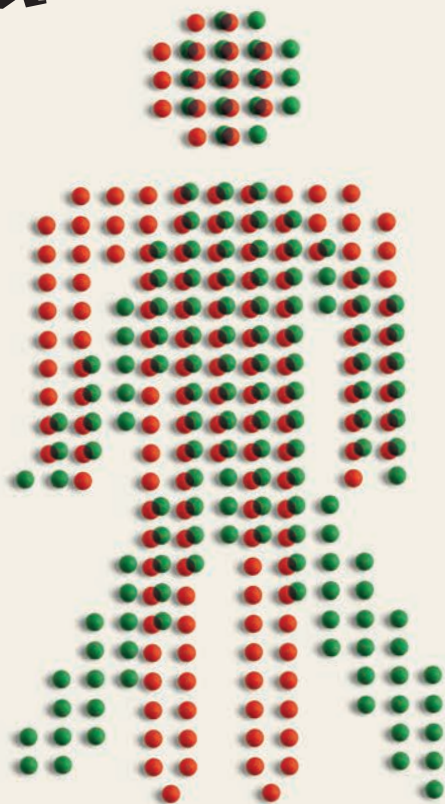


Hans Christian von Baeyer

La física cuántica del futuro

El QBismo y la nueva
interpretación de la realidad

TUSQUETS
EDITORES



Hans Christian von Baeyer
LA FÍSICA CUÁNTICA
DEL FUTURO

Traducción de Ambrosio García Leal

Ilustraciones de Lili von Baeyer

TUSQUETS
EDITORES

Título original: *QBism. The Future of Quantum Physics*

1.ª edición: octubre de 2019

© 2016 by the President and Fellow of Harvard College.
Publicado por acuerdo con Harvard University Press por mediación de International
Editors'Co

© de la traducción: Ambrosio García Leal, 2019
Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. – Avda. Diagonal, 662-664 – 08034 Barcelona
www.tusquetseditores.com
ISBN: 978-84-9066-745-3
Depósito legal: B. 17.878-2019
Fotocomposición: Realización Tusquets
Impresión y encuadernación: Black Print
Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro está calificado como papel ecológico
y procede de bosques gestionados de manera sostenible.

Queda rigurosamente prohibida cualquier forma de reproducción, distribución, comu-
nicación pública o transformación total o parcial de esta obra sin el permiso escrito de
los titulares de los derechos de explotación.

Índice

Introducción	11
Primera parte: Mecánica cuántica	
1. El nacimiento del cuanto	19
2. Partículas de luz	29
3. Dualidad onda/partícula	37
4. La función de onda	45
5. «El experimento más bello de la física».	55
6. Y entonces ocurre un milagro	65
7. Incertidumbre cuántica	73
8. La función de onda más simple	81
Segunda parte: Probabilidad	
9. Problemas con la probabilidad	95
10. La probabilidad según el reverendo Bayes.	109
Tercera parte: Bayesianismo cuántico	
11. El QBismo explicitado	123
12. El gato de Schrödinger salvado por el QBismo	129
13. Las raíces del QBismo	135
14. La rareza cuántica en el laboratorio	145
15. Toda la física es local	157
16. Creencia y certidumbre	163

Cuarta parte: La visión QBista del mundo

17. Física y experiencia humana	171
18. Las leyes de la naturaleza.	179
19. La piedra devuelve el golpe	185
20. El problema del Ahora	193
21. ¿Un mapa perfecto?	201
22. El camino por delante.	205

Apéndice I

Cuatro interpretaciones anteriores

de la mecánica cuántica	217
-----------------------------------	-----

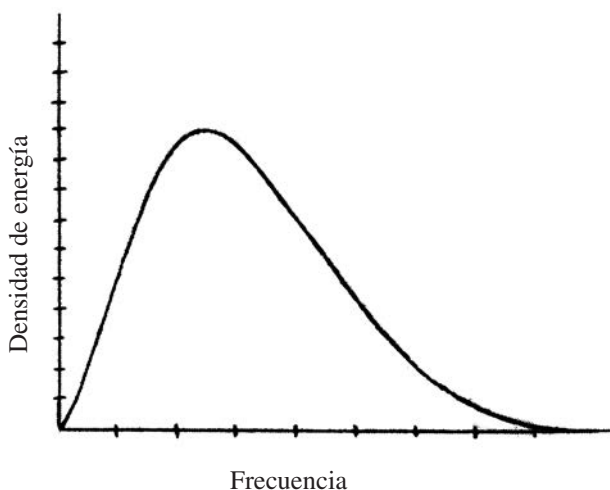
Apéndice II

Notas	223
Índice onomástico	231
Agradecimientos	233

Según su creador, el físico alemán Max Planck (1858-1947), la concepción del cuanto fue un «acto de desesperación».¹ Hacia 1900, espoleados por el desafío tecnológico de convertir el alumbrado público y privado de gas en eléctrico, los físicos investigaban por qué la materia emite luz. Cuando un objeto caliente brilla, ya sea una llama de gas, el filamento metálico de una bombilla incandescente, o el sol, irradia luz en distintos colores. Se sabía que la luz era algún tipo de onda, aunque no estaba claro qué era lo que oscilaba. Las ondas lumínicas, como las acuáticas y las sonoras, se describen mediante su amplitud, la altura de la onda, y su frecuencia, es decir, el número de ciclos completos, de cresta a valle y a cresta de nuevo, que puede registrar un observador estacionario en un segundo.² No podemos ver estos ciclos a simple vista, pero sabemos que los rayos de luz de diferentes colores se distinguen por su frecuencia. La luz roja corresponde a una oscilación lenta, o baja frecuencia, mientras que la luz amarilla tiene una frecuencia intermedia y la luz azul se caracteriza por una frecuencia elevada, o vibración rápida. (Un truco mnemotécnico: para recordar si el rojo representa una vibración lenta o rápida, téngase presente que las frecuencias por debajo de la luz visible del arcoíris se denominan infrarrojos. El prefijo infra-, como en infraestructura, significa por debajo. Por encima

de la cota superior del espectro lumínico encontramos la luz ultravioleta, donde el prefijo ultra- significa más allá.) Cuando hay muchos colores mezclados, como suele ser el caso en la naturaleza, los físicos se preguntan cuál es la relación entre intensidad y frecuencia. En lenguaje llano: ¿cuánta luz roja, cuánta luz amarilla o cuánta luz azul se emite? Y así a lo largo de todo el espectro.

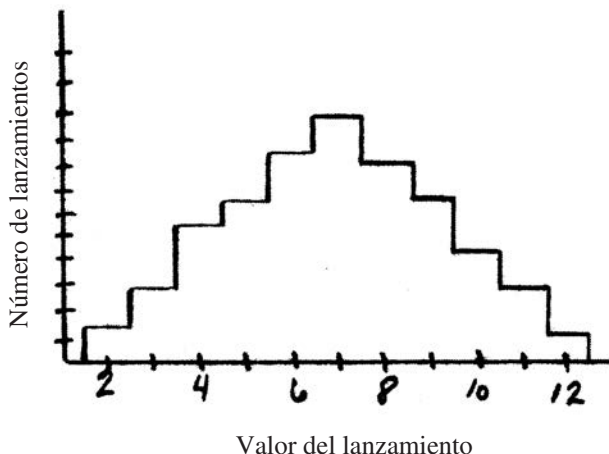
En tiempos de Planck los físicos experimentales competían por trazar las gráficas más exquisitamente precisas de esta relación en condiciones de laboratorio ideales. Cuando se representa la frecuencia en el eje horizontal y la densidad de energía, o brillo, en el eje vertical, la «curva de radiación» resultante parece una colina. Los colores más brillantes emitidos determinan dónde se sitúa el pico. La curva de radiación del sol, por ejemplo, tiene su pico en la parte amarilla del espectro. A la izquierda, en la banda infrarroja y la roja, no se emite demasiada energía. A medida que la frecuencia aumenta, la curva alcanza un máximo en la banda amarilla y luego vuelve a caer al descender la



energía emitida en las bandas azul, violeta y ultravioleta invisible.

Los teóricos se devanaban los sesos intentando explicar estas curvas de radiación a partir de los principios básicos de la física. Planck trabajó en el problema durante años, con un éxito solo parcial, hasta que finalmente, en los últimos meses del siglo XIX, probó un enfoque estadístico, una opción que hasta entonces había desdeñado. Las curvas acampanadas son corrientes en el campo de la probabilidad y la estadística. Supongamos, por ejemplo, que lanzamos un par de dados muchas veces y representamos gráficamente el número de veces que ha salido dos, tres, cuatro y así sucesivamente hasta doce. A lo largo del eje horizontal situamos los *valores* de los lanzamientos (el número total de puntos que suman los dos dados), de 2 a 12, y a lo largo del eje vertical el *número* de veces que sale cada valor. Con toda seguridad acabaremos con una pirámide (no perfectamente simétrica, pero más baja en ambos extremos y con un máximo central en el valor 7). La explicación de esta forma se basa en la idea del *número de maneras* en que puede verificarse un resultado dado. Solo hay una posibilidad de obtener un dos (1, 1) y solo una de obtener un doce (6, 6). En cambio, el siete puede obtenerse de seis maneras diferentes: (1, 6), (6, 1), (2, 5), (5, 2), (3, 4) y (4, 3). Los valores intermedios 3, 4, 5 y 6, así como 8, 9, 10 y 11, pueden obtenerse cada uno de menos de seis maneras. Dado que todas las combinaciones son igualmente probables, el valor del lanzamiento con el mayor número de posibilidades (el siete) es el que sale más veces, lo que explica sin dificultad el pico central de la gráfica.

Planck decidió hacer algo similar con la curva de la radiación. Para ello tenía que convertir un problema continuo en uno discreto. En el experimento con los dados, ambos ejes, horizontal y vertical, se refieren a cantidades numerables (am-



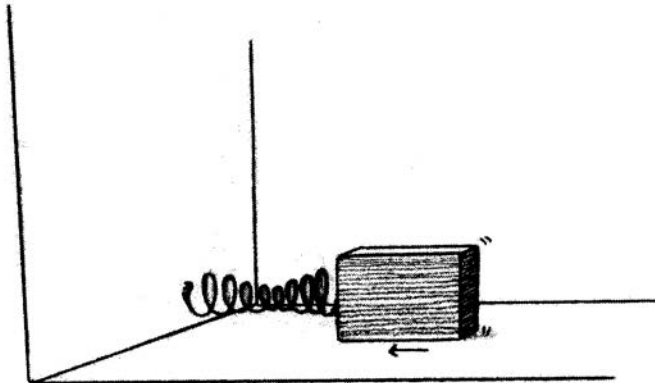
bas se miden mediante números enteros). Por otro lado, en la curva de radiación las frecuencias de luz se miden mediante números reales, de cero a infinito. (El arcoíris no consiste en los colores rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil y violeta, sino en un número incontable e infinito de tonos.) El eje vertical de la curva de radiación es igual de problemático. La energía que emite un cuerpo radiante también es medible, pero no numerable. Si quería «contar las maneras», Planck tenía que aproximar la curva de radiación uniforme mediante una gráfica escalonada (como una pirámide mexicana). Si hacía que los escalones fueran lo bastante pequeños para ser imperceptibles, el contorno escalonado podría representar la curva uniforme real.

Aunque Planck, como algunos de sus contemporáneos, no creía en la realidad de los átomos, era imaginativo. Sabía que la energía calorífica de un objeto radiante es la expresión de alguna clase de movimiento invisible. Lo que percibimos como calor en realidad es la imperceptible vibración interna del material que constituye el objeto. (Se puede convertir

movimiento en calor con solo frotarse las manos o perforando un sólido duro con un taladro eléctrico.) Con esta idea en mente, Planck ideó un ingenioso modelo que hacía numerables tanto las frecuencias como la energía.

El dispositivo más simple que almacena energía y vibra con una frecuencia definida es el *oscilador armónico*. (El seductor adjetivo *armónico* viene del papel de las oscilaciones en la producción de sonidos musicales.) Un ejemplo de oscilador armónico, u oscilador a secas, es un peso sobre una superficie sin fricción sujeto a un muelle que a su vez está sujeto a una pared. Otros ejemplos incluyen los diapasones, los instrumentos musicales y los péndulos. En reposo, con el muelle relajado, un oscilador no posee ni energía cinética de movimiento ni energía potencial almacenada en el muelle estirado o comprimido. Pero después de darle un leve empujón, su energía pasa uniformemente de cinética a potencial y viceversa con una frecuencia fija cuya magnitud se simboliza con la letra f . Si de verdad no hubiera fricción, su energía total se mantendría constante, y el armonioso movimiento continuaría para siempre.

Como recurso provisional, solo un mero truco matemá-



tico, Planck imaginó que la energía calorífica total del objeto radiante (digamos una bola de gas caliente) se distribuía en un número muy grande (pero no infinito) de minúsculos osciladores, de diseño no especificado, cuya única función era almacenar energía vibrando a una frecuencia definida, emitiendo y absorbiendo constantemente luz con esa misma frecuencia. El modelo de Planck no concernía a ninguna de las otras muchas propiedades del gas (ni su composición química, ni su densidad, ni su resistencia eléctrica, por ejemplo). Era una idea inverosímil, pero visionaria.

Más adelante quedó claro que los vibradores diminutos imaginados por Planck son muy reales: de hecho, son los átomos y moléculas vibrantes que constituyen la bola de gas, los cuales ciertamente emiten y absorben luz. (La pared rígida en el modelo ficticio representa la gran masa de gas que rodea cada átomo vibrante y lo mantiene más o menos en su sitio.) Los átomos son numerosos, desde luego, pero su número en cualquier objeto real es contable (en principio, aunque no lo sea en la práctica) y finito. Por otra parte, los osciladores de Planck eran, en sus propias palabras, «un supuesto puramente formal, y no pensé demasiado en ellos». El objeto de este salto de la imaginación era descomponer el rango de frecuencias en una secuencia finita de valores discretos numerables, en analogía con los once valores discretos, de 2 a 12, de los lanzamientos de nuestros dados.

A continuación, Planck tenía que dividir el eje vertical, que representa la energía radiada, igualmente en pasos discretos, en correspondencia con el *número* de veces que aparece cada valor en nuestros lanzamientos de dados. A este fin, Planck introdujo el extraño supuesto, nunca antes oído, de que cada oscilador solo podía almacenar energía en minúsculas porciones iguales, átomos de energía, por así decirlo, o como los llamó el propio Planck, «elementos de ener-

gía». Esta era una hipótesis con más consecuencias que la mera subdivisión del eje de la frecuencia. Para cada oscilador, dividió la energía en paquetes iguales, admitiendo la posibilidad de que su magnitud fuera diferente, según la frecuencia. Si a ese paquete de energía lo llamamos e , un oscilador podría almacenar una energía total de 0, o e , o $2e$, o $3e$, y así sucesivamente. Nótese que esta secuencia no puede continuar hasta el infinito, porque la energía disponible es la que hay en la bola de gas, así que un oscilador puede almacenar la energía total disponible, pero no más. Al final, este sutil detalle marcó una diferencia crucial en el cálculo, porque mantenía la contabilidad dentro de límites finitos en vez de dispararse al infinito.

Para poder predecir una curva de radiación experimental, Planck tenía que averiguar el valor real de e . ¿Cuánta energía hay en uno de esos diminutos paquetes imaginarios? Sabiendo que, si la amplitud se mantenía constante, la energía de un oscilador ordinario aumentaría con la frecuencia, Planck supuso que la cantidad de energía en un paquete es proporcional a la frecuencia (simbolizada por f) de ese oscilador. (Cuanto mayor la vibración, mayor la energía cinética.) Matemáticamente, esto significa que el paquete fundamental e se obtiene multiplicando la frecuencia por una pequeña constante ajustable que llamó h . (Una constante ajustable, o *parámetro*, es un número que se ajusta según las circunstancias, y luego se fija.) En símbolos

$$e = hf.$$

Barajando mentalmente ese número astronómico de paquetes de energía almacenados en esa vasta colección de osciladores microscópicos, Planck fue capaz de contabilizar el *número de maneras* en que la energía total puede distribuir-

se entre los osciladores, y de trazar una curva de la energía en función de la frecuencia para la bola de gas en su totalidad. Como en el caso de nuestros datos, los lados izquierdo y derecho de la curva resultante estaban por debajo del pico central. Jugando con el valor de h para ajustar su valor a los datos, reprodujo las curvas de radiación medidas experimentalmente con asombrosa precisión.

Aunque este logro le valió el Premio Nobel, Planck esperó durante años que sus paquetes de energía no fueran más que una ayuda para el cálculo, y que un modelo más refinado restaurara la continuidad. No podía ignorar la constante h sin más, ni hacerla desaparecer, porque aparecía en la fórmula final para la curva de radiación medida en el laboratorio, pero tenía la esperanza de que los diminutos osciladores y sus paquetes de energía fueran meros artefactos (como líneas de cuadrícula luminosas proyectadas en una hoja de papel para facilitar el trazo, que se apagan una vez completada la gráfica).

Pero Planck se equivocaba por partida doble. Los osciladores, como he apuntado, resultaron ser los átomos y las moléculas. Los paquetes de energía se conocerían más tarde como los *cuantos* (de *quantum*, cantidad en latín) y el parámetro h , ahora llamado *constante de Planck*, se convirtió en la moneda fundamental del reino de la mecánica cuántica. El truco desesperado de Planck resultó ser el acto de apertura de la fundación de la física moderna.

En manos de Einstein, la formulita de Planck, $e = hf$, se convirtió en el icono de la mecánica cuántica, por así decirlo, igual que $E = mc^2$ se convirtió en el icono de la teoría de la relatividad. De las dos ecuaciones, la segunda es la más famosa, pero la primera es igual de poderosa. Mientras que la relación entre la energía y la masa se deriva de los principios fundamentales de la relatividad, la relación de Planck entre la

consiste en porciones indivisibles de una pinta».⁴ Si Planck había concebido tales porciones como residentes en la materia, Einstein propuso que la luz misma consiste en paquetes de energía, que llamó cuantos, y que más adelante se conocerían como *fotones*.

Los antiguos filósofos griegos llamados *atomistas* habían propuesto que la materia consiste en partículas individuales. Los *electrones*, las partículas indivisibles de la electricidad, fueron descubiertos a finales del siglo XIX. Pues bien, Einstein propuso que la luz, como la materia y la electricidad, bajo un examen muy de cerca, podría resultar tener también una naturaleza granulada.