es la idea en la que se basa el transmisor de radio, que emite las ondas de radio producidas al hacer que se agiten los electrones en su interior. Heinrich Hertz inventó el transmisor de radio en 1887 y, cuando Rutherford descubrió el núcleo atómico, ya existía

una emisora de radio comercial que enviaba mensajes a través del Atlántico desde Irlanda hasta Canadá. Así que, claramente, la teoría de las cargas orbitales y la emisión de ondas de radio funcionaba sin problemas, lo cual fue una causa de confusión para quienes trataban de explicar cómo los electrones podían mantenerse en órbita alrededor de los núcleos.

Otro fenómeno igualmente inexplicable era el misterio de la luz que emitían los átomos al calentarse. Ya en 1853, el científico sueco Anders Jonas Ångström provocó la descarga de una chispa a través de un tubo de hidrógeno gaseoso y analizó la luz emitida. Se podría suponer que, al brillar, un gas produciría todos los colores del arcoíris. A fin de cuentas, ¿qué es el Sol sino una bola de gas brillante? En cambio, Ångström observó que el hidrógeno emitía luz de tres colores muy distintos: roja, verde azulada y violeta, como un arcoíris con tres arcos estrechos y puros. Al poco tiempo se descubrió que cada elemento químico se comporta de esta manera, y emite un código de barras de colores específico. Cuando Rutherford propuso su modelo del átomo nuclear, un científico llamado Heinrich Gustav Johannes Kayser había publicado una obra de referencia compuesta por seis volúmenes y 5.000 páginas, titulada *Handbuch der Spectroscopie*, en la que documentaba las coloridas líneas brillantes de todos los elementos conocidos. La pregunta de rigor, cómo no, era ¿por qué? No solo «¿Por qué, profesor Kayser?» (que debía de ser el alma de las fiestas), sino también «¿Por qué la profusión de líneas de colores?». Durante más de sesenta años, la ciencia de la espectroscopia, como se la denominaba, había sido al mismo tiempo un triunfo empírico y un páramo teórico.

En marzo de 1912, fascinado por el problema de la estructura atómica, el físico danés Niels Bohr viajó a Manchester para reunirse con Rutherford. Más tarde afirmó que tratar de descodificar los entresijos del átomo a partir de los datos espectroscópicos había sido como intentar deri-

var los fundamentos de la biología a partir de las coloridas alas de una mariposa. El átomo de Rutherford, un minúsculo sistema solar, le dio a Bohr la pista que necesitaba, y en 1913 publicó la primera teoría cuántica de la estructura atómica. Esta teoría presentaba ciertos problemas, de eso no había duda, pero también contenía varias ideas fundamentales que desencadenaron el desarrollo de la teoría cuántica moderna. Bohr llegó a la conclusión de que los electrones solo podían ocupar determinadas órbitas alrededor del núcleo, y de que las más cercanas a él eran las de menor energía. También afirmó que los electrones podían saltar entre esas órbitas. Saltaban a una órbita más elevada cuando recibían energía (de una chispa en un tubo, por ejemplo) y, pasado un tiempo, volvían a caer a órbitas inferiores, y al hacerlo emitían luz. El color de la luz estaba determinado directamente por la diferencia de energía entre las dos órbitas. La figura 2.1 ilustra esta idea básica: la flecha representa un electrón que salta del tercer nivel de energía al segundo y que, al hacerlo, emite luz (representada por la línea ondulada). En el modelo de Bohr, el electrón solo puede orbitar alrededor del protón en una de estas órbitas especiales, «cuantizadas»: se le impide caer en espiral hacia el núcleo. De esta manera, su modelo le permitía a Bohr calcular las longitudes de onda (es decir, los colores) de la luz que Ångstrom había observado: los atribuía a la caída de un electrón desde la quinta órbita a la segunda (luz violeta), de la cuarta órbita a la segunda (luz verde azulada) o de la tercera a la segunda (luz roja). El modelo de Bohr también predecía correctamente que asimismo se debía emitir luz cuando los electrones caían a la primera órbita. Esta luz se encuentra en el rango ultravioleta del espectro, que no es visible para el ojo humano, por lo que Ångstrom no pudo verla. No obstante, sí había sido detectada en 1906 por el físico Theodore Lyman en Harvard, y el modelo de Bohr encajaba perfectamente con los datos de Lyman.