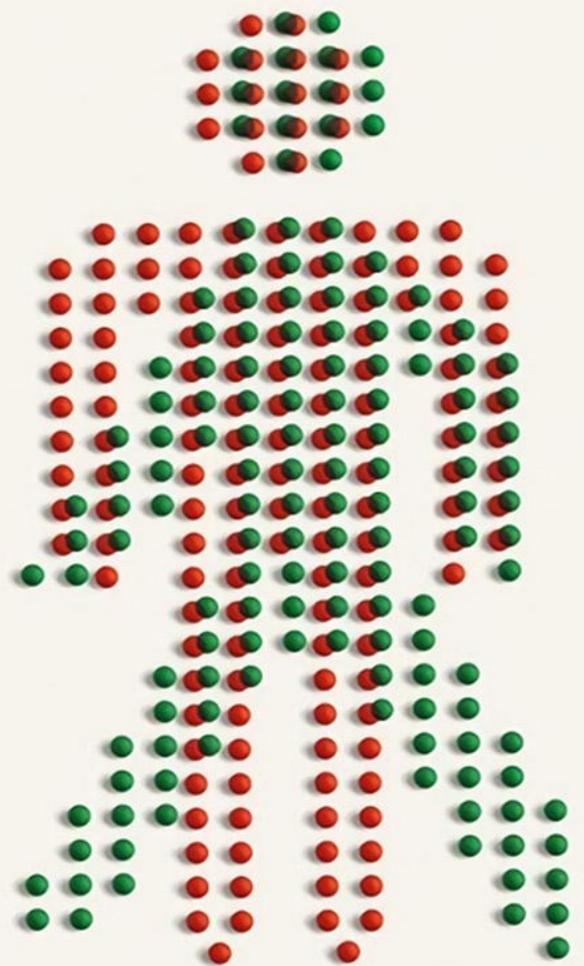


Hans
Christian
von Baeyer



La física cuántica del futuro

El QBismo y la nueva
interpretación
de la realidad



METATEMAS
LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Lectulandia

Este libro ofrece una sorprendente y renovada interpretación de las paradojas que suele arrojar la física cuántica y los misterios que envuelve el átomo. Asimismo, explica, de un modo accesible al lector común, las profundas implicaciones que la mecánica cuántica tiene con respecto a su aplicabilidad técnica y nuestra interacción con el mundo.

Hans Christian von Baeyer

La física cuántica del futuro

El QBismo y la nueva interpretación de la realidad

Metatemas - 138

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 28-07-2024

Título original: *QBism. The Future of Quantum Physics*
Hans Christian von Baeyer, 2016
Traducción: Ambrosio García Leal
Ilustraciones: Lili von Baeyer
Ilustración de portada: Diego Mallo

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r2.1





METATEMAS. LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA
COLECCIÓN CREADA POR JORGE WAGENSBERG^[1]

Para Barbara

Introducción

Soy un mecánico cuántico retirado. Después de cincuenta años dando clases de la asignatura en la universidad, manejando su maquinaria matemática en mis investigaciones, y esforzándome en hacer llegar su mensaje al gran público mediante conferencias, ensayos, libros y programas de televisión, la mecánica cuántica ha dejado su impronta en mí. Influye en mi forma de pensar en el universo.

Pero ya desde la escuela secundaria, cuando descubrí el mundo mágico de los *billares cuánticos* y las *selvas cuánticas* en los cuentos del señor Tompkins, el clásico de George Gamow, he tenido un fastidioso sentimiento de incomodidad con la mecánica cuántica^[2]. Es una teoría que funciona impecablemente y que nunca me ha fallado (ni a mí ni a nadie). Pero, aunque la usaba y la enseñaba, a un nivel profundo yo sabía que en realidad no la entendía. Sentía que me limitaba a seguir los movimientos que los pioneros de la teoría coreografiaron hace tiempo. Como todos los físicos, me desenvuelvo con soltura en la física newtoniana, también conocida como *física clásica*, y cuando la ocasión lo exige puedo recitar sus decretos por capítulo y versículo igual que un evangelista cita la Biblia, pero nunca he podido llegar a tener ese sentimiento de familiaridad con la mecánica cuántica. Y es que en ella hay una rareza que no radica en su complejidad matemática, sino en las paradojas y enigmas que la han atormentado desde su nacimiento. Uno de los más famosos de estos dilemas es la historia del desventurado gato de Schrödinger, al que según la mecánica cuántica se le supone vivo y muerto al mismo tiempo. Otros misterios incluyen la afirmación de que una partícula cuántica puede estar en dos sitios a la vez, de que las partículas pueden comportarse como ondas y las ondas como partículas, y de que la información se puede transmitir de forma instantánea. Se alude colectivamente a estos enigmas como *rareza cuántica*.

No pude hacer otra cosa que consolarme con las palabras del premio Nobel Richard Feynman. Aunque reconocido como uno de los físicos teóricos más importantes del siglo xx, se quejaba de que «nadie entiende la mecánica

cuántica», y eso le incluía a él. No obstante, esta angustiosa confesión no es que me confortara demasiado.

Y entonces sucedió lo inesperado. Justo cuando había empezado a pensar en mi jubilación y me había resignado a la melancólica convicción de que nunca me sentiría del todo cómodo con el cuanto, me topé con un artículo de Christopher Fuchs, un experto en el campo avanzado de la teoría de la información cuántica. Aunque no lo entendí muy bien, me pareció prometedor. Así que, conforme a la tradición de la comunidad científica, le invité a dar una charla en mi residencia académica, el *college* William and Mary de Virginia. Él aceptó, y así fue como empecé a saber de la nueva interpretación de la mecánica cuántica que él había contribuido a crear. Por razones que explicaré en este libro, se conoce como *bayesianismo cuántico* o, abreviadamente, *QBismo* (acrónimo del inglés *Quantum Bayesianism*). Este enfoque no atañe a los aspectos técnicos de la teoría que tan buen servicio me han hecho todos estos años, y que han conducido a la invención de tantos dispositivos que a su vez han propiciado industrias enteras que continúan transformando nuestras vidas. Lo que hace el bayesianismo cuántico es reinterpretar los fundamentos de la teoría y darles un nuevo significado.

Chris y yo nos hicimos amigos, y él me enseñó pacientemente cómo usar el QBismo para disipar buena parte de la rareza cuántica. Durante una década nos encontramos en congresos y seminarios, en lugares tan exóticos como un viejo castillo sueco, un laboratorio de ideas de alta tecnología en Canadá, un hotel en lo alto de una montaña de Suiza, o un deprimente auditorio de París, en cualquier sitio donde los físicos se congregaran para debatir los pros y los contras de este nuevo enfoque. Chris y yo nos visitamos mutuamente en nuestros domicilios familiares, intercambiamos innumerables mensajes por correo electrónico y vaciamos muchas botellas de vino juntos. De este modo la comprensión fue abriéndose paso gradualmente.

El QBismo es un enfoque radical y profundo, pero no particularmente difícil de entender. Si tardé tanto en asimilarlo es por el éxito de la mecánica cuántica convencional, la cual, con todas sus rarezas, es asombrosamente eficaz a la hora de explicar la naturaleza y hacer predicciones verificables. Como todos los físicos de mi generación, me eduqué en la tradición cómicamente descrita como la escuela de «¡Calla y calcula!». Nos enseñaron a aceptar la mecánica cuántica como un hecho, a usarla para explicar resultados de experimentos y diseñar artilugios, sin preocuparnos de su significado profundo. «¡Acostumbraos a ella!» era una versión más suave de «¡Calla y calcula!». Se nos exhortó a dejar a un lado nuestras reticencias filosóficas y dedicarnos a resolver problemas prácticos. Superar esa disposición mental lleva su tiempo.

Nuestra actitud condescendiente comenzó a cambiar en el nuevo milenio con la maduración de la teoría de la información cuántica, que reveló

potenciales insospechados de la mecánica cuántica. Estos se plasmaron en aplicaciones tan geniales como la criptografía cuántica (para crear códigos indescifrables) y la computación cuántica (para resolver problemas irresolubles). La primera ya es una realidad comercial, mientras que la segunda está en vías de llevarse a la práctica en un futuro no muy lejano. Espoleada por el rápido progreso tecnológico, la comunidad de físicos está comenzando a mirar de otra manera el verdadero significado de la mecánica cuántica. Ahora un joven investigador que muestre interés en estudiar sus fundamentos ya no es despachado como un simple soñador. A Chris y sus colaboradores les corresponde el mérito de haber estimulado este nuevo y fructífero interés en examinar el saber recibido, de haber agitado un cazo que había estado a fuego lento durante demasiado tiempo.

En vista de que el mensaje del QBismo se iba difundiendo poco a poco entre la comunidad de físicos, decidí que ya era hora de escribir este libro para quienes no tengan un acceso fácil a las fórmulas y ecuaciones matemáticas. Hace unos veinticinco años, en un libro sobre el efecto de las nuevas y espectaculares imágenes de átomos individuales en la física popular, escribí con más esperanza que convicción: «El vínculo de comprensión que estamos [...] estableciendo con el átomo le dotará de un significado más profundo, hasta que algún día una idea simple y profunda resolverá el enigma del cuanto». Bueno, ese día aún no ha llegado, pero no tengo ninguna duda de que, igual que los avances de la microscopía nos familiarizaron más con el átomo en el siglo xx, la esencia profunda y simple del QBismo nos llevará más cerca de entender el cuanto en el siglo xxi.

La primera sección de este libro, titulada «Mecánica cuántica», introduce la versión convencional de la teoría en términos no matemáticos. Para transmitir una intuición de su significado, recorro a metáforas y analogías con cosas familiares y experiencias cotidianas. Haber estudiado física en la escuela secundaria facilitará la comprensión, pero no es imprescindible.

En la sección siguiente, «Probabilidad», llevo a cabo una comparación entre la interpretación «frecuentista» tradicional de la probabilidad, tal como se enseña en secundaria, y la menos familiar probabilidad bayesiana. Un punto central en esta discusión es la distinción fundamental —y a menudo pasada por alto— entre la teoría matemática formal de la probabilidad y sus aplicaciones en el mundo real.

Tras esta preparación, el núcleo del libro describe cómo la mecánica cuántica y la probabilidad bayesiana se combinan en el bayesianismo cuántico, y cómo esta nueva interpretación disuelve la rareza cuántica.

La última sección, «La visión QBista del mundo», algo más filosófica, concierne a las lecciones más significativas que se extraen del QBismo, su significado profundo, aquello con lo que debemos quedarnos. El QBismo implica cambios en la actitud tradicional hacia los fundamentos de la visión

científica del mundo. ¿Cuál es la naturaleza de las «leyes de la naturaleza»? ¿Determinan totalmente estas leyes la evolución del universo, o tenemos libre albedrío para influir en ella? ¿Cómo nos relacionamos con el mundo material, del que somos a la vez parte y observador? ¿Qué es el tiempo? ¿Dónde están los límites de la comprensión humana? Todas estas cuestiones, contempladas desde el punto de vista del QBismo, se tratan en esta sección. El capítulo final echa un vistazo al posible desarrollo de esta interpretación de aquí en adelante.

El QBismo es algo más que vino viejo en botella nueva, no es solo una interpretación más de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica ha coloreado mi visión del mundo; el QBismo la ha transformado.

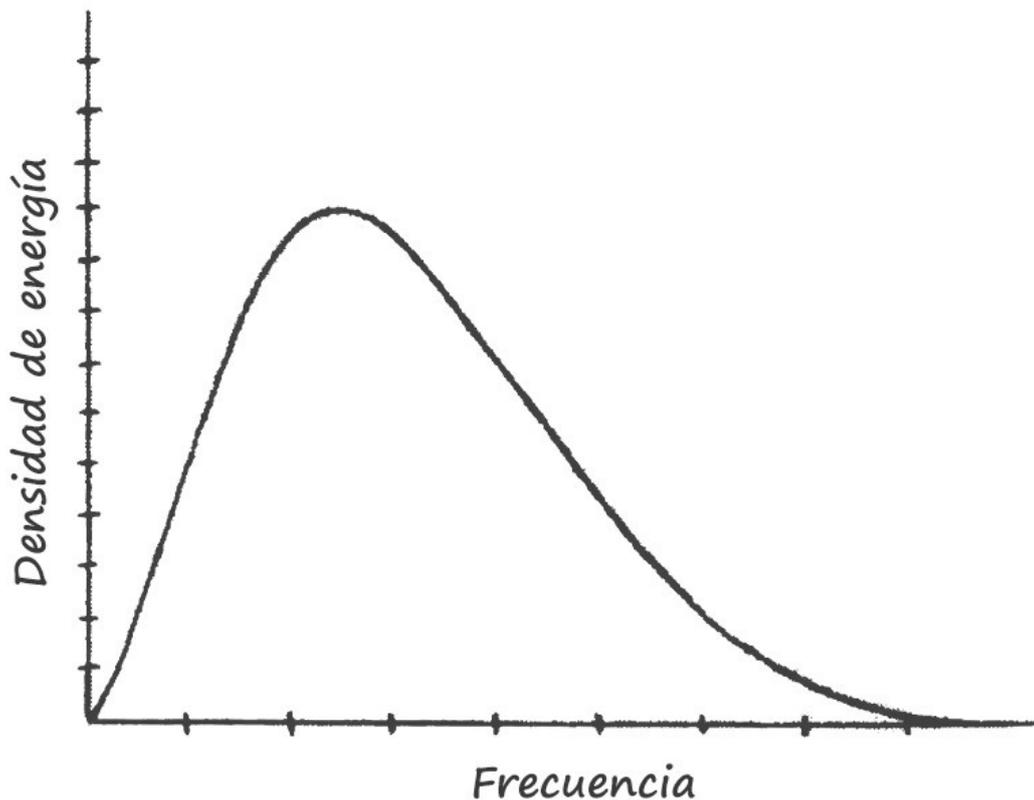
PRIMERA PARTE
Mecánica cuántica

El nacimiento del cuanto

Según su creador, el físico alemán Max Planck (1858-1947), la concepción del cuanto fue un «acto de desesperación»^[3]. 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^[4]. 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

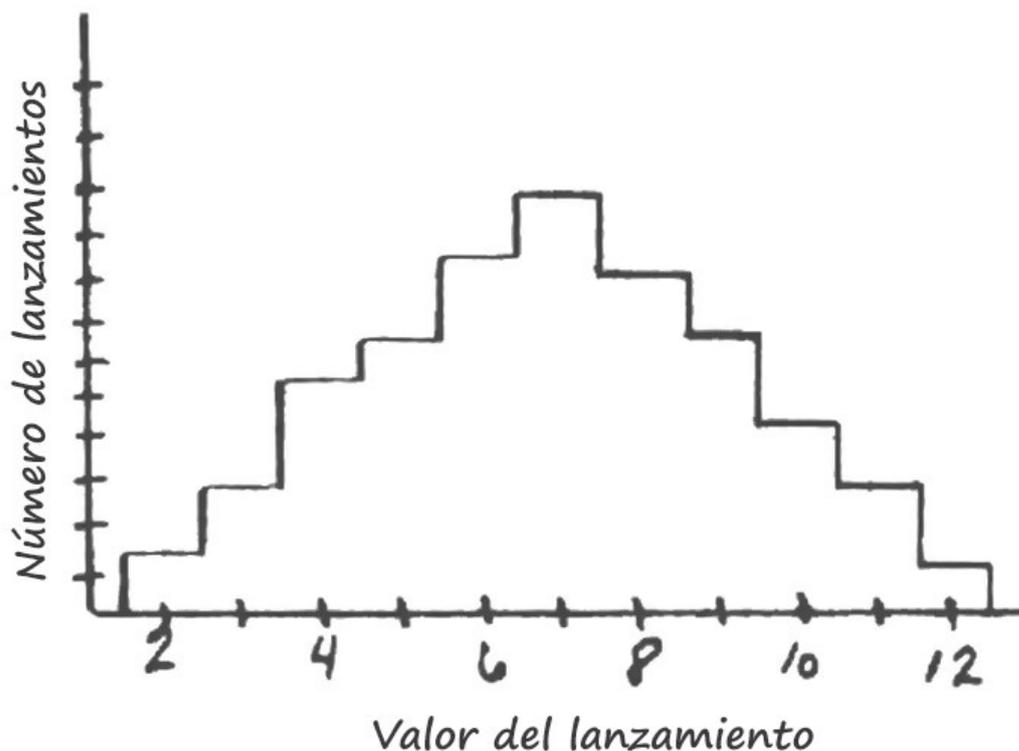
dónde se sitúa el pico. La curva de radiación del sol, por ejemplo, tiene su pico en la parte amarilla del espectro. A la izquierda, en la banda infrarroja y la roja, no se emite demasiada energía. A medida que la frecuencia aumenta, la curva alcanza un máximo en la banda amarilla y luego vuelve a caer 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.

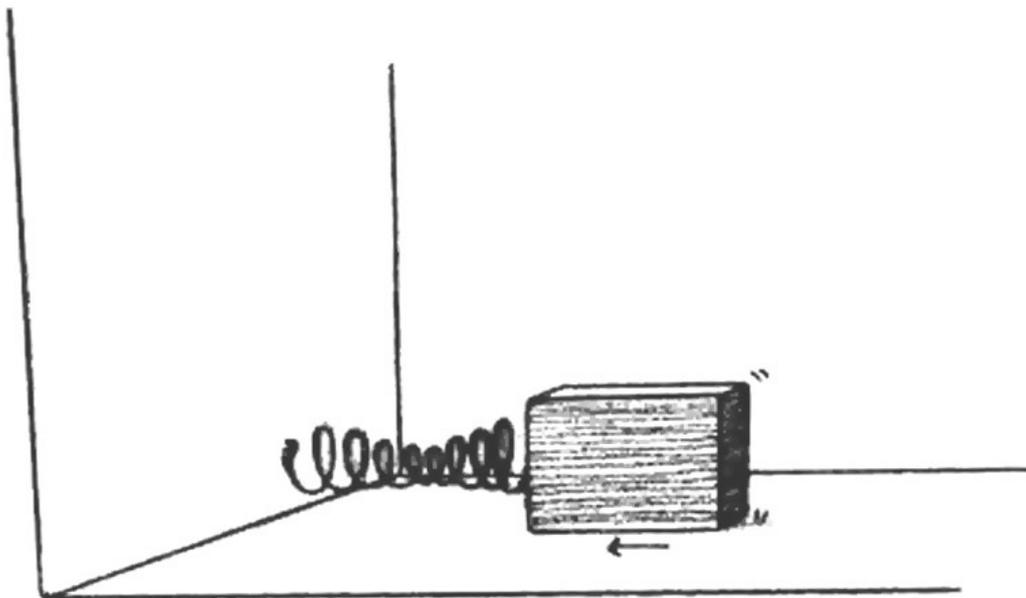
Planck decidió hacer algo similar con la curva de la radiación. Para ello tenía que convertir un problema continuo en uno discreto. En el experimento con los dados, ambos ejes, horizontal y vertical, se refieren a cantidades numerables (ambas se miden mediante números enteros). Por otro lado, en la curva 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 matemático, 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 energía». 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 distribuirse 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 dados, 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.

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.

Partículas de luz

No sabemos exactamente cómo se le ocurrieron a Einstein esas ideas tan radicales y enormemente influyentes, pero nos dejó unas cuantas pistas. Cuando le preguntaron: «¿Qué es el pensamiento?», sugirió que no se origina en palabras o ecuaciones, sino en «el juego libre de las imágenes», un proceso que podríamos describir como ensoñación, o garabateo, o dejar que las imágenes mentales se superpongan como los vidrios coloreados dentro de un caleidoscopio. Pero eso, continuó Einstein, aún no es pensamiento. Si surge alguna pauta de manera repetida en el juego de las imágenes, puede sugerir un concepto novedoso. Y si finalmente ese concepto se formula en palabras o símbolos matemáticos, ¡eureka!, ha nacido una idea.

En 1905, su año milagroso en el que sorprendió a sus colegas con su teoría especial de la relatividad, Einstein también abordó el misterio del efecto fotoeléctrico. Cuando la luz incide en la superficie de ciertas placas metálicas, libera electrones expulsándolos del metal. Dado que los electrones tienen carga negativa, su salida deja la placa con carga positiva. Cuando el efecto se estudió en detalle, surgieron dos enigmas. Como era de esperar, los electrones emergentes exhibían una variedad de energías (supuestamente, rebotan de manera errática dentro del metal, lo que les resta velocidad de salida). Pero con luz monocromática, siempre parecía haber una energía máxima, un umbral que ningún electrón podía superar. Aunque se incrementara la intensidad de la luz (bañando la placa de metal en un flujo de energía óptica que libera un torrente de electrones), la velocidad máxima o la energía de los electrones emitidos no aumentaba. ¿Qué los retenía?

El otro enigma del efecto fotoeléctrico surgía cuando se comparaban diferentes metales y diferentes colores de luz. Para cada metal había una frecuencia lumínica umbral, por debajo de la cual la emisión cesaba. En otras palabras, si la frecuencia de la luz era demasiado baja (si su color era «demasiado rojo») no se liberaban electrones, con independencia de la

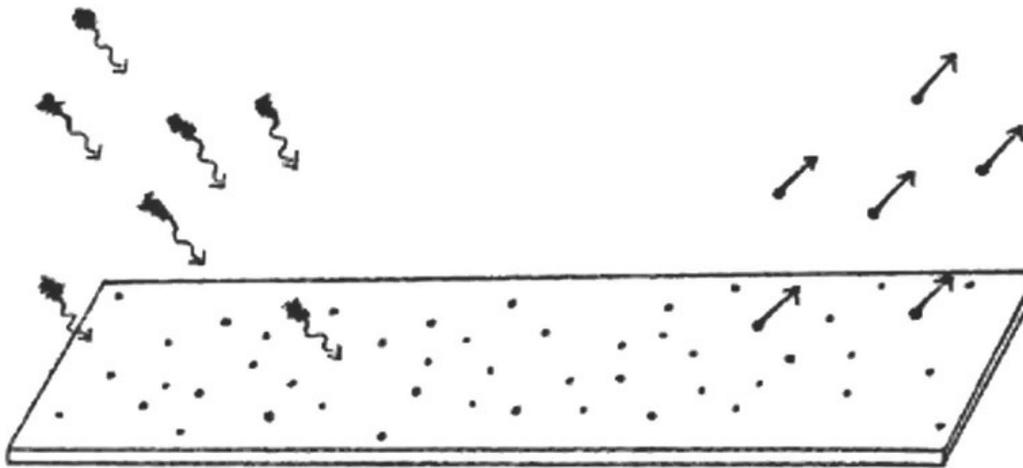
intensidad de la iluminación. ¿A qué se debe que la luz del extremo rojo del espectro sea incapaz de desalojar electrones de un metal?

Ninguna de estas dos observaciones, la energía máxima de los electrones y la frecuencia mínima de la luz, tiene sentido en el esquema clásico de las cosas. Que la luz consiste en ondas se había demostrado de manera concluyente a principios del siglo XIX. Luego los físicos aprendieron a describir las ondas lumínicas como campos eléctricos y magnéticos débiles que oscilaban rápidamente mientras se propagaban por el espacio a la velocidad de la luz. Imaginar los electrones como guijarros en la playa, y la luz como olas oceánicas que los barren, una imagen que Einstein pudo haber considerado en un principio, no sugiere ninguna razón para las peculiaridades del efecto fotoeléctrico. Pero en ciertas circunstancias habría un límite para la velocidad máxima de los electrones. Estimulados por los éxitos del atomismo, imaginemos que las ondas de luz incidentes en realidad consisten en paquetes discretos de alguna clase. Estos paquetes no pueden ser ni átomos ni moléculas, porque sabemos que la luz no está hecha de materia. Pero si los paquetes imaginarios de luz de un color concreto tuvieran todos la misma energía, y uno de estos paquetes golpeará de lleno un único guijarro, este podría absorber toda la energía del paquete de luz, pero no más. (Los jugadores de billar saben que una bola que golpee de lleno una bola estacionaria le transferirá toda su energía, pero no más). En este modelo habría un valor máximo de las energías de los electrones, tal como se observa.

En este punto Einstein habría recordado el retorcido razonamiento de Planck, que cinco años antes le había llevado, aunque a regañadientes, a adoptar la hipótesis de que la materia emite luz en paquetes de energía $e = hf$. Aunque el efecto fotoeléctrico examinado por Einstein no está relacionado con las curvas de radiación de materia caliente de Planck, ambos fenómenos tienen que ver con la naturaleza de la luz al nivel más íntimo. Solo la amplitud del juego de imágenes de Einstein le permitió vislumbrar que ambos conjuntos de experimentos (uno relativo a luz absorbida y otro, a luz emitida) podrían compartir un mismo patrón. Su paso crucial fue hacer extensiva la hipótesis atómica de la materia y la electricidad (donde había tenido éxitos brillantes) a la luz. Llámesele paquete o cuanto, hoy el «átomo» de luz se denomina fotón, y de hecho es la segunda partícula auténticamente elemental descubierta, después del electrón. Sirvió como modelo para muchas otras partículas elementales por descubrir (la última la famosa partícula de Higgs, detectada en 2012 tras medio siglo de búsqueda).

Einstein reemplazó la imagen de los guijarros azotados por las olas en la playa por la de un chorro de fotones incidiendo en un cúmulo de electrones más o menos estacionarios incluidos en una placa metálica. De vez en cuando un fotón golpea un electrón y entrega su carga de energía e (desapareciendo en el proceso como un copo de nieve que se funde en la mano). El electrón

sale entonces disparado, rebotando en los átomos cercanos en una trayectoria zigzagante, hasta abandonar finalmente su prisión. Por el camino puede perder algo de su energía e inicial, pero, y esta es la cuestión, *no adquiere más energía*. Si se incrementa la intensidad de la luz incidente aumenta el número de fotones absorbidos, pero cada uno transporta la misma energía e . La máxima energía que absorben los electrones individuales afectados sigue siendo la misma, solo que el número de electrones emitidos aumenta. Esto resuelve el primer enigma.



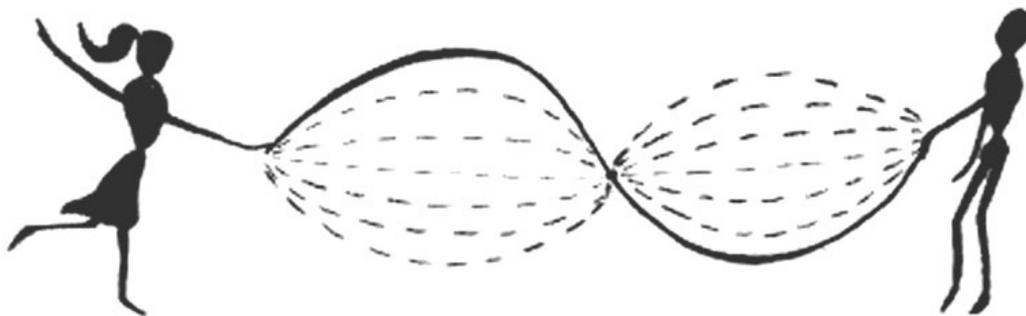
La solución al segundo enigma tuvo que encantarle a Einstein cuando la vislumbró en primera instancia. ¿Por qué hay una frecuencia mínima —un color «más rojo»— por debajo de la cual el efecto fotoeléctrico deja de funcionar? La respuesta es que la atracción eléctrica de los núcleos positivos del metal mantiene los electrones en su placa (como ranas en un pozo). No pueden escapar a menos que un fotón les dé un empujón. Y si el empujón es insuficiente, los electrones simplemente se quedan en el metal. Si el color de la luz es demasiado rojo, la frecuencia de la luz incidente será demasiado baja y, según la fórmula de Planck, la energía de cada fotón será demasiado débil para proporcionar el empujón requerido. Cada metal tiene una frecuencia mínima natural por debajo de la cual la luz incidente, por intensa que sea, no puede sacar los electrones de la placa.

La demostración de la validez del modelo de Einstein del efecto fotoeléctrico, basada en la imagen de fotones que chocan con electrones más o menos estacionarios, supuso más de una década de trabajo experimental minucioso, pero los resultados fueron convincentes cuando llegaron: la luz está compuesta de partículas.

La demostración experimental de que la luz está compuesta de ondas es igual de persuasiva y mucho más simple. Fue Thomas Young (1773-1829)

quien la llevó a cabo en 1803, un siglo antes de la hipótesis de los cuantos de Planck y Einstein.

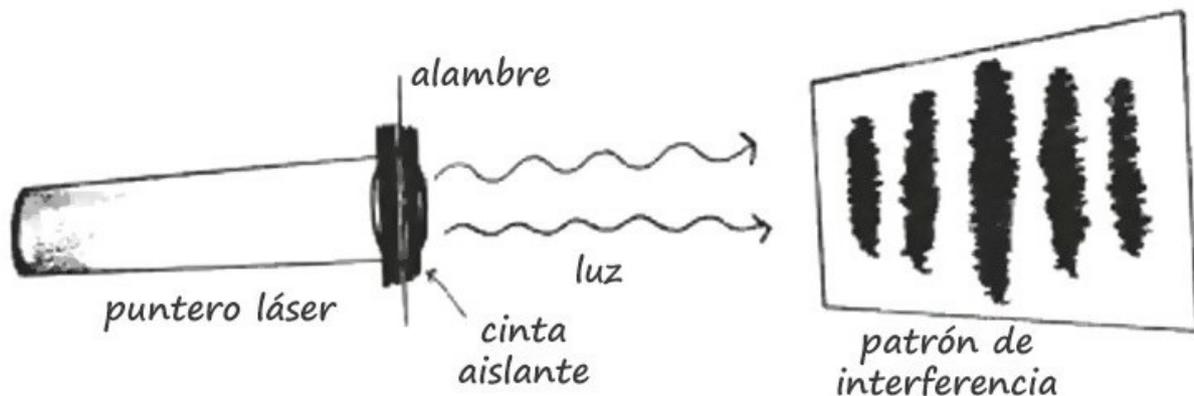
La seña de identidad de las ondas, lo que las distingue inequívocamente de las partículas, es el hecho de que en circunstancias especiales las ondas pueden cancelarse mutuamente y anularse, un truco conocido como *interferencia destructiva*, que el sentido común nos dice que no puede tener nada que ver con bolas de billar, canicas ni ninguna otra partícula ordinaria. Considérense dos ondas idénticas que llegan al mismo punto desde direcciones diferentes. Allí donde coinciden tiene lugar una *superposición*, lo que significa que ocupan la misma posición «una encima de otra», como dos imágenes fotográficas superpuestas. Si resulta que las dos ondas están completamente desfasadas, de manera que las crestas de una coincidan con los valles de la otra, ambas se cancelarán siempre que estén en sincronía. Tales zonas oscuras de interferencia destructiva son comunes en la naturaleza, si se sabe dónde mirar. Las olas del mar, las ondas sonoras y las ondas generadas por los niños agitando una cuerda pueden exhibir estos reveladores puntos muertos. (Si las ondas están en fase de manera que las crestas y valles de ambas se suman, se refuerzan mutuamente en lo que se conoce como *interferencia constructiva*).



La invención del láser, en sí mismo un producto de la mecánica cuántica, ha facilitado la observación de la interferencia destructiva. En YouTube pueden encontrarse vídeos de demostraciones caseras de bandas de interferencia con los términos de búsqueda «Experimento de interferencia de la doble rendija». Uno de ellos hace uso de un puntero láser tapado con una doble rendija hecha con trozos de cinta aislante a ambos lados de un alambre: ■|■. Si se proyecta la luz láser a través de las dos rendijas en una pared se genera un patrón de interferencia^[7]. Los haces de luz que salen por ambas rendijas están perfectamente en fase, pero a cada punto de la pared llega luz procedente de dos fuentes. Dado que las distancias desde cada rendija son ligeramente diferentes (salvo para los puntos situados en la línea media), las ondas estarán en fase o desfase dependiendo del punto de incidencia en la pared. Lo que

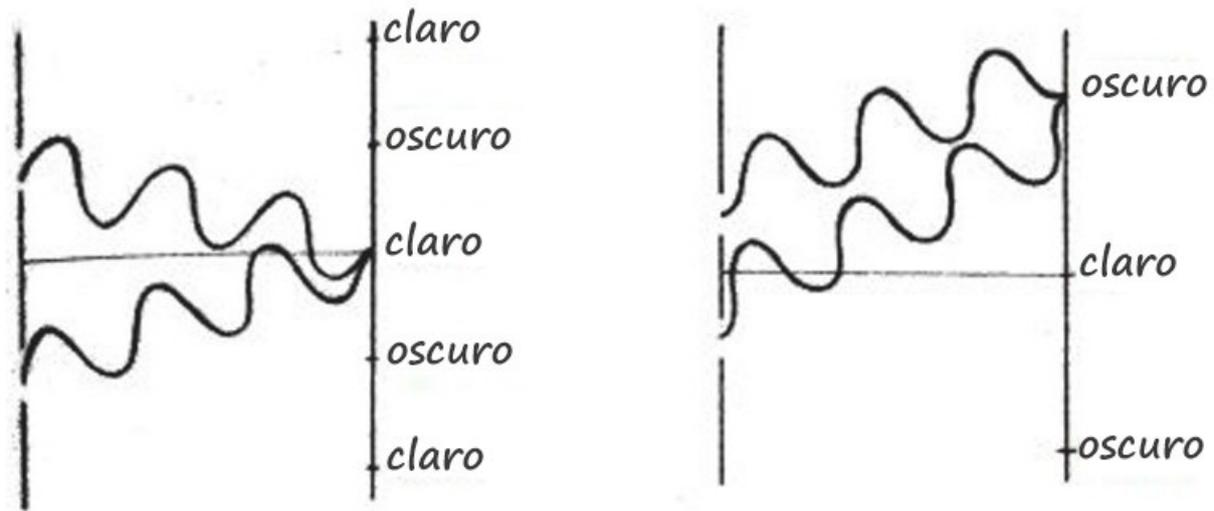
vemos es un patrón de bandas paralelas en la pared, alternativamente claras y oscuras.

Hay que hacer una acotación acerca del uso de ranuras como fuentes de luz en vez de agujeros. Para que la interferencia se haga visible, los agujeros deben ser pequeños y estar muy juntos. Esta limitación impide que los agujeros dejen pasar mucha luz. Pero si los sustituimos por dos ranuras estrechas, que pueden ser tan largas como queramos, podemos tener más luz y una imagen mejor, aunque las dos fuentes sigan siendo estrechas y estén muy juntas. Por esta razón el experimento suele hacerse con rendijas en vez de agujeros.



Las bandas luminosas en la pantalla se sitúan allí donde los haces de luz procedentes de ambas ranuras se refuerzan mutuamente, y las bandas oscuras donde se cancelan. Esta es la prueba de que la luz consiste en ondas.

De hecho, una vez que se sabe que la luz tiene propiedades de onda, se pueden encontrar efectos de interferencia por doquier. La interferencia es la responsable de las iridiscencias en las burbujas de jabón, por ejemplo. Cuando un haz de luz incide en la pared de una burbuja de jabón, que consiste en una delgada película de agua, es reflejado por dos superficies. La parte reflejada por la cara interna después de atravesar la película de agua queda ligeramente desfasada respecto de la parte reflejada por la cara externa. La cuantía de este desfase depende del grosor de la película de agua, y también de la frecuencia, o color, de la luz. Cuando los dos haces se recombinan antes de alcanzar nuestros ojos, las ondas desfasadas se anulan mutuamente y desaparecen del espectro, y las que están en fase se refuerzan. Así, grosores diferentes de la pared de la burbuja favorecerán colores diferentes, y estos colores cambian cuando la burbuja gira, se bambolea y se deforma. La naturaleza, a su manera inimitablemente llamativa, revela de este modo la naturaleza ondulatoria de la luz, que se hace casi tan obvia como la de la superficie oceánica.



Otras muestras de interferencia incluyen los reflejos iridiscentes de los discos compactos cuando se miran oblicuamente, los de las alas de las mariposas, los preciosos tonos del nácar de las conchas, las iridiscencias de las películas de grasa sobre el asfalto cuando llueve y hasta los dibujos del plumaje de los pavos reales. La naturaleza nos dice de todas estas maneras que la luz se comporta como las ondas. Pero es mucho más reacia a revelar que la luz también puede comportarse como una lluvia de partículas. Hizo falta un oscuro fenómeno —el efecto fotoeléctrico— y la imaginación única de Albert Einstein para desentrañar ese aspecto oculto de esa cosa maravillosa y ubicua llamada luz.

¿Cómo tenemos que pensar en la luz, entonces, como una onda electromagnética que se propaga por el espacio o como un chorro de partículas fantasmales?

Dualidad onda/partícula

Los fotones son bichos raros. Si repitiéramos el experimento de la doble rendija y preserváramos las imágenes de los fotones incidentes (igual que una diana de papel preserva los agujeros de bala hechos por un rifle), podríamos seguir el desarrollo gradual de la imagen y observar ambas mitades de la doble personalidad de la luz, su dualidad onda/partícula, al mismo tiempo. Rebájese la intensidad de la luz hasta que solo se emita alrededor de un fotón por minuto, en promedio. Al principio la pantalla estará en blanco, hasta que —*ping*— aparece un puntito en alguna parte, que anuncia la llegada de un fotón. Al cabo de un minuto, más o menos, aparece otro punto en otra parte. Los intervalos entre puntos son aleatorios: *ping*-pausa-*ping ping ping*-pausa larga-*ping ping*-pausa corta-*ping ping ping ping*. Y así sucesivamente. Durante largo tiempo los puntos parecen repartirse aleatoriamente por la pantalla. Pero después de cientos de impactos se empieza a vislumbrar un patrón. A intervalos regulares, bandas vacías cruzan la imagen, paralelas a la orientación de ambas rendijas. Y si esperamos lo bastante para registrar miles de fotones en la pantalla, surge el patrón de bandas característico de la interferencia de doble rendija.



Los puntos corresponden a partículas discretas, pero las bandas proporcionan una evidencia irrefutable de la existencia de ondas. Podríamos estar tentados

de encogernos de hombros y aducir que las ondas en el agua también consisten en miríadas de partículas, en este caso moléculas de H_2O , así que el hecho de que la luz tenga un aspecto ondulatorio y otro granular no sería tan extraño. La sutil diferencia está en la sincronía. Las olas del mar (como las olas del público de los estadios de fútbol) están constituidas por incontables unidades, cada una conectada a sus vecinas de algún modo y actuando de manera concertada, pero los fotones del láser llegan separados por intervalos largos, así que no puede haber conexión o comunicación que les permita coordinar su comportamiento. Podrían llegar separados por horas en vez de minutos, con el mismo resultado. Es como si diez mil espectadores ciegos y sordos en un estadio se las arreglaran para componer una ola perfecta sin tocarse unos a otros. Parece cosa de magia. Es extraño.

Si a los físicos de principios del siglo xx les pareció desconcertante la dualidad onda/partícula de los fotones, pronto se encontrarían con sorpresas aún mayores. A partir de 1923, descubrieron no solo que las ondas pueden comportarse como partículas, sino que las partículas también pueden comportarse como ondas. Los electrones, considerados partículas, pueden actuar como una onda. La prueba de esta asombrosa afirmación recurre a un procedimiento análogo en todos sus detalles al experimento de la doble rendija con láser, solo que aquí el láser se cambia por un fino haz de electrones —también de intensidad variable— y las rendijas deben ser mucho más estrechas y estar mucho más juntas que en el experimento de interferencia casero. Por último, en lugar de una pared blanca o una placa fotográfica, una pantalla fluorescente emite un destello allí donde incide un electrón. Pero el resultado es exactamente el mismo: aparecen puntos a intervalos aleatorios en posiciones impredecibles, pero gradualmente se genera un patrón de bandas de interferencia perfectamente paralelas (léase más sobre esto en el capítulo 5).

La dualidad onda/partícula está representada, con fina ironía histórica, por una pareja de físicos británicos, padre e hijo, que contribuyeron a poner los cimientos de lo que se acabaría conociendo como la teoría cuántica. En 1906, J.J. Thomson (1856-1940), uno de los grandes maestros de la física experimental de su tiempo, ganó un Premio Nobel por demostrar que los electrones son partículas trazando sus trayectorias parabólicas a través de campos eléctricos, a imitación de las trayectorias de las bolas de golf sometidas al campo gravitatorio de la Tierra. Treinta y un años más tarde, su hijo G.P. Thomson (1892-1975), siguiendo los pasos de su padre, obtuvo su propio Premio Nobel por demostrar que los electrones son ondas, al poner de manifiesto su interferencia destructiva. El padre, que también era un elegante escritor, sintetizó así el dilema: «[La visión onda/partícula] es como una lucha entre un tigre y un tiburón: cada uno es el rey en su propio elemento, pero se encuentra desvalido en el del otro». Contemplar un fotón o un electrón como

una partícula no puede explicar la interferencia de doble rendija; contemplarlos como ondas no nos dice nada del efecto fotoeléctrico o las trayectorias arqueadas de los electrones. La teoría de la onda y la teoría de la partícula parecen incompatibles.

La sentencia de J.J. Thomson se refiere a esta diferencia entre ambas teorías, tan fundamental como la que hay entre un tigre y un tiburón, a la hora de describir el comportamiento de fotones y electrones observados en circunstancias distintas. Esa explicación no satisface nuestra ansia de comprensión auténtica. La meta de la física no es contar un relato convincente sobre cada objeto y cada suceso en el mundo material, sino crear una teoría única, épica y coherente para describir la naturaleza. Nadie estaba más motivado por esta pasión unificadora que Einstein, inductor de la rivalidad entre tigres y tiburones en primera instancia. Ya en 1909, cuatro años después de proponer que la luz consiste en partículas, y dieciséis años antes del nacimiento de la mecánica cuántica, en una charla durante una reunión de físicos alemanes predijo lo siguiente: «Creo que la próxima fase en el avance de la física teórica nos traerá una teoría de la luz que pueda considerarse una fusión de las teorías [ondulatoria y corpuscular]». Sabía bien lo que se necesitaba, aunque al final no estuviera enteramente satisfecho con la solución ofrecida.

El problema con la dualidad onda/partícula es fácil de ver. Ondas y partículas son categorías derivadas de la observación del mundo cotidiano, macroscópico y newtoniano que nos rodea, y simplemente son inadecuadas para el dominio de los átomos. Los fotones no son como olas o balas, y los electrones tampoco. Ambos tienen ciertas propiedades que comparten con las ondas y con las partículas, pero no comparten todas sus características. ¿Por qué deberían? No podemos encogernos, como Alicia en el País de las Maravillas, hasta las dimensiones de un átomo para ver por nosotros mismos cómo se comportan las partículas elementales a su propia escala. Lo mejor que podemos hacer es ayudarnos de nuestra imaginación para pintar un cuadro consistente que explique lógicamente todas las observaciones en nuestros laboratorios a escala humana.

Para mediar entre las categorías incompatibles de «onda» y «partícula» se propusieron términos como *ondícula* o *partonda* para describir el electrón, pero por fortuna estas denominaciones tan malsonantes como poco informativas nunca cuajaron. Más pintoresca es la analogía animal de mi difunto amigo Rolf Winter, quien, inspirándose en J.J. Thomson, comparó el electrón con un ornitorrinco. Cuando los exploradores de Australia trajeron los primeros especímenes de ornitorrinco conocidos en el siglo XVIII, los doctos naturalistas de las universidades europeas dictaminaron que eran falsificaciones compuestas con partes de otros animales. Alegaron que «los mamíferos no ponen huevos, ni los reptiles amamantan a sus crías». Por lo

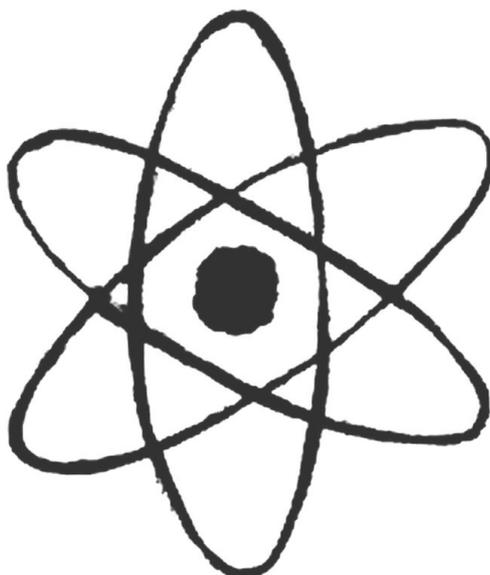
tanto, «un animal que sea a la vez mamífero y reptil no puede existir, así que es una patraña», sentenciaron. Pero las categorías que habían ideado sobre la base de sus propias observaciones limitadas resultaron ser inadecuadas para describir la profusión de criaturas en la Tierra. De modo similar, los fotones y los electrones son partículas que pueden comportarse como ondas, y ondas que pueden comportarse como partículas. Al igual que el ornitorrinco, se saltan alegremente las categorías que hemos derivado de precedentes inapropiados.

Para ir más allá de la invención de términos inútiles o la comparación con animales exóticos se requería un enfoque más radical. La fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular reclamada por Einstein en 1909 no llegó hasta el nacimiento oficial de la mecánica cuántica en 1925, pero el bebé comenzó a dar patadas bastante antes de ver la luz.

En 1913, el físico danés Niels Bohr (1885-1962) construyó el primer modelo exitoso del interior de un átomo. Conforme al proverbial hábito de los físicos de comenzar por lo más simple, Bohr centró su atención en el hidrógeno, el primer elemento de la tabla periódica, y el más ligero. Inspirándose en una audaz analogía con el sistema solar, describió un único electrón girando en torno a un núcleo central, igual que la Tierra gira alrededor del Sol. Solo ciertas órbitas discretas, cuyos radios venían dados por la magnitud de la constante de Planck, estaban permitidas. El átomo absorbía (o emitía) fotones con energías dadas por la ecuación de Planck-Einstein $e = hf$, y su electrón subía (o bajaba) los peldaños de la escalera de órbitas posibles. El cuadro resultante se perfiló rápidamente para incluir órbitas elípticas además de circulares, para obedecer las leyes de la relatividad especial y para describir átomos más complicados que el de hidrógeno. El celebrado «modelo de Bohr» dio origen a la que acabaría convirtiéndose en una de las caricaturas más reconocibles de la ciencia: la ubicua imagen de un átomo representado como un punto en el centro de tres elipses que simbolizan las trayectorias de tres electrones (probablemente el átomo de litio, el tercer elemento de la tabla periódica).

Este pequeño icono, reproducido en incontables variantes, se reconoce universalmente como la representación de un átomo, y ha sido adoptado como logotipo por empresas de alta tecnología, agencias gubernamentales y productos de consumo. Revolotea por la pantalla del televisor entre escena y escena de la serie *The Big Bang Theory*, y en todo el mundo sugiere poder, ya sea de una pasta de dientes o de un grupo de expertos. El mensaje de este logotipo es tan simple y convincente que sigue siendo dominante en la enseñanza secundaria y define la comprensión pública mayoritaria de la estructura atómica.

Por desgracia, también es un modelo fundamentalmente erróneo.



En 1919, solo seis años después de introducirlo, el mismo Bohr se vio obligado a rechazarlo porque era una mala representación de lo que ya entonces se sabía del comportamiento de los electrones dentro de los átomos. El modelo de Bohr describe la trayectoria del único electrón del átomo de hidrógeno como una órbita alrededor del núcleo (también conocido como protón). La estructura resultante es tan plana como una torta, pero sabemos, observando su interacción con otras partículas, que desde fuera parece más bien una bola de algodón difusa, al menos en su estado normal no perturbado.

Peor aún, el logotipo sugiere que el electrón está todo el tiempo separado del núcleo por el radio de su órbita, una distancia conocida como el *radio de Bohr*. Pero los experimentos evidencian que el electrón puede detectarse no solo en la superficie del átomo, sino en cualquier parte *dentro* de la bola de nieve.

Pero el error más garrafal e imperdonable del modelo de Bohr es más fundamental que estas cuestiones técnicas. Al presuponer trayectorias nítidas y bien definidas, el modelo ignora la dualidad onda/partícula del electrón y da preferencia a su naturaleza corpuscular. El modelo de Bohr es un retroceso a la física newtoniana, en la que una partícula describe una trayectoria continua, con posiciones y velocidades bien definidas en cada punto de la misma. Hablar de electrones en átomos igual que hablamos de órbitas planetarias es algo que se ha desterrado del lenguaje de la física desde hace un siglo.

Por su evocación de una imagen mental vívida, el modelo de Bohr capturó la imaginación de la ciencia popular hasta un grado alarmante. Como un monumento a la paralización del progreso, sugiere que en la física atómica no ha cambiado nada en un centenar de años. Ninguna otra ciencia fundamental da esa impresión: ni la cosmología, con su pasmosa sucesión de nuevos descubrimientos, como la expansión acelerada del universo, la enigmática

materia oscura y su correspondiente *energía oscura*; ni la astronomía, con su cosecha diaria de imágenes asombrosas de objetos distantes brillantemente coloreados; ni la biología, con su creciente comprensión de la estructura cerebral, las sutilezas del genoma humano y los inconcebibles productos de la evolución. El icono atómico universal está tan actualizado como un caballo o una calesa para representar un aparcamiento o un dibujo del aeroplano de los hermanos Wright para señalar la dirección de un aeropuerto.

El modelo de Bohr fue un paso importante en el desarrollo de la mecánica cuántica, pero hace mucho que dejó de ser útil. Aunque la dualidad onda/partícula lo haga todo más complicado, me parece que valdría la pena reemplazar el viejo icono por otro más propio del siglo XXI. Quizá se podría organizar un concurso público ligado a la celebración del centenario del nacimiento de la mecánica cuántica en 1925.

La función de onda

La meta de la física es explicar el funcionamiento del mundo no vivo. Al principio los filósofos se encargaron de describir las propiedades de los objetos reales: los movimientos de los planetas en el cielo nocturno, la formación de hielo o el sonido de una lira. Cuando la atención se dirigió a cosas que no podían verse o medirse con tanta facilidad, los físicos idearon modelos mecánicos para representar los objetos reales. Los atomistas griegos postularon partículas invisibles moviéndose en el vacío en lugar de materia continua, Max Planck imaginó innumerables osciladores diminutos en una bola de gas caliente y Niels Bohr visualizó el átomo de hidrógeno como un sistema solar microscópico.

Pero los modelos mecánicos también acabaron fallando, y en consecuencia se abandonaron y se sustituyeron por modelos matemáticos mucho más abstractos. Comparados con sus predecesores, estos modelos matemáticos son espartanos. Consisten en ecuaciones y fórmulas sin la textura, el color, el detalle visual —en fin, sin el rico atractivo— de sus parientes mecánicos. (¿Quién puede escapar a la inagotable fascinación de las casas de muñecas y los modelos de barcos o trenes?). Pero un modelo matemático compensa lo que le falta de encanto sobradamente con su ganancia de generalidad y poder predictivo. La ley de la gravitación universal de Newton fue durante siglos el ejemplo reinante de descripción puramente matemática de un fenómeno natural^[8]. Ha resistido los fútiles esfuerzos de generaciones de físicos profesionales y aficionados empeñados en revestir de carne su esqueleto «explicando» cómo el impulso mecánico de partículas invisibles o el arremolinamiento de algún fluido universal «causa» la gravedad. Y aun así, ¡cuán inmensa es la riqueza de información astronómica y terrestre comprendida en esa pequeña parcela de ocho símbolos, disponible para ser desvelada por los que sepan leer su mensaje!

Cuando llegó el momento de concebir una teoría del átomo, las categorías tradicionales se demostraron inadecuadas. Las órbitas y velocidades de los

electrones en la capa externa de los átomos resultaron ser inaccesibles. Los átomos emitían ondas de luz que se revelaban como partículas; los electrones actuaban como ondas. La física atómica rompió los esquemas.

Viendo que ningún modelo mecánico podía imitar de manera convincente la dualidad onda/partícula, un puñado de físicos ingeniosos marcaron el inicio de la revolución cuántica sobre la base de un modelo matemático. Su objetivo era capturar en lenguaje matemático los hechos extraños revelados por los experimentos de física atómica, sin apelar a ninguna descripción pintoresca de la realidad subyacente. Fue un movimiento osado que muchos de sus colegas encontraron difícil de tragar. Pero los modelos matemáticos de los fenómenos cuánticos dieron un fruto espectacular.

El gran salto fue separar el objeto de su descripción. «No nos fijemos en el electrón mismo», advirtieron los inventores de la mecánica cuántica, a veces de manera explícita y más a menudo de manera implícita. «No intentemos siquiera imaginar un artefacto que *actúe* como un electrón. En vez de eso, busquemos un conjunto de ecuaciones matemáticas que predigan el comportamiento del electrón en el laboratorio. La matemática no tiene que parecerse a nada semejante a una onda o una partícula, ni siquiera un ornitorrinco». Y para deleite suyo, tuvieron éxito.

El artefacto que les permitió salirse con la suya era una fórmula cuyo inventor, Erwin Schrödinger (1887-1961), llamó *función de onda*. La función de onda no solo codifica las propiedades de un sistema cuántico particular, sino que también incluye los detalles esenciales del experimento específico efectuado con ese sistema. Así pues, no hay una única función de onda, sino una para cada montaje de laboratorio particular. En la mayoría de los casos la representación gráfica de la función de onda no se parece en nada a una onda. Solo su nombre continúa recordándonos la propiedad crucial que tienen en común los sistemas cuánticos: la posibilidad de superposición y de interferencia constructiva o destructiva (la capacidad de dos ondas de estar en el mismo punto y hasta de cancelarse mutuamente).

La forma matemática de la función de onda suele ser bastante complicada, mucho más que una ecuación del estilo de $E = mc^2$ o $e = hf$. Por esa razón no expondré ningún ejemplo de función de onda real. Pero eso no significa que no podamos hablar de ellas. No hace falta saber leer una partitura para disfrutar de la música.

Una analogía aún más atrevida que la imagen de Bohr del átomo de hidrógeno como un sistema solar en miniatura fue la que inspiró la construcción de la función de onda. Uno de los problemas de la física atómica más desconcertantes para los físicos clásicos era el carácter discreto de las energías atómicas. A diferencia de nuestros satélites artificiales, que pueden orbitar el globo terráqueo a cualquier distancia con una cantidad de energía

arbitraria, los electrones confinados en los átomos solo se encuentran con energías discretas y definidas. ¿De dónde surge esta restricción?

El mejor ejemplo de la aparición, como por arte de magia, de valores discretos a partir de un continuo es la música. Se sabe desde tiempo inmemorial que los instrumentos musicales como las liras, los tambores y las flautas producen tonos fundamentales individuales, junto con sus armónicos. Cuando las ondas están confinadas en un espacio restringido (la longitud fija de una cuerda, un parche de tambor circular, el interior hueco de una flauta) generan sonidos con un tono puro, en vez del ruido que podría esperarse. El tono corresponde a la frecuencia de la onda sonora que transporta la nota, y la música se genera combinando distintas frecuencias. La cuestión es esta: en vista de que un átomo no se parece a una flauta más que en el hecho de que confina electrones, mientras que el tubo de una flauta confina aire en vibración, ¿cómo puede el bien conocido carácter discreto de las *frecuencias* de los instrumentos musicales ayudarnos a explicar el misterioso carácter discreto de las energías en los átomos?

La respuesta, por supuesto, vino sugerida por el primer precursor de la teoría cuántica, la conexión fundamental entre energía y frecuencia expresada por la celebrada relación de Planck-Einstein, $e = hf$.

El desafío para los artífices de la mecánica cuántica era encontrar una fórmula matemática para una onda con frecuencias discretas —inspirada en las fórmulas bien conocidas para las ondas sonoras generadas por instrumentos musicales— que, a través de la relación $e = hf$, diese los niveles de energía de un átomo. Dicha fórmula no describiría el átomo mismo, sino que predeciría la escalera observable de sus niveles de energía. Erwin Schrödinger acertó a encontrar un procedimiento general para componer una ecuación matemática cuya solución, a su vez, es su celebrada función de onda.

La teoría cuántica puede verse como la ciencia de construir funciones de onda y extraer de ellas predicciones de resultados medibles. Con el tiempo se han desarrollado técnicas sofisticadas para dicha tarea, primero con la ayuda de reglas de cálculo y luego con ordenadores. Los sistemas estudiados de esta manera han progresado desde las partículas y los átomos individuales hasta materiales masivos, el interior de las estrellas y hasta el universo primordial entero. Hasta la fecha, la mecánica cuántica ha pasado todos los exámenes experimentales con matrícula de honor.

El primer sistema objeto de tratamiento mecanocuántico no fue un átomo, ni siquiera un electrón, sino el artefacto del que partió todo: el oscilador armónico. Su descripción matemática solo tiene en cuenta su masa y su frecuencia única e invariante. (La tensión del muelle que fuerza a la masa a volver a su punto de reposo puede deducirse de estas dos variables, así que no necesita figurar en el formalismo de manera explícita). Como era de esperar,

la constante de Planck h , la piedra angular de la mecánica cuántica, tiene un papel clave en el cálculo. Establece la escala de las cosas, igual que una regla discretamente colocada al lado de la imagen nos da la escala de una zanja recién excavada en la foto de un arqueólogo.

Como un cobaya teórico, el oscilador tenía la ventaja de su descarnada simplicidad, pero su punto flaco era que en el siglo XX no había osciladores reales de masa y muelle lo bastante pequeños para que los efectos cuánticos fueran apreciables^[9]. Como mucho, el cálculo mecanocuántico sirvió como ejercicio de calentamiento para proyectos más difíciles, como la descripción del átomo de hidrógeno, que se abordó subsiguientemente y se ajustó a las mediciones de laboratorio. Aun así, incluso el oscilador mecánico ilustra algunas de las inusuales diferencias entre la mecánica cuántica y la mecánica newtoniana ordinaria.

La desesperada conjetura de Planck, que las energías de un oscilador armónico son múltiplos de $e = hf$, resultó ser casi correcta, pero no del todo. Sorprendentemente, la escalera de energías permitidas no parte del suelo, sino que la energía mínima es la mitad de un cuanto, y las energías permitidas son los extraños múltiplos de esta cantidad: $e/2, 3e/2, 5e/2\dots$ Planck tuvo suerte porque las *diferencias* entre los niveles de energía, que determinan cuánta energía irradia o absorbe un oscilador particular, son de hecho múltiplos de e , y eso era todo lo que necesitaba presuponer. Un oscilador cuántico no puede radiar o absorber una energía de, digamos, $46,7 hf$ del mismo modo que un tendero no puede aceptar un pago o dar un cambio de 46,7 céntimos en moneda. ¡Simplemente no puede hacerse! Y si intentamos restarle al oscilador toda su energía para hacer que se detenga, no podremos. Como un niño hiperactivo, nunca se está quieto. No obstante, al ser h tan pequeña, el temblor residual de un oscilador al que se le ha privado de toda la energía que puede ceder es muy difícil de detectar. Aun así, la evidencia experimental ha confirmado esta peculiar predicción de la mecánica cuántica.

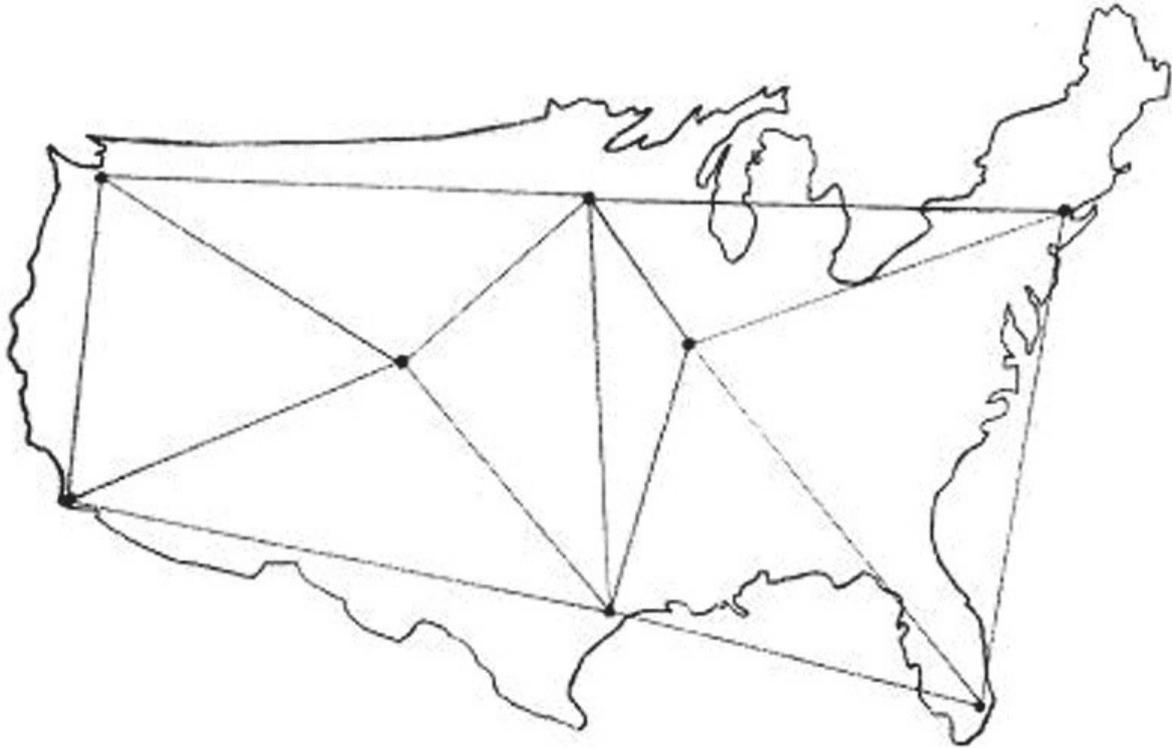
Además de la cuantización de la energía, la función de onda implica superposición. De acuerdo con la física clásica, la posición y la velocidad de un objeto están siempre definidas con precisión. En contraste, la posición y la velocidad codificadas en la función de onda de un oscilador, o de cualquier partícula, pueden distribuirse simultáneamente en un rango —una superposición— de distintos valores. Nótese que no he afirmado que la posición y la velocidad de una partícula puedan estar distribuidas. El enunciado correcto es que la posición y la velocidad *codificadas en la función de onda* pueden estar distribuidas. Esta es una distinción importante sobre la que volveré enseguida.

La función de onda viene a ser como un mapa. De la mejor clase posible, de hecho, porque codifica todo lo que puede decirse de un sistema cuántico. Aquí hay que hacer notar que la información contenida en un mapa ordinario

no tiene por qué representarse como un diagrama en una lámina de papel o un globo. Los atlas de carreteras, por ejemplo, a menudo incluyen una hoja de cálculo de las distancias y los tiempos de los trayectos entre ciudades. Para simplificar las cosas, imaginemos que las distancias no son kilómetros reales a lo largo de carreteras reales, sino que se miden en línea recta, «a vuelo de pájaro». Imaginemos una versión expandida de esta hoja de cálculo con diez mil ciudades estadounidenses. En principio es fácil reconstruir el mapa convencional entero a partir de los datos. Veamos cómo: colóquese San Luis en mitad de la página, colóquese Nueva York cerca del margen derecho, y busquemos la distancia entre ambas ciudades en la hoja de cálculo. Esto nos da la escala: cuántos kilómetros corresponden a un centímetro de nuestro mapa. Luego búsquense las distancias entre ambas ciudades y Miami, y conviértanse en centímetros. Dado que un triángulo queda completamente determinado por sus tres lados, sabremos dónde situar Miami. Hágase lo mismo con el resto de las ciudades para componer el mapa entero. Los astrónomos emplean un tercer método consistente en listar las coordenadas de millones de estrellas en gruesos catálogos, sin molestarse en situarlas en láminas o globos. Mapas, hojas de cálculo y catálogos pueden usarse para registrar los mismos conjuntos de datos. Aunque parezcan diferentes, son equivalentes a muchos efectos. Del mismo modo, la información contenida en una función de onda puede representarse mediante una fórmula, una hoja de cálculo, una lista de números o una imagen gráfica.

De hecho, la primera descripción mecanocuántica de un oscilador se expresó en términos de una hoja de cálculo, lo que los matemáticos llaman *matriz*. Estas matrices, a su vez, enseguida se demostraron matemáticamente equivalentes a las funciones de onda. Puesto que las segundas son más fáciles de imaginar que las primeras, en la mayor parte de lo que sigue me atenderé a las funciones de onda.

Una de las trampas más comunes en las que cae la gente —incluso los físicos profesionales— ante los enigmas de la mecánica cuántica es olvidar la diferencia entre un objeto y su representación. En un contexto diferente, el filósofo Alfred Korzybski expresó memorablemente esta distinción cuando acuñó la máxima «El mapa no es el territorio». Esta frase es un sucinto recordatorio de la obviedad de que la descripción de un objeto no es lo mismo que el objeto en sí. Así como la palabra *casa* no es lo mismo que una casa real de ladrillo y mortero, un modelo de la realidad no es lo mismo que la realidad. Korzybski quería advertir del equívoco que surge cuando el mapa se confunde con el territorio. Aplicada a la mecánica cuántica, su máxima nos hace sospechar que parte de la extrañeza del mundo cuántico podría residir más en la función de onda que en la naturaleza misma. ¿Podría ser que la extrañeza esté en el mapa y no en el territorio?



De niños aprendemos a leer mapas a base de explorar la relación entre un callejero y la realidad de asfalto y hormigón que representa. ¿Qué pasa por nuestras mentes cuando levantamos la vista de la pequeña imagen bidimensional y estática e intentamos hacerla cuadrar con el inmenso y turbulento mundo tridimensional que nos rodea, y a la inversa, cuando esbozamos un diagrama esquemático simple de la compleja escena del mundo real ante nosotros? Este proceso de comparar el mapa con el territorio es tan difícil que hay quienes nunca llegan a dominarlo. La inclusión de movimiento, como en la pantalla de un GPS, confunde aún más a algunos. Una barrera similar ha obstaculizado la comprensión de la mecánica cuántica. En el mundo cuántico, la función de onda de Schrödinger sirve como una suerte de mapa en evolución construido en el ordenador personal de un teórico. Pero si es como un mapa, ¿qué se supone que representa exactamente? ¿Cómo se supone que se relaciona con el paisaje atómico real?

«El experimento más bello de la física»

La función de onda es una forma matemática que codifica información sobre un sistema cuántico. La función de onda del oscilador cuántico revela que la minúscula máquina almacena cantidades de energía discretas (a diferencia de un diapasón ordinario, que adquiere una cantidad arbitraria de energía dependiendo de la fuerza con que se golpea). De modo similar, la función de onda del átomo de hidrógeno implica que la energía está restringida a escalones o niveles discretos, pero el esquema de estos niveles de energía es mucho más complicado que el del oscilador^[10].

Además de predecir niveles de energía, la función de onda predice los resultados de incontables experimentos con un sistema cuántico. La maquinaria matemática bien engrasada de la mecánica cuántica incluye recetas para construir la función de onda de cualquier montaje experimental concebible e instrucciones para calcular los resultados de medidas y observaciones. Pero en vez de entrar en estas cuestiones técnicas, vamos a intentar abordar el significado de la función de onda volviendo al misterio del que partió todo este lío: la dualidad onda/partícula de un electrón. Veamos cómo maneja ese enigma la función de onda.

Para ello, comparemos la descripción física del vuelo de dos proyectiles muy diferentes: una bala de rifle y un electrón.

Primero la bala. Para simplificar, ignoraremos la gravedad y la resistencia del aire. Una vez que la bala sale del cañón, no hay más fuerzas ejercidas sobre ella, así que, de acuerdo con la ley del movimiento de Newton, continuará en línea recta a velocidad constante hasta que alcance su diana, que supondremos de madera^[11]. Aquí encuentra de pronto una fuerza de frenado que, de acuerdo una vez más con la ley del movimiento, la frena hasta que se detiene. Después de pararse la bala es apretada desde todas las direcciones, pero no experimenta una fuerza neta y permanece en reposo (todavía en consonancia con la ley newtoniana).

La precisión del tiro depende del tirador y su equipo. Se dice que la legendaria tiradora Annie Oakley era capaz de darle a una moneda de diez centavos lanzada al aire. Hoy, asistidos por un sofisticado y exorbitantemente caro equipo que incluye láseres, lentes y ordenadores, hasta los aficionados pueden superarla. La física clásica no impone ningún límite a la puntería. Si la posición y la velocidad de la bala en el momento del disparo están determinadas dentro de ciertos límites, su punto de impacto puede predecirse dentro de unos límites correspondientes. En principio, aunque no en la práctica, la precisión podría ser perfecta. Con un rifle lo bastante bueno, una vista lo bastante aguda y una mano lo bastante firme, Annie podría haber acertado a cualquier punto escogido de la moneda de diez centavos.

Ahora el electrón. Lo disparamos con un dispositivo llamado *cañón de electrones*. ¿Sabíais que estas armas llegaron a ser más habituales en los hogares norteamericanos que las escopetas de caza? Los cañones de electrones eran componentes esenciales de los televisores antiguos, y estaban ocultos en la parte trasera del tubo de rayos catódicos, detrás de la pantalla. Ahora no se ven mucho porque los televisores de pantalla plana no los emplean. Ignorando, como antes, cualquier fuerza que pueda intervenir, consideremos la trayectoria de un electrón desde el cañón hasta la pantalla, donde se detiene y genera un punto visible.

El físico cuántico, incapaz de seguir la trayectoria del electrón directamente, calcula su función de onda. Para hacerlo necesita conocer los detalles geométricos del cañón de electrones, así como la velocidad de salida del proyectil. La representación gráfica de esta función de onda, en contraste con la del oscilador armónico y la del electrón en el átomo, sí que se parece a una onda que emana del cañón y se propaga hasta la pantalla. Como la onda que genera una piedra al caer en el agua, la función de onda se expande a medida que avanza hacia la pantalla. Cuando el electrón choca con la pantalla, ocurre un milagro. De manera súbita e inexplicable, la función de onda colapsa en un punto de la pantalla. Justo antes del impacto, está ampliamente dispersa en el espacio; después del impacto, el valor numérico de la función de onda se hace insignificante en todas partes menos en el puntito que marca la llegada del electrón.

Este fenómeno, conocido como el *colapso de la función de onda*, nos señala el camino hacia su comprensión. Es en su interpretación errónea, que abordaremos en el capítulo siguiente, donde reside su extrañeza.

Si el cañón de electrones dispara una y otra vez, dibuja un patrón de puntos individuales en la pantalla. Este patrón nos da una pista crucial para entender el significado de la función de onda. Los puntos que marcan la llegada de electrones se distribuyen aleatoriamente dentro del patrón. Por aleatorio entendemos que el punto de impacto es impredecible, que no

obedece a razón o ley alguna. Esa palabrita, *aleatorio*, describe una diferencia clave entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica.

Por supuesto, Annie Oakley no se habría sorprendido. Tras ajustar su disparo a las condiciones atmosféricas, las peculiaridades de su arma y su propio pulso, siempre le daba a la moneda, pero los impactos de bala se distribuían aleatoriamente por su superficie. «No hay manera de mejorar esto», podría haber pensado. No obstante, el físico clásico insiste en que la trayectoria de una bala es predecible con el nivel de precisión que se quiera (dando por sentado que los detalles del sistema entero se conocen con la precisión requerida). En la física clásica la aleatoriedad estadística se debe solo a la ignorancia de los detalles pequeños o la falta de control sobre ellos. Es lo que yo llamo *azar de Annie Oakley*. En principio, aunque no en la práctica, el azar está ausente de la física clásica. Por ejemplo, los lanzamientos de monedas se suponen auténticamente aleatorios, pero los lanzamientos a cargo de lanzadoras mecánicas pueden predecirse. El azar de Annie Oakley puede eliminarse (no de manera absoluta, pero tan cerca de cero como queramos y podamos permitirnos).

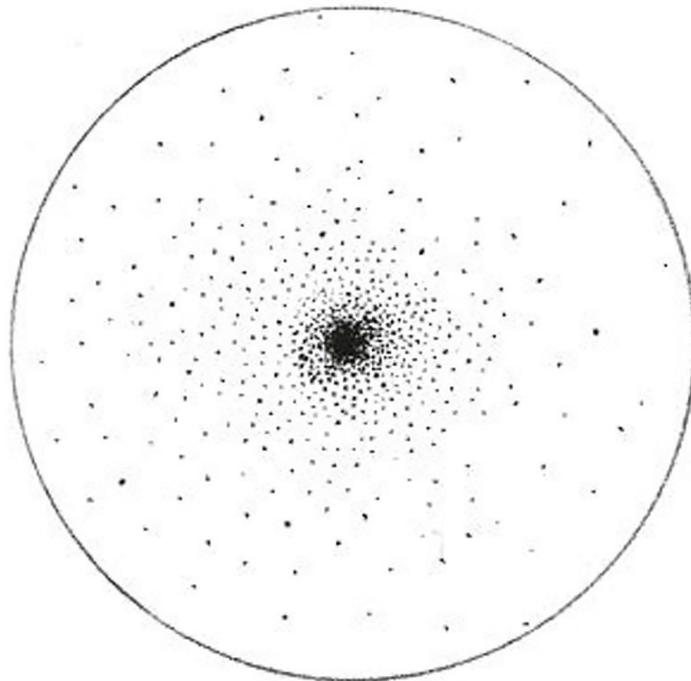
En marcado contraste, la aleatoriedad del cañón de electrones es insoslayable. Una vez incorporadas las barras de error adecuadas sobre las dimensiones del cañón y la velocidad de los electrones en la descripción del experimento, la extensión de la función de onda impone una fuente adicional de aleatoriedad inevitable. En los primeros días de la mecánica cuántica, a la comunidad de físicos le costó admitir este *azar cuántico*. Einstein nunca lo aceptó: iba en contra de toda la física que había aprendido en su larga y espectacularmente triunfal carrera. Le «olía» mal, y dado que su aguda intuición científica raramente le había engañado, proclamó desafiante sus dudas sobre la naciente teoría cuántica, a la que él tanto había contribuido, y que estaba cosechando éxitos a un ritmo asombroso. Sus ingeniosamente argumentadas objeciones mantendrían a los físicos trabajando para demostrar que estaba equivocado hasta años después de su muerte. Al final se salieron con la suya: el azar cuántico ciertamente existe. Pero unos cuantos de sus más leales defensores todavía esperan que Einstein se vea finalmente vindicado.

El azar cuántico (también conocido como *azar esencial* o *intrínseco*) viola una ley que ha sido una piedra angular de la física desde Aristóteles: la ley de causa y efecto. Se supone que todo efecto tiene una causa. A menudo la causa es difícil de determinar, pero se da por sentado que existe. Así, si la bala de Annie Oakley da en la *L* en vez de la *Y* de la palabra *LIBERTY* que aparece en una moneda de diez centavos, imaginamos que, si nos esforzamos lo suficiente, seríamos capaces de encontrar la causa exacta del error. El electrón, por otro lado, obedece leyes cuánticas que niegan del todo esta posibilidad. Para un físico clásico como Einstein, abandonar la ley de causa y efecto equivalía poco menos que a abandonar la empresa misma de la física.

Descubriremos que el QBismo emplaza la física sobre unos fundamentos diferentes y más resistentes, capaces de sustentar el azar intrínseco.

El patrón de puntos generado por un cañón de electrones señala el camino que lleva a entender el significado de la función de onda. Si los impactos fueran enteramente impredecibles, constelaciones irregulares de puntos llegarían a cubrir toda la pantalla. No sabríamos nada en absoluto de las trayectorias de los electrones. Pero el caso es que sabemos algo (en realidad mucho). La función de onda describe con precisión el ojo de buey simétricamente redondo en el que se concentran los puntos, e incluso la densidad decreciente de puntos a medida que nos alejamos del centro. Así pues, un cañón de electrones nos ofrece un ejemplo de aleatoriedad mezclada con conocimiento parcial.

Esta mezcla es la regla en ciencia. La certeza absoluta y la ignorancia absoluta son las excepciones. Por ejemplo, las barras de error acompañan todas las mediciones físicas. Incluso en la vida diaria, los extremos de la certeza absoluta y el azar perfecto son raros. Pensemos en las predicciones meteorológicas y del tráfico rodado. En ambos casos podemos predecir mucho, pero no todos los detalles. La herramienta matemática para tratar tales situaciones es la *probabilidad*, una noción tan fundamental en la mecánica cuántica como la constante de Planck h . Pero, como veremos, el concepto de probabilidad resultará sorprendentemente engañoso.



La nube de puntos en la pantalla generada por un cañón de electrones sugiere que la función de onda no describe electrones como tales, sino probabilidades. En particular, la función de onda evaluada un instante antes del impacto

determina la probabilidad de que un electrón incida en un punto dado de la pantalla.

La interpretación de la función de onda en términos de probabilidad es el auténtico cambio de juego que la mecánica cuántica impone en la física^[12].

En el capítulo 3 hemos visto que el experimento de la doble rendija con electrones pone de manifiesto la mezcla de azar y ley: dentro del patrón de bandas descrito con precisión por la interferencia de ondas procedentes de dos fuentes separadas, los fotones individuales se registran como puntos repartidos aleatoriamente sobre una placa fotográfica.

En su monumental libro de texto *The Feynman Lectures on Physics* [Las conferencias de Física de Feynman], publicado en 1965 (el año que yo comencé a dar clases de física), Richard Feynman comenzaba su discusión de la mecánica cuántica con una descripción detallada, aunque hipotética, del experimento de la doble rendija con electrones en vez de fotones. A la izquierda tenemos un cañón de electrones, en medio una doble rendija minúscula, y a la derecha una pantalla fluorescente que genera un punto de luz cada vez que un electrón incide en ella. En 2002 los lectores de la revista británica *Physics World* eligieron este diseño como «el experimento más bello de la física».

Antes de que se publicara el libro de Feynman ya se habían llevado a cabo ensayos previos de este experimento, pero hubo que esperar hasta 2013, cuando la tecnología había madurado lo suficiente, para llevar a la práctica el experimento mental de Feynman tal como lo había descrito él mismo medio siglo antes. Aparte de la dificultad de disparar y detectar electrones individuales, un gran impedimento práctico había sido el tamaño de las rendijas. En la versión moderna son de dimensiones nanométricas ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ milmillonésima de metro} = 1 \text{ millonésima de milímetro}$), una hazaña de ingeniería imposible de replicar en casa con alambre y cinta aislante. Un vídeo que muestra cómo surge lentamente el patrón de bandas a partir de puntos distribuidos aleatoriamente es una visión fascinante de la mecánica cuántica en acción^[13].

Además de poner de manifiesto la dualidad onda/partícula y el azar cuántico, el experimento ilustra convincentemente la propagación de la función de onda. Cada rendija tiene una anchura de unos setenta nanómetros. Este número representa nuestra ignorancia de la posición lateral exacta del electrón cuando sale del cañón. Por otro lado, el patrón de bandas en la pantalla detectora mide unos trescientos micrómetros de extremo a extremo. Para que las dos partes de la función de onda se superpongan y haya interferencia, cada una debe haberse expandido en anchura por un factor de 5000 en su camino de la rendija a la pantalla. Es evidente que la función de onda se expande considerablemente.

Al contemplar este experimento, es demasiado fácil caer en el error. Los haces de luz emitidos por un puntero láser y dirigidos a una doble rendija se expanden, se interfieren y generan patrones de bandas. Nuestra mente sustituye inadvertidamente los haces de electrones por la luz láser, y no ve lo extraordinario de este resultado. Lo que no debemos olvidar es que los electrones atraviesan el dispositivo uno a uno. Su flujo es tan débil que si quitáramos la doble rendija y la pantalla en el experimento de 2013 y simplemente apuntáramos el cañón hacia la ventana, los electrones irían uno tras otro en el aire como patitos en fila, solo que separados entre sí por unos dos mil kilómetros. Cada electrón individual viaja estrictamente por su cuenta. La doble rendija divide solo la función de onda en dos partes que se interfieren, no el electrón. Y sin embargo, a pesar de estar lejos de la influencia de sus compañeros, cada electrón se las arregla de algún modo para evitar ir a parar a las zonas prohibidas de la pantalla, como guiado por una fuerza invisible.

El equipo que llevó a cabo la versión moderna del experimento de la doble rendija calculó la función de onda del electrón con sumo cuidado, basándose en las medidas de sus aparatos, barras de error y demás. Este cálculo realista es mucho más complicado y tedioso que el cálculo idealizado y simplificado del libro de texto de Feynman. Después de medir las posiciones de muchos miles de electrones en la pantalla, los físicos compararon el patrón de interferencia observado de puntos, por lo demás distribuidos de manera aleatoria, con el resultado del cálculo mecanocuántico. Su lacónico comentario final justificaba su esfuerzo hercúleo: «Vemos justo lo que predice la mecánica cuántica».

Feynman dijo que el enigma de la doble rendija es el «único misterio» de la mecánica cuántica. Esta afirmación es un tanto hiperbólica, porque algunos efectos cuánticos no pueden explicarse como «mera» interferencia, como pronto descubriremos. No obstante, Feynman, que no solo era un gran físico sino también un docente inspirador, consiguió consagrar el experimento de la doble rendija con electrones como el ejemplo prototípico de la mecánica cuántica en acción.

Y entonces ocurre un milagro

Si contemplar electrones aislados dibujando lentamente un patrón de bandas en una pantalla es una experiencia perturbadora, pensar en el colapso de su función de onda es aún más desconcertante. Para ver por qué, es útil volver a la comparación de un cañón de electrones con un rifle. En un momento dado tenemos una bala que vuela a velocidad constante, y en el momento siguiente impacta en la diana y se detiene de golpe. De modo similar, la función de onda del electrón avanza expandiéndose, conforme a las leyes de la mecánica cuántica, y luego su carácter cambia súbitamente cuando aparece un punto en la pantalla. Hay algunas similitudes entre ambos casos, pero la diferencia, aunque no se aprecie de manera inmediata, es llamativa.

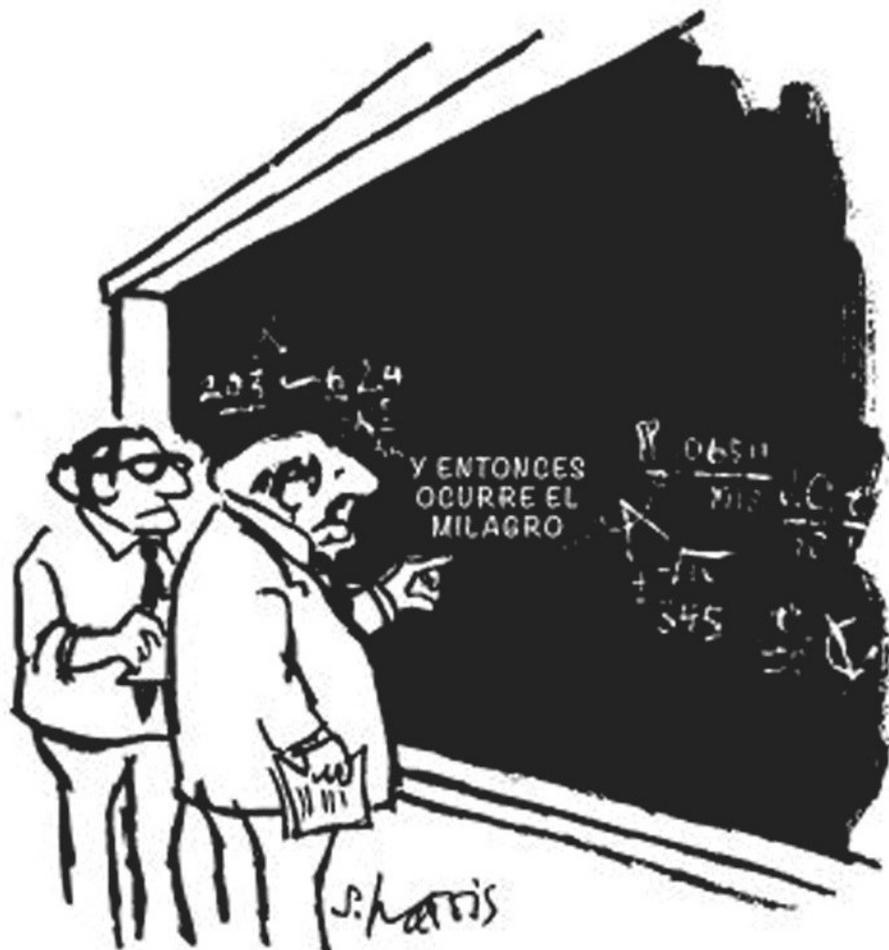
En el primer caso, antes, durante y después del disparo la bala nunca deja de cumplir la ley universal del movimiento de Newton.

La función de onda es menos obediente. Antes de que un electrón llegue a la pantalla, su función de onda evoluciona en el tiempo, propagándose tan uniformemente como una onda en la superficie de un estanque. La ley mecanocuántica del movimiento predice completamente su evolución. En consecuencia, la probabilidad de encontrar un electrón en una localización específica se distribuye por una región del espacio en rápida expansión. Pero cuando el electrón se detiene en la pantalla, su descripción —su mapa— cambia de carácter de manera instantánea y radical. La función de onda colapsa cuanto la probabilidad se convierte en (casi) certidumbre de la localización del electrón. El proceso de colapso no obedece ninguna regla o ley. Simplemente ocurre. Exactamente por qué o cómo ocurre ha sido objeto de controversia desde el nacimiento de la mecánica cuántica hace noventa años.

En su búsqueda de una solución al dilema onda/partícula, los inventores de la mecánica cuántica se vieron forzados a un compromiso. Al introducir la función de onda junto con su interpretación probabilística, consiguieron unificar el comportamiento de onda con el comportamiento de partícula, pero

tuvieron que pagar un precio. Tuvieron que abandonar una convicción firmemente implantada en el pensamiento de los físicos clásicos desde Newton hasta Einstein: la de que hay una única ley del movimiento para una partícula material. Resultaba que la función de onda del electrón no sigue una ley del movimiento invariable, al modo de una bala. En vez de eso, la función de onda obedece dos leyes fundamentalmente dispares:

1. Siempre que el electrón se deja a su aire, sin ser observado, su función de onda se despliega de manera uniforme, continua y predecible. Obedece leyes matemáticas fijas, igual que una bala en vuelo y una onda en la superficie de un lago.
2. Cuando un electrón revela su paradero dejando un punto en una pantalla, la función de onda «colapsa» súbitamente en una nueva forma mucho más compacta, concentrada en el punto de impacto.



**CREO QUE AQUÍ, EN EL PASO DOS,
DEBERÍA SER MÁS EXPLÍCITO**

Ilustración de Sidney Harris. Copyright © Sidney Harris, sciencecartoonsplus.com

El inimitable dibujante científico Sidney Harris ha plasmado la situación de manera sublime en su viñeta *Miracle* [Milagro]. Me gusta imaginar que los dos físicos están discutiendo sobre mecánica cuántica.

El colapso de la función de onda no es solo un «hundimiento» en el espacio, sino una transformación más general de probabilidad en certidumbre. No solo la posición, sino también la energía, la velocidad, la dirección del movimiento y muchos otros atributos de una partícula cuántica, todos los cuales tienen valores únicos definidos en la física clásica, pueden expandirse en la función de onda abarcando diferentes posibilidades, hasta que se efectúa una medida y se obtiene un valor sin ambigüedad. Por ejemplo, una función de onda describe una corriente eléctrica que fluye por un alambre en una dirección y en la opuesta a la vez, o una molécula con diferentes estructuras geométricas, o un núcleo radiactivo que permanece intacto y se desintegra simultáneamente. Hasta que se plantea y se responde la siguiente pregunta: de todas las *posibilidades* que podrían darse, ¿cuál ha *ocurrido*?

Se supone que los milagros no tienen ningún papel en la ciencia, pero el mundo nos presenta tal abundancia de cosas que no entendemos, un océano de ignorancia tan inacabable, que la infiltración ocasional del milagro en el pensamiento científico quizá no sea tan sorprendente después de todo. Solo que no lo llamamos milagro. La ley de la gravitación de Newton es un ejemplo perfecto.

Si sostenemos una manzana en la mano y luego la soltamos, cae al suelo. ¿Por qué? ¿No sería más natural que la manzana se quedara donde estaba? Si fuéramos un astronauta flotando en el espacio exterior, eso es justo lo que pasaría: la manzana se quedaría delante de nosotros en el punto donde la hubiéramos soltado. Pero aquí abajo, en la superficie de la Tierra, la manzana cae.

Newton explicó que la Tierra ejerce una misteriosa fuerza llamada *gravedad*, que atrae la manzana y tira de ella inexorablemente hacia el suelo. ¿Qué son estos tentáculos invisibles? ¿Son reales o imaginarios? ¿De qué están hechos? ¿Cómo podemos manipularlos, o incluso cortarlos, para arrojar luz sobre su naturaleza?

Newton acrecentó el misterio al generalizar su ley afirmando que todos los objetos materiales, incluyendo nuestra manzana y nuestro planeta, ejercen entre sí esta fuerza atractiva. Es lo que mantiene la Luna en su órbita, la Tierra girando alrededor del Sol, y a nosotros pegados al suelo en vez de flotar en el espacio exterior. Es lo que se dio en llamar *gravitación universal*, y es el ejemplo supremo de una *acción a distancia*.

Pero la acción a distancia es de todo punto irrazonable. La experiencia diaria sugiere que las fuerzas se transmiten por contacto directo. Si queremos desplazar una silla, tenemos que tocarla, directamente con nuestras manos o indirectamente con un palo o una cuerda. Las bolas de béisbol cambian de

dirección cuando tocan el bate, ni antes ni después. Las moléculas que empujan a sus vecinas y les transmiten su movimiento en una suerte de reacción en cadena transmiten sonido y calor. Los fotones transportan luz y radioondas de la fuente al receptor. A escala microscópica, incluso las llamadas fuerzas de contacto, como el empuje de una mano o un bate de béisbol, están mediadas en última instancia por campos eléctricos y magnéticos que transmiten perturbaciones de un punto a los puntos vecinos. Solo la acción a distancia está dispensada de la contigüidad de los cuerpos interactuantes. Es un milagro disfrazado de «ley de la naturaleza».

Pensemos en nuestro propio efecto en el universo. De acuerdo con Newton, cuando desplazamos nuestro cuerpo dando un paso adelante, cada átomo del universo, cada persona en la Tierra, cada planeta y cada estrella, no importa lo distantes que estén, experimenta instantáneamente un cambio en la fuerza gravitacional que soporta. Es como si la materia distante reaccionara de algún modo a lo que hace nuestro cuerpo, de manera instantánea y sin ningún mediador que lleve el mensaje.

Por supuesto, Newton comprendía lo inverosímil que era su propia ley. Años después de la entronización de la gravitación universal como gran ley de la naturaleza, respondiendo en una carta a las preguntas que suscitaba la acción a distancia, Newton escribió:

Es inconcebible que la materia inanimada, sin la mediación de algo más, pueda actuar sobre otra materia y afectarla sin un contacto mutuo. [...] Que la gravedad deba ser innata, inherente y esencial a la materia, de modo que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia [a través de] un vacío, sin la mediación de ninguna otra cosa, por y a través del cual su acción y fuerza pueda comunicarse de uno a otro, es para mí una *absurdidad* [la cursiva es mía] tan grande que ningún hombre con una facultad competente de pensamiento en cuestiones filosóficas puede caer nunca en ella. La gravedad debe ser causada por un agente que actúe constantemente conforme a ciertas leyes; pero si este agente es material o inmaterial, lo dejo a la consideración de mis lectores^[14].

¡Una absurdidad!, dice Newton de su más grandiosa contribución a la física. Se le había ocurrido hacia 1666, cuando tenía veinticuatro años. Este periodo de su vida se conoce como su *annus mirabilis*, su año milagroso, no porque la acción a distancia sea un milagro en sí misma, sino porque aquel mismo año Newton, en un milagroso acceso de creatividad, también inventó el cálculo diferencial y diseccionó la luz solar en los colores del arcoíris.

Un cuarto de siglo después de proponerla, Newton, lejos de repudiar la acción a distancia por irrazonable, la defiende por su utilidad, pero admite que es incomprensible en última instancia. Ha averiguado la ley por la que se rige

la gravedad, pero no lo que significa. Como devoto creyente, en privado atribuye la acción de la gravedad a Dios, pero sabiamente deja que sus lectores saquen sus propias conclusiones. Describe el milagro sucintamente en términos matemáticos, pero no puede explicarlo.

Con todo, la ley de la gravedad newtoniana reinó sin oposición durante todo un cuarto de milenio, de 1666 a 1916, hasta que Albert Einstein desentrañó su verdadera naturaleza. Desde luego, en todo ese tiempo hubo incontables intentos de explicar la gravedad en términos de modelos mecánicos complicados, pero ninguno resistió al escrutinio experimental o matemático. Durante doscientos cincuenta años los físicos se valieron de la ley de la gravitación universal de Newton para explicar el mundo y hacer portentosas predicciones, desde las mareas oceánicas y la forma de la Tierra hasta la cronología de los eclipses solares y la reaparición de los cometas. Tal fue el éxito de aquella ley absurda que su forma se copió en el tratamiento matemático de muchos otros fenómenos no relacionados con la gravedad, como las fuerzas eléctricas y magnéticas.

Einstein cuestionó la acción a distancia no solo porque viola el sentido común, sino también, lo que era más importante para él, la teoría de la relatividad especial. En 1905, su propio *annus mirabilis*, Einstein había propuesto que ningún objeto, señal o información puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Pero la acción a distancia atraviesa el vacío a velocidad infinita, algo imposible de acuerdo con la relatividad einsteiniana. Así pues, Einstein concibió su propia teoría de la gravedad y la llamó *relatividad general*. La teoría de la relatividad general eliminó la acción a distancia al mostrar que el espacio mismo es el medio de transmisión de la fuerza gravitatoria de un punto a los puntos contiguos. Este proceso —lo opuesto de la acción a distancia— se denomina *acción local*, porque una influencia localizada en un punto del espacio solo afecta a los puntos de su vecindad inmediata y local, no a los puntos más distantes. Desde esta perspectiva, si damos un paso adelante, el espacio en torno a nuestro cuerpo se combe sutilmente, y esa perturbación se propaga punto por punto a la velocidad de la luz hasta los confines del mundo, el sistema solar, la Vía Láctea y el universo. Al cabo de doscientos cincuenta años el milagro de la gravedad había sido por fin reemplazado por algo mucho más complicado, pero a la vez mucho más explícito.

La venerable teoría de Newton quedó reducida al estatuto de mera aproximación; una aproximación muy útil, desde luego, pero sin ninguna significación fundamental. Los físicos la emplean de la misma manera que tratan los sólidos, líquidos y gases de manera aproximada como materiales continuos, aunque saben que en realidad la materia está compuesta de átomos.

El colapso de la función de onda cuántica, que cubre distancias arbitrariamente grandes en un instante, también es una acción a distancia, y es

igual de incomprensible que la gravedad newtoniana. Pero al demostrar su validez de manera tan convincente como lo hizo la ley de Newton, el colapso de la función de onda también se ha instalado en la ortodoxia científica. La gran mayoría de los físicos aceptan la mecánica cuántica como un hecho probado (la superposición, las probabilidades, el colapso y todo eso). «¡Así es como se comporta la naturaleza!», se dicen, y continúan con sus cálculos y observaciones. Solo un pequeño, aunque creciente, número de ellos se toma en serio los dilemas filosóficos planteados por el formalismo estándar e intenta resolverlos. Una de las principales metas de esos espíritus intrépidos es hacer más explícito el segundo paso de la receta cuántica, el colapso de la función de onda, que los deja en un inexplicable salto de la probabilidad a la certidumbre.

Incertidumbre cuántica

El principio de incertidumbre de Werner Heisenberg se ha convertido en un meme de la cultura popular casi tan famoso como la fórmula de Einstein $E = mc^2$ y el gato de Schrödinger. Desde la pegatina «Heisenberg pudo haber dormido aquí» hasta el alias «Heisenberg» de Walter White, el moderno Jekyll y Hyde de la serie televisiva *Breaking Bad*, el nombre de Heisenberg evoca la idea de que la física cuántica ha erosionado las certidumbres de antaño. Pero interpretar su principio como la afirmación de que «todo es incierto» es una lectura superficial y errónea. Más trascendental que este malentendido corriente fue un error cometido por el propio Heisenberg. El principio que lleva su nombre es un teorema matemático derivado de la función de onda, y es impecable. Establece que la posición y la velocidad de una partícula no pueden especificarse con precisión a la vez: cuanto más precisa es la medida de la posición, más incierta resulta la velocidad, y viceversa. La precisión de otros pares de variables, como la energía y la duración, también está sujeta a compromisos similares. Pero Heisenberg se equivocó en la explicación del significado profundo de su teorema matemático.

El teorema de Heisenberg es un instrumento bastante burdo. Aunque raramente interviene en los cálculos detallados, sirve como una útil regla de oro. Permite hacer estimaciones rápidas y groseras de las propiedades de sistemas atómicos antes de que la teoría completa proporcione resultados más fiables. Por ejemplo, el principio de incertidumbre nos permite dar sentido al peldaño inferior de la escalera de energía de un oscilador cuántico. Supongamos, incorrectamente, que la energía mínima es justamente cero, de modo que conocemos tanto la velocidad como el desplazamiento de la minúscula masa: ambos son exactamente cero. La masa está en reposo, y el muelle está completamente relajado. Dado que este supuesto viola el principio de incertidumbre, tiene que ser erróneo. Si el oscilador debe obedecer las leyes de la mecánica cuántica, su masa debe vibrar un poco, variando así tanto

su posición como su velocidad, lo que introduce cierta incertidumbre. Es más, un argumento basado en el principio de incertidumbre incluso indica, correctamente, que la energía mínima del oscilador armónico cuántico no es cero, sino $e = hf/2$. Por desgracia, esta estimación no puede darse por buena hasta que se verifica, con mucho más esfuerzo, mediante un cálculo meticuloso de la función de onda del oscilador.

Dado que el principio de incertidumbre es tan contrario a los fundamentos mismos de la mecánica clásica, que dota a cada bala y cada pelota de golf de una posición, una velocidad y una dirección precisas que determinan su movimiento, Heisenberg se vio impelido a explicar la física subyacente tras su teorema. De hecho, este ejercicio era un tanto inusual en él, más inclinado al pensamiento abstracto, matemático, platónico, que a los argumentos realistas, intuitivos, de corte aristotélico. No obstante, procedió a presentar su principio en un lenguaje práctico ordinario que convenció a generaciones de físicos, yo incluido. Pero al final su razonamiento resultó engañoso, aunque el principio en sí es correcto.

Heisenberg buscó el origen de la incertidumbre cuántica en el efecto de la medición sobre el objeto medido. Para ilustrar la idea concibió un ingenioso experimento hipotético, el *microscopio de Heisenberg*. «Considérese un electrón en vuelo», sugirió. Para averiguar dónde está exactamente tenemos que capturarlo, tocarlo, hacer rebotar un rayo de luz en él, o como mínimo un fotón, con objeto de obtener información sobre su posición. Ese fotón, a su vez, perturbará algo el movimiento del electrón, cambiando su velocidad, su dirección o ambas. Así pues, aunque un fotón reflejado nos ayudará a situar el electrón en un momento específico, la observación modificará su velocidad. Examinando los detalles de este experimento imaginario con gran minuciosidad, y tras algún que otro traspié inicial, Heisenberg fue capaz de construir una ilustración física plausible de su principio de incertidumbre.

Lo que invocó debería describirse como un *efecto del observador*, un fenómeno real y fácil de entender. No hace falta acudir a la mecánica cuántica para encontrar ejemplos del efecto de una observación sobre el objeto observado. Los químicos saben muy bien que insertar un termómetro de mercurio a temperatura ambiente en un dedal lleno de agua caliente hace que disminuya la temperatura del agua. Los abogados saben que la manera de hacer una pregunta influye en la respuesta. Los antropólogos se cuidan de minimizar los efectos de su investigación en la cultura que quieren describir. Y en el peor de los casos, una observación puede llegar a destruir el objeto observado (una autopsia, por ejemplo, puede revelar la causa de la muerte, pero deja el cuerpo destrozado).

En las nueve décadas pasadas desde que Heisenberg anunció su principio, los físicos han ido constatando que no depende ni del efecto perturbador de las mediciones físicas ni de la precisión de los instrumentos de medida. Su

significado es en realidad mucho más profundo, y se sigue de la naturaleza ondulatoria de la materia, de la que el término *función de onda* es un recordatorio permanente. Incluso las ondas clásicas exhiben una relación recíproca entre duración y frecuencia. Imaginemos una perturbación de la superficie oceánica consistente en un tren de ondas. Si incluye varios ciclos, cada uno con una cresta y un valle, podemos cronometrarlos y determinar su frecuencia. La oscilación se extiende en el espacio y en el tiempo (su duración es larga). Por otro lado, si la oscilación consiste en una sola cresta, su longitud y su duración pueden ser mucho más cortas, pero no podemos definir la frecuencia, porque para ello necesitamos al menos un ciclo entero. Como mucho podemos contemplar esa cresta de onda solitaria como una superposición de numerosas ondas con diferentes frecuencias, cuyas crestas se suman para dar una sola elevación. El compromiso en el caso de las ondas clásicas implica que cuanto más larga es la duración de una onda, menor es su abanico de frecuencias, y viceversa.

Esta relación recíproca no solo vale para las ondas en el agua, sino también para las ondas sonoras, y su efecto puede oírse en un concierto orquestal. La prolongada nota *la*, que da comienzo a la velada, tiene una frecuencia bien definida, pero un choque de platillos, que dura solo una fracción de segundo, no tiene un tono discernible. De hecho, la partitura para los instrumentos de percusión emplea una notación especial sin ninguna referencia al tono, porque el tono de una percusión es indefinible. ¡Pero su tiempo es inconfundible!

La ecuación de Planck-Einstein $e = hf$ convierte el compromiso clásico entre duración y frecuencia en la relación de incertidumbre de Heisenberg entre la longevidad y la energía de un sistema cuántico tal como una partícula inestable. Una vez más, como en la derivación de la función de onda misma, la constante de Planck proporciona el enlace entre la física clásica y la cuántica.

La ilustración más drástica del principio de incertidumbre es el experimento de la doble rendija, que pone de manifiesto la incertidumbre entre la longitud de onda y la información sobre la trayectoria, es decir, la respuesta a la pregunta: «¿Por cuál de las dos rendijas ha pasado la partícula?». La longitud de onda puede deducirse fácilmente de las dimensiones del aparato y el patrón de interferencia^[15]. El conocimiento de la trayectoria es más difícil de obtener, salvo por la fuerza bruta: si se tapa una de las rendijas, *sabremos* que el haz de electrones ha pasado por la otra. Pero cuando se hace esto, el patrón de interferencia, y con él la posibilidad de conocer la longitud de onda, desaparece. (No puede ser de otra manera porque, después de todo, para que haya interferencia tiene que haber dos ondas). En este ejemplo la medida de la información de la trayectoria es destructiva en extremo, ya que elimina por completo una de las dos

posibilidades. La incertidumbre, por lo tanto, también es extrema: puede determinarse la longitud de onda o la trayectoria, pero no ambas a la vez.

A medida que se profundizaba en la comprensión del principio de Heisenberg, las nuevas tecnologías sugirieron nuevas maneras de manipular partículas elementales individuales que permitirían convertir los experimentos mentales de ayer en observaciones de laboratorio reales (como fue el caso del experimento de Feynman). Los refinamientos modernos permitieron analizar la incertidumbre de la doble rendija no solo a la manera antigua y obvia de todo o nada, sino también para diferentes aproximaciones de la longitud de onda y el conocimiento probable de la trayectoria. Y eso no fue todo. A comienzos de este siglo, nuevas versiones del venerable experimento comenzaron a hacer explícito el error de Heisenberg: la incertidumbre cuántica no es un efecto del observador.

La ingeniosa innovación consiste en separar los «mecanismos de observación» de la trayectoria hasta una distancia segura para evitar que interactúen directamente con la partícula, en este caso un fotón^[16]. En cuanto sale de la doble rendija, cada fotón se envía a un cristal especial donde genera espontáneamente dos fotones nuevos con propiedades idénticas (o complementarias). Estos dos fotones se envían en direcciones diferentes, cada uno con un cometido distinto: uno, llamado *señal*, contribuye a la generación del patrón de interferencia (o su ausencia) de la manera usual, mientras que el otro sirve como testigo. Cada fotón señal se asocia a un único fotón testigo.

El testigo llega a su destino después de que el fotón original haya atravesado la doble rendija, de ahí la denominación de *experimento de elección retardada*. El testigo es interrogado mediante una tecnología óptica estándar para revelar de qué rendija provenía el fotón original, o si salió de ambas rendijas sin revelar el camino que tomó.

Con esta disposición, el detector de señal registra miles de fotones barriendo un área amplia. Cada fotón señal detectado corresponde a un punto de la pantalla en la versión antigua del experimento, solo que ahora cada fotón señal tiene un testigo. Luego el experimentador tiene que escoger. En primer lugar, de todos los datos recogidos selecciona solo los fotones señal cuyo testigo indica que no se tiene información de su trayectoria. Y al representar gráficamente las posiciones registradas por el detector de señal (los puntos en la pantalla), obtiene el patrón de bandas de interferencia esperado. En realidad no ha hecho más que reproducir el experimento de Thomas Young de 1803. En segundo lugar, alternativamente, si selecciona solo los fotones señal de trayectoria conocida y representa sus posiciones, no aparece ningún patrón de bandas. Pero aquí ambas rendijas han permanecido abiertas en las dos partes del experimento.

El mensaje de este resultado es claro. El detector de testigos opera a tanta distancia espacial y temporal que no puede tener ninguna influencia física

directa en lo que sucede en las rendijas. Por tanto, la desaparición del patrón de interferencia no es una respuesta mecánica a la observación de la trayectoria seguida por la señal, como ocurre cuando se bloquea una rendija. En pocas palabras, el principio de incertidumbre no es un efecto del observador.

El progreso del microscopio de Heisenberg a la interpretación del principio de incertidumbre como una propiedad general y muy básica de las funciones de onda evoca otros avances en la historia de la mecánica cuántica. Así, el modelo mecánico de Planck de la materia radiante llevó a la dualidad onda/partícula y su resolución por la función de onda. Una función de onda puramente matemática y su interpretación en términos de probabilidad sustituyó el modelo mecánico del átomo de hidrógeno de Bohr. En ambos casos, una descripción mecánica, visualizable, resultó ser inadecuada, y se reemplazó por una explicación matemática abstracta.

La abstracción es un signo de madurez. Los niños comienzan a aprender qué es el dinero manejando monedas, pero luego su comprensión se amplía para abarcar conceptos abstractos tales como coste, precio y crédito. En la sociedad en general, la noción de justicia evolucionó desde el principio primitivo, personal, del «ojo por ojo» hasta sistemas sofisticados de leyes abstractas. En física, la madurez implica abandonar modelos mecánicos tangibles por abstracciones matemáticas (del latín *abstrahere*, «librarse de»). Las cosas son concretas, los pensamientos son abstractos. Pero abstracto no debería confundirse con complejo. Un concepto abstracto no tiene por qué ser complicado.

La función de onda más simple

Comenzar por lo simple es un buen consejo para la mayoría de las empresas humanas, incluida la ciencia. Niels Bohr comenzó por el hidrógeno antes de aventurarse con átomos más complicados, y la mecánica cuántica dio sus primeros pasos con el oscilador armónico simple. Sigamos, pues, el consejo y consideremos la función de onda más simple posible, no en términos de ecuaciones matemáticas, sino en la forma de símbolo visual. Este ejercicio ilustrará cuatro propiedades fundamentales de las funciones de onda: superposición, probabilidad, discretización y colapso. Como ventaja adicional, también resultará útil más adelante, cuando exploremos las implicaciones del QBismo.

Dado que los átomos, incluso los más simples, son estructuras maravillosamente intrincadas, los dejaremos de lado y nos fijaremos en una partícula auténticamente elemental, indivisible. Hemos conocido dos de ellas, el fotón y el electrón. Los fotones eluden la descripción en términos simples: en el vacío siempre van como una centella a la velocidad de la luz, negándose a ir más despacio o pararse para dejarse inspeccionar. Cuando son detectados de alguna manera, ceden su energía y desaparecen. Para describir sus fantasmales propiedades, los físicos deben ir más allá de las funciones de onda y el lenguaje de la mecánica cuántica ordinaria. Los electrones, por otro lado, pueden retardarse, pararse, almacenarse, examinarse y manipularse casi tan fácilmente como las canicas, así que prometen ser más accesibles a la intuición cotidiana. Es más, no solo son ingredientes esenciales de la materia, incluyendo nuestros cuerpos, sino que como transportadores de energía (en los tendidos eléctricos) y de información (en los ordenadores) nos sirven para impulsar y organizar nuestras vidas. El electrón, ese poderoso enano, es un vehículo apropiado para focalizar nuestras ideas sobre el micromundo invisible.

La descripción de un electrón incluye su posición, velocidad, masa o peso, y carga eléctrica. Además, un electrón tiene otras dos propiedades

relacionadas. La primera es la rotación sobre su propio eje, lo que se conoce como *espín* (del inglés *spin*), y la segunda es el magnetismo^[17]. Un electrón se comporta como un diminuto imán, o una aguja de brújula en miniatura, con una fuerza magnética invariable y conocida. La mecánica cuántica predice correctamente esa fuerza con la pasmosa precisión de una milmillonésima (lo que equivaldría a la proporción entre el grosor de un pulgar y la distancia de Nueva York a Hawái).

La lista de atributos de un electrón también vale para una bola de plástico, por ejemplo, con carga eléctrica. Cuando esta bola gira alrededor de su propio eje, también se comporta como un pequeño imán. Así pues, estamos tentados de concebir el electrón como una versión en miniatura de un globo terráqueo. Es más simple que la Tierra, porque es perfectamente esférico, y además sus dos ejes —el rotacional y el magnético— coinciden. (A diferencia de nuestro planeta, los polos magnéticos de una bola giratoria también son sus polos geográficos). Pero la mecánica cuántica es algo más que la mecánica clásica en pequeño. Un examen detenido del electrón nos introducirá en una dimensión ajena a este mundo familiar.

Nótese que la anterior lista de propiedades del electrón incluye la masa, pero no el tamaño. ¿Cuán grande es un electrón, pues? O, más bien, ¿Cuán pequeño? La sorprendente respuesta es que ningún instrumento de medida, no importa lo preciso, complejo o caro que sea, ha podido detectar nunca el volumen de un electrón. Profundizando en este punto, cuando los teóricos introducen un minúsculo radio electrónico hipotético en sus ecuaciones, muchas predicciones correctas, incluyendo la de la fuerza magnética, se van a pique. El mejor supuesto, que conduce sistemáticamente a predicciones fenomenalmente precisas de resultados experimentales, es que el radio del electrón es nulo. Por lo que sabemos, el electrón es una partícula puntual. Por supuesto, puede que algún día descubramos que el electrón tiene una subestructura y un radio después de todo, y entonces las teorías actuales deberán afinarse, pero hasta la fecha eso es pura especulación. Así pues, atengámonos a lo que se sabe e intentemos imaginar una partícula sin ningún volumen.

El problema es que una partícula puntual no puede girar. Un punto puede moverse en círculo, pero es imposible dar sentido a la idea de un punto girando en torno a su propio eje. Girar implica que distintas partes del objeto se mueven en sentidos opuestos, así que un punto, al no tener partes, no puede girar. Las pelotas de béisbol y los patinadores pueden hacerlo, pero un punto es demasiado insustancial para poder girar. Esto quiere decir que el modelo mecánico del electrón como una bola cargada que gira es insostenible. El mismo término *espín* es un fósil conceptual engañoso de la misma cosecha que el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno. Por desgracia, nos quedamos

atascados en la conclusión paradójica de que el electrón posee rotación y magnetismo, pero no volumen.

Intentar aplicar conceptos de nuestro mundo macroscópico al dominio microscópico del cuanto nos trajo problemas cuando descubrimos la dualidad onda/partícula, y ahora vuelve a pasar lo mismo. Para recuperar cierta paz mental, tenemos que ser más imaginativos. Quizá podamos aprender algo del encuentro de Alicia en el País de las Maravillas con el gato de Cheshire. A medida que su cuerpo se desvanece hasta finalmente desaparecer, lo único que el gato deja atrás es su sonrisa, a lo que Alicia responde que, aunque ha visto muchos gatos sin sonrisa, nunca ha visto una sonrisa sin gato. Desde lejos un electrón parece una bola rotatoria que se hace cada vez más pequeña hasta que desaparece sin dejar nada salvo su espín.

El espín puede ser aún más intrigante. El espín de un electrón, a diferencia de la rotación de una bola, no puede frenarse ni acelerarse. Tiene una magnitud fija determinada por el valor de la ubicua constante de Planck h . Para averiguar hacia dónde apunta la aguja de la brújula del electrón (y por ende su eje de espín), podemos acercarlo al polo norte de un imán de nevera ordinario. Dejado a su aire, el electrón se alineará como es debido con su polo sur magnético apuntando hacia el imán, y su polo norte en sentido contrario. Se le puede dar la vuelta al electrón para que apunte al revés, pero hay que invertir algo de energía (como empujar una aguja de brújula con el dedo).

A diferencia de un imán ordinario, cuya intensidad y dirección puede cambiarse arbitrariamente, el magnetismo del electrón tiene una magnitud fija y una dirección restringida. En particular, cuando se mide el espín de un electrón (y por ende su magnetismo), solo puede haber dos valores posibles. Todo dispositivo empleado para medir el espín contiene un campo magnético externo fijo que proporciona una dirección de referencia arbitraria. Pues bien, extrañamente, el espín del electrón siempre resulta estar alineado con la dirección de referencia o al contrario. Nunca se alinea perpendicularmente o a cuarenta y cinco grados, ni siquiera mientras se le da la vuelta. El magnetismo del electrón suele representarse como una flechita, que también representa su espín. Cuando se mide la dirección del espín de un electrón en un campo magnético vertical, apunta hacia arriba \uparrow o hacia abajo \downarrow , nunca en ángulo con la vertical. De modo similar, si el campo de referencia se alinea horizontalmente, el electrón solo apuntará a la derecha \rightarrow o a la izquierda \leftarrow . En vez de un rango infinito de direcciones de rotación de una bola, un electrón tiene dos direcciones de espín y no más. Esta restricción de las direcciones posibles se parece a la restricción de las energías de los osciladores armónicos y de los átomos, que a su vez evocan las restricciones del tono del sonido de una flauta.

Como las otras variables que describen el mundo atómico, el espín también está sujeto a un principio de incertidumbre o compromiso de

información. Si preparamos un electrón con su espín apuntando hacia arriba \uparrow , por ejemplo, y luego medimos el espín a lo largo del eje horizontal x , el resultado será izquierda \leftarrow o derecha \rightarrow al azar. Y viceversa, si sabemos que el espín apunta a la derecha \rightarrow , al medir su orientación en el eje vertical obtendremos arriba \uparrow o abajo \downarrow , también al azar.

Acabamos de aterrizar en medio del país de las maravillas de la mecánica cuántica. El espín, con sus peculiares reglas, es un fenómeno cuántico que no tiene ningún papel en el experimento de la doble rendija, que Feynman describió como «el único misterio de la mecánica cuántica». A pesar de lo cual es un enigma.

La función de onda de un electrón implicado en cualquier experimento tiene dos partes. La parte «externa» tiene que ver con el movimiento en el espacio (dentro de un átomo, o de un cañón de electrones a una pantalla, o a través de una doble rendija). Esa es la parte de la que nos hemos ocupado hasta ahora. Además, hay una parte «intrínseca» que tiene que ver únicamente con el espín. A menudo estos dos componentes de la función de onda se entrelazan en el cálculo, pero para lo que nos interesa aquí los separaremos, ignoraremos la parte externa y nos limitaremos a la parte que describe el espín. Con esto hemos llegado a nuestro destino: la función de onda más simple posible.

A diferencia de una función de onda ordinaria, que puede abarcar las tres dimensiones del espacio y tiene un rango de valores infinito, correspondientes a los lugares donde podría estar el electrón, la función de onda del espín no se sitúa en el espacio real. La invención de la función de onda del espín, una construcción abstracta puramente mecanocuántica sin ninguna analogía en nuestro mundo cotidiano, representó uno de los eventos más revolucionarios en la historia de los primeros tiempos de la mecánica cuántica. Implicaba que cada electrón tiene dos estados ocultos, una suerte de personalidad bipolar que solo se revela cuando se observa su campo magnético, o su movimiento rotacional. Fuera de eso, el doble carácter del electrón permanece escondido en una dimensión ajena al espacio en el que vivimos.

El espín del electrón es un ojo de cerradura a través del cual vislumbramos el mundo cuántico, un mundo que nos resulta irreconocible no por su extrema pequeñez, sino porque algunas de sus propiedades son accesibles solo a nuestra imaginación, no a nuestros sentidos inmediatos. Entre las incontables citas de Einstein que han pasado a formar parte de la cultura popular, una de las más tranquilizadoras es esta: «Dios es sutil, pero no malicioso»^[18]. Si quitamos a Dios, la frase sugiere que los secretos de la naturaleza están profundamente escondidos y son difíciles de sacar a la luz, pero en última instancia son accesibles a la razón y la imaginación. Cuando la naturaleza nos pone ante una paradoja aparente, a menudo tiene el detalle de

susurrarnos al oído pistas para su resolución. El espín del electrón es una pista que nos permite escrutar el mundo secreto del cuántico.

Dado que la palabra *espín* y sus asociaciones familiares con la rotación de pelotas de béisbol y patinadores son en cualquier caso poco apropiadas, los dos estados observables de la función de onda del espín no deben etiquetarse como sentidos horario y antihorario. De hecho, pueden llamarse arriba/abajo, como en el modelo mecánico original del electrón, o izquierda/derecha, +/-, sí/no, cara/cruz, encendido/apagado o blanco/negro, pero para establecer una conexión con el código informático se designan convencionalmente como 0 y 1. Estos dos enteros no son más que etiquetas convenientes, como los números de página.

La función de onda del espín es inmensamente útil más allá del contexto del espín electrónico y el magnetismo, porque describe cualquier sistema mecanocuántico que tenga solo dos configuraciones reales posibles. Puede referirse a una molécula que alterna entre dos disposiciones estructurales distintas, una corriente eléctrica que puede ir en sentido horario o antihorario en un bucle de alambre, un electrón que puede ocupar uno de dos niveles de energía específicos en un átomo, un haz de luz polarizada horizontal o verticalmente, o un núcleo radiactivo intacto o desintegrado. Exactamente la misma función de onda simple describe todos estos sistemas y muchos otros. Por su simplicidad, poco a poco este objeto matemático está reemplazando la función de onda de la doble rendija de Feynman en los cursos universitarios de iniciación a la mecánica cuántica.

En el lenguaje de las hojas de cálculo, el espín del electrón se describe con una matriz de 2×2 , la matriz cuadrada mínima. (Una matriz de 1×1 no es digna de tal nombre, pues consiste en un solo número, de manera que no puede haber superposición cuántica).

Los sistemas de este estilo son tan ubicuos que se han asegurado un nombre propio. Cualquier sistema cuántico con solo dos estados posibles se denomina bit cuántico o cúbit (del inglés *qbit*, que es una contracción de *quantum bit*, mientras que el término *bit* es a su vez una contracción de *binary digit*). Un bit clásico no es más que una variable que toma los valores 0 o 1, un símbolo abstracto de un conmutador con las etiquetas *apagado* y *encendido*. Un cúbit, en cambio, es un objeto o sistema físico mecanocuántico real. Es una cosa, no un símbolo.

Lástima que el término cúbit no tenga nada que ver con *QBismo*, el tema de este libro. Sus homófonos se refieren respectivamente a una medida de longitud bíblica y a un periodo histórico del arte del siglo XX, cosas ambas irrelevantes para la mecánica cuántica, pero es que el bit cuántico tampoco tiene ninguna relación con el bayesianismo cuántico (aparte del adjetivo *cuántico*). La *b* de cúbit viene de *binario*, mientras que la *B* de *QBismo* alude

a Thomas Bayes, un clérigo del siglo XVIII. A veces el enrevesado mundo de la nomenclatura científica crea extraños compañeros de cama.

Un cúbit se describe mediante un aparato matemático llamado *función de onda del cúbit*. Para distinguir el cúbit de su función de onda (el territorio de su mapa), en este libro emplearé la notación *cúbit* (en cursiva) como abreviatura de la función de onda del cúbit. La cursiva subraya de manera intencionada esta distinción, porque en la literatura profesional la advertencia de Korzybski suele ignorarse.

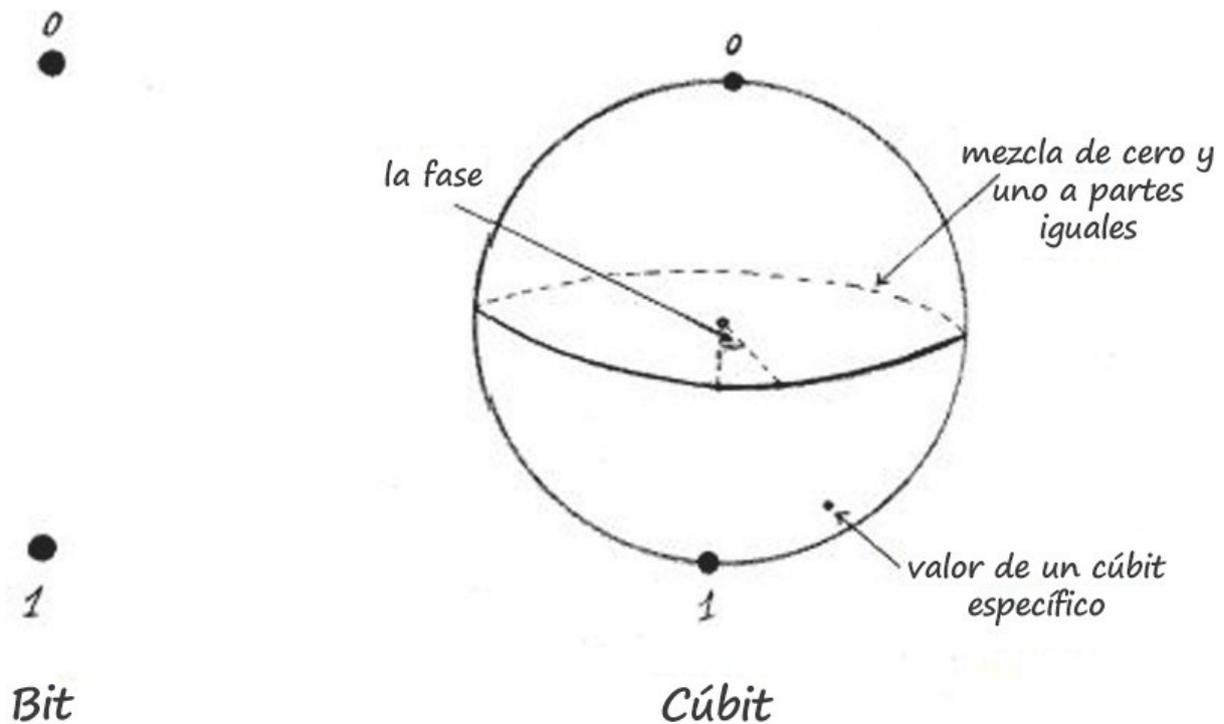
Un punto en una esfera puede representar simbólicamente el *cúbit* de un sistema particular implicado en un experimento. Cada punto de la superficie corresponde a una probabilidad. En los polos los resultados de la medida, sean cuales sean, se etiquetan como 0 y 1. Entre estos extremos tenemos mezclas, o superposiciones, de los dos valores. Por ejemplo, un suceso cuyo *cúbit* se localiza en el ecuador tiene una probabilidad del 50 % de salir 0, como la cara en el lanzamiento de una moneda. En las latitudes del hemisferio norte es más probable el 0 que el 1, y viceversa en las latitudes meridionales. En contraste con la latitud, la longitud no tiene contrapartida clásica. Es una variable puramente mecanocuántica y representa una fase, medida por un ángulo en un espacio imaginario e inaccesible. Dos *cúbits* vecinos en la esfera tienden a interferirse constructivamente (crestas con crestas y valles con valles), mientras que los situados en lados opuestos de la esfera dan interferencias más destructivas (crestas coinciden con valles). La fase es el último eco de una onda clásica, con su característica propiedad de superposición, que inspiró la mecánica cuántica en primera instancia y prestó su nombre a la función de onda.

Así pues, la esfera del *cúbit* es un recordatorio visual del fenómeno de la superposición y su interpretación en términos de probabilidad. Salvo en los polos, un punto de la esfera no permite predecir el resultado de una medida aislada. Las repeticiones de experimentos preparados de manera idéntica dan ceros y unos en una secuencia aleatoria. La latitud del punto predice la frecuencia con que aparece cada resultado en la secuencia.

Los polos, puntos excepcionales sin superposición y sin fase, reflejan la discretización de la mecánica cuántica. Así como los niveles de energía del oscilador armónico cuántico y de los átomos reales son discretos y numerables en vez de continuos, muchas otras mediciones, incluyendo el sentido del espín de un electrón, tienen un rango de valores restringido y numerable (dos en el caso del *cúbit*). Los polos anclan la imagen en el mundo real. Tomados juntos, están representados por un bit.

Puede que el mensaje visual más persuasivo del *cúbit* provenga de lo que *no* es. No es la imagen de un electrón ni de nada que podamos encontrar en nuestro mundo (a diferencia del icono de Bohr). Sus tres dimensiones son producto de la imaginación. Un punto en la superficie de la esfera representa

la probabilidad del resultado de un experimento, pero una vez efectuado el experimento el sistema resulta estar en el estado 0 o en el estado 1. En otras palabras, un punto de la esfera ha saltado a un polo. Este salto es el notorio colapso de la función de onda.



Un punto de la esfera puede estar fijo en el tiempo, o puede describir una trayectoria prescrita. Considérese, por ejemplo, un núcleo radiactivo producido en un momento dado. Hagamos que el valor del *qubit* represente la respuesta a la siguiente pregunta: ¿Se ha desintegrado el núcleo, sea por escisión o por emisión de radiación de alguna clase? La respuesta «no» viene representada por el valor 0, y la respuesta «sí» por el valor 1. Inicialmente, el punto en la esfera del *qubit* está en el polo superior etiquetado como 0. A medida que transcurre el tiempo la probabilidad de que el núcleo se haya desintegrado aumenta, así que el punto se desliza hacia el polo sur. No obstante, nunca llegará allí mientras el núcleo permanezca inobservado. Si comprobamos la condición del núcleo, encontraremos que o está intacto o se ha desintegrado. En ese momento el *qubit* colapsa en uno de sus polos. El viaje del punto a lo largo de la superficie de la esfera es enteramente predecible y viene descrito matemáticamente por la mecánica cuántica, pero no así el salto instantáneo al polo sur o de vuelta al polo norte. Tras la medición el *qubit* adopta un valor de 0 o 1, que representa un bit de información, pero antes no tiene ningún valor por descubrir.

La imagen de la esfera del *cúbit* no explica ni la superposición, ni la probabilidad, ni la discretización, ni el colapso de la función de onda. Tampoco revela las fórmulas matemáticas que simboliza, pero sirve como un recordatorio visual compacto de los ingredientes principales de la mecánica cuántica. Es una imagen de la función de onda más simple posible, aunque no se parezca en nada a una onda.

SEGUNDA PARTE
Probabilidad

Problemas con la probabilidad

Las leyes de la mecánica cuántica son diáfanas en sus instrucciones para construir funciones de onda. A veces la receta plantea dificultades matemáticas y problemas de cálculo, pero raramente hay alguna duda sobre *qué* hacer; es el *cómo* lo que hace que los físicos se devanen los sesos. Concluida la tarea, tienen a mano una función de onda para llevarse al laboratorio.

La conexión entre la teoría y el experimento resultó ser la *probabilidad*: o bien la función de onda predice probabilidades y el laboratorio proporciona los datos para confirmarlas, o bien una distribución de probabilidad determinada experimentalmente guía el cálculo de la función de onda, que luego proporciona información sobre otros experimentos posibles y permite hacer predicciones. A primera vista, el concepto de probabilidad parece tan elemental que resulta intuitivamente obvio. ¿Cuál es la probabilidad de que salga cara en el lanzamiento de una moneda? Una mitad, o 50 %, como sabe todo capitán de equipo de fútbol. ¿Qué es más probable, sacar un 6 o un 7 con un par de dados? Contemos las posibilidades. En total hay $6 \times 6 = 36$ resultados posibles, pero solo un puñado de ellos suman 6 o 7: (1, 5), (5, 1), (2, 4), (4, 2) y (3, 3) frente a (1, 6), (6, 1), (2, 5), (5, 2), (3, 4) y (4, 3). La probabilidad del 6 es $5/36 \approx 13,9\%$, y la del 7 es $6/36 \approx 16,7\%$, así que el 7 es cerca de un 3 % más probable que el 6, como un jugador de dados avezado sabe por experiencia.

La probabilidad de un suceso es simplemente el número de resultados favorables (por ejemplo, que entre los dos dados sumen seis puntos) dividido por el número de resultados posibles (en nuestro ejemplo 36). Esta fórmula suele funcionar incluso cuando el número de posibilidades es incontable. ¿Cuál es la probabilidad de que un niño pequeño con los ojos vendados pinche la cola en alguna parte del cuerpo de un asno dibujado en un póster, suponiendo que los pinchazos se distribuyen uniformemente al azar por todo el póster? Basta con dividir el área del asno por el área del póster. El resultado

es un número real entre 0 y 1 (una probabilidad válida, expresable como fracción o porcentaje).

Las probabilidades así calculadas son números abstractos, teóricos. Cómo se suman y combinan en contextos complicados es de lo que se ocupa la rama de las matemáticas puras conocida como *teoría de la probabilidad*. Las probabilidades de las que trata la teoría no son más reales que las líneas infinitamente delgadas, los puntos adimensionales o los círculos perfectos de la geometría euclidiana. El que las abstracciones de la teoría de la probabilidad o la geometría euclidiana tengan aplicaciones en el mundo real no es una cuestión de lógica, sino de experimentación y observación (es decir, una cuestión de ciencia). Nos puede parecer que los lanzamientos de monedas o dados son algo tan simple que nuestras intuiciones no necesitan confirmación, pero, como muchas cosas en la vida, la verdad es más sutil, así que es mejor prepararse para las sorpresas.

Consideremos la desconcertante paradoja de la *fábrica de cubos*, planteada en 1989 por el filósofo Bas van Fraassen, quien se inspiró en rompecabezas similares más antiguos. (El ejemplo me parece especialmente apropiado en el contexto del QBismo). Imaginemos una fábrica de cerámica que produce una enorme pila de cubos pequeños de entre 0 y 1 cm de lado, con longitudes distribuidas aleatoriamente. Tomamos uno de estos cubos al azar y lo examinamos. ¿Cuál es la probabilidad de que su lado mida entre 0 y 0,5 cm? La respuesta más inmediata sería «una mitad», porque el rango de resultados favorables es la mitad del rango de resultados posibles. Pero vamos más allá. Vemos que el área de las caras de un cubo varía de 0 a 1 cm². ¿Cuál es la probabilidad de que el área de las caras del cubo que tenemos en la mano esté entre 0 y 0,5 cm × 0,5 cm, o 0,25 cm²? Dado que 0,25 es un cuarto del rango total, la probabilidad de que nuestro cubo encaje en ese intervalo es «un cuarto». Pero la cosa empeora. Si medimos volúmenes en vez de longitudes o áreas, su rango de variación va de 0 a 1 cm³, y la pregunta ahora es: ¿cuál es la probabilidad de que el volumen del cubo esté entre 0 y 0,5 cm × 0,5 cm × 0,5 cm = 0,125 cm³? La respuesta es «un octavo». Tres respuestas diferentes a la misma pregunta es algo escandalosamente paradójico. ¿Cuál es la respuesta correcta?

El problema no tiene una solución matemática. En un caso real podría elegirse una de las respuestas teniendo en cuenta el proceso de manufactura de los cubos. En alguna parte dentro de la maquinaria debe haber algún procedimiento de aleatorización de alguna clase. ¿Es un calibrador que varía aleatoriamente para medir entre 0 y 1 cm? Si es así, la primera respuesta es la correcta. ¿O es una balanza que pesa aleatoriamente porciones de arcilla correspondientes a volúmenes entre 0 y 1 cm³, que luego se modelan en cubos perfectos? En ese caso es la tercera respuesta la que vale. O puede que el

proceso de aleatorización fuese totalmente distinto, lo que daría una cuarta respuesta posible a la pregunta de Van Fraassen.

La fábrica de cubos es un potente recordatorio de que la probabilidad es una herramienta matemática afilada que debe manejarse con cuidado al aplicarla a situaciones reales.

Pero no solo la lógica y la matemática pueden darnos sorpresas: la naturaleza también. Consideremos dos bolas pintadas de blanco y negro, respectivamente, guardadas al azar en dos urnas diferentes. Solo hay cuatro posibilidades: (BN, 0), (B, N), (N, B) y (0, BN). La probabilidad de encontrar ambas bolas en una misma urna es evidentemente 2 dividido por 4, o 1/2. Este modo de determinar probabilidades fue durante siglos el procedimiento estándar, y parece perfectamente obvio. Funciona para repartir votos entre dos candidatos y calcular las apuestas en póquer, pero en el mundo cuántico resulta inadecuada.

Los fotones no son como bolas en una urna. Su comportamiento exhibe otra peculiaridad de la mecánica cuántica sin paralelo en el mundo cotidiano: los fotones con la misma frecuencia (igual color) son absolutamente indistinguibles. Las monedas nuevas se parecen mucho unas a otras, pero a escala microscópica es fácil distinguir las rugosidades de su superficie. Y aunque las monedas fueran idénticas hasta donde nuestros sentidos tecnológicamente asistidos pudieran determinar, sus trayectorias por el espacio y el tiempo podrían seguirse y servir para diferenciarlas, con independencia de su recorrido. Las monedas pueden distinguirse por su historia, aparte de su apariencia. «Esta es la moneda A y esta otra la moneda B» siempre es un enunciado válido y verificable. Los fotones, en cambio, no pueden etiquetarse de esta manera. Una vez que se acercan unos a otros, expresan su carácter ondulatorio, se superponen y pierden sus identidades individuales. A diferencia de las monedas, son fundamentalmente indistinguibles.

Si se distribuyen entre dos polarizaciones diferentes (que hacen las veces de urnas), las únicas posibilidades para dos fotones por lo demás idénticos, representados mediante asteriscos, son (**, 0), (*, *) y (0, **). La probabilidad de encontrar ambos fotones en el mismo estado de polarización ha aumentado de 1/2 a 2/3. Este incremento puede parecer modesto, pero cuando se repite un billón de veces en una aplicación real, cambia de manera fundamental la estadística de los fotones. El físico indio Satyendra Nath Bose fue el primero en explorar las consecuencias de esta manera no convencional de contar, y tomando fotones en vez de osciladores hipotéticos consiguió reconstruir la ley de radiación de Planck. Einstein, que había propuesto la existencia de los fotones, se quedó sorprendido y hondamente impresionado por este cálculo. Se aseguró de que los otros físicos lo conociesen y luego generalizó la versión de Bose de la estadística resultante para aplicarla

también a partículas con masa. Ochenta años después, en 2001, se concedió un Premio Nobel por la observación experimental de la estadística de Bose-Einstein en ciertos átomos.

Los electrones también son indistinguibles, pero obedecen a una tercera regla de recuento, diferente tanto de la versión clásica como de la de Bose. El comportamiento de los electrones es opuesto al de los fotones. Si los fotones tienden a juntarse, los electrones se evitan mutuamente. Si reemplazamos las dos urnas por estados energéticos en un átomo o por espines opuestos, una ley mecanocuántica llamada principio de exclusión prohíbe que dos electrones estén en el mismo estado. Así, las distribuciones $(**, 0)$ y $(0, **)$ están estrictamente prohibidas, lo que deja $(*, *)$ como la única opción. Si esta extraña ley se suspendiera de pronto por arte de magia, todos los electrones de todos los átomos caerían al nivel de energía más bajo disponible, las distinciones entre los elementos químicos desaparecerían y la materia colapsaría.

Dos cambios simples en la manera de contar modifican las probabilidades subyacentes, que a su vez determinan la estadística cuántica de las partículas, lo que tiene profundas consecuencias para el comportamiento de la materia y la radiación. De hecho, las consecuencias son más que profundas: son existenciales. Sin la estadística de Bose-Einstein o el principio de exclusión, el mundo que conocemos no existiría.

Intentar encasillar las partículas elementales como si fueran canicas vuelve a plantear el problema de las categorías inapropiadas, con el que ya nos hemos encontrado a propósito de la dualidad onda/partícula y la idea de un punto giratorio. Las partículas elementales no se avienen al sentido común humano.

Las sorpresas teóricas y experimentales del estilo de la fábrica de cubos y la estadística de partículas deberían haber levantado banderas de advertencia cuando los físicos cuánticos invocaron la probabilidad en primera instancia, pero no fue así. Parte de la razón de este descuido podría estar relacionada con las suspicacias, rayando en el desdén, de los físicos hacia la filosofía. De hecho, la probabilidad no es solo un concepto cotidiano que manejan incluso los niños, sino que también ha sido tema de debate entre los sabios durante siglos. En cualquier caso, sean cuales sean las razones, cuando los físicos cuánticos alcanzaron el punto donde la teoría se encuentra con el experimento, bajaron la guardia, abdicaron de sus facultades críticas y sin pensar continuaron con la definición prevaleciente de probabilidad como «número de casos favorables dividido por número de casos posibles».

Dado que se basa en el recuento de ocurrencias de sucesos, esta interpretación del significado de la probabilidad se conoce como *probabilidad frecuentista*. Se desarrolló en una disciplina matemática rigurosa desde mediados del siglo XIX hasta la primera mitad del siglo XX, y se ha enseñado

en las escuelas como una verdad autoevidente. Por su definición como una razón de números, que son accesibles a la observación, la probabilidad frecuentista adopta un aire de objetividad. La probabilidad del 50 % para el juego de cara o cruz tiene la apariencia de una propiedad real e intrínseca de la moneda, un atributo medible similar a la masa y el tamaño.

Pero ni los frecuentistas más empedernidos van tan lejos. Solo afirman el carácter objetivo de una probabilidad derivada de una serie de lanzamientos de monedas, no de un examen de la moneda o del lanzamiento. Su definición de probabilidad debe extraerse de enunciados como este: «En un gran número de lanzamientos equitativos de una moneda equilibrada el número de caras es de alrededor del 50 %, de modo que la probabilidad de que salga cara es aproximadamente $1/2$ ». Pero a los matemáticos no les satisfacen palabras tan vagas como *gran*, *alrededor* o *aproximadamente*, así que en vez de eso imaginan una serie infinita de lanzamientos. Con ese cambio el número de caras es exactamente el 50 % y la probabilidad $1/2$. Por desgracia, la definición pierde su objetividad, porque se convierte en una hipótesis no verificable experimentalmente.

Otro problema de la formulación frecuentista es la palabra *equitativo*. Hay que presuponer que la moneda es perfectamente simétrica y el lanzamiento absolutamente idéntico para cada repetición. Pero en el mundo real las monedas perfectamente simétricas y los mecanismos de lanzamiento no sesgados no existen. En realidad, esto es bueno. Si cada lanzamiento de cada moneda pudiera reproducirse de manera idéntica en cada detalle, como se nos pide que supongamos, el resultado siempre sería el mismo (al menos en un mundo clásico, newtoniano y determinista). No habría secuencias aleatorias de caras y cruces, y el lanzamiento de monedas no incumbriría a la teoría de la probabilidad. Pero en los experimentos reales la información sobre la moneda y los lanzamientos es limitada. Lo bastante limitada para permitir cierta variación, pero no tanto para que las regularidades estadísticas no se dejen ver.

Los que se dedican a la teoría matemática formal de la probabilidad se distancian de estas preocupaciones y simplemente presuponen valores exactos de las probabilidades (como $1/6$ para el lanzamiento hipotético de un dado) y repeticiones infinitas como axiomas primarios, dejando las aplicaciones en el mundo real a jugadores, encuestadores, estadísticos médicos y físicos. Los matemáticos se apartan de los embrollos del mundo real. Sabedores de que una moneda nunca se arrojará un número infinito de veces, los matemáticos pulen sus definiciones y axiomas y luego demuestran sus teoremas rigurosos sobre monedas perfectas, lanzamientos no sesgados y paciencia infinita. Los físicos no pueden permitirse ese lujo.

El principio más trascendental de la interpretación frecuentista de la probabilidad es también el más efectivo a la hora de separar la matemática de

la experiencia del mundo real. Lo que afirma es que la probabilidad se aplica a ensayos múltiples, pero no nos dice nada de un caso o suceso individual. Para los frequentistas, la «probabilidad de caso único» es algo tan carente de sentido como el concepto de «diferencia» aplicado a un único número o el de «atracción» a una partícula solitaria.

No comprender esta restricción tiene que ver con la *falacia del jugador*, un coco de los profesores de instituto. Es la creencia errónea de que si hemos jugado al cara o cruz 100 veces y siempre ha salido cara, la probabilidad de que salga cruz la próxima vez que lancemos la moneda debe haber aumentado, porque una secuencia de 101 caras seguidas es ridículamente improbable. En particular, la falacia del jugador implica que los resultados previos de lanzamientos de monedas, tiradas de dados, manos de cartas y vueltas de ruleta (las largas secuencias de resultados que definen la noción misma de probabilidad) no nos permiten predecir el resultado siguiente. Esta regla se implanta en las cabezas de los alumnos como sabiduría popular.

La probabilidad frequentista es útil para los físicos que se dedican a efectuar múltiples ensayos de experimentos minuciosamente controlados, pero descarta la relevancia de la probabilidad para los casos aislados de la vida cotidiana. En el contexto de la probabilidad frequentista, enunciados como «la probabilidad de que llueva esta tarde es del 30 %», o «esta leche probablemente está estropeada», o «es probable que ella me quiera», o la estimación de Obama de una probabilidad entre el 45 % y el 55 % de que se encontrara a Osama bin Laden, carecen todos de sentido.

La siguiente anécdota sirve para remarcar el abismo entre la teoría matemática formal de la probabilidad y nuestro uso de la probabilidad en la vida diaria. Vas con un amigo a un auditorio donde un jugador en el escenario está lanzando una moneda al aire y te invita a participar. «Te apuesto un dólar a que sale cara», dice. «Si es cara, me pagas un dólar, si es cruz, te pago un dólar. ¡Así de simple!». Confías en que no caerás en la falacia del jugador y tienes ganas de aventura, así que decides probar suerte. Pero cuando estás a punto de abrir la boca, tu acompañante te susurra al oído: «Las últimas cien veces ha ganado, ¡siempre ha salido cara!».

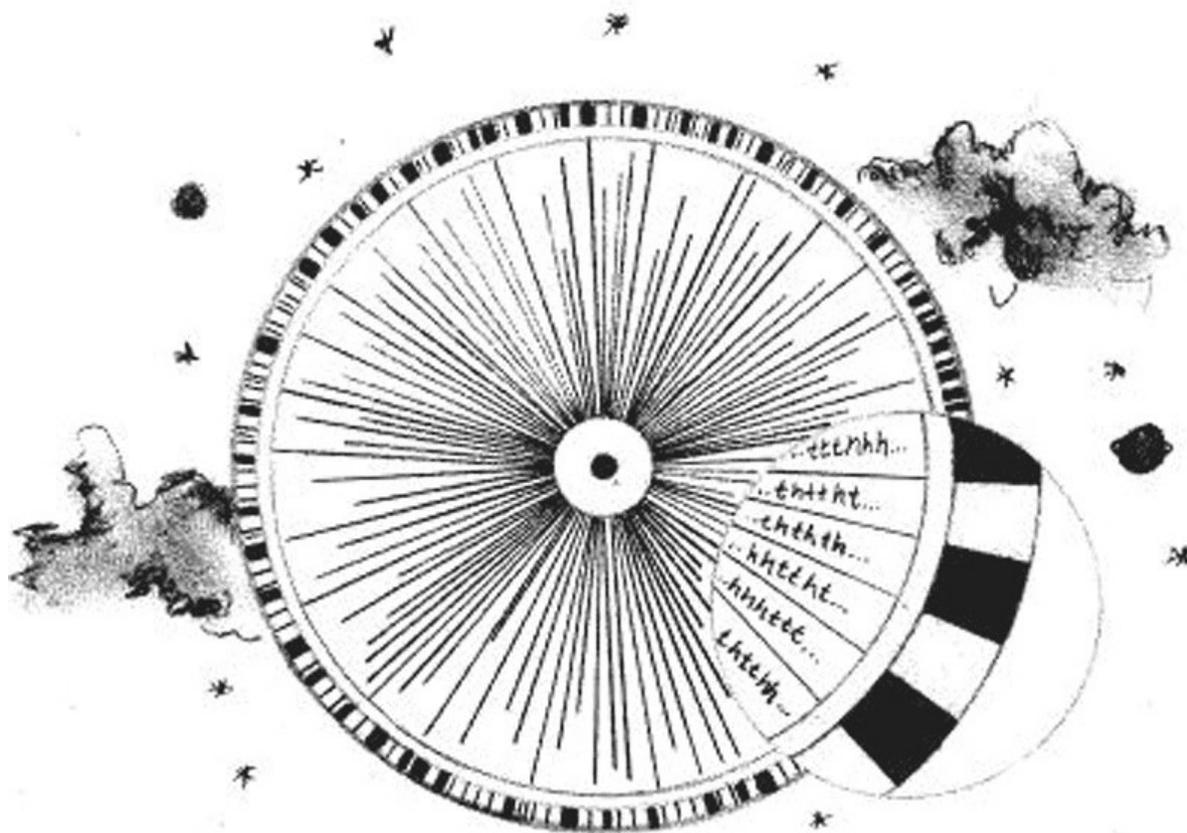
La pregunta es: ¿qué harás a continuación? Por favor, no conviertas el relato en un estéril problema de libro de texto preguntándome si la moneda está trucada, si el amigo está bien informado o si el jugador es honesto. Toma el guion tal cual y considera qué pasaría realmente. Haz lo posible por imaginar la situación como una experiencia de la vida real, con toda su ambigüedad e incertidumbre. Para mí la respuesta está clara: sucumbiría a la desacreditada falacia del jugador de que los sucesos previos afectan la apuesta, repudiaría la teoría de la probabilidad frequentista y me dejaría guiar por mi instinto. Por mucho que cien caras seguidas pueden darse en teoría por

puro azar, y eso no debería afectar al resultado del siguiente lanzamiento, yo no aceptaría la apuesta.

Un estadístico podría defender su teoría afirmando que *si* la moneda fuera realmente equitativa, el lanzamiento realmente no sesgado, y tanto el jugador como el amigo realmente honestos, entonces yo debería aceptar la apuesta. Muy bien, pero ¿cómo voy a saber todo eso? Sin más evidencia no arriesgaría ni un dólar. ¿Y tú?

¿Qué me convencería de que la moneda es equitativa? Si yo, o alguien de mi confianza, la lanzara cien veces y saliera cara alrededor de la mitad de las veces en un orden aparentemente aleatorio, convendría con la gente razonable en que ciertamente es equitativa, al menos a todos los efectos prácticos. Pero el razonamiento que debería aplicar para llegar a esta conclusión no es tan obvio como parece.

El físico matemático Marcus Appleby, uno de los primeros simpatizantes de la interpretación bayesiana de la mecánica cuántica, ilustró este punto con una vívida parábola^[19]. Imaginemos que Alice hace rodar una ruleta (europea) con sus 37 números una sola vez, obteniendo el número 11, de lo que concluye que la ruleta es equitativa. Está claro que su argumento no es válido, y cualquier persona sensata debería desestimarlo. El resultado de una tirada no puede decirnos nada de la imparcialidad de la ruleta. Ahora imaginemos un guion diferente en el que Bob lanza una moneda cien veces, obtiene una secuencia de caras y cruces que consiste en cincuenta caras y cincuenta cruces, más o menos, en un orden aparentemente aleatorio, y concluye que la moneda es equitativa.



Pues bien, si Bob se basa en hechos observados y *nada más*, su argumento no es mejor que el de Alice. Desde el punto de vista de la teoría matemática de la probabilidad, una secuencia de cien lanzamientos de una moneda es equivalente a un giro de una enorme ruleta con 2^{100} sectores, cada uno etiquetado con una secuencia diferente de cien caras y cruces. (Si se diseñara para una bola del tamaño de una canica, esta máquina monstruosa no cabría en todo el volumen finito del universo observable). A un sector se le asigna precisamente la secuencia obtenida por Bob con su moneda. De este modo, con una vuelta de su fabulosa ruleta obtiene un resultado del que concluye que todas las secuencias son igualmente probables y, por lo tanto, la ruleta, como la moneda equivalente, es equitativa. A pesar de la gigantesca diferencia de escala, el argumento de Bob es tan falaz como el de Alice.

Appleby ideó este ejemplo para ilustrar una perturbadora inconsistencia en la concepción frecuentista de la probabilidad. En sentido estricto, no existe una definición de probabilidad para un suceso aislado. El resultado de dividir los casos favorables por los casos posibles es una propiedad del conjunto de las repeticiones del suceso, sea su número finito o infinito. Y sin embargo, como veremos con la analogía de la ruleta, los frecuentistas aplican tácitamente el concepto de probabilidad aplicada a un único suceso, una probabilidad de caso único, aunque no puedan definirla.

De hecho, para poder afirmar que su moneda es equitativa, Bob debe rechazar la analogía de la ruleta y esgrimir un argumento que se basa en supuestos tácitos. Debe dar por sentado que sus cien lanzamientos de moneda son sucesos independientes, y que la probabilidad de que salga cara es la misma en cada lanzamiento. Pero incluso esto es insuficiente. Si acepta estos supuestos y toma $1/2$ como el valor numérico de la probabilidad de que salga cara, obtiene la minúscula probabilidad de $(1/2)^{100}$ para la secuencia particular de caras y cruces que observó. (El número $(1/2)^{100}$ es inimaginablemente pequeño. Puede representarse por la longitud resultante de cortar una vara de un metro por la mitad cien veces, y por pura casualidad es solo un poco mayor que la constante de Planck en unidades métricas). Por desgracia, Bob no puede hacer nada con esta probabilidad infinitesimal. Es como la probabilidad $1/37$ de obtener el número 11 en el caso de Alice, y no implica nada en absoluto en cuanto a equitatividad. En particular, una moneda trucada también podría haber dado la misma secuencia de caras y cruces observada. Por eso Bob debe ahondar en la teoría y, en vez de dar por sentado el famoso $1/2$ para la probabilidad de obtener cara con su moneda, considerar también otras probabilidades. Tomando valores como $0,7$ o $0,2$, que implican un sesgo a favor o en contra de las caras, respectivamente, debe repetir su cálculo de la probabilidad de la secuencia particular que obtuvo. Solo ahora, tras esa cadena de supuestos y cálculos, llega a un resultado útil: la probabilidad calculada para su secuencia, aunque minúscula, es mucho mayor cuando supone una probabilidad $0,5$ que la que obtiene suponiendo que la moneda está sesgada. Finalmente aquí tenemos una respuesta matemática a la pregunta: ¿es equitativa la moneda? Sí, porque la probabilidad $1/2$ es, cuantitativamente, el supuesto más probable.

Nótese lo que Bob se ha visto obligado a hacer. Una y otra vez se ha referido a las probabilidades para lanzamientos aislados de una moneda (a probabilidades de caso único). Primero tuvo que presuponer que esta probabilidad es la misma para cada lanzamiento (un enunciado que solo tiene sentido si la probabilidad para un único lanzamiento está definida). Luego tuvo que asignar valores numéricos concretos a esa probabilidad de caso único para determinar el que daba la mayor probabilidad para la secuencia entera. Solo cuando ese valor especial resultó estar próximo a $0,5$ pudo afirmar que su moneda es equitativa.

Marcus Appleby concluyó que, en realidad, la probabilidad frecuentista no se basa exclusivamente en largas secuencias de ensayos, finitas o infinitas. Para que sea consistente hay que admitir las probabilidades de caso único como los elementos fundamentales, los «átomos» por así decirlo, de la teoría de la probabilidad. En pocas palabras, el frecuentismo es inconsistente.

Al final de su artículo, Appleby daba las gracias a Chris Fuchs, el cointroductor del QBismo, por hacerle «ver la importancia de estas

cuestiones». Este reconocimiento es un indicio de la batalla que libramos los partidarios de este enfoque. La mayoría de mis colegas en la comunidad física ignoran alegremente los problemas con el concepto de probabilidad. No llegan a apreciar la importancia de estas cuestiones.

La probabilidad según el reverendo Bayes

El bayesianismo cuántico —o QBismo— se basa en una interpretación de la probabilidad que lleva el nombre del reverendo Thomas Bayes (1701-1761), un ministro presbiteriano que también fue un competente matemático y estadístico. Su fama se basa en un único artículo, publicado póstumamente, en el que introdujo un caso especial de un resultado más general que ahora se conoce como *ley de Bayes* (o también teorema, regla, fórmula o ecuación de Bayes). La ley de Bayes es la piedra angular de la *teoría de la probabilidad bayesiana*, una empresa floreciente iniciada por el astrónomo y matemático Pierre-Simon Laplace (1749-1827), entre otros, y continuada por las generaciones subsiguientes de sabios.

Después de Laplace, durante un siglo la teoría de la probabilidad y la estadística continuó con la tradición bayesiana. Luego un grupo de matemáticos, entre los que estaba John Venn (1834-1923), famoso por los diagramas epónimos, introdujo la definición frecuentista en términos de ensayos repetidos, en un intento de hacer «más objetiva» la noción de probabilidad. La seductoramente simple fórmula «casos favorables dividido por casos posibles» acabó dominando la enseñanza. Los físicos también adoptaron el frecuentismo porque los experimentos de laboratorio en física son, en principio, simples, repetibles y cuantificables. Otras ciencias, sobre todo disciplinas como la biología, la psicología, la economía y las ciencias médicas, donde las incertidumbres son considerables y los experimentos sin ambigüedades difíciles de llevar a la práctica, se esforzaban en mantener la conexión con el mundo imaginario de las monedas equilibradas y las repeticiones infinitas. Hasta que, a mediados del siglo xx, el péndulo de la práctica corriente comenzó a volver al viejo punto de vista bayesiano como alternativa al frecuentismo. Incluso los astrónomos y los físicos experimentales, inundados por torrentes de datos que requerían análisis estadístico, comenzaron a redescubrirlo^[20]. Finalmente, a principios del

presente milenio, esta tendencia prendió también en la física cuántica, y nació el QBismo.

Los matemáticos, estadísticos y filósofos de la matemática han analizado, diseccionado y recompuesto la noción de probabilidad bayesiana, lo que se ha traducido en un enorme número de variaciones y refinamientos ahora disponibles. El QBismo se basa en una versión de la probabilidad bayesiana descrita como «personalista» y «subjetiva». Esta es la única variante que consideraré en este libro.

La probabilidad es una medida de las posibilidades de que ocurra un suceso. En la conversación ordinaria las estimaciones de la probabilidad se expresan en términos tales como «imposible, improbable, quizá, difícil de decir, posible, muchas posibilidades, prácticamente seguro, seguro, no cabe duda ninguna», pero a efectos científicos es deseable asignar valores numéricos a las probabilidades. Para situaciones simples e idealizadas, como los lanzamientos de monedas o los disparos de electrones a una diana, que pueden efectuarse en condiciones controladas, la probabilidad frecuentista cumple esta función. Pero en interés de la consistencia lógica, como hemos visto, y también a efectos prácticos, se requiere una definición de probabilidad que sea aplicable a sucesos únicos. El frecuentismo no puede ofrecerla.

El bayesianismo traslada la localización de la probabilidad del mundo material externo a la mente de una persona, llamada *agente*. En este contexto, un agente (del latín *agere*, «actuar») no es un representante de otros, sino alguien capaz de tomar decisiones y llevar a cabo acciones. La probabilidad bayesiana es una medida del *grado de creencia* personal del agente en que ocurrirá un suceso o en la verdad de una proposición. La palabra *agente* imbuje a la definición de la posibilidad de consecuencias reales (las cavilaciones privadas que no afectan al mundo no tienen ningún interés para la ciencia). Una «creencia» es algo personal y subjetivo. Toma forma como resultado de influencias muy diversas, que solo el agente en cuestión conoce exactamente. Los bayesianos no pretenden hurgar en las fuentes de las creencias de un agente, ni juzgarlas.

Pero sí quieren cuantificar el «grado» de creencia. ¿Cómo se mide la intensidad de una creencia? No se puede, a menos que se traduzca en alguna acción discernible externamente. El ingenioso dispositivo empleado para convertir las estimaciones cualitativas en números es una versión formalizada de la apuesta. Un agente interpreta el papel de apostador. La cantidad que está dispuesto a jugarse en una apuesta monetaria imaginaria —con independencia de cómo llega a esa decisión— se usa para definir su estimación de la probabilidad de un suceso. La teoría de la probabilidad vuelve así a sus antiguas raíces en las apuestas y los juegos de azar.

Para estandarizar el procedimiento y asegurar que las probabilidades así medidas sean números reales entre 0 y 1 (o porcentajes equivalentes), la definición bayesiana parte de un contrato estándar entre las partes apostantes que toma la forma de un cupón con las palabras «Si ocurre el suceso E , el vendedor de este cupón pagará al comprador un dólar». Una vez que los apostantes han acordado una descripción precisa del suceso E , se compran y venden mutuamente tales cupones. Si un comprador piensa que la ocurrencia de E es segura —por ejemplo, que el sol saldrá mañana— le asigna una probabilidad 1. En tal caso estará dispuesto a pagar cualquier precio hasta un dólar por el cupón. (Pagar un dólar entero implicaría no ganar nada, una apuesta estúpida). Por otro lado, si cree que el suceso E es imposible —por ejemplo, que su taza de café levitará hacia el techo cuando la suelte— le asignará una probabilidad 0 y no pagará nada por un cupón.

El procedimiento puede hacerse extensivo a sucesos que no sean ni seguros ni imposibles. En el caso de una moneda al aire, por ejemplo, el agente ha aprendido en la escuela y por experiencia propia que la probabilidad de que salga cara (el suceso E en este caso) se supone que es $1/2$, así que pagará hasta cincuenta centavos por un cupón. Luego se lanza la moneda, y si sale cara recibe un dólar, con lo que gana cincuenta centavos como mínimo. Si sale cruz, pierde sus cincuenta centavos o menos (una apuesta justa).

En general, la definición bayesiana formal de probabilidad, por acientífica que pueda sonar, es la siguiente: la asignación por un agente de la probabilidad p para la ocurrencia de un suceso E significa que el agente está dispuesto a pagar cualquier cantidad hasta p dólares por un cupón que vale un dólar si ocurre E . Y a la inversa, el agente está dispuesto a vender el cupón por cualquier cantidad de p dólares o más.

La probabilidad así definida resulta ser un número real entre 0 y 1 (ambos incluidos), igual que la probabilidad frecuentista. Pero detrás de su similitud aparente, las dos definiciones difieren radicalmente. Para quienes se han formado en una tradición no es fácil pasarse a un punto de vista completamente nuevo. A diferencia de un cepillo de dientes nuevo, una nueva manera de entender la probabilidad no puede sustituir al modelo antiguo de un día para otro. Solo por esta razón, el QBismo no se impondrá en la comunidad física por asalto, pero no hay nada en el horizonte que pueda pararlo, ninguna objeción simple que lo descarte sumariamente. La probabilidad bayesiana ha demostrado su valor como herramienta sólida y eficaz en buena parte de la esfera científica y tecnológica. El QBismo amplía su dominio de aplicación a la mecánica cuántica.

A los físicos, yo incluido, la probabilidad bayesiana suele desconcertarles de entrada. Hablar de «grados de creencia» parece algo palmariamente ajeno al vocabulario propio de la física. Los físicos en general piensan que las

«grandes leyes de la naturaleza» no deberían tener nada que ver con la subjetividad o las creencias de agentes individuales. Pero la alternativa, el frecuentismo, tiene una frustrante manera de apartarse del mundo real y convertirse en cháchara académica y estéril de libro de texto. Al rechazar la falacia del jugador —que la probabilidad puede predecir algo observable acerca de un suceso único—, el frecuentismo se condena a la irrelevancia cuando se trata de tomar decisiones para la acción futura. Si la predicción de un 70 % de probabilidad de que llueva esta tarde no dice *nada* de lo que va a ocurrir, ¿en qué me ayudaría esa predicción a decidir si llevarme el paraguas cuando salga de casa? Pero el caso es que la predicción *significa* algo: yo interpreto la predicción del 70 % como mi «grado de creencia» en lo que puede esperarse del tiempo esta tarde, y por supuesto eso influye en mi decisión (igual que la estimación del presidente Obama de que Osama bin Laden estaría en casa influyó en su mucho más importante decisión de ordenar el asalto a la residencia del líder de Al Qaeda).

Si la física se contempla como una aventura humana épica en vez de una colección de hechos crudos, entonces también requiere un flujo constante de decisiones, que a su vez se basan en grados de creencia. Cada evaluación de datos, cada acometida de un nuevo cálculo, cada diseño de un experimento, cada debate y cada conclusión, cada paso de la empresa implica decisiones entre múltiples opciones. Y las probabilidades estimadas de sucesos únicos conforman todas ellas.

Además de decisiones, también hay revisiones. Nada distingue más claramente la probabilidad bayesiana del frecuentismo que la posibilidad de cambio. Los grados de creencia personales cambian, y en consecuencia también lo hacen las asignaciones de probabilidades a los sucesos. La probabilidad frecuentista, modelada como lo está en los lanzamientos de monedas, queda grabada en piedra, o quizá en plata o cobre, una vez definida, pero la probabilidad bayesiana, que reside en la mente humana, puede cambiar por el camino. Y precisamente de esta maleabilidad partió la historia de la probabilidad bayesiana en primera instancia. La ley de Bayes es una prescripción matemática para cambiar una probabilidad cuando se adquiere alguna evidencia nueva que modifica el grado de creencia original (recordemos cómo cambió mi parecer sobre el jugador en el auditorio).

La ley de Bayes responde a la siguiente pregunta: suponiendo que conocemos o damos por sentado el valor de la probabilidad de algún suceso específico, y que luego adquirimos una nueva información relevante, como un resultado experimental o una noticia inesperada, ¿cómo modifica esa nueva información nuestra probabilidad estimada?

El valor de la ley de Bayes reside en su rigor matemático. Las probabilidades son creencias, y las creencias, a diferencia de los hechos, son maleables. Pero ¿cómo se adapta la probabilidad a la información nueva para

dar una probabilidad actualizada? Ese procedimiento es un resultado matemático tan evidente e indiscutible como el teorema de Pitágoras.

Ilustraré la ley con un ejemplo. Supongamos que hay un tipo de cáncer con una incidencia bien conocida del 0,5 % en la población general, lo que significa que afecta a una de cada doscientas personas. Supongamos ahora que se ha puesto a punto un nuevo test sanguíneo para la detección de la enfermedad que es fiable en un 99 % (lo que quiere decir que solo el 1 % de las veces el test da un resultado incorrecto). Nuestro médico sospecha que podemos tener la enfermedad, nos toma una muestra de sangre y la envía a analizar. Al cabo de unos días, para horror nuestro, el médico nos llama para comunicarnos que el test ha dado positivo.

¿Cuál es la probabilidad de que tengamos cáncer? ¿Hasta qué punto deberíamos preocuparnos? En vista de que el test es tan fiable, ¿deberíamos asumir lo peor? ¿Deberíamos informar a nuestros amigos y familiares? ¿Deberíamos buscar una segunda opinión? ¿Cómo podemos atenuar nuestro pánico creciente con una evaluación razonable de nuestras posibilidades? ¿Hay un rayo de esperanza en la constatación de que podríamos no tener cáncer, de que el test ha dado un resultado erróneo, lo que se conoce como falso positivo?

La ley de Bayes proporciona una manera metódica de abordar estas cuestiones. Es una relación entre cuatro probabilidades diferentes, todas expresables como números entre 0 y 1 o como porcentajes. Representemos la nueva información de que el test ha dado positivo por un signo más, y el suceso en cuestión, la constatación de que realmente tenemos cáncer, por una cara triste. Entonces $p(+ \rightarrow \ominus)$ representa la respuesta numérica a la pregunta: ¿cuál es nuestro grado de creencia en el enunciado «El positivo del test implica que realmente se tiene cáncer»? Este es el número que deberíamos buscar, las posibilidades en las que basar nuestro estado de ánimo.

El segundo componente de la ley de Bayes es la probabilidad de que el test dé positivo para el conjunto de la población (enfermos y sanos incluidos). Llamémosla $p(+)$. En tercer lugar necesitamos $p(\ominus)$, la probabilidad de tener cáncer antes de someterse al test. Esto no es más que la incidencia poblacional de cáncer de la que hemos partido, a saber, un 0,5 %.

El cuarto número, como apreció Bayes, es el quid de la cuestión. Lo representaré por $p(\ominus \rightarrow +)$, y es la probabilidad de que, sabiendo con seguridad que se tiene cáncer, el resultado del test sea positivo. Como sugiere mi símbolo, viene a ser una probabilidad inversa, que da respuesta a una pregunta inversa. No «Si tengo un resultado positivo del test, ¿cuáles son mis posibilidades de tener cáncer?», sino «Si tengo cáncer, ¿qué posibilidades hay de que el test salga positivo?». La confusión descuidada de estas dos preguntas hace mucho daño. Difieren de manera tan fundamental como «Los

delincuentes son en su mayoría hombres» y «Los hombres son en su mayoría delincuentes».

Con toda esta maquinaria, la ley de Bayes no es más que la ecuación

$$p(+) \times p(+ \rightarrow \ominus) = p(\ominus) \times p(\ominus \rightarrow +).$$

Intuitivamente es fácil de captar. Si se escribe en términos de porcentajes, expresa un hecho obvio. De entre la población entera podemos seleccionar todos los que han dado positivo $p(+)$, y *de entre ellos* seleccionar solo los que tienen cáncer $p(+ \rightarrow \ominus)$. Alternativamente, podemos proceder al revés y seleccionar los que tienen cáncer $p(\ominus)$, y *de entre ellos* elegir solo los que han dado positivo $p(\ominus \rightarrow +)$. Por ambos caminos acabaremos con el mismo grupo de gente: los que han dado positivo y tienen cáncer.

Hagamos las cuentas.

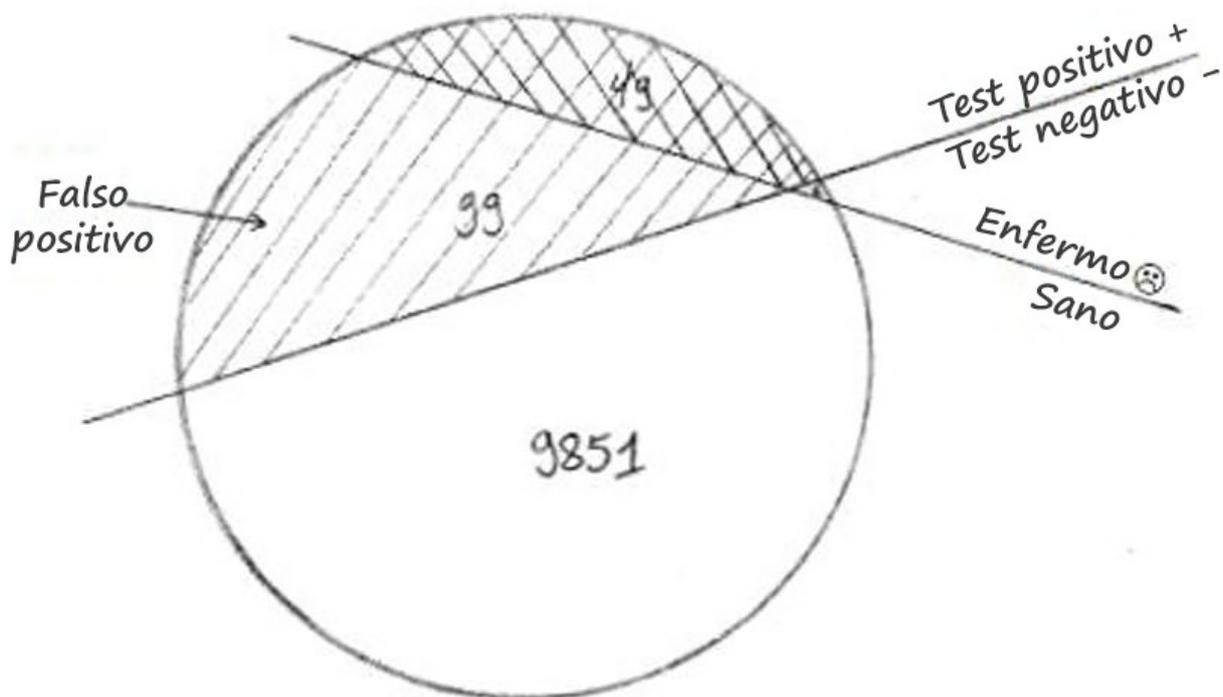
La probabilidad de tener la enfermedad es $p(\ominus) = 0,5\%$. El segundo término del lado derecho, la probabilidad inversa, estima la probabilidad de dar positivo suponiendo que se tenga cáncer. Como el test es tan fiable, podemos tomar como una buena aproximación $p(\ominus \rightarrow +) \approx 100\%$. Este es el número que nos provocó ansiedad cuando el médico nos llamó para darnos la mala noticia. Sabiendo que el test tiene casi un 100% de aciertos, la mayoría intuye que un resultado positivo casi con seguridad implica un diagnóstico confirmado de cáncer. ¡Pero no es así!

El ingrediente más tramposo de la fórmula es $p(+)$, que mide la probabilidad de un resultado positivo del test en el conjunto de la población. Hemos convenido en que el 0,5% de la población tiene la enfermedad, que el test detectará casi con seguridad. Pero nos queda un 1% de gente sana (que son la abrumadora mayoría de la población total) que se encontrará con un falso positivo, así que la fracción total de gente que da positivo es $p(+) \approx 1,5\%$.

Juntémoslo todo y dividamos ambos lados de la ecuación por $p(+)$. La probabilidad de que estemos enfermos habiendo dado positivo es $p(+ \rightarrow \ominus) \approx 0,5\% \times 100\% / 1,5\% = 100\%/3 \approx 33\%$. (Nótese que dos de los tres porcentajes en la segunda expresión se cancelan). El resultado final que da la ley de Bayes es que nuestras posibilidades de tener cáncer se reducen a una de cada tres. Es un compromiso razonable entre la estadística de la incidencia poblacional de cáncer, que nos da una probabilidad del 0,5% de tener cáncer, y la estadística del test, que erróneamente sugería una probabilidad cercana al 100%. ¡Qué alivio! Es aconsejable repetir el test con urgencia. Dado que es improbable dar un falso positivo dos veces, la repetición del test reducirá drásticamente la incertidumbre (para bien o para mal).

La curiosa repartición de la gráfica circular que se muestra, para una población total de diez mil personas, representa números reales con los que se pueden comprobar los porcentajes (aproximados). Las secciones con los números 49 y 99 en el diagrama comprenden todos los que dieron positivo. Si hemos dado positivo estamos en una de esas dos categorías, pero no sabemos cuál, así que nuestras posibilidades de tener cáncer son una de tres, tal como predice la ley de Bayes.

En un contexto más general, el signo + puede reemplazarse por I , que es la información nueva, y la cara triste por E , que denota un suceso. Con estas sustituciones y volviendo a dividir ambos lados de la igualdad por $p(I)$, la ley de Bayes adopta su forma convencional:



$$p(I \rightarrow E) = p(E) \times p(E \rightarrow I) / p(I)$$

Dos de los términos constituyen la carne y el queso de la hamburguesa, por así decirlo, mientras que los otros dos son el bollo. El primer término del lado derecho, $p(E)$, no es más que la probabilidad del suceso E antes de que se aporte la información nueva I . Por esa razón $p(E)$ se denomina probabilidad a priori. A veces es una conjetura infundada que se introduce simplemente para tener algo con lo que empezar, esperando que la aplicación repetida de la ley de Bayes la mejore. El término del lado izquierdo, $p(I \rightarrow E)$, es la nueva estimación de la probabilidad (a posteriori) para el mismo suceso E , actualizada por la adquisición de la información nueva I . Los otros dos términos constituyen el aparato técnico para efectuar la revisión. La idea de

actualizar una probabilidad a priori mediante esta regla simple es la esencia de la interpretación bayesiana de la probabilidad^[21].

En el ejemplo del cáncer, nuestra estimación de la probabilidad de estar enfermo antes de la llamada del médico —la probabilidad a priori— era del 0,5 %. Tras la llamada del médico, nuestro temor intuitivo de que la probabilidad de estar enfermo había aumentado hasta cerca del 100 % era un error. La ley de Bayes muestra que nuestra estimación debería actualizarse al 33 %.

La potencia de la ley de Bayes deriva de su capacidad de combinar información de fuentes muy diferentes, una hazaña de integración que resulta más difícil con la metodología frecuentista, más adaptada a combinar conjuntos de datos homogéneos. En nuestro ejemplo la probabilidad a priori procedía de estudios estadísticos poblacionales a gran escala, mientras que la precisión del test de cáncer presumiblemente se midió en estudios clínicos controlados. En los cálculos bayesianos no solo intervienen datos numéricos. La historia y la intuición pueden ayudar a un agente a elegir una probabilidad a priori y luego actualizarla. El ejemplo del jugador en el auditorio, que supuestamente había sacado cara cien veces seguidas, subraya la utilidad en la vida real de permitir que la información añadida y las hipótesis nuevas afecten a las probabilidades, definidas como grados de creencia.

La versatilidad, la generalidad y la consistencia lógica hacen recomendable el bayesianismo por encima de su rival frecuentista como la interpretación primaria de la probabilidad. En climatología, ciencia que hace predicciones sobre la manifiestamente única atmósfera de la Tierra y combina evidencias de una amplia variedad de fuentes, la teoría de la probabilidad bayesiana es a menudo la técnica matemática preferente. Otras disciplinas, como las ciencias sociales, la biología, la medicina y la ingeniería, le sacan partido. En casos simples la fórmula frecuentista «casos favorables dividido por casos posibles» puede determinar las probabilidades numéricamente, pero la definición bayesiana continúa dándoles sentido. La medida del área de una hoja de papel de forma irregular ilustra la diferencia fundamental entre *determinación* y *definición*. Aunque el área pueda determinarse convenientemente dividiendo el peso del papel (en gramos) por su densidad (en gramos por metro cuadrado), el significado de la palabra *área* sigue siendo estrictamente geométrico, sin referencia al peso o la densidad.

¿Qué ocurre cuando el bayesianismo se encuentra con la mecánica cuántica, la cual, como hemos visto, se basa de manera tan fundamental en el concepto de probabilidad?

TERCERA PARTE
Bayesianismo cuántico

El QBismo explicitado

Como un río ancho que crece absorbiendo incontables arroyos y afluentes a lo largo de su curso, la ciencia normalmente avanza gradualmente a medida que incorpora un flujo continuado de datos frescos e ideas novedosas. El nacimiento del QBismo, en cambio, fue más parecido a la confluencia de dos grandes corrientes. A principios del siglo XXI, la mecánica cuántica, una ciencia madura y sofisticada con setenta y cinco años, se unió a la probabilidad bayesiana, una rama de las matemáticas recientemente rejuvenecida que data del siglo XVIII, en una poderosa confluencia de cuerpos de conocimiento bien establecidos. Los creadores del QBismo no inventaron ni una cosa ni otra, pero las juntaron, con profundas implicaciones no solo para la mecánica cuántica misma, sino para la visión científica del mundo en general.

La tesis principal del QBismo no es más que esta: las probabilidades cuánticas son medidas numéricas de grados de creencia personal.

Si no se ha oído hablar de la probabilidad bayesiana con anterioridad, esta proposición puede parecer estafalaria. ¿Acaso la ciencia no consiste en eliminar lo *personal* en favor de lo *universal*? ¿Acaso la *creencia* no es la antítesis misma del *conocimiento*, y por ende de la ciencia? Así es como reaccionan la mayoría de los físicos, y así reaccioné yo también cuando tropecé con el documento fundacional del QBismo, publicado en 2002. El artículo anunciaba audazmente su sorprendente conclusión directamente en el título: «Probabilidades cuánticas como probabilidades bayesianas»^[22].

La decisión de pasar de la probabilidad frecuentista a la interpretación bayesiana de la probabilidad está sujeta a una suerte de análisis de coste/beneficio. Por un lado, es justo preguntarse qué ganamos con el cambio. Por otro lado, también hay que preguntarse cuáles son sus inconvenientes, cuál es el coste de dar el salto.

El coste de adoptar el QBismo no es ni mucho menos tan grande como podría parecer, porque el bayesianismo tiene un historial que lo avala. La

interpretación de la probabilidad en términos de estimaciones personales de apuestas, aunque a primera vista resulte desconcertante para la mayoría, no solo es más antigua que el frecuentismo, sino que también la han adoptado legiones de científicos e ingenieros en los campos más dispares. Ha sobrevivido durante siglos y ha pasado el examen de incontables aplicaciones significativas. Por poco familiar que resulte, no es estrafalaria en absoluto.

En el lado positivo de la balanza, el QBismo ofrece beneficios considerables, el más convincente de los cuales es la solución del enojoso problema del colapso de la función de onda. En la versión convencional de la teoría cuántica, la causa inmediata del colapso se deja sin explicar. No hay ninguna descripción matemática de cómo tiene lugar en el espacio y en el tiempo, a diferencia de los procesos de la física clásica. La propagación de perturbaciones mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, acústicas y térmicas de un punto a otro, y su influencia en objetos cercanos y lejanos, son cosas que se entienden con un detalle matemático meticuloso. Incluso los efectos de la gravedad, el lazo que nos mantiene juntos en el universo, pueden seguirse con confianza, paso a paso, desde aquí hasta las estrellas, y en sentido inverso, mediante el laborioso formalismo de la relatividad general. Pero el colapso de la función de onda ha seguido siendo algo milagroso, una irritante espina clavada en el cuerpo de la física matemática.

El QBismo resuelve el problema de manera fácil y elegante. En cualquier experimento, la función de onda calculada proporciona las probabilidades a priori para las observaciones empíricas que puedan hacerse después. Una vez se ha hecho una observación (la partícula ha dejado su marca, el detector ha emitido un chasquido, se ha determinado el espín, o se ha medido la posición o la velocidad) hay una nueva información disponible para el agente que lleva a cabo el experimento, que le permite actualizar su probabilidad y su función de onda, de manera instantánea y sin magia. El colapso se despoja así de su misterio. La actualización bayesiana lo describe y finalmente hace explícito el paso que faltaba.

El funcionamiento del proceso es claro. Consideremos un ejemplo. Alice, en Nueva York, elige dos tarjetas, una negra y una roja, y las mete en sendos sobres separados sin ninguna marca, que sella y luego baraja. Para asegurarse de que son indistinguibles, le pide a su amigo Bob que los baraje también. Luego se guarda uno en su bolso y le entrega el otro a Bob. A continuación Alice se va a Australia. Antes de abrir su sobre, su grado de creencia en que Bob tiene la tarjeta roja es del 50 %. Pero después de abrir el sobre y mirar su tarjeta, sabe lo que hay en el sobre de Bob, aunque esté a veinte mil kilómetros de distancia. De este modo actualiza su grado de creencia al 100 % o 0 % de manera instantánea. Mientras tanto, la expectativa de Bob del color de la tarjeta de Alice, sea el que sea, no cambia por las acciones de ella. No hay milagro.

El colapso de la función de onda cuántica sigue la misma lógica, con una diferencia crucial. En el caso clásico, hay una cadena ininterrumpida de causa y efecto de principio a fin. Un objeto material, en la forma de una tarjeta escondida en un sobre, porta un mensaje en el bolso de Alice. La tarjeta actúa como un mensajero secreto, un ejemplo de lo que los físicos llaman *variable oculta*, con un bit de información de rojo o negro. En el dominio clásico el desconocimiento de Alice oscurece la información, pero en principio ella puede acceder a la misma en cualquier momento de su viaje sin más que abrir el sobre. En el dominio cuántico, en cambio, no hay tarjetas en sobres, ni mecanismos objetivos que lleven mensajes secretos, ni variables ocultas. No hay manera, ni siquiera en principio, de averiguar dónde está un electrón, a qué velocidad se desplaza o adónde apunta su espín entre el momento de su disparo y el de su detección. Que no hay variables ocultas es una afirmación que puede comprobarse y se ha comprobado experimentalmente, algo a lo que ya llegaremos.

Cuando comencé a entender el QBismo y me di cuenta de que con solo adoptar una definición de probabilidad más conveniente podía dejar de interrogarme por el sentido del colapso de la función de onda, me invadió una sensación de liberación al borde de la euforia. «¡Por supuesto, así es como funciona!», me dije. Fue un delicioso sentimiento de iluminación inesperada e inmerecida, mi «momento eureka» privado.

Por si la explicación del colapso de la función de onda como una simple actualización de una probabilidad no fuera bastante, el QBismo aporta otra clarificación igualmente significativa. En 1961, justo cuando estaba empezando mi carrera, el pionero de la física cuántica Eugene Wigner (1902-1995) señaló una ambigüedad fundamental conocida como la *paradoja del amigo de Wigner*, que también podría llamarse «¿La función de onda de quién?». Wigner y un amigo están llevando a cabo un experimento mecánico juntos. Convienen en que el sistema que están observando, digamos el espín de un electrón, viene descrito por una función de onda de un *cúbit* consistente en una superposición de las dos posibles orientaciones etiquetadas como *arriba* y *abajo*. Se efectúa el experimento, y el contador registra el resultado. El amigo lee el contador mientras Wigner, de espaldas al aparato, espera hasta saber que el experimento ha concluido. El amigo sabe que la función de onda ha colapsado en el resultado *arriba*. Wigner, por su parte, sabe que se ha efectuado una medida, pero no conoce el resultado. La función de onda asignada por él es una superposición de dos resultados posibles, como antes, pero ahora asocia cada polo del *cúbit* del electrón con una determinada lectura del contador y con el conocimiento de su amigo de dicha lectura (un conocimiento que Wigner no comparte).

¿Quién tiene razón? ¿Ha colapsado el *cúbit*, o sigue siendo una superposición? Si la función de onda se contempla como algo real o como la

descripción de un proceso real, la cuestión no es más fácil de resolver que la infausta pregunta del obispo Berkeley sobre el árbol en el bosque: cuando cae un árbol en el bosque sin que nadie lo oiga, ¿hace algún ruido? La respuesta ha sido objeto de debate durante tres siglos y aún genera controversia. Einstein, quien pensaba por sí mismo en vez de remitirse a autoridades antiguas, formuló la misma cuestión en términos diferentes. Su colega Ernst Pascual Jordan lo recordaba así: «A menudo discutíamos sus ideas sobre la realidad objetiva. Recuerdo que durante un paseo Einstein se paró de pronto, se volvió hacia mí y me preguntó si realmente creía que la luna existía solo cuando yo la miraba»^[23]. El problema del amigo de Wigner (¿qué función de onda y qué asignación de probabilidad son las correctas?) vuelve a poner en cuestión el significado de la palabra *probabilidad*, y es tan controvertido como la pregunta de Berkeley.

Desde la óptica del QBismo, sin embargo, aquí no hay problema alguno: tanto Wigner como su amigo hacen lo correcto. Cada uno asigna una función de onda que refleja la información disponible, y dado que sus respectivas recopilaciones de información difieren, sus funciones de onda también lo hacen. Tan pronto como Wigner mira el contador por sí mismo o escucha el resultado que le dice su amigo, actualiza su función de onda con la nueva información, y los dos vuelven a concordar (en una función de onda colapsada).

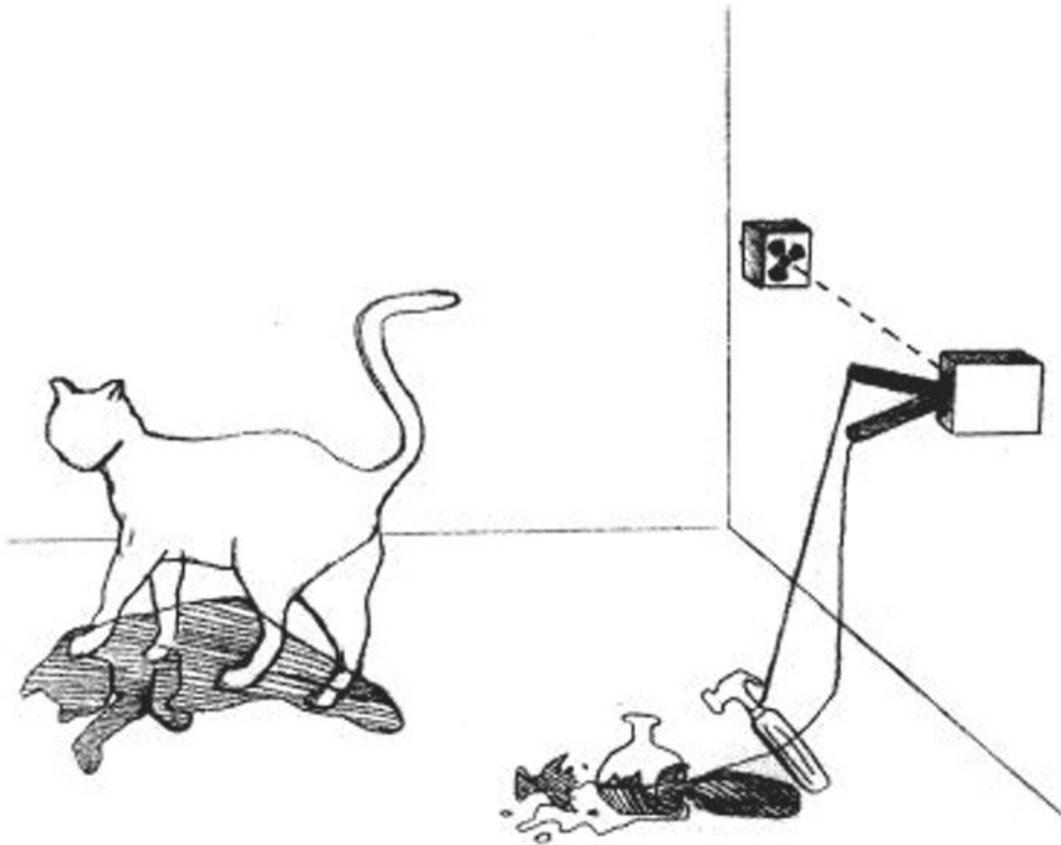
El problema del amigo de Wigner surgía de la pregunta: ¿quién tiene razón? En otras palabras, ¿cuál es la función de onda del electrón correcta? De acuerdo con el QBismo, no hay una función de onda única. Las funciones de onda no están asociadas a los electrones como los halos a las cabezas de los santos, sino que son asignadas por un agente y dependen de la información total de la que dispone ese agente. Son maleables y subjetivas. En pocas palabras, las funciones de onda y las probabilidades cuánticas son bayesianas.

Este lacónico enunciado —el manifiesto del QBismo, si se quiere— es lo bastante corto para caber en una camiseta, pero trae consigo una nueva manera de concebir el mundo.

El gato de Schrödinger salvado por el QBismo

El gato de Schrödinger es probablemente el felino más famoso del mundo, pero no todos los físicos le tienen cariño. Una vez asistí a una conferencia de Stephen Hawking en la que exclamó con la cadencia maquinal de su sintetizador de voz: «Cuando escucho a alguien mencionar al gato de Schrödinger, echo mano a mi pistola»^[24]. El pionero del QBismo Chris Fuchs también detesta al animal, y una vez me dijo que siempre había preferido al amigo de Wigner. El gato es una víctima de su propia fama. La cultura popular ha introducido en su narración tantos malentendidos, mofas y sinsentidos que la mayoría de los físicos procuran eludirla. Pero en vista de que, a la avanzada edad de ochenta años, sigue siendo efectivo como recurso didáctico, lo reviviré una vez más.

He aquí el tinglado: se encierra un gato vivo en una caja junto con un dispositivo consistente en un contador Geiger, un átomo hecho radiactivo mediante el bombardeo de neutrones, un martillo y una ampolla de gas venenoso. Cuando el átomo se desintegra, como ocurrirá tarde o temprano, el contador Geiger se activa y emite una señal eléctrica que acciona el martillo, que rompe la ampolla, que libera el gas, que mata al gato. Al instante y sin dolor.



La primera pregunta es: ¿cómo describe un físico cuántico este experimento? Un átomo radiactivo se asocia a una función de onda representada por un *cúbit* cuyo polo norte, etiquetado como 0, representa *intacto*, mientras que el polo sur, etiquetado como 1, representa *desintegrado*. La probabilidad inferida de la función de onda cae paulatinamente de 0 a 1 a una tasa siempre descendente bien conocida. Tras un intervalo de tiempo que define la vida media del átomo, el *cúbit* ha alcanzado el ecuador, donde consiste en una mezcla al 50 % de intacto y desintegrado. Si observáramos el átomo en ese momento, tendríamos un 50 % de posibilidades de ver que se ha desintegrado.

Es importante subrayar que, según la interpretación convencional de la mecánica cuántica, prevaleciente cuando Schrödinger imaginó su gato, el valor de un *cúbit* es (salvo en los polos) una mezcla de «0 y 1». No es «0 o 1». El experimento clásico de la doble rendija de Young enfatiza al máximo la diferencia. Para que haya interferencia, la onda de luz debe pasar por *ambas* ranuras, no por una u otra. Por lo mismo, un punto sobre la esfera del *cúbit* no representa una alternativa, sino una superposición de los dos resultados posibles del suceso cuántico en cuestión. Los efectos de interferencia cuántica son tan reales y observables como los colores de las burbujas de jabón, y el único modo que conocemos de describirlos es mediante superposiciones.

Todo lo dicho hasta aquí es mecánica cuántica convencional e incuestionable. Incontables experimentos han probado que esta es la manera

correcta de describir un átomo radiactivo. El problema surge cuando hacemos inferencias del átomo al gato. ¿Cuál es el estado del gato al cabo de un tiempo igual a la vida media del átomo, suponiendo que no hayamos abierto la caja? Los destinos del gato y del átomo están íntimamente conectados (*entrelazados* es el evocador término introducido por el propio Schrödinger). Un átomo intacto implica un gato vivo; un átomo desintegrado implica un gato muerto. De ello parece seguirse que, puesto que la función de onda del átomo es incuestionablemente una superposición, también lo es la del gato, que está a la vez vivo y muerto. En cuanto se abre la caja, la paradoja se esfuma: el gatito está o vivo o muerto, tal como dicta el sentido común. Pero mientras no se abra la caja, ¿qué hacemos con la extraña afirmación de que el gato está muerto y vivo al mismo tiempo?

Schrödinger ideó la historia del gato para trasladar la extrañeza cuántica del oscuro dominio de los átomos individuales y sus funciones de onda a la luz de la experiencia humana. Buscaba escenificar la diferencia entre ambos dominios. Buena parte del ímpetu para las interpretaciones alternativas de la mecánica cuántica concebidas a lo largo de los últimos noventa años emanó de las elaboraciones matemáticas del guion del gato.

El QBismo despacha el cuento del gato con tanta facilidad como ventila el milagro del colapso de la función de onda y la paradoja del amigo de Wigner. ¡El mapa no es el territorio! La función de onda del átomo no es una descripción del átomo. El *cúbit* que describe el átomo es una síntesis de la creencia de un agente particular sobre los resultados esperables de una observación futura, ni más ni menos. El estado del átomo *antes* de ser observado se define matemáticamente, pero no en los términos que empleamos después de su observación efectiva. De acuerdo con el QBismo, el estado de un átomo no observado o una moneda cuántica o, ya puestos, un gato no tiene ningún valor en términos de bits. Un punto del ecuador de una esfera de *cúbit* no es un símbolo de nada del mundo real, sino la mera representación de una fórmula matemática abstracta que da las posibilidades de una observación futura: 0 o 1, intacto o desintegrado, vivo o muerto.

Afirmar que el gato está muerto y vivo a la vez tiene tan poco sentido como afirmar que el resultado del lanzamiento de una moneda es cara y cruz mientras la moneda está dando vueltas en el aire, o que un caballo es ganador y perdedor antes de que termine la carrera. La teoría de la probabilidad sintetiza el estado de una moneda que gira en el aire asignándole una probabilidad 1/2 a la cara. El tablero del hipódromo lista las posibilidades para el caballo ganador. Del mismo modo, el QBismo evita describir la condición del gato antes de que se abra la caja, rescatándolo así de un limbo de muerte en vida.

Una memorable descripción de esta conclusión fue formulada en 1978, mucho antes del advenimiento del QBismo, por el físico teórico Asher Peres

(1934-2005), quien señaló que los relatos como el del gato implican una pregunta del tipo «¿Y si?», en este caso «¿Y si pudiéramos observar al gato mientras la caja sigue cerrada?». Peres concluyó que la mecánica cuántica no permite preguntas de esta clase, y acuñó el pegadizo lema «Los experimentos no realizados no tienen resultados». Obviamente, la física clásica permite imaginar lo que hay en la caja antes de abrirla. El resultado de este experimento mental en el dominio clásico es que el gato está muerto o vivo. En mecánica cuántica, sin embargo, hay un modo bien definido de describir un sistema que está en uno de dos estados posibles, 0 o 1. La herramienta matemática para dicha descripción es un bit clásico (el conmutador universal de la tecnología de la información). Pero el bit no puede ser la función de onda de un átomo radiactivo. El *cúbit*, que reemplaza al bit en el dominio cuántico, no tiene ningún valor en bits hasta que se lleva a cabo una medida. Describir átomos mediante bits en vez de *cúbits* conduce a conflictos flagrantes con los resultados experimentales.

La formulación de Peres es profundamente QBista en espíritu. Si la función de onda, como sostiene el QBismo, no nos dice nada de un átomo o cualquier otro objeto mecanocuántico más allá de las posibilidades de resultados experimentales futuros, entonces un agente ni siquiera estaría tentado de especular prematuramente sobre el estado del átomo o del gato. El experimento no realizado de mirar dentro de la caja antes de abrirla no tiene ningún resultado, ni siquiera especulativo.

En resumen, de acuerdo con la interpretación bayesiana de la mecánica cuántica, la función de onda entrelazada de átomo y gato no implica que el gato esté vivo y muerto a la vez. En vez de eso, le proporciona a un agente una expectativa razonable de lo que se puede encontrar al abrir la caja.

Las raíces del QBismo

Aunque el QBismo es una innovación del siglo XXI, sus raíces pueden remontarse hasta los atomistas griegos. Demócrito, que vivió hacia el 400 a. C., enseñó que «el dulce lo es por convención, el amargo lo es por convención, el calor lo es por convención, el frío lo es por convención, el color lo es por convención; en verdad no hay más que átomos y vacío». La gente podría discrepar en privado en cuanto a qué llamar dulce o amargo, calor o frío, pero tiene que estar de acuerdo en la presencia o ausencia de partículas de materia, dando por supuesto que sus sentidos y sus instrumentos son lo bastante sensibles.

Sobre la base de esta declaración, a Demócrito se le reconoce como el padre del atomismo. «En verdad no hay más que átomos y vacío» suena a autoridad, ¿no? Seguro, persuasivo, categórico. Lo que podría llamarse el manifiesto atomista mantuvo subyugada a la física durante dos milenios y medio y se convirtió en el saber convencional que se enseña en la escuela. En la segunda página de su clásico *Lectures on Physics*, Richard Feynman reafirmaba el manifiesto atomista en sus propios términos:

Si algún cataclismo destruyera todo el conocimiento científico y solo quedara una frase para las generaciones sucesivas de criaturas, ¿qué enunciado contendría la máxima información con menos palabras? Yo creo que es la *hipótesis atómica* (o el *hecho atómico*, o como se le quiera llamar) que establece que *todas las cosas están hechas de átomos, partículas diminutas en movimiento perpetuo, que se atraen mutuamente cuando están a poca distancia, pero que se repelen al apretarse unas contra otras.* (La cursiva es del original).

A lo largo de mis años en el aula, he enseñado el manifiesto atomista de Demócrito y Feynman. Imagínese mi sorpresa cuando descubrí que el aforismo atribuido a Demócrito, con toda su duradera influencia, estaba

incompleto. En realidad forma parte de un pequeño diálogo que hay que leer entero^[25]:

Intelecto: Lo dulce es por convención y lo amargo por convención, lo caliente por convención, lo frío por convención, el color por convención; en verdad no hay más que átomos y vacío.

Sentidos: Pobre mente, ¿tomas de nosotros la evidencia por la cual quisieras destronarnos? Tu victoria es tu derrota.

Este pasaje no es un manifiesto atomista inequívoco, sino una fantásica caricatura del conflicto entre dos maneras de percibir la naturaleza profundamente diferentes. Según el Intelecto, la ciencia persigue describir el mundo tal como es «en realidad». La mente científica aspira a descubrir la auténtica esencia de las cosas. Desde esta perspectiva, la atención del científico se centra enteramente en el objeto en cuestión, ya sea un árbol, una roca, un átomo o un electrón. Aquí no hay sitio para el observador que describe el objeto y su comportamiento. La ciencia busca la objetividad; la subjetividad es tabú.

Pero los Sentidos protestan por su exclusión de la descripción de la naturaleza, y le recuerdan al Intelecto la obviedad de que todo lo que sabemos del universo procede de las experiencias sensoriales, directas o con la ayuda de instrumentos. ¿Veis ese árbol de ahí? ¿Cómo sabemos lo que es *realmente*? Descubrimos sus colores y su forma con nuestros ojos, ayudados por dispositivos ópticos. Podemos ir hacia él y tocarlo para sentir la dureza de su madera. Podemos oler el aroma de sus flores. Podemos recordar lo que hemos aprendido sobre él de nuestras propias observaciones y leyendo lo que han dicho otros. Pero entre el árbol y nuestra mente, que intenta confeccionar un esquema preciso del mismo, nuestras experiencias sensoriales personales siempre ejercen de mensajeras. Y esto vale no solo para los árboles y las rocas, sino también para los electrones y los quarks, y para la materia, y para el espacio y el tiempo.

Constatando este hecho simple, los Sentidos concluyen que si el Intelecto desdeña su papel crucial en la ciencia como una mera convención, descarta la única evidencia que tiene para descubrir lo que quiere llamar la «verdad».

Durante siglos después de Demócrito, los filósofos y los teólogos reflexionaron en profundidad y escribieron gruesos tratados sobre la relación entre la realidad y nuestra percepción de la misma, entre lo que *es* y lo que *parece* ser. Pero los físicos ignoraron esos debates. Suprimieron la segunda parte del fragmento de Demócrito, purgaron sus informes de influencias subjetivas, y construyeron lo que según ellos era una descripción puramente objetiva de un mundo sin observadores. Pudieron salir adelante con esta estrategia porque confinaron rigurosamente su atención a sistemas

inanimados simples como planetas en órbita, manzanas que caen y partículas materiales inertes. A base de plantear preguntas simples, consiguieron encontrar respuestas simples y aparentemente objetivas.

Esta objetividad estricta funcionó espectacularmente bien durante siglos, pero el encanto de Demócrito estaba condenado, tal como él mismo predijo. «Tu victoria es tu derrota», advirtieron los Sentidos al Intelecto. En 1905, la teoría de la relatividad especial de Einstein supuso una conspicua ruptura con la objetividad absoluta al echar por tierra el austero e intuitivamente atractivo andamiaje newtoniano conocido como *espacio absoluto y tiempo absoluto*. Sin ese rígido entramado para definir el movimiento, un enunciado tal como «Ese coche viaja a ochenta kilómetros por hora» pierde su significado. En relación con un policía estacionario podría ser cierto, pero si el policía está persiguiendo al coche en su vehículo, la velocidad medida será otra. El observador, o al menos el marco de referencia del observador, siempre debe especificarse para que la mecánica tenga algún sentido. Enseguida se demostró que la crucial clarificación de Einstein no era solo una objeción pedante, sino una intuición importante con consecuencias observables de gran trascendencia. El majestuoso marco espacio-temporal absoluto nacido del Intelecto de Newton se reemplazó por el espacio y el tiempo relativos de Einstein, un marco más mundano que proporcionaba una concordancia mucho mayor entre las predicciones teóricas y las mediciones de laboratorio. Aunque la teoría de la relatividad no reintroduce explícitamente al observador, al menos sus marcos de referencia libremente elegidos tienen un papel indispensable en la física.

Otro asalto a la objetividad pura y dura vino dado por la dualidad onda/partícula. Un electrón en realidad no es ni una partícula ni una onda, sino un híbrido que manifiesta propiedades diferentes dependiendo de las preguntas que se plantean y del aparato libremente elegido por el experimentador. Cuando la teoría cuántica propiamente dicha apareció en 1925-1926, la astuta predicción de Demócrito se acercó aún más a su cumplimiento. Con la introducción de la función de onda, los físicos dejaron de intentar describir los electrones, los fotones, los átomos y los núcleos «como realmente son». Una partícula no tiene una velocidad y una posición, sino una u otra, dependiendo de cómo decidimos observarla.

La atención pasó del territorio al mapa, a medida que la mirada de los físicos se apartaba del mundo real —que indudablemente existe ahí fuera— y se dirigía a su representación. Separar la cosa de su descripción matemática fue una ruptura significativa, aunque en gran medida no declarada, de la mecánica cuántica con su progenitora clásica.

Los pioneros de la teoría cuántica comprendieron esta implicación radical de su obra. Niels Bohr, que no concibió la mecánica cuántica pero contribuyó significativamente a su interpretación, escribió en 1929, tres años después de

la introducción de la función de onda por Schrödinger: «En nuestra descripción de la naturaleza el propósito no es desvelar la esencia real de los fenómenos, sino solo determinar, hasta donde sea posible, las relaciones entre [...] los aspectos de nuestra experiencia»^[26]. La «esencia real» corresponde a la «verdad» de Demócrito, y «nuestra experiencia» se refiere a nuestros sentidos. Las esencias son objetivas, absolutas y universales; las experiencias son subjetivas, relativas y particulares de agentes individuales.

Werner Heisenberg, que concibió la mecánica cuántica con su tratamiento matricial del oscilador armónico, insistió en que «la concepción de la realidad objetiva [...] se ha evaporado en la [...] transparente claridad de unas matemáticas que ya no representan el comportamiento de partículas, sino nuestro conocimiento de dicho comportamiento»^[27]. Heisenberg creía que la física no trata de este árbol o ese electrón, como la ciencia newtoniana había dado por sentado, sino de lo que ocurre en nuestras mentes como resultado de observaciones y experimentos que conciernen al árbol y al electrón. La expresión «ya no» telegrafía la ruptura con la física clásica por él percibida.

El propio Erwin Schrödinger lo expresó así en 1931: «Uno solo puede ayudarse a sí mismo mediante algo parecido al siguiente decreto de emergencia: la mecánica cuántica prohíbe enunciados sobre lo que realmente existe, enunciados sobre el objeto. Sus enunciados tratan solo de la relación objeto-sujeto»^[28]. En otras palabras, la mecánica cuántica describe lo que experimenta un observador (el sujeto) al contemplar la naturaleza (el objeto).

Las generaciones sucesivas de físicos no prestaron mucha atención a estas disquisiciones filosóficas. Las discusiones sobre «esencias», «métodos de inquisición», «decretos de emergencia» o «relaciones objeto-sujeto» no les preocupaban especialmente. Pronto vieron que la nueva teoría cuántica y los rápidos avances tecnológicos se combinaban en una herramienta asombrosamente robusta. La comprensión de la materia al nivel atómico y nuclear progresó a saltos. Los nuevos dispositivos cuánticos, como los transistores y los láseres, se emplearon a su vez para sondear aún más profundamente el átomo, incluso mientras se convertían en bienes de consumo, desde ordenadores hasta teléfonos móviles. La mecánica cuántica *funcionaba*. Una oleada de descubrimiento e invención durante la segunda mitad del siglo xx barrió los reparos filosóficos sobre la dualidad onda/partícula, la superposición, la incertidumbre y el colapso de la función de onda.

Pero la extrañeza persistió. El quid de la cuestión, como suele ser el caso en los conflictos globales, es una disputa de frontera. A un lado tenemos el mundo familiar que percibimos con nuestros sentidos y describimos en términos deterministas newtonianos. Se caracteriza por grandes leyes de la naturaleza y, al menos en principio, por la certidumbre. Al otro lado

encontramos el mundo del cuanto, un mundo de incertidumbre y probabilidad. La cuestión es: ¿dónde acaba un territorio y comienza el otro?

Inicialmente la respuesta parecía obvia. Dado que la mecánica cuántica se concibió para electrones, fotones, átomos y núcleos, se tenía la impresión de que los fenómenos cuánticos estaban por fuerza confinados a un micromundo repleto de objetos increíblemente pequeños en números inimaginablemente grandes. Este error sugirió una división de la física moderna en cuatro regiones adyacentes: lo muy grande se rige por la relatividad general, lo muy rápido por la relatividad especial, y lo muy pequeño por la mecánica cuántica. Las tres ramas modernas de la física rodean la región clásica a escala humana, donde Newton es el rey.

Pero este esquema tan ordenado fracasó por dos razones, una práctica y la otra filosófica. Por un lado, se descubrieron efectos cuánticos en sistemas cada vez más grandes. El experimento de la doble rendija, por ejemplo, que empezó con fotones y electrones, se repitió con átomos enteros e incluso fullerenos, moléculas enormes de hasta sesenta o setenta átomos de carbono. En fechas más recientes, como he mencionado en el capítulo 4, se demostró que un diapasón convencional, aunque diminuto, muestra un comportamiento cuántico. En el frente astronómico, se descubrieron estrellas de neutrones del tamaño de un planeta que se comportan como núcleos atómicos gigantes. Incluso el universo entero parece haber tenido un comportamiento mecanocuántico en su infancia. Está claro que la idea de que la mecánica cuántica se aplica solo al micromundo es simplemente errónea.

Pero la objeción filosófica a circunscribir la mecánica cuántica a los átomos y moléculas es aún más persuasiva. La queja sobre la diferencia entre tigres y tiburones, unos rigiendo los arenosos desiertos y otros los procelosos mares, también es aplicable aquí. No debería haber dos teorías, la clásica y la cuántica, con fundamentos diferentes y conectadas solo por un frágil y milagroso puente llamado «colapso de la función de onda». Debería haber una sola teoría, de la que las otras puedan derivarse con un argumento simple y convincente. O vivimos en un mundo clásico y la mecánica cuántica es una mera aproximación, o al revés.

La línea que separa el territorio cuántico del nuestro es una frontera borrosa y disputada. Heisenberg la veía como la frontera entre un sistema cuántico tal como un átomo, que viene descrito por una función de onda, y el aparato para observarlo, que obedece las leyes clásicas, lo que se conoce como el *corte de Heisenberg*. Él intentó presentar su localización indefinida como una virtud, porque poder cambiar la situación del corte permitía tratar a un gato o un colega como un sistema clásico o un objeto cuántico grande, según conviniera. Esta verborrea no impresionó a John Bell (1928-1990), un brillante y audaz físico que saltó a la fama por sacar las disputas sobre el significado de la mecánica cuántica de los despachos de los teóricos y

llevarlas al laboratorio, donde podían resolverse experimentalmente. Se burló del corte describiéndolo como una «división veleidosa», demasiado vaga para ser de utilidad en cualquier análisis serio.

A lo largo de los años, la expresión *corte de Heisenberg* se ha aplicado de diversas maneras a la línea divisoria en dicotomías tales como macroscópico-microscópico, clásico-cuántico, Intellecto-Sentidos, objetivo-subjetivo, certidumbre-incertidumbre, real-aparente, mundo físico-observador, territorio-mapa... La división siempre es borrosa, indefinida y voluble. Finalmente, el distinguido físico de Cornell N. David Mermin, un hombre de mi generación y también convertido al QBismo, propuso una manera de zanjar la discusión. «Presentó una moción», por usar una expresión parlamentaria, sugiriendo que se ha vertido tanta tinta sobre el asunto que continuar con el debate parece fútil. En 2012 escribió un ensayo cuyo subtítulo anunciaba su intención de «fijar la división»^[29]. (Mermin se las arregla bien con las palabras. Su uso del término *fijar* implica tanto reparar como estabilizar). El QBismo, argumentó Mermin, ofrece una solución clara y convincente para situar y definir la división. Es, efectivamente, la frontera entre lo objetivo (lo externo, no afectado por pensamientos o sentimientos, que existe con independencia de la percepción) y lo subjetivo (lo interno, lo percibido, que existe en la mente). Pero, a diferencia de la concepción previa de lo subjetivo, esto es, existente en la mente humana, para los QBistas lo subjetivo también es algo estrictamente personal: existe en la mente de una persona concreta. Según Mermin, la división pertenece a cada agente individual.

Cada uno de nosotros es consciente de la diferencia entre el mundo (objetivo) y la percepción (subjetiva) de nuestra propia experiencia. Si yo soy el agente, el mundo objetivo es todo lo que hay fuera de mi mente (incluyendo los otros agentes y hasta mi propio cuerpo). A todo eso, si quiero, puedo darle un tratamiento mecanocuántico y describirlo con funciones de onda. Al otro lado de la división están las cosas exclusivamente personales, que ni yo ni nadie puede tratar como objetos. Son mis experiencias y percepciones propias, que sirven para sustentar mis creencias y mis apuestas sobre experiencias futuras. Son subjetivas, únicas y personales.

Si un lego y un QBista tuvieran delante una caja cerrada con el gato de Schrödinger dentro, el primero declararía confiado: «Por mi experiencia anterior, sé que el gato o está muerto o está vivo». Estaría hablando del gato en ese momento. El segundo sería más cauto y diría: «No sé nada del gato ahora mismo, pero, por mi conocimiento de la mecánica cuántica, creo que si abro la caja, las posibilidades de que me lo encuentre vivo son del 50 %». Así, ni uno ni otro dirían que el gato está muerto y vivo, pero el QBista estaría hablando de su creencia sobre una experiencia futura, no sobre el estado actual del gato.

Si oyera esto, Demócrito, apodado el filósofo risueño, sonreiría. Después de más de dos milenios, su advertencia finalmente ha sido escuchada. El Intelecto está comenzando a mostrarse respetuoso con los Sentidos.

La rareza cuántica en el laboratorio

En los primeros tiempos, los persistentes problemas conceptuales de la mecánica cuántica le daban un aroma distintivamente místico. Como la teoría funcionaba tan bien en la práctica y las paradojas parecían tener más relación con la interpretación del formalismo que con su contenido, la mayoría de los físicos pensaban que podían ignorarse sin más. Los problemas como el colapso de la función de onda, el amigo de Wigner y el gato de Schrödinger pertenecen al dominio de los *experimentos mentales*, ejercicios teóricos de tan precioso refinamiento que son imposibles de replicar en el laboratorio. No se puede capturar una función de onda en el acto del colapso, ni determinar el bienestar de un gato sin mirarlo.

Pero los experimentos mentales no deberían archivarse de un plumazo, porque con el tiempo a menudo se hacen realidad. Por ejemplo, a principios del siglo xx Albert Einstein introdujo la relatividad especial y la relatividad general mediante experimentos mentales que al final se confirmaron, con modificaciones considerables, en el observatorio y en el laboratorio, lo cual tuvo consecuencias históricas. En 1935 volvió a la carga en un artículo escrito con sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen y titulado «¿Puede considerarse completa la descripción mecanocuántica de la realidad física?». Los autores (EPR) señalaron que si se pudiera efectuar cierto tipo de experimento atómico y describirlo mecanocuánticamente, las conclusiones eran inverosímiles y contradictorias, lo que llevó a Einstein a poner en duda la teoría tal como se entendía entonces. El argumento, conocido como la *paradoja EPR*, ha suscitado un vigoroso y aparentemente inacabable debate en la pequeña comunidad de filósofos, historiadores y físicos preocupados por los fundamentos de la física. Tras la muerte de Einstein en 1955, su experimento mental comenzó a hacerse real.

En vez de seguir el hilo histórico, me saltaré las versiones del experimento EPR que finalmente se llevaron a cabo y demostraron que las sospechas de Einstein acerca de la mecánica cuántica eran infundadas^[30]. En vez de eso

pasaré al presente siglo para ilustrar la idea de la paradoja EPR con un montaje experimental diferente y más fácil de entender que el ejemplo original. A diferencia de sus predecesores, no depende del análisis de sutiles correlaciones estadísticas ni del papel de la aleatoriedad en los fenómenos cuánticos, sino que gira en torno a una única observación que pone en evidencia de un solo golpe decisivo el conflicto entre la mecánica cuántica y el sentido común.

La paradoja EPR sugería que la combinación de dos supuestos generales, ambos autoevidentes para Einstein, lleva a la conclusión de que la mecánica cuántica convencional es incorrecta, o al menos incompleta. Si, por el contrario, la mecánica cuántica es correcta tal como está, entonces hay que abandonar alguno de los supuestos. Einstein no concebía prescindir de ninguno de los dos, por lo que solo podía esperar que algún día la mecánica cuántica se completara. Pero la mayoría de los físicos, incluidos los QBistas, creen que la mecánica cuántica es una teoría completa y correcta, lo que les obliga a prescindir de una de las dos hipótesis EPR.

Las dos hipótesis críticas, que valen para la física clásica, son la *localidad* y el *realismo*.

La localidad es la ausencia de lo que Einstein describió como la *tenebrosa* acción a distancia. En una teoría local las señales y demás efectos físicos no viajan a velocidad infinita, sino que se propagan de un punto a otro punto vecino del espacio al modo de las fichas de dominó que caen en fila, a una velocidad que no puede exceder la de la luz. La gravedad newtoniana, con su acción a distancia instantánea, violaba espectacularmente el principio de localidad, y fue reemplazada por la relatividad general, que sí lo respeta.

En la mecánica cuántica las violaciones de la localidad parecen darse en dos circunstancias. El colapso de la función de onda, como hemos visto, es un proceso no local que los QBistas explican interpretando la probabilidad como una creencia y no como una realidad física. Los experimentos EPR parecen violar la localidad de una manera diferente, aunque relacionada. Se pretende mostrar que la medida de una magnitud física en un lugar ejerce una influencia instantánea, o al menos a velocidad superlumínica, en el resultado de otra medida en un punto lejano. Los magos llaman a esto telequinesia (el arte de mover objetos solo con el poder de la mente). Einstein decía que era algo tenebroso.

Aun así, la demostración experimental de tales efectos es tan asombrosa que algunos físicos creen que, en efecto, el mundo es no local. Que el universo es una unidad interconectada que tiembla cuando uno le hace cosquillas a lo lejos es una idea poética, desde luego, pero su negación ha sido un enfoque considerablemente más fructífero para entender el funcionamiento del universo material.

El segundo supuesto presuntamente evidente en la paradoja EPR es más difícil de precisar. Al hablar de *realismo* me refiero, obviamente, al realismo científico, no al literario, artístico o filosófico. Pero cuando miramos el artículo de treinta páginas sobre el «Realismo científico», con su bibliografía de más de ciento ochenta referencias, en la acreditada *Stanford Encyclopedia of Philosophy* online, nos encontramos con una descorazonadora advertencia: «Quizá sea solo ligeramente exagerado decir que el realismo científico es caracterizado de manera diferente por cada autor que lo discute». ¡Ay!

Confiando una vez más en la sabiduría popular de Einstein, uno podría intentar definir el realismo como el supuesto de que la luna está ahí aunque nadie la esté mirando. En términos generales, se refiere al supuesto de que los objetos tienen propiedades físicas que no se ven afectadas por las mediciones y las observaciones. Uno podría ir más allá y proponer que *real* significa no afectado por medidas, observaciones e incluso pensamientos y opiniones. La realidad en el marco EPR se define entonces así: «Si podemos, sin perturbar un sistema de ninguna manera, predecir con certidumbre [...] el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad correspondiente a esa magnitud»^[31].

Para ver cómo funciona este supuesto en la práctica, podemos pensar en una observación astronómica (que seguramente no perturba el sistema). Cuando Galileo descubrió las lunas de Júpiter, los astrónomos escépticos consideraron que eran artefactos —reflejos o imperfecciones de las lentes— de los telescopios primitivos de la época. De hecho, a veces se veían tres puntos y a veces cuatro en la vecindad del planeta gigante, y sus posiciones parecían cambiar de un día para otro. Pero al final se establecieron regularidades, las desapariciones se explicaron por el paso de las lunas por delante o por detrás del planeta, y las predicciones de las posiciones observadas de las lunas alcanzaron la certeza. A partir de entonces las lunas y sus posiciones en el cielo se convirtieron en elementos de realidad.

Para resumir la tesis EPR: la mecánica cuántica es incompatible con la suposición simultánea de localidad y de realismo. Si, con Einstein, insistimos en ambos supuestos, la mecánica cuántica nos parecerá defectuosa. Esta es una afirmación inusitadamente amplia. La mayoría de las predicciones físicas son mucho más específicas y modestas, en la línea de «si se deja caer esta bola desde una altura de un metro, llegará al suelo en medio segundo». Aun así, se han llevado a cabo experimentos para probar la tesis EPR con sus premisas vagas, ambiguas y filosóficas.

Describiré uno de esos experimentos en términos de *cúbits*, ignorando las sustanciales complicaciones instrumentales que entraña. Además, aunque el experimento se hizo con fotones, yo lo describiré en términos de electrones, porque los electrones son partículas materiales un poco más accesibles a nuestra intuición que los fotones. El atractivo de los *cúbits* reside en su

capacidad para describir sucintamente cualquier sistema cuántico de dos estados, ya sea un fotón con dos polarizaciones posibles o un electrón con dos orientaciones de espín a lo largo de un eje arbitrario.

Antes de comenzar debo introducir un recurso lógico que tiene un papel útil en el análisis, la noción de transitividad. No es más que sentido común. Dice que, si Alice y Bob tienen el mismo color de ojos, y Bob y Charlie también, entonces Alice y Charlie deben tener el mismo color de ojos. La igualdad es transitiva: si $A = B$ y $B = C$, entonces se sigue por sentido común y por lógica que $A = C$. La relación transitiva necesaria para el experimento cuántico tiene que ver con la propiedad geométrica de la dirección. Si los espines A y B apuntan en la misma dirección, y lo mismo pasa con B y C , entonces A y C necesariamente apuntan también en la misma dirección. Téngase en cuenta, no obstante, que el espín de un electrón solo puede medirse a lo largo de un eje cada vez.

Con la paradoja EPR, los *cúbits*, la localidad, el realismo y la transitividad, las piezas del rompecabezas están sobre la mesa.

El experimento simplificado e idealizado que estoy a punto de describir fue propuesto en términos más realistas por Daniel Greenberger, Michael Horne y Anton Zeilinger (GHZ) en 1989 y se llevó a cabo en el año 2000. Procede en cuatro fases: preparación, medición, predicción y análisis.

Preparación

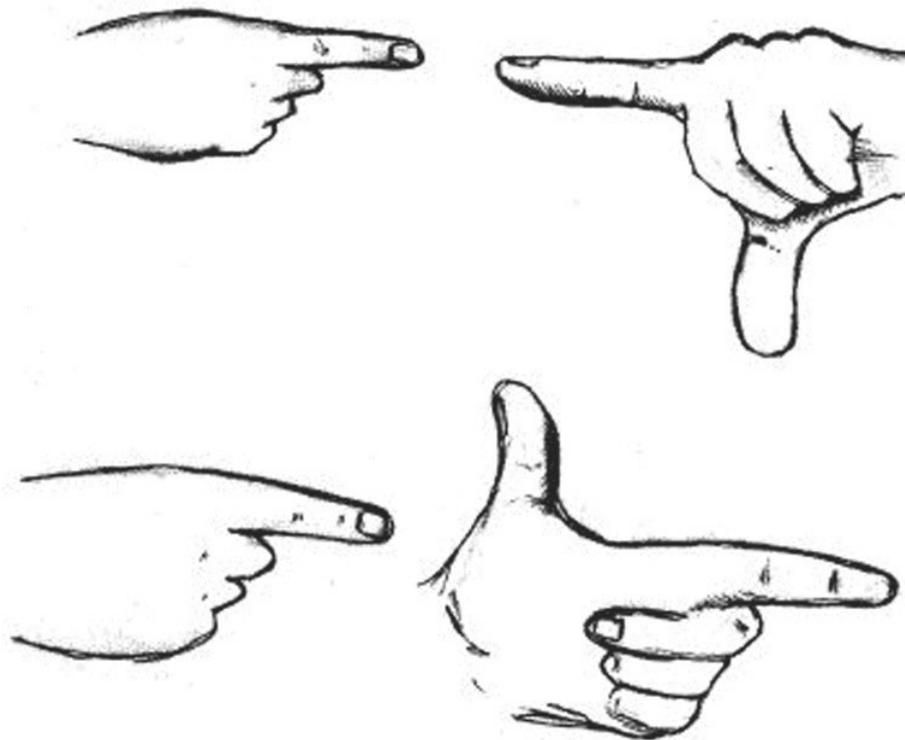
Tres electrones se ponen en estrecho contacto y se les hace adoptar una configuración muy especial llamada *estado entrelazado*. La función de onda de su espín se obtiene cosiendo tres *cúbits* que vendrán representados por tres flechas, correspondientes a medidas en la dirección horizontal o en la vertical. Los electrones no se observan, ni se miden sus espines, mientras están en la vecindad de los otros.

Tras este paso preliminar crucial y técnicamente desafiante, los electrones vuelan hacia tres puntos ampliamente separados, donde tres detectores independientes miden sus espines. La configuración se ha dispuesto de tal manera que cuando dos de los tres espines apuntan en la misma dirección horizontal, el tercero, medido en la dirección vertical, apunta hacia arriba. Por otro lado, si dos espines horizontales se oponen, el tercer espín vertical apunta hacia abajo. Si denotamos derecha, izquierda, arriba y abajo como R , L , U y D , las únicas observaciones posibles son RRU , LLU , RLD y LRD . Simbólicamente vienen representadas por $(\rightarrow \rightarrow \uparrow)$, $(\leftarrow \leftarrow \uparrow)$, $(\rightarrow \leftarrow \downarrow)$ y

(\leftarrow \rightarrow \downarrow). Dado que los tres electrones son intercambiables, el orden de las flechas en cada par de paréntesis es irrelevante, así que las dos últimas posibilidades son en realidad equivalentes.

Una regla mnemotécnica ayuda a memorizar el esquema: si nuestros dos dedos índices apuntan en el mismo sentido horizontal, entonces «con cuerdan» y uno de nuestros pulgares apunta hacia *arriba*. Si apuntan en sentidos horizontales opuestos, entonces «discrepan» y el pulgar apunta hacia *abajo*.

Esta preparación puede comprobarse repetidamente, cada vez con un nuevo trío de electrones y con dos detectores en la orientación horizontal y uno en la vertical. Es consistente. A partir de dos medidas cualesquiera puede predecirse la tercera con certeza, y el trío EPR habría dicho que es un elemento de realidad. A esta restricción de los resultados posibles la llamaré *regla GHZ*. La preparación de los tres electrones no varía de ningún modo a lo largo de todo el experimento.



Medición

Una vez dispuestos así, los electrones entrelazados se separan, y sus espines se miden con los detectores distantes. Sin embargo, ahora los detectores no

están orientados igual que cuando se estaba comprobando la preparación. En particular, los tres detectores se han girado para medir solo espines verticales. Los dos primeros dan una mezcla de UU , UD , DU y DD . Solo los casos UU se registran; los otros se ignoran.

Predicciones

¿Qué detecta el tercer detector? El primer U implica que los espines horizontales de los electrones dos y tres, *si se midieran*, concordarían. El segundo U implica que los espines horizontales de los electrones uno y tres, *si se midieran*, también concordarían. Por el principio de transitividad, y por sentido común, esto implica que los electrones uno y dos deben concordar, y por lo tanto que el espín vertical del tercer electrón es (pulgar) *arriba*.

En pocas palabras, la predicción clásica es que los tres detectores deberían medir UUU .

La mecánica cuántica, por su parte, predice inequívocamente que la configuración UUU está prohibida, y que el único resultado permitido es UUD . Esta predicción se sigue directamente de la función de onda GHZ, pero no puedo dar una explicación mejor aquí. Lo que importa es que, en efecto, se confirmó experimentalmente. ¡Admitámoslo!

Este resultado es una llamada a las armas, alto, claro e innegable. De manera más impresionante que ninguna otra observación única, señala la necesidad de una revolución en el pensamiento.

Análisis

La mecánica cuántica ha ganado al sentido común, pero ahora debemos examinar las implicaciones para la localidad y el realismo, los cuales, de acuerdo con la tesis EPR, no pueden continuar juntos como la ley del mundo.

Para empezar, insistamos en el realismo. Una propiedad de un objeto es real si el objeto la lleva siempre puesta, si su valor es preexistente a cualquier medida y solo es revelado, no creado, por la observación. Recordemos las tarjetas roja y negra en los sobres sellados de Alice y Bob que vimos en el capítulo 11: son reales y existen antes de que los sobres se abran. Supongamos, pues, que las direcciones de espín también son atributos reales

de un electrón. Supongamos también que, contraviniendo las leyes de la mecánica cuántica, los valores de espín horizontal y vertical pueden asignarse a cada electrón simultáneamente, siempre según la regla GHZ (*RRU*, *LLU*, *RLD* y *LRD*).

Partiendo de esta hipótesis, los espines se manipulan y preasignan mientras los electrones están juntos al principio del experimento. Solo dos asignaciones (y sus imágenes especulares) obedecen la regla requerida. En este esquema simbólico, cada par de flechas se refiere a los valores (simultáneos) de espín vertical y horizontal de un electrón. (Una vez más recuerdo que la mecánica cuántica, y en particular su principio de incertidumbre, prohíbe la medida simultánea del espín horizontal y del vertical). Estas son las únicas configuraciones permitidas:

$\uparrow \rightarrow \uparrow \rightarrow \uparrow \rightarrow$ y su imagen especular $\uparrow \leftarrow \uparrow \leftarrow \uparrow \leftarrow$

o

$\downarrow \rightarrow \downarrow \rightarrow \uparrow \leftarrow$ y su imagen especular $\downarrow \leftarrow \downarrow \leftarrow \uparrow \rightarrow$.

Compruébese que las cuatro asignaciones obedecen la regla GHZ.

Las otras asignaciones no la obedecen. Examínese, por ejemplo, dónde deja de cumplirse la regla para las asignaciones que incluyen dos medidas *arriba*,

$\uparrow \rightarrow \uparrow \rightarrow \downarrow \rightarrow$ y su imagen especular $\uparrow \leftarrow \uparrow \leftarrow \downarrow \leftarrow$

o

$\uparrow \rightarrow \uparrow \leftarrow \downarrow \leftarrow$ y su imagen especular $\uparrow \leftarrow \uparrow \rightarrow \downarrow \rightarrow$.

Para ver en detalle cómo se obtienen estos resultados, hay que comenzar con \uparrow y construir el resto de la configuración, siempre siguiendo la regla GHZ. Enseguida se concluye que es imposible obtener el resultado observado *UUD* con valores de espín preasignados. La única manera es invocar un efecto a distancia: las dos medidas *UU* iniciales afectan de algún modo a la última medida, a distancia, para forzar que sea *D*, el resultado predicho correctamente por la mecánica cuántica. Si insistimos en el realismo, se viola la localidad.

Por otro lado, la localidad puede salvarse si se prescinde del realismo (como hacemos los QBistas). En tal caso los electrones interactúan inicialmente en una localidad para producir un trío entrelazado descrito por una función de onda cuántica que incorpora la regla GHZ. Dado que no es

real, la función de onda no pretende describir un estado de cosas real, a diferencia de todas las flechitas de antes. En vez de eso, la función de onda es una ingeniosa construcción matemática hecha de *cúbits* que predice correctamente los resultados del experimento GHZ, tanto en la fase de preparación como en la de medición.

El experimento GHZ proporciona una espléndida ilustración de la máxima de Peres: «Los experimentos no realizados no tienen resultados». La contradicción entre la física cuántica y la clásica solo surge cuando suponemos que en la fase final del experimento los *espines horizontales* tenían valores definidos, aunque no se hubieran medido. La advertencia de Peres descarta la asignación simultánea de dos direcciones de espín a un electrón, expresada mediante símbolos como $\uparrow \rightarrow$.

Una manera alternativa de analizar el experimento GHZ es en términos de variables ocultas, que llevan mensajes escondidos como tarjetas rojas o negras en sobres sellados. Muchas de las predicciones de la mecánica cuántica pueden explicarse sin sacrificar ni la localidad ni el realismo (como esperaba Einstein). Si presuponemos la existencia de atributos aún por descubrir que transportan información, se puede reproducir buena parte de la mecánica cuántica ajustando los valores de dichos atributos. En el experimento GHZ, por ejemplo, este programa funcionaría en toda la fase de preparación. La regla GHZ puede imponerse contemplando los espines verticales y horizontales como variables ocultas cuyos valores pueden asignarse simultáneamente, aunque no puedan medirse simultáneamente. En el experimento GHZ, la mecánica cuántica, la localidad y el realismo coexisten felizmente con variables ocultas, siempre que haya dos detectores horizontales y uno vertical.

El quid de la tesis GHZ es el ingenioso descubrimiento de que cuando los tres detectores son verticales, ninguna cantidad de gimnasia mental —ni siquiera la hipótesis de las variables ocultas— puede permitir sortear la flagrante contradicción entre la mecánica cuántica y el sentido común. Las variables ocultas, al modo de las tarjetas en sobres sellados, permiten a los físicos clásicos contar una historia ininterrumpida y creíble de lo que ocurre entre medida y medida en cualquier experimento. Esa posibilidad equivale a la afirmación de que entendemos lo que ocurre realmente aunque no podamos probarlo mediante la observación. Equivale a dar por sentado el realismo. Pero la mecánica cuántica nos obliga a abandonar tales historias. La admonición de Asher Peres de que los experimentos sin realizar no tienen resultados nos advierte de las nefastas consecuencias de intentar inventárnoslos.

El experimento GHZ no prueba la validez del QBismo, pero, al prescindir del realismo de Einstein, Podolsky y Rosen, esta interpretación nos

proporciona una manera simple y convincente de evitar la tenebrosa acción a distancia.

Toda la física es local

La mecánica cuántica no incluye explícitamente ninguna acción a distancia. En el experimento GHZ, por ejemplo, la función de onda es una combinación de tres *cúbits* para describir tres espines electrónicos. La posición y el tiempo ni siquiera se mencionan, así que la distancia en la expresión *acción a distancia* es irrelevante. En cambio, la venerable ley de la gravitación universal de Newton, que afirma que al moverme mi fuerza atractiva sobre tu cuerpo cambia simultáneamente, es un ejemplo de acción a distancia explícita e instantánea. Pero el uso de la función de onda GHZ, lo que se *hace* con ella y cómo se *interpreta* puede llevar a creer en una acción a distancia implícita. Hemos visto que si uno insiste en que la función de onda es algo real, se ve obligado a concluir que los detectores deben comunicarse de alguna manera entre sí a distancia para dar resultados que dependen de otros resultados de medidas lejanas. Este tenebroso efecto se nos antoja tan misterioso como la atracción gravitatoria lo era para Newton.

Las teorías de la relatividad especial y general de Einstein desterraron la acción a distancia explícita (que no implícita) de la física. Fundamentalmente, toda la física es local, parafraseando la venerable máxima norteamericana de que toda la política es local.

Richard Feynman inventó una ingeniosa manera de hacer entender esto. Los electrones en un átomo están sometidos a las fuerzas eléctricas ordinarias (atracción por el núcleo y repulsión mutua). En una teoría clásica burda, esas fuerzas se describen exactamente igual que la gravedad newtoniana, mediante una acción a distancia: cargas distintas se atraen, cargas iguales se repelen. Es una aproximación lo bastante buena para derivar las funciones de onda atómicas de la teoría cuántica inicial. Pero la cuantización acabó abarcando también las interacciones eléctrica y magnética, de modo que no solo los electrones, sino las mismas fuerzas entre ellos, tenían que obedecer las leyes de la mecánica cuántica. La teoría que consiguió cumplir esta tarea, que se perfeccionó a mediados del siglo XX y se conoce como electrodinámica

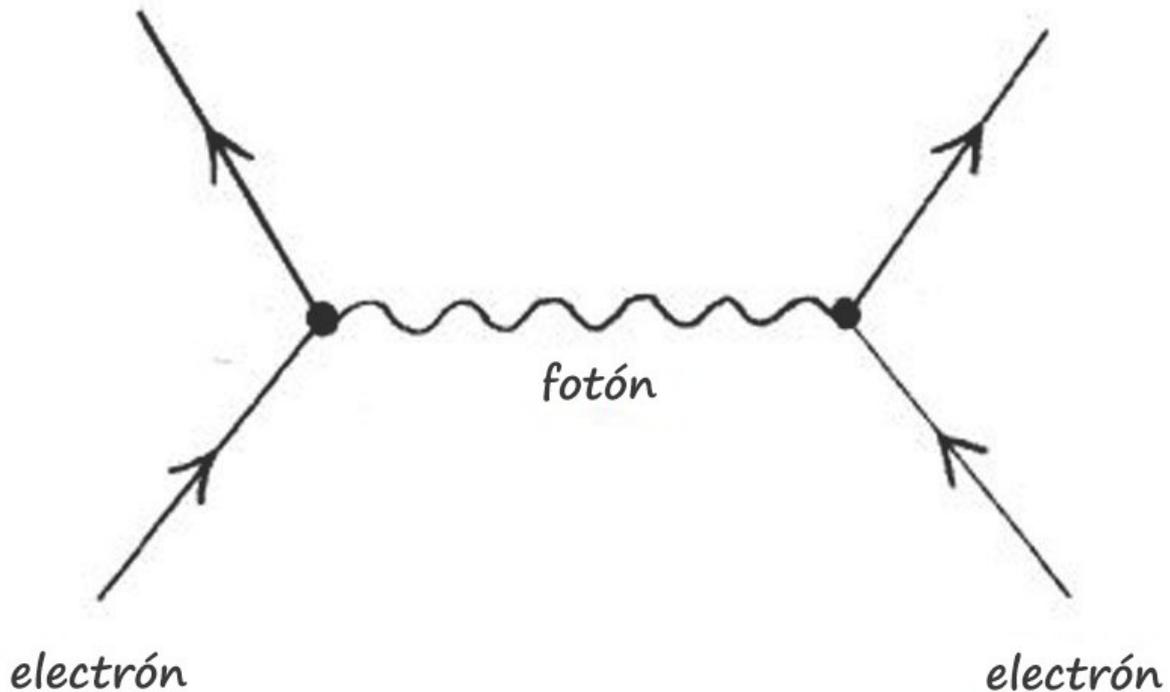
cuántica, o QED (acrónimo de *quantum electrodynamics*, y muy adecuado, pues coincide con el de *quod erat demonstrandum*), combinaba la mecánica cuántica con la electrodinámica clásica para describir el comportamiento de fotones y electrones con asombrosa precisión. En el capítulo 8 he mencionado la fuerza magnética de un electrón como uno de sus éxitos.

A medida que esta teoría se fue puliendo para mejorar su concordancia con los experimentos, su complejidad se acrecentó. Al final requería resmas de densos cálculos, lo que hacía inevitable que se deslizaran errores. Feynman, con una aguda vista para los trucos ingeniosos que ahorraran esfuerzos, apreció pautas comunes en las ecuaciones que le llevaron a concebir un sugestivo lenguaje gráfico, una suerte de atajo matemático para los cálculos cuánticos. Los diagramas de Feynman son tan simples que los físicos los garabatean en servilletas de papel en el restaurante para ilustrar puntos abstrusos profundamente enterrados en la matemática. Al mismo tiempo, sin embargo, cada trazo de un diagrama viene respaldado por una receta detallada para traducir dibujos en fórmulas. Los diagramas de Feynman pronto se convirtieron en el lenguaje simbólico universal —la *lingua franca*— de los físicos de partículas de todo el mundo.

El primer diagrama de Feynman que aprendí a descifrar, consistente en dos líneas continuas y una ondulada, representaba una estimación simple de la repulsión entre dos electrones. La fuerza eléctrica entre ellos no se trata como una repulsión entre cargas distantes, sino como consecuencia de la emisión de un fotón por uno y su absorción por el otro. (El efecto se compara a veces con la repulsión aparente que sienten dos patinadores sobre hielo que se arrojan vigorosamente una pelota de baloncesto alternativamente; tanto el retroceso del lanzador como el impacto en el receptor los llevan a separarse). En el diagrama el tiempo discurre verticalmente: primero los electrones se aproximan uno a otro, luego se repelen y finalmente se separan. Cada punto negro en los extremos de la línea ondulada representa un punto concreto del espacio y el tiempo donde tiene lugar una interacción física. Estimaciones más refinadas, representadas por diagramas más complicados, recuerdan encajes de telaraña hechos de líneas rectas y onduladas. Cada empalme interno se marca con un punto negro. Los cuatro extremos sueltos son los electrones entrantes y salientes; todo lo demás está tan firmemente conectado como en una telaraña real. En el interior del diagrama no hay cabos sueltos.

El vocabulario gráfico de Feynman acabó expandiéndose para incluir otras partículas, como los neutrinos, los quarks y los gluones, así como el recientemente detectado bosón de Higgs. Ello requirió nuevas reglas y nuevas convenciones gráficas. En conjunto, la teoría entera está tan bien confirmada en el laboratorio que se la conoce por el imponente nombre de *modelo estándar de la física de partículas*. Máquinas del tamaño de catedrales, ejércitos de físicos e ingenieros, años de trabajo y millones de dólares se han

dedicado a explorar el modelo estándar. Y hasta ahora se ha mantenido en pie brillantemente, aunque los físicos nunca pierden la esperanza de que algún día se venga abajo y descubran algo nuevo.

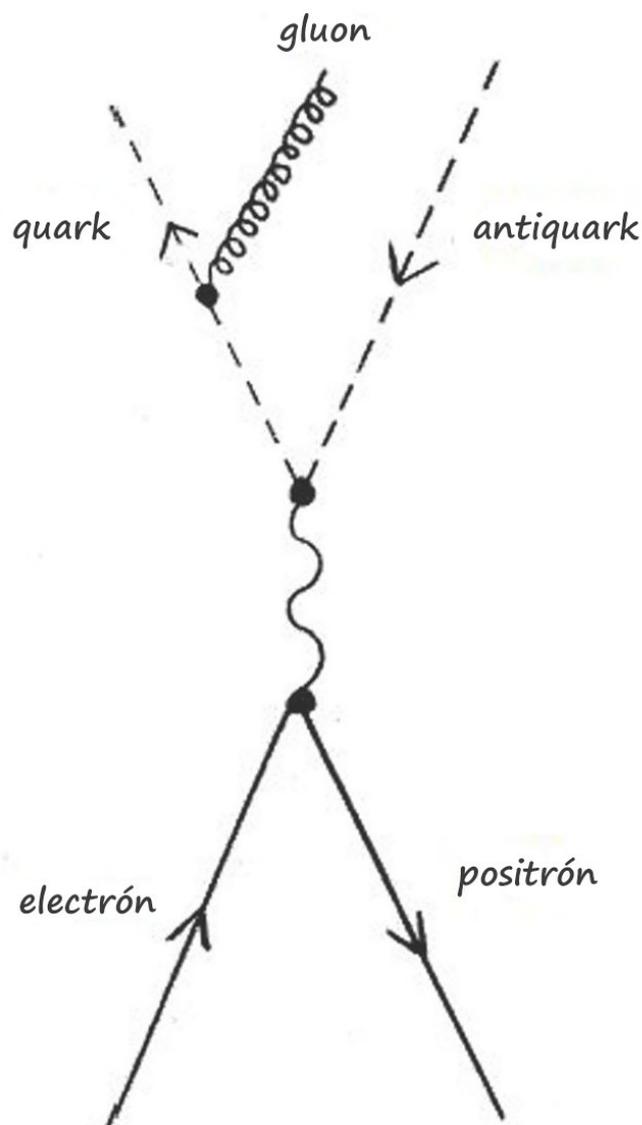


Un notable rasgo común de todos los diagramas que representan miles de experimentos llevados a cabo en el último medio siglo es que todas las líneas externas acaban en un punto negro, y todas las líneas internas tienen puntos negros en cada extremo. Eso significa que cada interacción individual en el aparato teórico entero tiene lugar en un único punto del espacio y el tiempo (en otras palabras, que es estrictamente local). El formalismo matemático de la física cuántica es explícitamente local.

La localidad es una de las raras propiedades del mundo acerca de la cual la experiencia diaria, la física teórica moderna y la intuición de Einstein parecen estar en perfecto acuerdo.

Hasta aquí la matemática. La conclusión de que las ecuaciones subyacentes son estrictamente locales todavía deja pendiente la cuestión de su interpretación. El argumento de Einstein, Podolsky y Rosen implicaba que si insistimos en la localidad y queremos salvar la mecánica cuántica, debemos abandonar el realismo^[32]. El QBismo hace eso, por supuesto, pero queda una cuestión pendiente: ¿dónde están los puntos, *loci* en latín, donde tienen lugar las interacciones? Después de todo, los puntos negros de los diagramas de Feynman no son puntos reales del espacio-tiempo, sino meros artefactos matemáticos para el cálculo de probabilidades. En palabras llanas, según el QBismo, ¿dónde pasa lo que pasa?

La respuesta a esta pregunta es a la vez sorprendente y nada convencional. David Mermin, junto con los QBistas originales Fuchs y Schack, lo explican así: «La mecánica cuántica bayesiana es local porque todo lo que se propone es permitir a cualquier agente singular organizar sus propios grados de creencia sobre los contenidos de su propia experiencia personal»^[33]. Las experiencias personales se graban (se localizan) en la mente del agente. Se suceden en el tiempo, pero, por definición, nunca ocurren simultáneamente en localizaciones muy separadas. Son locales. Su relación mutua difiere fundamentalmente de la conexión entre dos masas en la gravedad newtoniana. Un QBista no puede afirmar que a medida que un cuerpo se mueve, otro cuerpo distante nota el cambio, porque el QBismo se refiere solo a las experiencias de un único agente.



El experimento GHZ ilustra esta idea. Digamos que una agente llamada Alice opera uno de los tres detectores ampliamente separados. Por experiencia

entiende las correlaciones de los tres espines, resumidas en la regla GHZ. Su detector mide el espín vertical de uno de un trío de electrones y da el resultado *arriba*. Entonces recibe una llamada telefónica de Bob, el operador del segundo detector, que le comunica también el resultado *arriba*. Si ella es una física cuántica convencional, ahora puede aplicar la física clásica o la mecánica cuántica para predecir la lectura de Charlie del tercer detector. Pero si es una QBista, lo máximo que puede decir es: «Estoy muy segura de que cuando Charlie me llame, me dirá que ha salido *abajo*». Y cuando lo hace, ella concluye que la física clásica es incorrecta. No puede «explicar» el resultado más allá del hecho de que la teoría cuántica funciona, pero no intentará contar un relato de influencias tenebrosas. De acuerdo con Fuchs y sus colegas, «La cuestión de la no localidad ni se plantea».

Creencia y certidumbre

En lo que respecta a la mecánica cuántica, Einstein acertó en dos terceras partes de lo que dijo. El artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) sugería correctamente que la teoría, tal como la conocemos hoy, no puede interpretarse como una descripción local y realista de la naturaleza. La localidad, por su parte, es un requerimiento de las propias leyes de la relatividad de Einstein. Era solo en su insistencia en alguna clase de realismo físico en lo que Einstein iba desencaminado.

La mayoría de la gente, incluidos los QBistas, comparten la sensación intuitiva y de sentido común de que hay un mundo real ahí fuera. Para aquellos que afirman, por el contrario, que solo hay mentes e ideas, el gran lexicógrafo Samuel Johnson ofreció una beligerante refutación. Dando una patada a una gran piedra, exclamó: «Así lo refuto». Dado que su vigoroso lenguaje corporal no demostraba nada en realidad, se dice, en analogía con un *argumentum ad absurdum* (reducción al absurdo), que el suyo es un *argumentum ad lapidem* (reducción a la piedra). Pero como expresión de un sentimiento visceral, el dramático gesto del doctor Johnson tiene cierto atractivo.

Lo que se discute, más que si la realidad existe, es un complejo de cuestiones que han ocupado a los sabios durante milenios: cómo percibimos esa realidad, cómo interactuamos con ella y cómo intentamos representarla. Hasta que los físicos cuánticos empezaron a meter sus narices en esos problemas, los físicos se las arreglaban para evitar pensar en los métodos y límites del conocimiento humano, y dejaban la metafísica para los metafísicos. Hay que reconocerle a Einstein y sus colegas Podolsky y Rosen que al menos intentaran especificar con precisión lo que entendían por *realidad*, aunque su definición resultara ser demasiado restrictiva. Parece ser que Einstein llegó a esa conclusión por sí mismo, a juzgar por el hecho de que tras la publicación del artículo la expresión *elemento de realidad* desapareciera de su correspondencia^[34]. Pero dado que la definición tiene la

virtud de ser sucinta, y por un tiempo incluso a Einstein le pareció lo bastante buena, nos sirve para centrar la discusión.

Según la tesis EPR, «Si podemos, sin perturbar un sistema de ninguna manera, predecir con certidumbre (esto es, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad correspondiente a esa magnitud». Esta famosa definición se formula en términos de un silogismo del tipo «si... entonces», en el que tanto la premisa como la conclusión son debatibles. La premisa implica que una predicción que acierta repetidamente conduce a la certidumbre. Esto es un ejemplo de *argumento por inducción*, que va de lo particular a lo general. Pero la inducción no tiene la fuerza de una implicación lógica. El hecho de que todos los cisnes que hayamos visto sean blancos no prueba que todos los cisnes son blancos. El hecho de que el sol haya salido cada día durante eones no prueba que seguirá haciéndolo por siempre jamás. De hecho, los astrónomos nos aseguran que no será así^[35].

La conclusión de la definición EPR intenta proceder de la «certidumbre» a algo aún más sustancial. Si es algo de lo que se tiene certeza, se supone que es real. Se supone que hay alguna clase de mecanismo físico objetivo en el mundo real para anclar la «magnitud física» considerada y garantizar el éxito de cada predicción. Pero las apariencias —ni siquiera las persistentes y predecibles— no necesariamente revelan una verdad objetiva subyacente. El mundo cotidiano, incluyendo el mundo científico, está demasiado repleto de ilusiones, espejismos, autoengaños e interpretaciones equivocadas para justificar esa convicción. Las ilusiones ópticas, de las que pueden encontrarse ejemplos alucinantes en internet, ilustran persuasivamente el abismo entre los hechos y las percepciones.

Con su énfasis en la enmienda y el mejoramiento de los juicios personales, la probabilidad bayesiana ofrece una interpretación alternativa eficaz del significado de la certidumbre. Una pista de que la «probabilidad igual a la unidad» debe examinarse con cuidado es inherente a la forma misma de la ley de Bayes. Recordemos que la adquisición de nueva información cambia el valor de la probabilidad a priori por otro a posteriori mediante un factor multiplicativo. Pero hay un número que nunca cambia al multiplicarlo por otro: el número 0. El resultado de multiplicar el número 0 por cualquier número finito es 0. Si un agente asigna una probabilidad a priori de 0, lo que significa que el suceso es imposible o la proposición falsa, ninguna información adicional puede hacerle cambiar de opinión.

Que lo mismo ocurre con una probabilidad a priori de 1 puede demostrarse simplemente cambiando la proposición por su negación. En vez de preguntarnos: «¿Cuál es la probabilidad de que una manzana caiga al suelo cuando la soltemos?» (probabilidad a priori 1), nos preguntamos: «¿Cuál es la probabilidad de que una manzana *no* caiga cuando la soltemos?»

(probabilidad a priori 0) y luego aplicamos el razonamiento del párrafo anterior.

En pocas palabras, la ley de Bayes deja la certidumbre intacta. Esto puede plantear un problema si una nueva evidencia que se supone que actualiza el conocimiento previo resulta ser muy potente.

Los estadísticos bayesianos sortean este defecto con una regla simple. Salvo los casos de certidumbre matemática o lógica, simplemente reemplazan las probabilidades a priori de 0 o 1 por probabilidades muy muy próximas a 0 y 1, y proceden a partir de ahí. El matemático Dennis Lindley ha acuñado la denominación *regla de Cromwell* para la prohibición de probabilidades a priori de 0 o 1, en referencia a una carta de Oliver Cromwell (no Thomas) a la Asamblea General de la Iglesia de Escocia implorándoles que no se encorsetaran al justificar sus convicciones como verdades inmutables decretadas por «la voluntad y la mente de Dios». Para enfatizar su súplica, Cromwell recurrió a una frase peculiar e inolvidable: «Os ruego, en las entrañas de Cristo, que penséis en la posibilidad de que estéis equivocados». La regla de Cromwell es un llamamiento a la humildad, la apertura mental y el escepticismo que caracterizan la empresa científica, o así debería ser.

Los QBistas atienden la súplica de Cromwell de modo muy diferente a como lo hacen los estadísticos bayesianos. En vez de cambiar los números mismos, enmiendan la interpretación de «certidumbre». Puesto que las funciones de onda tales como los *cúbits* sí permiten probabilidades de 1 y 0, lo que hacen es reinterpretar dichos valores. ¿Qué significa que un agente asigne la probabilidad 1 a un suceso? En el contexto de la probabilidad bayesiana, todo lo que implica es que el agente está muy muy seguro de que ocurrirá y que apostaría lo que fuera a que así será. No implica nada sobre asignaciones de probabilidad al mismo suceso por otros, ni sobre el diseño real del mundo.

La regla de Cromwell me recuerda un error que parecía cometer la mayoría de mis estudiantes de cursos introductorios. Cuando yo les decía que el número 0,999... (donde los tres puntos representan un decimal periódico) está muy muy próximo al número 1, estaban de acuerdo. Pero cuando yo continuaba preguntándoles: «¿Pensáis que es un poquito más pequeño que 1, en otras palabras, que es matemáticamente correcto escribir $0,999... < 1?$ », su respuesta solía ser que sí.

Pero se equivocaban. «Un poquito» no es un término matemático aceptable. De hecho, la respuesta correcta a mi pregunta es que $0,999... = 1$. (Para convencerse de ello basta con una división larga para encontrar $1/3 = 0,333...$ y luego multiplicar ambos lados de la ecuación por 3.)

Los neófitos en matemáticas suelen sorprenderse de aprender que en notación decimal el número 1, y muchos otros, pueden escribirse de dos maneras muy diferentes (siempre que uno deje que su mente viaje al infinito y

vuelva). Imaginar la hilera de nueves sin fin, un proceso que los matemáticos llaman *paso al límite*, es una excursión mental inaccesible a los ordenadores. Cualquier cálculo real, sea manual o electrónico, trunca la secuencia infinita y da como resultado una desigualdad correcta, por ejemplo $0,999 < 1$, que no implica un decimal periódico.

La ecuación $1 = 0,999\dots$ sirve como una suerte de recordatorio taquigráfico de tres maneras de tratar la certidumbre. El lado izquierdo es tan real y concreto como nuestro dedo índice; representa la presunción de certeza absoluta, la cual, según la tesis EPR, viene garantizada por un elemento de realidad. Es simple, real y finito. El lado derecho es una abstracción tan esquiva como el concepto de infinitud mismo, y ayuda a ilustrar la interpretación QBista de la certidumbre. El decimal recurrente tiene la misma apariencia externa que todos los números reales entre 0 y 1, todos los cuales valen para representar probabilidades. Simbólicamente, la notación $0,999\dots$ elimina el estatuto especial que la tesis EPR confería al número 1, aunque los dos números sean el mismo. Un tercer modo de concebir la certidumbre es omitir los puntos y convertir la igualdad en una aproximación $1 \approx 0,999$, que representa la regla de Cromwell. Así, los tres símbolos 1, $0,999\dots$ y $0,999$ sirven como metáforas de las interpretaciones de la aparentemente no problemática noción de certidumbre por la tesis EPR, el QBismo y la estadística bayesiana, respectivamente.

De acuerdo con el QBismo, las asignaciones de probabilidad de 0 y 1 son creencias personales de los agentes, no enunciados sobre el mundo real. Esta chocante conclusión alinea esas asignaciones con el resto de las probabilidades. En contra de la definición EPR de realidad, no hay ningún salto cualitativo de una probabilidad cercana a 1 a una probabilidad igual a 1, ningún salto cuántico a través de una frontera entre la incertidumbre y la certidumbre, ningún vacío tramposo que salvar, y ninguna transición de opinión a hecho. El grado de mi creencia en que una manzana caerá cuando la suelte es numéricamente mucho mayor que el grado de mi creencia en que esta tarde lloverá, pero ambos juicios, aunque *cuantitativamente* estén a años luz, no son *cualitativamente* distintos.

Esta constatación es una de las consecuencias más radicales del QBismo y posiblemente «el principio más duro de aceptar para los físicos»^[36]. Hace tiempo los miembros de la Asamblea General de la Iglesia de Escocia encontraron igual de difícil poner en duda su propio juicio, que justificaban en nombre de su religión, y rechazaron la apasionada súplica de Oliver Cromwell de no basar la certidumbre en la creencia. En nuestro tiempo el QBismo va aún más allá, pues sostiene que incluso la certidumbre es una forma de creencia.

CUARTA PARTE
La visión QBista del mundo

Física y experiencia humana

Mucho antes de la invención del QBismo, la mecánica cuántica convencional ya apuntaba que las percepciones humanas deben estar escondidas en alguna parte de sus entresijos matemáticos. La paradoja del amigo de Wigner muestra por qué. Si dos amigos no tienen la misma información sobre un sistema cuántico, deben asignarle funciones de onda diferentes. Dado que su información —lo que conocen— viene determinada no solo por el sistema mismo, sino también por sus propias experiencias previas, dichas experiencias personales separadas influyen directamente sus modelos del mundo.

En 1961, cerca del fin de su eterna lucha por dilucidar el significado auténtico de la mecánica cuántica, Niels Bohr escribió: «La física va a contemplarse no tanto como el estudio de algo dado a priori, y más como la concepción de métodos para ordenar y sondear la experiencia humana»^[37].

Al decir «dado a priori» Bohr se refería al mundo exterior (lo que Einstein llamaba «realidad»). Es la piedra a la que el doctor Johnson dio una patada. Nótese que Bohr no eliminaba del todo lo objetivo en favor de lo subjetivo. Lo que él llama «dado a priori» no es irrelevante, solo que su papel *no es tan fundamental* en la ciencia como nos han enseñado. Si bien el experimentador, el observador y el teórico están investigando *algo* externo a ellos mismos, con lo que tratan directamente no es con la naturaleza misma, sino con la naturaleza tal como se refleja en las experiencias humanas.

El epigrama de Bohr, como muchos de sus pronunciamientos oraculares, cayó en oídos sordos. Yo desde luego nunca oí una palabra sobre la experiencia humana en mis clases de mecánica cuántica cuando era estudiante. Y aunque hubiera oído la observación de Bohr, probablemente no la habría entendido. No solo porque contradice todo lo que me habían enseñado a creer sobre la ciencia, sino también porque sus palabras son oscuras en el mejor de los casos. ¿Qué se supone que son exactamente esos «métodos para ordenar y sondear la experiencia humana»? La mecánica

cuántica convencional proporcionaba recetas claras y explícitas para sondear y cartografiar sistemáticamente el mundo material en términos matemáticos, desde el microcosmos de las partículas elementales hasta el macrocosmos del universo; pero los pensamientos, impresiones y memorias de los seres humanos que confeccionan y usan el mapa han sido cuidadosamente limpiados de las ecuaciones. Si Bohr estaba en lo cierto, ¿dónde podían encontrarse esos elementos subjetivos en el formalismo?

Cuarenta años después de la muerte de Bohr, el QBismo finalmente ha dado con una manera sencilla de dar sentido a su críptico pronunciamiento. La clave de la implementación de su intuición es el concepto de probabilidad. De acuerdo con el QBismo, la probabilidad —ese pilar central de la mecánica cuántica— no es una cosa. No es algo dado a priori, como sugiere la probabilidad frecuentista. Un enunciado tal como «La probabilidad de que salga cara en el lanzamiento de una moneda no trucada» parece independiente de cualquier influencia humana. Está pidiendo a gritos ser un «hecho». Pero el QBismo demuestra, de manera lógica y empírica, que es más efectivo contemplar la probabilidad como un grado de creencia que, por lo tanto, depende de la experiencia del agente de turno. Al adoptar la probabilidad bayesiana en vez de la probabilidad frecuentista, el QBismo inyecta ideas y creencias humanas en el austero entramado matemático de la física.

El QBismo comulga con Bohr, pero da un gigantesco paso adelante. A diferencia de Bohr, no habla de experiencias humanas en general, sino de la experiencia de un único agente, un ser humano particular. ¿Quién es esa persona, entonces? Chris Fuchs responde a esta pregunta enfáticamente con el exuberante estribillo de una canción de los Beatles de los años setenta: «Yo-yo-mí-mí-mío». Se refiere a cada usuario individual de la mecánica cuántica, de manera separada e independiente. Según el QBismo, la mecánica cuántica proporciona un método para que los agentes sondeen y organicen sus propias experiencias personales.

Si eso suena más como una receta para la anarquía o una estrafalaria forma de egocentrismo que como un principio fundamental de la gran empresa de la ciencia es porque nos hemos acostumbrado a una representación equivocada del alcance de nuestras experiencias científicas. La interpretación QBista implica un *estrechamiento* y a la vez una *ampliación*, en una dirección diferente, del objeto de la mecánica cuántica y, por extensión, de toda la ciencia. Representa un estrechamiento radical porque restringe la relevancia de una probabilidad estimada a un solo agente. Pero al mismo tiempo implica una inmensa ampliación, porque las experiencias de ese agente incluyen no solo medidas del espín de este electrón o la frecuencia de aquel láser —«sucesos nimios» en el gran esquema de las cosas, por emplear la frase despreciativa de John Bell—, sino todas las experiencias personales, pasadas y presentes.

Aunque yo, como agente, tengo una libertad considerable para asignar estimaciones de probabilidad a mis propias experiencias futuras, deben conformarse a las restricciones del cálculo de probabilidades. También deben estar libres de contradicciones matemáticas. Por ejemplo, si creo que hay un 20 % de posibilidades de que salga un rey en un juego de cartas, sería absurdo asignar a la vez un 30 % a las posibilidades de que salga un rey de espadas. Y a la inversa, tampoco puedo predecir un 10 % de posibilidades de que salga una figura. Los psicólogos y los economistas han puesto de manifiesto que la mayoría de nosotros, basándonos en la falible intuición, nos saltamos rutinariamente las leyes formales de la probabilidad que prohíben tales disparates. Se han hecho experimentos psicológicos en los que la gente expresa creencias absurdas, como la estimación de que en un intervalo de tiempo dado hay más asesinatos en Detroit que en Michigan (Detroit está en Michigan). Este comportamiento paradójico puede tener consecuencias financieras y sociales funestas, pero parece formar parte de la condición humana. En ciencia, sin embargo, hay que desterrarlo para que la empresa entera no se autodestruya por la contradicción interna. El sucinto lenguaje matemático nos ayuda a asegurar la consistencia lógica, porque sus términos son mucho más transparentes y menos ambiguos que los del habla ordinaria.

La red de asignaciones de probabilidad para la totalidad de las experiencias de un agente particular difiere de la del resto de los agentes en el mundo. Las redes de probabilidades, como los cristales de hielo, son intrincadas y únicas. Ahora bien, ¿qué hay de la coherencia entre los agentes? Si cada agente viviera dentro de su cascarón de posibilidades personales privado, cada uno internamente consistente, pero sin concordancias ni consistencia entre ellos, la ciencia se disolvería en un parloteo incoherente de preferencias personales. La ampliación del dominio de lo que se considera una experiencia científica proporciona las ligaduras que convierten la ciencia en un poderoso producto del ingenio humano. Lo que me conecta con mis colegas y colaboradores, y también con el resto de la comunidad científica pasada y presente, es la suma de las experiencias personales que tengo de comunicación con ellos. Cada libro, artículo y carta que leo, cada charla que escucho, cada conversación en la que participo, cada imagen que veo, y cada medida de la que soy testigo, todas son nuevas experiencias añadidas a mi mente consciente, y todas sirven como información de contexto para actualizar mis asignaciones de probabilidad. Así pues, aunque la colección de experiencias de cada agente es única, cada una incluye un gran núcleo común de experiencias idénticas compartidas. Por ejemplo, todos conocemos y respetamos las leyes de Newton porque todos las hemos aprendido y las hemos usado para calcular las probabilidades previas para nuestras experiencias futuras. Esas enormes áreas de superposición entre redes personales de asignaciones de probabilidad, basadas en las experiencias

compartidas, aportan orden a la ciencia. Las pequeñas diferencias individuales contribuyen a la innovación y el progreso.

De acuerdo con el QBismo, la mecánica cuántica no es una descripción del mundo, sino una técnica para comprenderlo. Nuestras experiencias futuras solo pueden describirse en términos de probabilidades. Podrían ser clásicas o cuánticas, dependiendo de las circunstancias, pero todas son probabilidades bayesianas. Por ejemplo, en un experimento determinado un electrón puede concebirse como un sistema cuántico con una función de onda extendida, pero en circunstancias diferentes su movimiento puede compararse al de una pelota de golf. Y a la inversa, Wigner tomaría a su amigo por un objeto clásico hasta que, en el contexto de un experimento cuántico, se vería impelido a construir una función de onda que entrelace a su amigo con un electrón.

Desarrollar una visión del mundo abarcadora y consistente es una empresa formidable. El viaje es largo y duro, pero el QBismo nos ha mostrado cómo acometerlo.

Mi propia adopción de esta interpretación como la base de una nueva visión del mundo me proporcionó una profunda sensación de plenitud, porque me puso —finalmente— en contacto personal con las leyes de la naturaleza y la gente que las concibió. Me entrelazó en la grandiosa épica de la física de una manera que nunca había anticipado o siquiera creído posible.

Ya no participo en la investigación científica, aunque si participara continuaría haciendo lo que he hecho toda mi vida. Manejaría la mecánica cuántica como la herramienta fiable que es, calcularía funciones de onda, deduciría probabilidades de ellas y exhortaría a mis colegas experimentales a compararlas con los datos de laboratorio. Pero mis impresiones sobre el proceso han cambiado.

Lo que he estado procurando ha sido investigar conforme al «método científico». Hoy en día se encuentran aulas de enseñanza primaria adornadas con coloridos pósteres que muestran una lista con los seis o siete pasos del método científico en versión más o menos estándar: «1. Piensa una pregunta. 2. Haz la investigación de base. 3. Formula una hipótesis. 4. Realiza un experimento». ¿Por qué no hay un póster al lado titulado «El método artístico»? Porque ni siquiera los filósofos han sido capaces de definir el arte, y menos aún sus métodos, de una manera universalmente aceptable. Simplemente, la empresa artística es demasiado humana para reducirla a un póster. Involucra sentimientos, idiosincrasias y diferencias individuales de manera tan esencial que encorsetar el «método artístico» en la camisa de fuerza de una definición no solo es imposible, sino también contraproducente. Si pudiera diseñarse, un póster del método artístico seguramente inhibiría más que inspiraría a los niños que lo memorizaran.

Si el método artístico es demasiado humano para ser estandarizable, el método científico enlatado adolece del problema opuesto. En su descripción estándar no hay sitio para la individualidad o las diferencias personales. Suena más como el manual de instrucciones de una cortadora de césped que como la representación de una gloriosa aventura humana.

El QBismo ofrece un punto de vista más atractivo. Al situar a los usuarios de la mecánica cuántica, cada agente de manera individual y personal, en el centro de la acción, «el QBismo devuelve al científico a la ciencia», como escribió David Mermin en 2014 en la revista *Nature*^[38]. Para mí esto implica que, como físico, no me limito a seguir un conjunto de reglas que han evolucionado durante milenios sin mi participación. En vez de eso, el QBismo me permite sentir que estoy trabajando de manera independiente, guiado por mi propia experiencia y mis pensamientos (que, por supuesto, han sido conformados y alimentados por los de mis ilustres predecesores). Al final lo que importa es mi propia asignación personal de probabilidades. El QBismo ha internalizado y, por ende, humanizado la ciencia.

También implica un cambio radical de perspectiva. Al ofrecer una descripción del universo de abajo arriba, da la vuelta a la visión tradicional de arriba abajo. La física convencional, que separa estrictamente el objeto del sujeto, intenta ver el mundo desde un punto de vista universal. Las leyes de la naturaleza son fijas e inmutables. El universo material existe «ahí fuera», regido por esas leyes y no afectado por los lastimosos seres humanos que lo contemplamos. El tiempo también es objetivo, en el sentido de que está divorciado de los sentimientos, creencias y puntos de vista personales, aunque los efectos de la velocidad y la gravedad descritos por la teoría de la relatividad compliquen su discurrir. La comprensión humana, en este modo de pensar, nunca alcanzará la mente de Dios, pero sí aspira a capturar retazos de sabiduría divina. En los siguientes cuatro capítulos exploraré cómo el QBismo cuestiona esta visión del mundo y la reemplaza por otra más humilde, que en vez de argumentar de lo general a lo específico, busca lo universal en las experiencias personales particulares.

Las leyes de la naturaleza

Este es uno de los enigmas más antiguos del hombre: ¿cómo puede armonizarse la independencia de la volición humana con el hecho de que seamos partes integrales de un universo que está sujeto al rígido orden de las leyes de la naturaleza?^[39]

MAX PLANCK,
¿Adónde va la ciencia?

Las leyes de la naturaleza no se revelan simplemente buscándolas, igual que descubrimos un nuevo planeta o una nueva especie de hormiga. En vez de eso, se inventan libremente sobre la base de un número limitado de observaciones y experimentos. Su formulación, como Planck sabía por una experiencia trabajosamente adquirida, requiere no solo lógica y matemáticas, sino imaginación, intuición, perspicacia e instinto. El método de búsqueda de esas leyes recurre a la inducción (razonar de lo específico a lo general), un procedimiento tan falible como cualquier empresa humana.

A diferencia de una simple observación, que puede registrarse y compartirse con otros tan pronto como se lleva a cabo, un nuevo principio de la ciencia nace como una hipótesis (o una conjetura, como decía Feynman con su estilo directo) y luego requiere un largo periodo de prueba antes de que alcance el noble estatuto de «ley de la naturaleza». Tomemos, por ejemplo, la fórmula de Newton para la gravedad, uno de los primeros postulados de la física que merecen la designación de *ley*. Inicialmente recibida con recelo y en ocasiones incluso ridiculizada, la ley de la gravedad tardó décadas en ser aceptada por la ciencia y el público. Corroborada por una explicación exitosa tras otra (las mareas oceánicas, el abombamiento ecuatorial de la Tierra, las predicciones de eclipses y cometas...), poco a poco fue ganando crédito, hasta ascender a la certidumbre y la aceptación popular.

El modo en que las hipótesis se consolidan y cristalizan en leyes se parece a la transición entre predicciones y elementos de realidad en el razonamiento de Einstein, Podolsky y Rosen. En ambos casos una creencia gana fuerza y gradualmente se llega a la certidumbre. Una vez que un principio adquiere la prestigiosa etiqueta de *ley de la naturaleza*, su significado comienza a cambiar. La ley comienza a invocarse no solo para describir cómo pasan las cosas, sino para controlarlas o gobernarlas. Comienza a regir el mundo en el sentido de la expresión «el imperio de la ley». O como lo expresó Planck, el universo se somete al orden rígido impuesto por la ley.

Sabemos de dónde proceden las leyes humanas y cómo se gestan, pero ¿de dónde proceden las leyes de la naturaleza? Para los creyentes como Newton, Dios decreta las leyes, y hasta donde somos capaces de desentrañarlas aprendemos a entender y apreciar una pizca de la mente de Dios. En esta visión, las leyes de la naturaleza son leyes divinas, y no hay más que hablar. Por desgracia, las explicaciones religiosas tienden a excluir el debate en vez de estimular la curiosidad y el descubrimiento.

Para los físicos clásicos como Planck, como para la mayoría de mis colegas actuales, las leyes de la naturaleza huelen a absoluto. Desde luego, todos sabemos y aceptamos el hecho de que las teorías científicas evolucionen y muten, y estén sujetas a una posible retirada, pero hasta que se demuestren incorrectas, se presume que las leyes tienen una validez absoluta. Las leyes de la relatividad especial, por ejemplo, son absolutas, por contradictorio que pueda sonar. Nunca se ha encontrado una violación de las mismas, y se aceptan universalmente como válidas. A menos y hasta que se demuestre convincentemente que están equivocadas, todas las teorías físicas deben conformarse a la relatividad especial. Igualmente, todas las leyes de la naturaleza tienen una validez absoluta (mientras no sepamos más).

La idea de que las leyes de la naturaleza controlan el mundo domina la enseñanza de la ciencia. Cuando a un escolar se le pregunta por qué un disco de hockey continúa deslizándose sobre el hielo en vez de pararse tan pronto pierde contacto con el palo, se espera que responda algo así como: «Por la ley de conservación del momento». Se cree que la ley gobierna la materia inanimada, y que el disco se limita a hacer lo que le ordena un ama todopoderosa (la ley de la naturaleza en cuestión). En ese sentido, la ley es la «causa» de la persistencia del movimiento del disco (igual que las leyes de tráfico son la causa de que los conductores se atengan a los límites de velocidad). Pero, dado que un disco no tiene libre albedrío, la ley natural que «obedece» debe diferir de alguna manera profunda del límite de velocidad en una autopista.

¿Cuál es, entonces, el estatuto de una ley de la naturaleza? ¿De dónde proviene? ¿Quién la redactó? ¿Dónde reside? ¿Está codificada de algún modo en la materia o el espacio-tiempo del universo? ¿Cómo se hace cumplir?

¿Regía antes de que se consignara por primera vez? Si no sabemos de dónde surge una ley, ¿acaso no es un milagro (como lo era la ley de la gravedad para Newton)? ¿Son las leyes de la naturaleza sobrenaturales en sí mismas, estando por encima y más allá del alcance de la ciencia?

A menudo, en la ciencia como en la vida, se puede aprender mucho de algo estudiando cómo llegó a ser. La historia de un fenómeno nos da pistas sobre su significado. Dado que las leyes de la naturaleza nacen en las mentes de los científicos, quizá deberíamos buscar ahí las claves de su esencia, más que en la naturaleza misma o más allá, en algún plano superior.

La respuesta del QBismo a esta cuestión es más terrenal que cualquier explicación religiosa o sobrenatural. La interpretación bayesiana de la probabilidad como medida de la expectativa de una experiencia futura sugiere que la tradición que ha elevado las leyes de la naturaleza a su actual estatuto trascendente tiene su retroceso. El QBismo implica que las cosas no ocurren como ocurren porque obedecen una ley de la naturaleza, sino que las leyes de la naturaleza han sido inventadas porque las cosas ocurren como ocurren.

Las leyes de la naturaleza adoptan así un nuevo papel. En vez de determinar sucesos, describen la experiencia pasada de estos. Son compendios de información sumamente eficaces, brillantes ejemplos de lo que los informáticos llaman *compresión de datos*. La cantidad de información científica contenida en los ocho pequeños símbolos de la ley de la gravedad de Newton es inimaginable en su alcance, tan inimaginable como la secuencia infinita de dígitos que define el número sucintamente descrito como la «raíz cuadrada de dos». Así contemplada, como un compendio de información, la palabra *ley* parece inapropiada. Quizá la palabra *regla* se acerque más a expresar su contenido. (La palabra *regla* viene del latín *regula*, que significa «vara de medir»). Una regla puede interpretarse como una regularidad observada más que como un edicto impuesto desde arriba (aunque pueda ser tan fundamental e inflexible como una ley). Entre las leyes del electromagnetismo, por ejemplo, la llamada regla de la mano derecha describe la dirección del campo magnético que rodea un conductor de corriente. Esa regla es tan rígida como una ley de tráfico, pero tiene un nombre más humilde.

En la visión del mundo QBista, las leyes de la naturaleza ganan crédito de manera asintótica, acercándose cada vez más a la certidumbre con una tasa de cambio decreciente. Así como la probabilidad de que un átomo radiactivo se haya desintegrado aumenta de 0 a 1, pero nunca alcanza esa cota superior (a menos que se observe), la probabilidad de que una ley de la naturaleza sea efectivamente válida aumenta de 0 (antes de que se hiciera la primera conjetura) a 1, sin alcanzar nunca la certidumbre. La regla de Cromwell debería aplicarse no solo a las probabilidades, sino también a las leyes de la naturaleza. Al permitir un asomo infinitesimal de duda para atemperar su

validez absoluta, estamos mejor preparados para los inevitables refinamientos y salvedades que las actualizarán en el futuro.

Estoy muy muy seguro de que la taza que hay sobre la mesa delante de mí no levitará espontáneamente hacia el techo, pero creo que sería imprudente afirmar que estoy absolutamente seguro. Apostaría mi dinero a que eso no ocurrirá, pero aun así insistiría en reservar un asomo de duda. De hecho, incluso los físicos clásicos conciben una minúscula posibilidad de que una acumulación accidental y extremadamente rara de moléculas de aire bajo la taza pudiera levantarla como un globo.

El QBismo me ha ayudado a contemplar las leyes de la naturaleza que he estado enseñando durante medio siglo bajo una nueva luz. Estas leyes representan las experiencias y el saber compilado por generaciones de físicos, pero no son ni absolutas ni rígidas. Son creaciones humanas, y por lo tanto maleables (al menos en principio).

La interpretación QBista de la naturaleza de las leyes de la naturaleza nos libera de los grilletes del determinismo rígido al que aludía Planck en el epígrafe de este capítulo. Ahora bien, ¿qué tiene que decir el QBismo de la antítesis del determinismo estricto, a saber, la posibilidad de la volición y el libre albedrío del ser humano?

La piedra devuelve el golpe

El físico teórico norteamericano John Archibald Wheeler (1911-2008) es más conocido por el gran público por enriquecer nuestro léxico con el término *agujero negro* que por sus contribuciones pioneras a la física nuclear. La comunidad científica le veía no solo como un teórico audaz e imaginativo, sino también como un docente inspirador. Su discípulo más famoso fue el *enfant terrible* de la física norteamericana, el premio Nobel Richard Feynman, de cuya tesis doctoral fue supervisor. Cuarenta años más tarde, en la Universidad de Texas, Wheeler fue el tutor de investigación de Chris Fuchs, a quien animó a dedicarse al estudio de los fundamentos de la física, lo que en aquel momento la mayoría de nosotros veía como un tema marginal en el mejor de los casos. De su profesor, Fuchs aprendió que la información cuántica podía ser la clave más prometedora para una comprensión más profunda de la mecánica cuántica misma y, por extensión, de la física en general. Así pues, se puede decir que Wheeler es el padrino del QBismo.

A Wheeler le gustaba plantear lo que se dio en llamar «grandes preguntas» en lenguaje críptico y oracular. Entre ellas estaban: ¿Por qué el cuanto?, ¿Está la información en la base de todo? y ¿Un universo participativo?

La respuesta a la primera pregunta es tan esquiva hoy como lo fue para Max Planck. Al principio de este libro he sugerido que la fórmula de Planck $e = hf$ es el icono de la mecánica cuántica. ¿De dónde viene? En su momento era una hipótesis sin base, mientras que hoy se sigue de los principios más fundamentales, y más complicados, de la mecánica cuántica. Ahora bien, ¿cuál es la esencia simple de esos principios? Puede que esta pregunta sea verdaderamente profunda, o puede que no tenga respuesta, o puede que, lo más probable, no esté bien formulada. Si, por ejemplo, el mundo es realmente mecanocuántico en su núcleo inefable y nosotros simplemente no lo apreciamos en el mundo clásico de nuestra vida cotidiana, entonces se le podría dar la vuelta a la pregunta. Si el cuanto es tan inexplicable como la

existencia misma, la auténtica cuestión podría ser: ¿Por qué lo clásico? En cualquier caso, al preguntarse *por qué* en vez del más pusilánime *cómo*, Wheeler dejó ver su inclinación por la metafísica. A él le parecía que las cuestiones filosóficas sobre el sentido del ser y de la realidad deberían volver a ocupar su legítimo lugar dentro de la disciplina de la física, donde han sido vetadas durante siglos. Chris Fuchs se ha tomado este consejo muy a pecho.

La segunda gran pregunta, a menudo referida como la cuestión del *It from bit*, que en su expresión más asertiva Wheeler usaba sin interrogante, es un ejemplo extremo de compresión de datos. En tres palabras cortas resume la totalidad del legado filosófico de Wheeler, que propone que la información es la clave para comprender la naturaleza. ¿Es el *bit*, contemplado como un átomo de información, aún más fundamental que el átomo químico para nuestra comprensión del *it* (el universo material)? El QBismo es el primer capítulo de este siglo, y seguramente no el último, en la gran búsqueda metafísica conocida como *It from bit*.

Con su pregunta más radical: ¿Un universo participativo?, Wheeler subrayó la lección que hemos aprendido de la mecánica cuántica: que la experimentación y la medición no son actos de un observador pasivo y externo que examina un mundo con una existencia independiente, como los físicos clásicos han supuesto desde los tiempos de Demócrito. En vez de eso, el observador y el objeto de estudio están íntimamente implicados. Más que actuar como meros registradores de información, los observadores somos agentes que participamos en la creación misma de los resultados de nuestras interacciones con el mundo.

El QBismo responde con un sí a la pregunta de Wheeler, y la elabora. Desde su nacimiento, la mecánica cuántica se ha preocupado de los experimentos físicos llamados *medidas*. Típicamente consisten en disponer un aparato para medir algún atributo de un sistema cuántico, como el espín de un electrón. Luego se calcula una función de onda con objeto de predecir las probabilidades de los resultados posibles, se efectúa el experimento, y los datos empíricos obtenidos se comparan con las predicciones.

Muchos físicos han objetado que el término *medida* tiene connotaciones engañosas. La palabra parece implicar que el resultado es un valor preexistente que solo espera a ser revelado. Por ejemplo, medir el peso de un bebé implica tácitamente que el bebé tiene un peso, que simplemente está por conocer. La medida no hace más que descorder el velo sobre ese valor y dejarlo a la vista de todos.

En mecánica cuántica, sin embargo, *los experimentos no realizados no tienen resultados*. El espín del electrón no tiene dirección hasta que la determinamos. El *cúbit* que representa el espín no tiene valor en bits hasta que la función de onda colapsa en *arriba* o *abajo*. De hecho, si presuponemos que hay un valor de espín oculto, nos vemos abocados al error (como demuestra

espectacularmente el experimento GHZ). No es cuestión de no saber qué valor asignarle al espín. La que está equivocada es la presunción fundamental de que hay un valor de espín preexistente.

De acuerdo con el QBismo, una medida no revela un valor preexistente, sino que dicho valor se crea en la interacción entre el sistema cuántico y el agente.

Chris Fuchs lo explica así:

El QBismo dice que cuando un agente alarga la mano y toca un sistema cuántico (cuando efectúa una medición cuántica) ese proceso da lugar a un nacimiento, en un sentido casi literal. Con la acción del agente sobre el sistema, algo nuevo viene al mundo que no estaba previamente: es el «resultado», la consecuencia impredecible para el mismo agente que emprendió la acción. John Archibald Wheeler lo expresó así, y nosotros lo suscribimos: «Cada fenómeno cuántico elemental es un acto elemental de “creación de hecho”»^[40].

Eso es lo que Wheeler entendía por *universo participativo*. Mientras vivimos y nos ocupamos de nuestros asuntos, no solo interactuamos con el universo, sino que participamos continuamente en su creación.

Eso suena arrogante, pero los QBistas en realidad no reclaman la autoría de la creación del universo. Los experimentos mecanocuánticos crean solo minúsculas adiciones, prácticamente invisibles, al tejido del mundo, no todo el tinglado. Cumplen la importante función de poner de manifiesto lo que es posible. Además, incluso las causas ínfimas pueden tener efectos trascendentales, como ha demostrado convincentemente la teoría del caos. (Aquí la expresión clave es *efecto mariposa*: el aleteo de una mariposa en México puede acabar causando un huracán en Texas). Pero aun admitiendo tales efectos de palanca potenciales, el grueso del universo obviamente se originó sin la ayuda de ningún físico experimental. Cómo ocurrió es algo que aún tenemos que resolver, pero Wheeler, siempre visionario, no duda en jugársela:

Es difícil dejar de hacerse una provocadora pregunta. ¿Se construye la totalidad de la existencia, en vez de sobre partículas o campos de fuerza o geometría multidimensional, sobre billones y billones de fenómenos cuánticos elementales, esos actos elementales de «participación del observador», esas entidades, las más etéreas de todas, que nos han sido impuestas por el progreso de la ciencia^[41]?

La frase «actos elementales de participación del observador» es un tanto engañosa. Participando en experimentos cuánticos y observando sus

resultados es como los físicos tropezaron con la teoría cuántica, pero los actos elementales implicados pueden ser mucho más comunes que las mediciones en los laboratorios de física. Si un observador —un agente, junto con su aparato— se contempla como un gran sistema cuántico, entonces un experimento es en esencia una interacción entre dos sistemas cuánticos, y hemos aprendido que eso se traduce en la creación de nuevos hechos. La misma clase de creación de hecho se da cuando dos sistemas cuánticos cualesquiera se juntan. Según Wheeler, ese podría ser el mecanismo para la creación evolutiva del universo: los sistemas cuánticos colisionan e interaccionan, creándose así nuevos «hechos sobre el terreno». Wheeler dejó la respuesta a su tercera gran pregunta a las generaciones futuras. Chris Fuchs y los QBistas han dado el primer paso hacia una respuesta.

Los defensores de la interpretación bayesiana de la mecánica cuántica son criticados a menudo por su postura ante la «realidad». Puesto que consideran que las funciones de onda y las probabilidades que proporcionan son irreales, se les acusa de negar la realidad del todo (una acusación tan infundada como ilógica).

De hecho, los QBistas creen firmemente en la existencia del mundo real ahí fuera, externo a nosotros mismos. Pero en vez de insistir en que los científicos son meros observadores desconectados que registran esa realidad, se incluyen a sí mismos como parte de ella y participantes activos en su formación. En un acto de participación del observador, no hay parte dominante: el observador y lo observado participan en los mismos términos. Potencialmente, por lo tanto, cada partícula, junto con cada agente, es un participante en la creación del universo.

Así entendido, el universo del QBismo no es estático, sino dinámico. No se parece tanto a una maquinaria de relojería intrincada como al interior de una estrella en evolución, que no está viva en el sentido convencional, pero bulle de energía creativa y sorpresa continuada. Es real pero velado, objetivo pero impredecible, sustancial pero inacabado.

Lejos de negar la realidad, los QBistas creen que la evidencia de lo que es real procede primariamente de la mecánica cuántica misma. Fuchs lo expresa así: «Creemos en un mundo externo a nosotros precisamente porque nos encontramos recibiendo patadas impredecibles (del mundo) todo el tiempo». A modo de ilustración, menciona un experimento típico. Un agente dispone su equipo para preparar un sistema cuántico en una configuración especial determinada por su libre albedrío. Calcula probabilidades subjetivas de diversas posibilidades para el resultado de su medida, pero no puede hacer más que eso. El mundo externo, interactuando con el aparato, determina lo que ocurre al final, cuál de las posibilidades es la que se realiza. «Así pues», concluye Fuchs, «yo diría que en una tal medida cuántica tocamos la realidad del mundo de la más esencial de las maneras^[42]» .

El doctor Johnson pensaba que estaba iluminando la naturaleza de la realidad física porque él y su audiencia podían predecir con certidumbre lo que experimentaría al darle una patada a su piedra. La piedra era un ejemplo de «elemento de realidad» einsteiniano. Pero si la patada se la hubiera dado a una piedra cuántica, habría tenido que predecir uno de varios resultados posibles, cada uno con su propia probabilidad. La elección de lo que ocurre en realidad no depende solo del buen doctor haciendo uso de su libre albedrío, ni de la piedra obedeciendo leyes de la naturaleza estrictas, sino que depende de ambos en el acto de colisión. Según Fuchs, nuestra incapacidad de predecir con certidumbre lo que ocurrirá en un experimento cuántico revela más de la naturaleza real del mundo de lo que la física clásica, con sus leyes y sus certidumbres, ha sido capaz de descubrir. En este nuestro mundo real mecanocuántico, el observador participa y la piedra devuelve el golpe.

El problema del Ahora

Cuando tenía once años, hice que el tiempo se parara. Aunque estaba intrigado y vagamente alarmado por el curso inexorable del tiempo, me había resignado al hecho de que no podía pararlo del todo. Pero me preguntaba si podría pararlo al menos *un* momento, una suerte de punto de referencia que permaneciera fijo para siempre. Sin ser capaz de articularlo, probablemente sabía por experiencia que cuanto más atrás proyectaba la mente, con menos claridad podía recordar momentos concretos, así que aunque seleccionara un punto fijo en el pasado, rápidamente podría desdibujarse y desvanecerse. Para asegurarme de que no lo olvidaría, resolví tomar un punto único en algún momento del futuro en vez del pasado, y fijarlo como un espécimen de mariposa clavado en un alfiler.

Sabía de antemano que tenía que preparar el momento a conciencia, siendo inusualmente observador y plenamente consciente de su contexto. Un viaje en tren que hice solo, desde la casa de mis abuelos en Basilea, Suiza, hasta nuestra casa familiar cerca de Zúrich, proporcionó la ocasión. Sabía que poco después de dejar Basilea el tren pasaría junto a un pequeño y bonito castillo en un claro del bosque que se veía por la ventanilla derecha. Me encantaba captar una visión fugaz de aquel castillo de cuento de hadas con sus muros de ladrillos amarillos y sus almenas bordeadas de ocre, y nunca me cansaba de mirarlo.

El día en cuestión, me preparé examinando y memorizando mis alrededores con todo el detalle que pude. Hoy, casi setenta años después, la escena sigue claramente grabada en mi memoria. Los teléfonos móviles aún estaban lejos en el futuro, y no tenía una cámara, pero mi recuerdo es vívido. Era la tarde de un templado día de otoño, el vagón estaba casi vacío, los ajados asientos de madera eran duros e incómodos, y el tranquilizador traqueteo de las ruedas, tan familiar tras incontables viajes, me habría adormecido si no hubiera estado tan entregado a la tarea que tenía entre manos. Cuando salimos al claro y apareció el castillo, bastante cerca de las

vías, me concentré tanto como me permitía mi capacidad de atención juvenil, y en el instante en que pasábamos por delante grité: «¡Ahora!». Si los pasajeros que me acompañaban se sobresaltaron, no lo noté. Había capturado mi momento. Había parado el tiempo.

Años más tarde me decepcionó un poco enterarme de que el edificio en realidad pertenecía a la empresa cervecera Feldschlösschen, y aparecía en las etiquetas de sus cervezas.

De todos los momentos memorables subsiguientes en mi vida, ninguno ha tenido la distinción de ser seleccionado intencionadamente con el propósito de parar el tiempo en seco. De vez en cuando, en alguna charla sobre el tiempo, contaba la historia del castillo de Feldschlösschen y recreaba el experimento ante la audiencia. Preveíamos lo que íbamos a hacer y por qué, anticipándonos al momento que se avecinaba hasta que casi podíamos sentir físicamente su aproximación, cada vez más cerca, como si viniera hacia nosotros con alguna clase de movimiento inefable. Finalmente hacíamos la cuenta atrás todos juntos de diez a uno, acabando con un grito de «¡Ahora!» al unísono. Después nos volvíamos a referir a ese momento e intentábamos describir las similitudes y diferencias entre el instante mismo y su recuerdo evanescente. A mis alumnos les encantaba el ejercicio, pero, para mí, a estos Ahoras posteriores les faltaba la intencionalidad y la novedad del original. En mi mente, las recreaciones posteriores se han desenfocado y se han desvanecido. En cierta ocasión, me sorprendió agradablemente toparme con un exalumno que recordaba la experiencia diez años después.

El problema con el tiempo es que no existe. El pasado se va y deja solo trazas en memorias y registros. El futuro está por venir. Si el viaje de una partícula a través del espacio y el tiempo se representa mediante una línea sinuosa, el punto de encuentro entre pasado y futuro —el presente— es solo eso: un punto en la línea. Así como un punto en el espacio carece de extensión, un punto en el tiempo carece de duración. Es una idealización matemática, una abstracción, una idea.

Y aun así, el presente es la única experiencia directa que tenemos del tiempo. Cuando pensamos en el pasado, somos conscientes de estar hurgando en un banco de memoria. Cuando pensamos en el futuro, sabemos que estamos anticipando algo que está por llegar. Pero el presente está aquí con nosotros. Lo sentimos en nuestros huesos y cada uno de nosotros sabe exactamente lo que es porque estamos en él. De hecho, de acuerdo con las enseñanzas budistas, así como con la tradición psicológica moderna, vivir plenamente en el presente es una receta para el bienestar mental y espiritual. Que la enorme significación psicológica del Ahora tenga su representación en un punto parece casi absurdamente inadecuado.

Albert Einstein, que había ido a la escuela en Aarau, una población a apenas treinta kilómetros a través de las colinas detrás del castillo de

Feldschlösschen, se preocupó por el Ahora. Esto se debió en parte a que había agravado el problema. Al rechazar el tiempo absoluto de Newton, que es el mismo en cualquier parte del universo, y sustituirlo por un tiempo relativo, que depende del movimiento de un observador y del entorno gravitacional, había sembrado la confusión en la definición misma del sentido del Ahora. Pero su preocupación era más fundamental. El filósofo Rudolf Carnap recordaba una conversación en la que Einstein le explicó que «la experiencia del Ahora significa algo especial para el hombre, algo esencialmente diferente del pasado y del futuro, pero esta importante diferencia no se da ni puede darse en la física. Que esta experiencia estuviera fuera del alcance de la ciencia le parecía algo a lo que, dolorosa pero inevitablemente, había que resignarse»^[43].

El físico de Cornell David Mermin advirtió que, aunque la distinción entre pasado, presente y futuro es algo periférico a la interpretación de la mecánica cuántica, el QBismo ofrece una resolución convincente al problema del Ahora. Cuando el contenido de la física se entiende en términos de estimaciones de probabilidad personales —con valores entre 0 y 1— para las experiencias futuras de los agentes, el Ahora, como cualquier otra experiencia humana, es único de cada agente. Si me represento a mí mismo como un punto en el espacio-tiempo, puedo trazar una línea sinuosa que represente mi posición y la lectura de mi reloj mientras me ocupo de mis asuntos. El tiempo de mi reloj en el que se establecen recuerdos y registros de mi entorno es el momento en continuo avance que llamamos Ahora. La línea, con su punto avanzando inexorablemente a medida que pasa el tiempo, se divide en dos porciones llamadas mi pasado y mi futuro, que se encuentran en mi Ahora. Ese diagrama y su interpretación son perfectamente aceptables para la física.

El QBismo aporta dos nuevas perspectivas a la historia. Habla explícitamente de experiencias humanas, que los físicos clásicos como Einstein consideraban fuera de los límites de la ciencia, y nos recuerda que el mapa no es el territorio. Aunque yo, como agente, represente mi cuerpo como un punto, sé muy bien que no soy un punto. Tampoco lo es mi Ahora, que experimento vívidamente mientras escribo estas líneas, pero que, cuando estéis leyendo esto, ya se habrá desvanecido hace tiempo. Mi cuerpo y mi Ahora no son más un punto de lo que un electrón es un *cúbit*.

Mermin continúa explicando que la experiencia del Ahora, aunque sea privada, puede compartirse, igual que Wigner y su amigo compartían la experiencia de medir el espín de un electrón. Puesto que la física es local, los agentes deben estar en estrecha proximidad, lo bastante para que el tiempo que tarde una señal en pasar de uno a otro sea despreciable. En tal caso las complicaciones de la teoría de la relatividad ni siquiera se plantean. Dos observadores o agentes en la misma localización pueden convenir en que sus Ahoros coinciden siempre que permanezcan juntos. Así que cuando mi esposa

y yo nos tomamos una copa de vino por la tarde, experimentamos el mismo Ahora juntos. Y cuando yo gritaba «¡Ahora!» con mis alumnos, todos estábamos, por un momento, en el mismo Ahora. Pero cuando mis alumnos se iban a puntos distantes, nuestro Ahora divergía en experiencias separadas sin nada en común.

Como suele ocurrir, Einstein se adelantó a su tiempo. Al expresar su frustración por la incapacidad de la física para abordar el Ahora, estaba metiendo el dedo en un tema de profundo interés para las generaciones futuras. El tratamiento de Mermin del significado del Ahora es llano y convincente, pero representa solo la aproximación más simple de un fenómeno sutil y rico. Así como el punto final de esta última frase resulta ser un enjambre de partículas en interacción cuando se mira con suficiente aumento, mi Ahora, si se examina más de cerca, es un fenómeno maravillosamente complejo y lleno de significado. Antes de que la física pueda aportar algo a su comprensión, la neurociencia, que trata de células y corrientes eléctricas al nivel clásico en vez del cuántico, tendrá que decir algo.

Mi ahora, sea lo que sea, es una experiencia determinada en buena parte por el contexto en el que está inmersa. Mucho de ello tiene que ver con mi entorno físico inmediato, mi *aquí*, como el vagón de tren y la visión a través de su ventana en mi experimento de juventud. Parte de este escenario entró en mi conciencia directamente a través de mis ojos, pero buena parte de él estaba registrado en la memoria inmediata de lo que había detrás, por encima y por debajo mío, fuera de mi vista. Y más allá del escenario visual estaban los sonidos, olores y emociones que experimenté justo momentos antes de aquel Ahora particular.

No obstante, lo más intrigante es la constatación de que la anticipación de experiencias en el futuro inmediato influye en el Ahora. La borrosidad que rodea el punto del tiempo que llamamos el presente se extiende no solo hacia atrás, a través de la memoria, sino también un poco hacia delante. El cerebro no es, como suele pensarse, un órgano meramente reactivo. También es en buena medida un órgano predictivo. Constantemente, sin que seamos conscientes de ello, nuestras mentes efectúan un número astronómico de predicciones de lo que es probable que vaya a suceder a continuación. Incluso una acción tan simple como alargar la mano hacia una taza de café involucra el control rápido e inteligente (no aleatorio) de unos cincuenta músculos diferentes de la mano y el brazo, una tarea computacional de pasmosa complejidad, sin la cual la mano no acertaría a alcanzar la taza. Este hervidero silencioso de actividad nos permite funcionar en el mundo^[44]. Es un aspecto oculto del Ahora.

Los métodos bayesianos ofrecen la manera más natural de describir el control motor humano. La experiencia pasada proporciona las probabilidades a priori para predecir cómo van a reaccionar las células corporales a impulsos

eléctricos específicos, y luego los inputs sensoriales (medidas, en términos físicos) actualizan las probabilidades anteriores mediante la ley de Bayes. Estas probabilidades actualizadas guían a su vez los impulsos nerviosos subsiguientes que controlan los músculos.

Si un modelo de la percepción humana como este resulta tener éxito, se verá que un examen microscópico del Ahora encajará limpiamente en la visión del mundo del QBismo. Se verá que la evolución se ha anticipado a la ciencia. Y al final, el sueño de Einstein de incluir el momento presente en el marco de la ciencia física podría cumplirse de maneras que él no pudo llegar a imaginar.

¿Un mapa perfecto?

En una de sus últimas novelas, Lewis Carroll, el autor de *Alicia en el País de las Maravillas*, describió un mapa ideal:

¡Y entonces se nos ocurrió la idea más fabulosa de todas! Lo que hicimos fue un mapa del país a la escala de ¡una milla por milla! Pero su mismo tamaño creó problemas: nunca se ha extendido del todo [...]. Los granjeros se opusieron; decían que cubriría el país entero, ¡y tataría la luz del sol! Así que ahora empleamos el país mismo como su propio mapa, y le aseguro que funciona casi igual de bien^[45].

Los físicos son más sofisticados. Desde los días de Newton, la idea de un modelo matemático perfecto, análogo a un mapa perfecto, ha sido la meta última de la ciencia física. Teniendo absolutamente claro que el mapa no es el territorio, y aprovechando la notable capacidad de las matemáticas para comprimir datos, el mapa perfecto de los físicos debería ser uno a uno, no en el sentido de Lewis Carroll, sino en el siguiente: cada rasgo del mundo físico debería tener su contrapartida en el mapa, sin dejarse nada fuera, y cada elemento del mapa debería representar a su vez una parte del mundo real. Por ejemplo, la hipótesis atómica de que la materia consiste en átomos y vacío fue un retazo de ese mapa perfecto, como también lo fue la ley de la gravedad de Newton.

Un mapa perfecto debería representar la visión divina del mundo. Si los seres humanos lo entendiéramos, tendríamos conocimiento de la mente de Dios. Un mapa perfecto es una meta tan distante que ni siquiera la física clásica ha sido incapaz de alcanzarla. No solo es imposible registrar la posición de una partícula con precisión infinita, sino que nuestro estudio de los sistemas caóticos, espoleado por el desarrollo de la computación en el último cuarto del siglo xx, pone en evidencia un problema aún más perturbador. Resulta que, en la mayoría de los sistemas físicos, aunque establezcamos las coordenadas con un error muy pequeño, la discrepancia

entre nuestra predicción matemática y la configuración real del sistema aumentará rápidamente hasta niveles inaceptables. En otras palabras, la predicción del futuro lejano no es posible en ningún sistema realista.

En la física clásica un mapa perfecto no es factible en la práctica, pero aún es concebible como ideal teórico. Aunque *nosotros* no podamos, Dios puede ver el mundo de esa manera desde lo alto, y podemos esforzarnos en aproximarnos a su punto de vista. Pero el bayesianismo cuántico, con su aleatoriedad intrínseca y sus probabilidades bayesianas, pone fin a la esperanza de que podamos llegar a conocer la mente de Dios.

La mecánica cuántica, en la medida en que ha sido corroborada experimentalmente, nos obliga a admitir que es imposible hacer predicciones con certeza absoluta, y el QBismo, en la medida en que proporciona una interpretación razonable de la mecánica cuántica, implica que la ciencia no trata de la realidad última, sino de lo que podemos esperar razonablemente. Para muchos, Einstein incluido, abandonar la búsqueda de un mapa perfecto significaba una melancólica admisión de derrota, pero Marcus Appleby, de quien ya hemos hablado en el capítulo 9, tiene una visión mucho más optimista del asunto^[46].

Para empezar, señala que el QBismo no subestima de ninguna manera el inmenso éxito de la mecánica cuántica a la hora de ayudarnos a comprender no solo el mundo material, sino también, a través de la bioquímica y la neurociencia, los fundamentos de las ciencias de la vida. Saber lo que podemos esperar razonablemente y cuán firmemente deberíamos esperararlo es lo más cerca que podemos estar de entender y controlar el mundo.

El segundo punto de Appleby es que el QBismo, al llevar la física más cerca de los pensamientos y sentimientos humanos, puede tener más posibilidades que el materialismo crudo de resolver el ancestral enigma de la conciencia, el problema de la relación entre la mente y el cerebro, aunque admite que en el momento presente eso no es más que una esperanza. No obstante, la conclusión de Appleby es tan sorprendente como deliciosa:

La ambición de «conocer la mente de Dios» no es realista. Pero yo iría más allá. Yo pondría en duda que la idea sea siquiera atractiva. Supongamos que uno pudiera comprender el universo en su totalidad. ¿Acaso esto podría dejar de resultar un tanto limitante? Que el universo pudiera comprenderse en su totalidad significaría que estaría tan limitado como lo estamos nosotros. A mí me parece que vivir en un universo así sería más bien como intentar nadar en un charco de solo quince centímetros de profundidad. [...] Mi impresión personal es que yo no desearía pertenecer a un universo susceptible de comprenderse plenamente. A esta visión de la física como el conocimiento de la mente de Dios me gustaría contraponer otra: la física como el ejercicio de

nadar en aguas con una profundidad mucho mayor que la nuestra (quizá incluso infinitamente profundas^[47]).

Si, a diferencia de Appleby, persistimos en lamentarnos de nuestra incapacidad de encontrar un mapa perfecto, podemos confortarnos con el consejo de Lewis Carroll: como guía para encontrar nuestro camino, el territorio mismo sirve casi igual de bien. El QBismo revela cómo. Nuestras experiencias del territorio (el mundo exterior) proporcionan las claves que necesitamos para averiguar lo que es razonable esperar encontrarse a la vuelta de la próxima esquina. ¿Quién necesita más?

El camino por delante

En su discurso del Premio Nobel de 1965, Richard Feynman relató la trayectoria real —callejones sin salida, rodeos, desvíos equivocados y todo eso— de su contribución al desarrollo de la electrodinámica cuántica, la teoría fundamental de los electrones y los fotones^[48]. En el curso de esta búsqueda aprendió a apreciar el valor de expresar una teoría con diferentes formulaciones matemáticas, que al final resultan ser lógicamente equivalentes. Sabía, por ejemplo, que la mecánica cuántica podía formularse en el lenguaje de las funciones de onda o en el de las matrices, pero él concibió un tercer esquema basado en conjuntos de trayectorias clásicas, que superficialmente no se parece a los dos anteriores. Incluso reformó de manera radical la venerable teoría decimonónica de la electricidad y el magnetismo.

Al formular lo mismo en términos diferentes se busca una comprensión más profunda. En mi carrera docente he constatado la penosa futilidad de las «explicaciones» de temas difíciles que equivalen a repetir las mismas palabras una y otra vez. Los giros retóricos frescos y los arzones matemáticos novedosos que expresan el mismo significado esencial inevitablemente traen con ellos nuevas alusiones, imágenes y connotaciones, lo que a su vez favorece la comprensión. Así, cuando Feynman emprendió la monumental tarea de combinar la electrodinámica con la mecánica cuántica, su juego de herramientas matemáticas contenía no solo la versión estándar de ambas teorías, sino unas cuantas variantes equivalentes de cada una.

Pero Feynman, siendo quien era, escarbó más hondo. ¿Cuál es el sentido de estas múltiples reformulaciones? «Siempre me parece raro», dijo, «que las leyes fundamentales de la física, cuando se descubren, puedan aparecer en tantas formas diferentes que no parecen idénticas de entrada, pero con un poco de manipulación matemática se puede mostrar la relación [...]. No sé por qué es así; sigue siendo un misterio, pero es algo que aprendí por experiencia».

Y por supuesto Feynman sugirió una respuesta en su discurso del Nobel: «No sé lo que significa, que la naturaleza escoja estas curiosas formas, pero puede que esta sea una manera de definir la simplicidad. Quizá una cosa es simple si se puede describir por completo de varias maneras diferentes sin saber de inmediato que estamos describiendo la misma cosa».

Bajo esta luz, ¿cuál es esa cosa simple que anima los elaborados formalismos de la mecánica cuántica? ¿Por qué el cuanto?, como planteó John Wheeler. El QBismo no da respuesta a esta pregunta (aún). Como las otras que aparecen en el Apéndice, el QBismo es una nueva *interpretación* de una teoría existente, no una *reformulación* en el sentido de Feynman. El QBismo es importante y poderoso, y entraña consecuencias filosóficas de gran calado, pero no afecta al contenido técnico real de la mecánica cuántica, que es lo que permite la comparación de la teoría con los experimentos. Solo el significado de los conceptos que integra —especialmente el de probabilidad— se ve modificado por la nueva interpretación. Lo que aún nos falta es una versión completamente nueva de la teoría vieja.

Pero aún es pronto. Uno de los atributos más importantes de una idea científica nueva es que debería ser *heurística*, de modo que lleve a investigaciones futuras e inspire ideas y cuestiones frescas. El adjetivo *heurístico* deriva del vocablo griego que significa *hallar*: una idea heurística nos espolea para hacer nuevos descubrimientos. En el título mismo del famoso artículo de 1905 en el que Einstein introdujo los fotones con energía $e = hf$, él describía su propuesta como heurística^[49]. La historia de la física del siglo xx ha demostrado cuán notablemente profética era esta descripción de la hipótesis del cuanto. El QBismo también ofrece la promesa de tener un papel heurístico en la búsqueda del significado real de la mecánica cuántica.

El QBismo sugiere la pregunta: «¿Por qué la función de onda?». ¿Realmente necesitamos ese aparato matemático abstracto, que parece suscitar tanta controversia y al final debe colapsar antes de que proporcione probabilidades? ¿No podría formularse la mecánica cuántica directamente en términos de probabilidades, esto es, números reales entre 0 y 1, evitando así las funciones de onda con su carácter nebuloso y sus componentes imaginarios? Si tal cosa fuera posible, esos extraños mapas llamados funciones de onda podrían descartarse y dejarse en la buhardilla de la historia de la ciencia.

De hecho, es posible. No está demostrado que las funciones de onda sean la única manera de capturar el fenómeno de la superposición, aunque, al estar inspiradas por las intuitivamente accesibles ondas clásicas, está claro que lo hacen bien. Lo que se discute no es la posibilidad de reescribir la teoría en otros términos, sino que es cuestión de simplicidad. Ningún principio fundamental impide traducir el formalismo matemático de las funciones de onda al lenguaje de las probabilidades, pero, a menos que se haga con

inteligencia, el resultado podría ser una teoría fea y monstruosamente complicada. Si ese resultara ser el caso, la física no habría ganado mucho. Sería un poco como describir el sistema solar no en términos de elegantes elipses keplerianas abstractas, sino como una burda compilación de coordenadas planetarias en crudo, observadas directamente. Sería un paso atrás.

Impertérritos, los QBistas han emprendido un programa para expresar las reglas cuánticas en términos de probabilidades en vez de funciones de onda. En el curso de este ejercicio matemático, dieron con una manera elegante y versátil de descomponer cualquier probabilidad verificable experimentalmente en una suma de probabilidades estándar, más básicas y primitivas. (El proceso recuerda el *teorema fundamental de la aritmética* de Euclides, que permite descomponer todo número entero en un producto único de números primos, un procedimiento que ha tenido un papel principal en la historia de las matemáticas). Recientemente, estas medidas cuánticas estándar se han efectuado en el laboratorio y han demostrado ser tan simples y útiles como han afirmado los QBistas^[50].

El aspecto visual de la fórmula que relaciona una probabilidad cuántica real con las probabilidades estándar resultó una sorpresa, porque es casi exactamente igual que la ecuación de un principio básico de la teoría de la probabilidad clásica convencional que proporciona la probabilidad total de un resultado que puede darse a través de distintas rutas. En el caso de una moneda, por ejemplo, la probabilidad de que salga cara más la probabilidad de que salga cruz debe ser 1 ($1/2 + 1/2 = 1$, para una moneda no trucada), lo que refleja el hecho de que si solo hay dos posibilidades, es seguro que ocurrirá una o la otra. Este es un caso simple de un teorema de la probabilidad clásica conocido como la *ley de probabilidad total*. Lo usamos tácitamente en el cálculo bayesiano de las posibilidades de tener cáncer cuando expresamos la probabilidad total $p(+)$ de que nuestro test dé positivo como la suma de probabilidades de un positivo verdadero y de un falso positivo.

En la teoría cuántica esta ley no se cumple en su forma clásica. En el precioso experimento de Feynman, por ejemplo, no es verdad que la probabilidad de encontrar el electrón en un punto dado cuando ambas rendijas están abiertas equivalga a la suma de las probabilidades para los casos en que una u otra rendija está bloqueada^[51]. Las probabilidades cuánticas no se suman (pueden interferirse y hasta cancelarse mutuamente). Este punto es tan fundamental que movió a Feynman a elegir el experimento de la doble rendija como ilustración del «único» misterio de la mecánica cuántica.

Por eso fue un alivio, más que una mera sorpresa, que la nueva ecuación derivada por los QBistas, llamada *ley cuántica de la probabilidad total*, se desvíe de su contrapartida clásica. Pero las dos ecuaciones son seductoramente similares; solo difieren en un minúsculo término extra, un

término que es quintaesencialmente mecanocuántico en origen. Y, en contra de lo que podría esperarse, la modificación no tiene que ver con la ubicua constante de Planck h . En cierto sentido, ese término extra es aún más fundamental que la constante de Planck.

Antes de revelar cuál resultó ser esa pequeña desviación cuántica, debo confesar un pecado de omisión. En la ciencia, como en la vida, surgen obstáculos inesperados. La ecuación que he estado describiendo ha sido demostrada salvo por un fastidioso detalle matemático que está demorando el progreso. Esa laguna técnica ha atraído la atención de un pequeño círculo internacional de matemáticos y físicos matemáticos, pero, aunque la solución es fácil de conjeturar, su demostración está resultando ser esquiva. Por ahora ha desafiado una década de esfuerzos, pero en el proceso ha revelado bellas conexiones hasta ahora insospechadas en la matemática pura. El matemático Jon Yard incluso ha sugerido que la conjetura podría estar relacionada con uno de los famosos veintitrés problemas no resueltos que planteó David Hilbert en 1900. (Esa celebrada lista, que se ha reducido con éxito a cerca de la mitad de su extensión original en los años transcurridos, continúa desafiando e inspirando a los matemáticos). Si la conjetura se confirma y contribuye a resolver un problema de Hilbert, o incluso solo una parte, el QBismo habrá demostrado una vez más su poder heurístico, y se habrá ganado un respeto añadido por parte de matemáticos y físicos^[52].

Volvamos a la probabilidad total. El término que distingue la versión cuántica de la ley de su prima clásica resulta ser un número entero conocido como la *dimensión cuántica* del sistema considerado, y denotado con la letra d . La dimensión cuántica no tiene nada que ver con el espacio ni el tiempo, sino con el número de estados que puede ocupar un sistema cuántico. Es la dimensionalidad del espacio abstracto en el que opera la función de onda, y mide el tamaño de la hoja de cálculo cuando la función de onda se expresa como una matriz. Por ejemplo, la dimensión cuántica de un *cúbit* es 2, lo que refleja el hecho de que el *cúbit* esférico tiene una superficie bidimensional. Para el sistema GHZ de tres electrones, $d = 8$, mientras que para otros sistemas d puede tomar cualquier valor hasta infinito.

La dimensión cuántica es un atributo intrínseco e irreducible que caracteriza la naturaleza cuántica de cualquier sistema. Aún más fundamental que la constante de Planck, indica una desviación del comportamiento clásico. Chris Fuchs compara su significación física con la de la masa, que caracteriza las propiedades inerciales y gravitacionales de los objetos materiales. La dimensión cuántica está implícita en todo cálculo mecanocuántico, pero pocas veces se muestra explícitamente como lo hace en la ley cuántica de la probabilidad total. Es una propiedad natural del mundo material que escapa a la percepción humana, un poco a la manera de la ubicua distorsión relativista del espacio inducida por la masa, que elude por completo nuestros sentidos.

Si se encuentra la demostración matemática que falta, los QBistas tendrán a mano una poderosa nueva herramienta. Darle cuerpo al sentido práctico de la dimensión cuántica sería un gran paso hacia la respuesta a la pregunta: «¿Por qué el cuanto?». Al mismo tiempo, la ley cuántica de la probabilidad total puede resultar ser la base de una formulación radicalmente nueva de la mecánica cuántica sin funciones de onda, lo que, como señaló Feynman, nos proporcionará una comprensión más profunda. Esta es la esperanza de Chris. Más concretamente, le gustaría poder instalar la ley cuántica de la probabilidad total como el principal axioma de la teoría cuántica.

Mucho más especulativa que este avance técnico es la sugerencia de Marcus Appleby de que el QBismo, por su propia naturaleza, puede proporcionar el puente entre la psicología y la física que se necesita para deshacer el antiguo nudo gordiano de los problemas en torno a la autoconciencia humana, el libre albedrío y la relación mente/cuerpo. Como mínimo, el QBismo libera a la física del maleficio de Demócrito, la presunción equivocada de que podemos comprender el mundo en términos puramente objetivos como algo que existe fuera de nosotros mismos, separado de nuestros pensamientos, sentimientos y percepciones. Sin ese primer paso liberador, la maldición de Demócrito («Pobre mente [...] Tu victoria es tu derrota») continuará persiguiéndonos.

Pero debemos tener paciencia. Recordemos que desde la concepción griega de los átomos hasta las actuales micrografías de átomos reales con el microscopio de efecto túnel han transcurrido más de dos milenios.

Appleby parece ser más optimista acerca de la llegada de la próxima etapa en la historia de la ciencia. En una conversación sobre el intento de fusionar la física y la psicología en alguna clase de síntesis psicofísica, me dijo que tal proyecto podría tardar «cientos de años» en conseguirse. En el contexto del ritmo acelerado de la ciencia actual, esa estimación suena como una admisión de derrota, pero Marcus es matemático y está acostumbrado a esperar. El último teorema de Fermat, por ejemplo, se demostró en 1994, al cabo de trescientos cincuenta y siete frustrantes años de intentos fallidos. Tomar la promesa del QBismo a largo plazo, como hace Appleby, resulta más natural para un matemático o un filósofo que para un físico.

Rüdiger Schack, miembro del triunvirato fundador del QBismo, se muestra más confiado. «Querría acabar con una predicción», declaró en una entrevista de 2014. «En veinticinco años, cuando una nueva generación de científicos se haya expuesto a las ideas QBistas, el bayesianismo cuántico se dará por sentado y los fundamentos de la teoría cuántica habrán desaparecido como problema^[53]» .

¿Qué puede hacerse mientras tanto? Max Planck, a quien Schack evocaba en la declaración anterior, hizo esta famosa observación: «Una nueva verdad científica no triunfa convenciendo a sus oponentes y haciéndoles ver la luz,

sino más bien porque sus oponentes acaban muriendo y viene una nueva generación que está familiarizada con ella desde el principio»^[54]. Como descripción del curso real de la historia de la ciencia, este juicio puede ser demasiado simplista, pero como advertencia para aquellos que se esfuerzan en presentar un nuevo paradigma al mundo, contiene una lección. La única manera de que los miembros de la próxima generación puedan familiarizarse con una nueva teoría es conociéndola. Así pues, el consejo a los QBistas, que creen que la experiencia personal de adquirir nueva información es el mecanismo quintaesencial por el que evoluciona la ciencia, es que promulguen sus ideas con la máxima difusión y claridad. La difusión vence a la intimidación, según Planck.

Chris Fuchs es la encarnación misma de esta estrategia. Con una sonrisa contagiosa, una ingeniosa conversación y un entusiasmo inagotable, recorre el mundo como un trovador de nuestros días. Su laúd es su ordenador portátil, su melodía es matemática, y su pergamino es PowerPoint. Así armado, difunde el mensaje del QBismo por todo el mundo. En el curso de sus viajes, Chris ha reunido un círculo de colaboradores asombrosamente amplio: colegas, discípulos, amigos y críticos con los que intercambia una monumental correspondencia electrónica. Su objetivo es asegurarse de que antes de que desaparezca la generación más veterana de físicos (a la que yo pertenezco), que recibieron la versión convencional de la mecánica cuántica de sus predecesores, la nueva generación se familiarice con el QBismo. Gradualmente, este esfuerzo está dando fruto a medida que aumentan los conversos. Estoy seguro de que al final el QBismo triunfará como «una nueva verdad científica», un hito en el largo y sinuoso camino que comenzó en el año 1900 con la desesperada hipótesis cuántica de Planck.

Apéndice

Cuatro interpretaciones anteriores de la mecánica cuántica

Desde la invención de la mecánica cuántica en 1925-1926, se han propuesto alrededor de una docena de interpretaciones distintas del significado de su formalismo matemático, cada una con numerosas subvariantes. Dado que ninguna de ellas afecta a las aplicaciones prácticas de la teoría, están en gran medida aisladas de la corroboración o falsación experimental. El resultado es que pocas de ellas se han retirado del todo del mercado de las ideas, aunque sus popularidades relativas fluctúan. El QBismo posiblemente es la interpretación más radical. En vez de edificar sobre las leyes matemáticas aceptadas de la mecánica cuántica y añadirles una superestructura teórica, profundiza hasta sus raíces revisando el significado de los elementos básicos de la teoría, como la probabilidad, la certidumbre y la medida.

He aquí cuatro de las interpretaciones dominantes en razón de su popularidad, evaluada mediante encuestas informales (y, por ende, carentes de significación estadística) a físicos^[55].

La interpretación de Copenhague

Esta interpretación toma su nombre del instituto de Niels Bohr en Copenhague, donde se desarrolló la versión ortodoxa de la mecánica cuántica, principalmente por Bohr y Heisenberg, aunque con contribuciones esenciales de otros. El QBismo retiene muchos de los elementos de la interpretación de Copenhague, pero discrepa de manera fundamental en otros aspectos.

El conjunto de las propiedades observables de un sistema cuántico es lo que se denomina *estado cuántico*. A su vez, el estado cuántico viene descrito por una función de onda, o su equivalente, una matriz. En general, la función de onda incluye números imaginarios tales como la raíz cuadrada de -1. A partir de la función de onda se derivan probabilidades (números reales entre 0 y 1) mediante reglas estándar. Las probabilidades se refieren a los resultados posibles de observaciones y medidas experimentales.

Una medición causa de algún modo el colapso instantáneo del estado cuántico inicial a un nuevo estado correspondiente al resultado real del experimento. Las repeticiones del experimento con el mismo sistema cuántico, que se prepara de la misma manera para cada ensayo, dan resultados diferentes en orden aleatorio con distintas frecuencias, como las repeticiones del lanzamiento de un par de dados.

Aunque retiene el mismo formalismo matemático, el QBismo difiere de la escuela de Copenhague en su interpretación de la función de onda, las probabilidades y el colapso. Aquí la función de onda para un sistema particular no es una fórmula universal independiente del observador, sino una expresión personal de cada agente. Puesto que depende del conocimiento de cada agente, es subjetiva. Las probabilidades derivadas de esta función de onda son grados de creencia subjetivos, en vez de probabilidades frecuentistas objetivas. El colapso de la función de onda no es un suceso físico (un cambio en el estado del sistema inducido por un experimento), sino una actualización bayesiana de una asignación de probabilidad por la adquisición de información nueva.

La interpretación de mundos múltiples

La manera más directa de evitar el problema del colapso de la función de onda es eliminar el colapso mismo. Este drástico movimiento ha conseguido muchas adhesiones en los últimos años. La interpretación de mundos múltiples presupone un único estado del universo con una función de onda que evoluciona de manera continua y predecible. Cuando se lleva a cabo un experimento la función de onda no colapsa, sino que el universo entero, la función de onda y todo lo demás, se divide en tantas ramas como resultados posibles. El observador solo es consciente de uno de los resultados y continúa viviendo en esa rama. De este modo el universo se ramifica continuamente en un vasto «multiverso» donde cada resultado posible ocurre en uno de un

número posiblemente infinito de universos reales distintos y mutuamente incomunicados.

La principal objeción a esta interpretación es la exorbitante demanda de imaginación que requiere. Entre otros problemas más técnicos está que no explica la causa de la ramificación, y la dificultad a la hora de justificar las reglas para derivar probabilidades específicas de la función de onda universal.

La interpretación de la onda piloto o el campo guía

Inspirados por el éxito de teorías de campos como la electrodinámica y la relatividad general, varios físicos, incluido Einstein por un tiempo, abogaron por una interpretación que parte del aparato matemático aceptado de la mecánica cuántica y lo reescribe con un nuevo formato. Este procedimiento da una expresión que se parece a un campo de fuerza físico real que controla el movimiento de una partícula de una manera determinista y predecible. Este campo es de índole similar a los campos electromagnético y gravitatorio, pero distinto. No obstante, la sugestiva imagen de una «fuerza cuántica» se malogra cuando entran en juego varias partículas, digamos N . En tal caso el campo no existe en nuestro espacio tridimensional familiar, sino en un espacio abstracto de dimensión $3N$. Aunque esta propiedad no familiar es compartida por la función de onda convencional de Copenhague, menoscaba el atractivo intuitivo de un campo guía. Más problemático es el hecho de que el campo guía es explícitamente no local, como la gravedad de Newton. Se continúan proponiendo y debatiendo enmiendas a la interpretación de la onda piloto para compatibilizarla con la relatividad especial e incluir el espín.

Teorías de colapso espontáneo

Puesto que los modelos de esta clase añaden un mecanismo completamente nuevo al formalismo cuántico convencional, se les debería llamar teorías más que interpretaciones. En esta visión, los colapsos de las funciones de onda son sucesos naturales que no necesitan ser inducidos por observadores. Ocurren

de manera espontánea, pero tan raramente que no afectan a la interacción de los sistemas cuánticos individuales a pequeña escala. Pero cuando un sistema cuántico interactúa con un aparato clásico grande, como un instrumento de medida, el efecto se amplifica hasta el punto de que la función de onda entera colapsa. La desventaja de este modelo es que el colapso espontáneo es un suceso aleatorio no explicado cuya naturaleza es tan misteriosa como la del colapso inducido por el observador de la interpretación de Copenhague, al que se supone que tiene que reemplazar.

Agradecimientos

Doy las gracias primero y principalmente a Chris Fuchs, quien me enseñó todo lo que sé del QBismo, y así, sin proponérselo, fue el inspirador de este libro. Las conversaciones y la correspondencia con Marcus Appleby y David Mermin me aclararon muchas sutilezas (espero haber presentado sus ideas fielmente). Entre los lectores que pacientemente me hicieron comentarios sobre versiones sucesivas del manuscrito están Roy Champion, Deke Dusinberre, Arthur Eisenkraft, Don Lemons, Tom Prewitt y mi hermano Carl von Baeyer. Sin el ánimo y el apoyo de mi esposa, Barbara Watkinson, y de nuestra hija Madelynn von Baeyer, este libro nunca se habría completado. Mi colaboración con nuestra segunda hija, Lili von Baeyer, la ilustradora de este libro, siempre es un placer. A todos ellos les hago extensiva mi más sincera gratitud.

Notas

[1] Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor. <<

[2] George Gamow, *Mr. Tompkins in Paperback*, Canto Classics, Cambridge University Press, Cambridge, 2012. [Trad. esp.: *El breviario del señor Tompkins*, Fondo de Cultura Económica de España, Madrid, 1993]. <<

[3] Helge Kragh, «Max Planck: The Reluctant Revolutionary», *Physics World*, 1 de diciembre de 2000, págs. 31-35, <http://www.math.lsa.umich.edu/krasny/math156_article_planck.pdf>. <<

[4] La frecuencia se mide en unidades de ciclos por segundo, o hercio, abreviado Hz. <<

[5] Puesto que la frecuencia tiene dimensiones de por segundo, o segundos inversos, al multiplicar h por f se cancelan los segundos, quedando el cuanto e con la unidad métrica de energía, el julio. <<

[6] Philipp Frank, *Einstein: His Life and Times*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1947, pág. 71. <<

[7] «Do it Yourself Double Slit Experiment (Young's)—Easy At-Home Science», vídeo de YouTube, <http://www.youtube.com/watch?v=kKdaRJ3vAmA> >. <<

[8] $F = GmM/r^2$, donde F es la fuerza gravitatoria, G es la constante gravitatoria universal, m y M son las dos masas que se atraen, y r es la distancia entre ambas. <<

[9] Un diminuto diapasón tan largo como el grosor de un pelo humano y capaz de exhibir un comportamiento cuántico fue etiquetado como «Gran avance del año 2010» por la revista *Science*. Véase en.wikipedia.org/wiki/Quantum_machine >. <<

[10] A diferencia de Max Planck, a quien los niveles de energía de su oscilador se le escaparon por muy poco, Niels Bohr había extraído de su modelo mecánico primitivo la expresión matemática correcta para los niveles de energía del hidrógeno doce años antes de la invención de la función de onda.
<<

[11] $F = ma$, donde m es la masa de un objeto, a es su aceleración y F es la fuerza externa neta que causa la aceleración. <<

[12] La descripción matemática de una onda suele incluir valores positivos y negativos para representar la altura de la onda por encima o por debajo del eje x . Pero las probabilidades nunca son negativas: son números reales entre 0 y 1, ambos incluidos. Peor aún, las funciones de onda suelen incluir números imaginarios, como la raíz cuadrada de -1 . Por lo tanto, el valor numérico de una función de onda no puede ser *igual* a una probabilidad. La receta matemática correcta es esta: «La densidad de probabilidad es igual a la función de onda multiplicada por su complejo conjugado». Simplificaré esto diciendo que la función de onda «da» probabilidades. <<

[13] El experimento, que incluye un vídeo del resultado, se describe en «Feynman's Double-Slit Experiment Gets a Makeover», Physics-world. com, 14 de marzo de 2013, [physicsworld.com/cws/article /news/2013/mar/14/ feynmans-double-slit-experiment-gets-a-makeover](http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/mar/14/feynmans-double-slit-experiment-gets-a-makeover) <<

[14] Isaac Newton a Richard Bentley, *Letter to Bentley, 1692/3*, tercera carta a Bentley, 25 de febrero de 1693, citado en *The Works of Richard Bentley*, A. Dyce (ed.), vol. 3, Londres, 1838, reimp. AMS Press, Nueva York, 1966, págs. 212-213. <<

[15] Longitud de onda $\approx \lambda d/L$, donde x es la distancia entre bandas de interferencia, d es la distancia entre las dos rendijas y L es la distancia de las rendijas a la pantalla. <<

[16] Bram Gaasbeek, «Demystifying the Delayed Choice Experiments», 22 de julio de 2010, <<http://arxiv.org/abs/1007.3977>>. <<

[17] La cantidad de rotación de un objeto ordinario se mide por su momento angular, que a su vez depende de su masa, forma y velocidad rotacional. Es llamativo que las unidades del momento angular resulten ser las mismas que las de la constante de Planck h , una coincidencia que inspiró en parte el viejo modelo de Bohr del átomo de hidrógeno. <<

[18] «Raffiniert ist der Herr Gott, aber boshaft ist Er nicht», Alice Calaprice, *The Expanded Quotable Einstein*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2000, pág. 241. <<

[19] D.M. Appleby, «Probabilities Are Single-Case, or Nothing», *Optics and Spectroscopy*, 99, 2005, págs. 447-462, <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0408058>>. <<

[20] Véase, por ejemplo, W.T. Eadie, D. Drijard, F.E. James, M. Roos y B. Sadoulet, *Statistical Methods in Experimental Physics*, CERN, Ginebra, Suiza, 1971. <<

[21] Una advertencia importante: si la probabilidad a priori es 0 o 1, ninguna información nueva la modificará. <<

[22] Carlton M. Caves, Christopher A. Fuchs y Rüdiger Schack, «Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities», *Physical Review*, A65, 2002, págs. 022305-022315. <<

[23] N. David Mermin, «Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory», *Physics Today*, abril de 1985, pág. 38. <<

[24] La ocurrencia es una paráfrasis de una versión tergiversada de un comentario usualmente atribuido por error a diferentes oficiales nazis en referencia a la *cultura*, y no al gato. <<

[25] Citado en Erwin Schrödinger, *Nature and the Greeks*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996, pág. 89. [Trad. esp.: *La naturaleza y los griegos*, Tusquets Editores, Barcelona, 1997]. <<

[26] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, n.º 8, 2014, pág. 749. <<

[27] Werner Heisenberg, «The Representation of Nature in Contemporary Physics», *Daedalus*, 87, 1958, pág. 99. <<

[28] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, n.º 8, 2014, pág. 757. <<

[29] N. David Mermin, «Quantum Mechanics Fixing the Shifty Split», *Physics Today*, julio de 2012, pág. 8. <<

[30] John Bell planteó en 1964 la posibilidad de convertir el experimento mental EPR en una realidad. Las implementaciones de laboratorio de su propuesta comenzaron a principios de la década de 1980 y han continuado hasta hoy. <<

[31] Arthur Fine, «The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory», *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, invierno de 2014, <plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/qt-epr/>. <<

[32] Arthur Fine, «The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory», *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, invierno de 2014, <plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/qt-epr/>. <<

[33] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, n.º 8, 2014, págs. 749-754. <<

[34] Arthur Fine, «The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory», *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, invierno de 2014, <plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/qt-epr/>. <<

[35] A diferencia de los razonamientos científicos y filosóficos por inducción, las demostraciones matemáticas por inducción son válidas. <<

[36] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, n.º 8, 2014, pág. 755. <<

[37] Christopher A. Fuchs, N. David Mermin y Rüdiger Schack, «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*, 82, n.º 8, 2014, pág. 749. <<

[38] N. David Mermin, «QBism Puts the Scientist Back into Science», *Nature*, 507, 27 de marzo de 2014, págs. 421-423. <<

[39] El epígrafe está extraído de Max Planck, *Where Is Science Going?* (trad. James Murphy), W.W. Norton & Company, Nueva York, 1932, pág. 107. [Trad. esp.: *¿Adónde va la ciencia?*, Losada, Buenos Aires, 1947]. <<

[40] Christopher A. Fuchs, «QBism, the Perimeter of Quantum Bayesianism»,
26 de marzo de 2010, <<http://arxiv.org/abs/1003.5209>>. <<

[41] *Ibíd.* <<

[42] Christopher A. Fuchs, «The Anti-Vaxjo Interpretation of Quantum Mechanics», 25 de abril de 2002, 11, <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0204146>>. Este artículo se publicó antes de que se acuñara el término *QBismo*. <<

[43] N. David Mermin, «QBism as CBism: Solving the Problem of “the Now”», <<http://arxiv.org/abs/1312.7825>>. <<

[44] Rodolfo R. Llinás y Sisir Roy, «The “Prediction Imperative” as the Basis for Self-Awareness», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 2009, págs. 1301-1307. <<

[45] Lewis Carroll, *Sylvie and Bruno Concluded*, Macmillan, Londres, 1893, cap. 11. [Trad. esp.: *Silvia y Bruno*, Anaya, Madrid, 1989]. <<

[46] Marcus Appleby, «Concerning Dice and Divinity», 26 de noviembre de 2006, <<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0611261>>. <<

[47] *Ibíd.* <<

[48] Richard Feynman, <[nobelprize.org/prizes/ physics/1965/feynman/lecture](https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/feynman/lecture)>. <<

[49] Albert Einstein, «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», *Annalen der Physik*, 17, n.º 6, 1905, págs. 132-148. <<

[50] N. Bent, H. Qassim, A.A. Tahir, D. Sych, G. Leuchs, L.L. Sánchez-Soto, E. Karimi y R.W. Boyd, «Experimental Realization of Quantum Tomography of Photonic Qudits via Symmetric Informationally Complete Positive Operator-Valued Measures», *Physical Review*, X5, 12 de octubre de 2015, págs. 1-12, <[journals.aps.org/prx/ abstract/ 10.1103/ PhysRevX.5.041006](https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.5.041006) >. <<

[51] Rüdiger Schack, <[intelligence.org/ 2014/04/29/ ruediger-schack/](http://intelligence.org/2014/04/29/ruediger-schack/)>. <<

[52] Jon Yard, <physik.univie.ac.at/uploads/media/Yard_John_05.06.14.pdf>. <<

[53] *Ibíd.* <<

[54] <[gutzitiert.de/ zitat_autor_max_planck_thema_wissenschaft_zitat_27498](http://gutzitiert.de/zitat_autor_max_planck_thema_wissenschaft_zitat_27498)>. <<

[55] Adaptado de Hans C. von Baeyer, «Quantum Weirdness? It's All in Your Mind», *Scientific American*, 308, n.º 6, 2013, pág. 47. <<