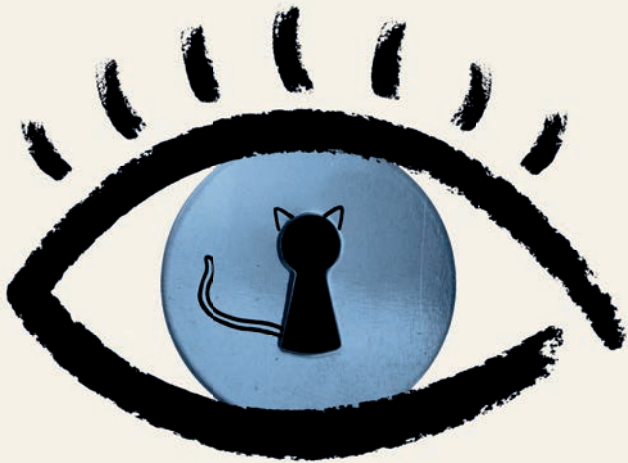


Bruce Rosenblum y Fred Kuttner El enigma cuántico

El secreto mejor guardado de la física contemporánea



Bruce Rosenblum y Fred Kuttner
EL ENIGMA CUÁNTICO
Encuentros entre la física y la conciencia

Traducción de Ambrosio García Leal

TUSQUETS
EDITORES

Título original: *Quantum Enigma. Physics encounters consciousness*

1.ª edición en Tusquets Editores: junio de 2010

1.ª edición en esta presentación: marzo de 2016

© 2006 by Bruce Rosenblum y Fred Kuttner

© de la traducción: Ambrosio García Leal, 2010

Reservados todos los derechos de esta edición para

Tusquets Editores, S.A. - Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona

www.tusquetseditores.com

ISBN: 978-987-670-114-3

Depósito legal: B. 1.851-2016

Fotocomposición: David Pablo

Impreso por Huertas Industrias Gráficas, S.A.

Impreso en España

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

Índice

P.	13	Agradecimientos
	15	Prefacio
	17	1. Presentación del enigma
	23	2. Einstein la calificó de «fantasmal»... y ojalá yo lo hubiera sabido
	29	3. La visita a Eug Ahne Poc: una parábola cuántica
	37	4. Nuestra visión newtoniana del mundo: Una ley universal del movimiento
	55	5. El resto de la física clásica
	67	Hola, mecánica cuántica
	69	6. La intrusión del cuanto en la física
	87	7. La ecuación de Schrödinger: La nueva ley universal del movimiento
	103	8. Un tercio de nuestra economía
	109	9. Nuestro secreto de familia
	123	10. Maravillosa, maravillosa Copenhague
	141	11. El controvertido gato de Schrödinger
	153	12. En busca de un mundo real: EPR
	169	13. Acciones fantasmales: El teorema de Bell
	189	14. ¿Qué está pasando?: La interpretación del enigma cuántico
	207	15. El misterio de la conciencia
	221	16. El misterio se encuentra con el enigma
	239	17. La conciencia y el cosmos cuántico
		Apéndices
	253	Lecturas recomendadas
	255	Índice onomástico

1

Presentación del enigma

Aunque lo que decís es correcto, exponer este material a los no científicos es el equivalente intelectual de dejar que los niños jueguen con pistolas cargadas.

Objeción de un colega a nuestro curso de física, «El enigma cuántico»

Éste es un libro controvertido. Pero nada de lo que diremos sobre la *mecánica cuántica* es controvertido. Los resultados experimentales expuestos y nuestra explicación de los mismos mediante la teoría cuántica son indiscutibles. Lo que se debate acaloradamente es la implicación de dichos resultados *más allá* de la física. Para muchos físicos es mejor no hablar de este enigma cuántico, el misterio del encuentro de la física con la conciencia. Es nuestro secreto de familia.

Nuestra preocupación como físicos es que algunos, ante esta unión de la sólida ciencia física con el misterio de la mente consciente, se vuelvan susceptibles a tonterías pseudocientíficas de toda clase. Somos conscientes de este peligro y lo tenemos en cuenta. También los físicos podemos sentirnos incómodos al ver nuestra disciplina involucrada en algo tan «etéreo».

Antes que nada, queremos recalcar que el encuentro con la conciencia de nuestro subtítulo no implica ninguna acción de la mente del estilo de las presentadas a veces por la ciencia ficción o los ilusionistas (como la levitación, por ejemplo). En realidad, nosotros hablamos de algo más profundo. El papel crucial de la conciencia al que nos referimos incluye nuestra impresión de que podríamos haber *elegido* obrar de otra manera en vez de como lo hemos hecho. La percepción de que tenemos «libre albedrío», lo que los físicos llaman «el problema de la medida», es básica para el enigma cuántico.

¿Qué implicaciones tienen los hechos que exploraremos para el papel de la conciencia en el mundo físico? No tenemos una respuesta definitiva a esta controvertida cuestión en la frontera de nuestra disciplina.

Pero incluso los lectores con una formación física nula llegarán a entender los temas planteados y podrán participar en el debate.

La teoría cuántica es asombrosamente exitosa. Ni una sola de sus predicciones se ha demostrado incorrecta. La mecánica cuántica ha revolucionado nuestro mundo. Un tercio de la economía mundial depende de productos basados en ella. Pero esta física puede sonar a misticismo. Y es que los experimentos cuánticos sacan a la luz un enigma que desafía nuestra visión cotidiana del mundo.

La visión del mundo que demanda la teoría cuántica es, en palabras de J.B.S. Haldane, no sólo más extraña de lo que suponemos, sino más extraña de lo que *podemos* suponer. La mayoría de nosotros comparte intuiciones de sentido común. Por ejemplo, ¿no es de sentido común dar por sentado que un objeto no puede estar en dos sitios al mismo tiempo? Y, por supuesto, lo que sucede aquí no puede estar afectado por lo que está sucediendo *simultáneamente* en algún lugar muy lejano. ¿Y acaso no hay un mundo real «ahí fuera», con independencia de que lo contemplamos o no? La mecánica cuántica pone en solfa estas intuiciones al establecer que la propia observación *crea* la realidad física observada.

Esta última idea es tan difícil de aceptar que algunos la suavizan diciendo que la observación *parece* crear la realidad observada. Pero hoy la mayoría de físicos ya no elude el enigma a base de semántica y afronta lo que la Naturaleza parece estar diciéndonos (aunque sin dejar de admitir que aún no se comprende del todo). Cuando hayamos descrito el experimento cuántico arquetípico, los lectores podrán decidir hasta qué punto la creación de la realidad por la propia observación es sólo «aparente».

Puesto que la teoría cuántica funciona perfectamente, a efectos *prácticos* los físicos podemos dejar de lado —y hasta negar— todo misterio. Pero al obrar así dejamos los aspectos de la teoría que más fascinan a los no físicos a merced de presentaciones engañosas como, por poner un ejemplo, la película *¿Y tú qué sabes!?* (quien no la haya visto puede leer nuestro comentario en el capítulo 14). El auténtico enigma cuántico no sólo es más fascinante que las «filosofías» defendidas por tales presentaciones, sino que es más extraño. La comprensión del verdadero misterio requiere cierto esfuerzo mental, pero está al alcance de cualquier persona inteligente sin formación técnica.

El enigma del que hablamos no es sólo un modo de ver las cosas, ni tampoco una nueva —o antigua— perspectiva filosófica. Describiremos fenómenos físicos simples que desafían nuestra visión del mundo convencional, y que pueden demostrarse de manera convincente ante cualquiera.

Aunque el enigma cuántico ha ocupado a los físicos durante ocho décadas, sigue sin estar resuelto. Puede que nuestra formación y nuestro talento como físicos no nos conviertan en profesionales especialmente cualificados para su comprensión. Por eso, aunque nos cueste, debemos abordar el problema con modestia.

La interpretación de lo que ocurre en la frontera donde la física sólida se difumina es objeto de debate entre los físicos que la han abordado en serio. Pero es innegable que la física se ha encontrado con la conciencia. Según las interpretaciones al uso, dicho encuentro no tiene por qué convertirse en una relación. No obstante, ninguna interpretación lo evita.

Así lo expresó una vez el premio Nobel Eugene Wigner:

Quando el dominio de la teoría física se amplió para abarcar los fenómenos microscópicos mediante la creación de la mecánica cuántica, el concepto de conciencia saltó de nuevo a la palestra. No era posible formular las leyes de la mecánica cuántica de manera plenamente consistente sin ninguna referencia a la conciencia.

Aun así, el estamento físico no acepta el estudio de la conciencia misma entre sus competencias. Y con buen criterio. La conciencia está demasiado mal definida, demasiado sesgada emocionalmente. No es la clase de cosas de las que nos ocupamos los físicos. Pero la discusión de la *relación* entre mecánica cuántica y conciencia es ineludible.

En este libro describimos los hechos experimentales y su explicación aceptada mediante la teoría cuántica. Luego exploramos el enigma que se deriva de ellos y las diversas interpretaciones alternativas de su significado. Lo hemos hecho con toda la precisión posible en lenguaje no técnico. Por fortuna, esto no resulta demasiado difícil. El enigma cuántico, convencionalmente conocido como «el problema de la medida», se plantea ya desde el experimento cuántico más simple.

Nos hemos esforzado en hacer que nuestro libro sea comprensible. Se basa en un material preparado a lo largo de los últimos diez años para estudiantes de filosofía y ciencias humanas, en lo que se ha convertido en el curso más popular de nuestro departamento de física de la Universidad de California en Santa Cruz.

Nuestra postura (que la conexión del enigma cuántico con el misterio de la conciencia merece atención) será obvia. Sólo una minoría de nuestros colegas físicos comparte esta pretensión. La mayoría no piensa demasiado en el enigma. Muchos incluso tienen la impresión de que ya ha quedado resuelto por alguna de las interpretaciones de la teoría cuántica.

tica. Sin embargo, la mayoría de los *proponentes* de dichas interpretaciones todavía ven el misterio que contienen.

Una respuesta no atípica de los físicos cuando se les exhorta a afrontar el enigma es que la mecánica cuántica simplemente muestra que debemos abandonar el realismo ingenuo. Nadie admite ser un realista *ingenuo*. Ahora bien, si la teoría cuántica niega la realidad física directa de los átomos, también debería negar la realidad física directa de las sillas, que están hechas de átomos. ¿Está intentando la Naturaleza decirnos algo? Nos hemos esforzado en presentar los hechos y la controversia que suscitan con honestidad y en hacer que los lectores puedan sacar sus propias conclusiones.

A menudo pensamos en imágenes. La mayoría de las numerosas ilustraciones de este libro es de cosecha propia. Son versiones mejoradas de lo que nosotros mismos trazamos en nuestras pizarras al explicar estas resbaladizas ideas.

Cómo contamos la historia

Cuando uno de los dos autores de este libro (Bruce) y otro estudiante de física pasamos una tarde con Albert Einstein, él nos habló de sus reticencias hacia la teoría cuántica. Por desgracia, habíamos sido instruidos en los *usos* de la teoría, no en sus implicaciones (que Einstein consideraba «fantasmales»). Sólo décadas más tarde llegamos a apreciar lo que dos azorados estudiantes no estaban aún preparados para discutir aquella tarde (una experiencia que relataremos en el capítulo siguiente).

La tecnología actual puede demostrar la extrañeza de la mecánica cuántica sólo en el dominio de lo muy pequeño. Por eso, en el capítulo 3, ilustraremos un resultado básico de la mecánica cuántica con una parábola, una fantasía imposible, en la que un visitante a una tierra cuya tecnología mágica permite evidenciar fenómenos cuánticos a escala humana se siente desconcertado. Su desconcierto se parece mucho al que puede experimentar el lector tras nuestra exposición del enigma cuántico.

Nuestras intuiciones sobre cómo funciona el mundo no están *todas* en nuestros genes. Muchas se remontan a cinco siglos atrás, con la revolución intelectual iniciada por Copérnico y Galileo y completada principalmente por Newton. La visión del mundo a la que desafía la mecánica cuántica es la newtoniana, pero la actitud científica que ha permitido dicho desafío se la debemos a Galileo. En un mismo capítulo trataremos tanto el derrocamiento de la ciencia renacentista por Galileo como el impacto de la perspectiva newtoniana en nuestro pensamiento.

Puesto que debemos hablar de los fenómenos cuánticos en un mismo lenguaje para la física «clásica» y para la moderna física cuántica, en otro capítulo apuntaremos unas cuantas ideas básicas sobre campos eléctricos, ondas y energía. Veremos sólo la física clásica necesaria para apreciar por qué los físicos se vieron *forzados* a adoptar la teoría cuántica a pesar de las cosas tan raras que dice sobre el mundo.

Los siguientes párrafos resumen nuestra exposición del enigma cuántico en este libro. Los temas, enunciados aquí de manera muy compacta, se irán aclarando a medida que progrese nuestro relato.

El cuanto salió por primera vez a escena en la explicación de la radiación de los cuerpos calientes vertida por Max Planck, con su «asunción desesperada» que violaba las nociones más básicas de la física clásica. Albert Einstein se tomó la asunción de Planck muy en serio y sugirió que la luz es un haz de partículas discretas. Puesto que los físicos sabían que se podía *demostrar* lo contrario, que la luz es una onda que se propaga, la propuesta de Einstein fue tachada inicialmente de «temeraria». Pero pronto esta dualidad «onda-partícula» se aplicó no sólo a la luz, sino a *todo*.

Cuando la mecánica cuántica adquirió su formulación moderna en los años veinte del siglo pasado, el enigma cuántico afloró al verse que la teoría implicaba el *acto de observación*. Y una observación *consciente*. Ya que esto da a la teoría cuántica un aire de filosofía especulativa, el capítulo siguiente es un interludio dedicado a la aplicación práctica de la teoría, donde mostraremos que un tercio de la economía moderna depende de dispositivos basados en efectos cuánticos.

A continuación, en un diálogo imaginario, un físico expone el enigma cuántico (el encuentro de la física con la conciencia) a un grupo de personas razonables y de mente abierta, que se enfrentan al «secreto de familia» de la física.

Tras esta confrontación, veremos que la «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica mantiene escondido el embarazoso secreto de familia de la física. Esta visión pragmática del enigma defiende que, si la teoría *funciona*, todo está bien (al menos a efectos prácticos). Es lo que los físicos aceptamos tácitamente en nuestra investigación y nuestras clases.

Para explorar la insatisfacción con la interpretación de Copenhague, explicamos la metáfora del gato de Schrödinger y examinamos la profunda crítica de Einstein de que la teoría cuántica presenta un mundo creado por la observación porque es incompleta. La única laguna en el argumento de Einstein era su negación inapelable de las conectividades instantáneas que implicaba la teoría, que calificó de «acciones fantasma-

les». A continuación exponemos una versión no matemática del teorema de Bell, que permite demostrar la existencia de las acciones fantasmales negadas por Einstein.

En la actualidad hay otras interpretaciones que compiten con la de Copenhague, y entre sí. El *sentido* de la mecánica cuántica se ha convertido en una cuestión polémica. Pero veremos que todas las interpretaciones propuestas tropiezan con la conciencia. Llegamos así a los confines de la ciencia física, un límite más allá del cual la formación en física deja de ser lo único relevante.

Luego nos acercamos a ese límite desde el otro lado, el de la conciencia al encuentro de la física. En el actual auge del interés filosófico y psicológico por la conciencia, la mecánica cuántica aparece en relación con el «problema difícil» de la conciencia, la explicación de la *experiencia* tal cual. En el penúltimo capítulo exploramos varias conexiones del misterio de la conciencia con el enigma cuántico.

El capítulo final, «La conciencia y el cosmos cuántico», lleva las implicaciones de la teoría cuántica a su increíble conclusión lógica. Aquí es inevitable que las hipótesis se desboquen, e invitamos al lector a desarrollarlas por sí mismo.

2

Einstein la calificó de «fantasmal»

... y ojalá yo lo hubiera sabido

He pensado cien veces más en el problema cuántico que en la teoría de la relatividad general.

Albert Einstein

No puedo tomarla [la teoría cuántica] en serio, porque... la física debería representar una realidad en el tiempo y en el espacio, libre de fantasmales acciones a distancia.

Albert Einstein

En los años cincuenta, en Princeton, un amigo invitó a su yerno y a mí (Bruce) a pasar una tarde de sábado con Albert Einstein. Poco después, dos maravillados estudiantes graduados en física veían a Einstein, en bata y pantuflas, bajar por la escalera que daba a la salita donde le esperaban. Recuerdo que tomamos té y galletas, pero no el principio de la conversación.

Pronto Einstein nos inquirió sobre nuestro curso de mecánica cuántica. Le complació que usáramos el texto de David Bohm, y nos preguntó si nos gustaba el tratamiento *filosófico* inicial de Bohm. No teníamos respuesta. Se nos había dicho que dejáramos a un lado esa parte del libro y nos concentráramos en la sección titulada «Formulación matemática de la teoría». Einstein insistió, pero no estábamos familiarizados con el tema. Habíamos sido instruidos en el *uso* de la teoría, no en su significado. Nuestras respuestas le decepcionaron, y pronto pasamos a otra cosa. Sólo muchos años más tarde llegamos a entender la profunda incomodidad de Einstein ante las implicaciones misteriosas de la teoría cuántica, que calificaba de «fantasmales» y, en su opinión, cuestionaban la existencia obvia del mundo real.

La teoría cuántica no es una teoría física más. Es el marco en el que se basa en última instancia toda la física actual. A Einstein le molestaba la afirmación de que, si uno observaba la posición de un átomo, era la observación misma la que causaba su presencia allí (en otras palabras, no estaba antes de que lo viéramos). ¿Vale lo mismo para los objetos grandes? En principio sí. Para ridiculizar esta idea, Einstein le preguntó una vez a un colega, sólo medio en broma, si creía que la Luna sólo estaba donde estaba cuando él la miraba.

Nuestro libro se centra en la negación mecanocuántica de la existencia de un mundo real independiente de su observación. Tras aquella tarde con Einstein, durante años apenas pensé en esta extraña idea, que los físicos conocen como «el problema de la medida». Como estudiante graduado me intrigaba la «dualidad onda-partícula». Se trata de la paradoja de que un átomo podía manifestarse en un experimento como una cosa compacta y concentrada, mientras que en otro experimento podía manifestarse como una cosa distribuida en una región amplia. Esto parecía extraño, pero daba por sentado que, si dedicaba una hora a pensarlo detenidamente, lo vería todo tan claro como parecía verlo mi profesor. Y en aquellos tiempos tenía cosas más urgentes que hacer.

Tras doctorarme en Columbia y pasar un año en Berkeley, durante más de una década ejercí de investigador y director de investigación en una gran empresa electrónica. Mi trabajo requería aplicar la mecánica cuántica; pero, como la mayoría de físicos, las *implicaciones* de la teoría no me preocupaban más de lo que a un diseñador de motores para automóviles le preocupa que la mecánica clásica que emplea sea una teoría determinista que pone en tela de juicio el libre albedrío.

Más adelante, ya en el departamento de física de la Universidad de California en Santa Cruz, mi discípulo Rob Shaw me pidió dejarle ejecutar nuestro experimento sobre vórtices cuánticos en superconductores a lo largo de quince días, para poder explorar una idea de la teoría del caos. Los quince días se convirtieron en varios años (y en una beca MacArthur para Shaw).

Antes de reemprender la investigación en superconductores, otros dos discípulos y yo nos pusimos a estudiar la sensibilidad de las aves al campo magnético terrestre, a instancias de un amigo biólogo que afirmaba que sus ratas se veían afectadas por dicho campo magnético. Yo era escéptico: «Los biólogos no tenéis idea de lo difícil que es detectar un campo magnético tan débil». Pero él replicó: «Los físicos no tenéis idea de lo complicada que puede ser la vida». Una observación interesante, no del todo ajena al tema de este libro.

También comencé a leer sobre los fundamentos de la teoría cuántica

y a arrepentirme de haber sido tan ignorante de sus extrañas implicaciones el día que Einstein quiso hablar del tema con nosotros años atrás. Poco después me hice cargo de un curso de física dirigido a estudiantes de carreras no científicas. En esta clase de cursos uno puede enseñar más o menos lo que le venga en gana, porque no se trata de preparar a los alumnos para el siguiente curso de física. Centrar el curso en el enigma cuántico era una excusa perfecta para dedicar más tiempo a mi nuevo interés.

Nunca volví a los vórtices en superconductores. Tras una conferencia sobre los fundamentos de la mecánica cuántica en Italia, ya no pude dejar el tema del que fui incapaz de conversar con Einstein aquella tarde en Princeton.

En cuanto a mí (Fred), tomé contacto con la mecánica cuántica durante mi primer año en el MIT. Recuerdo que escribí la ecuación de Schrödinger por toda la página de mi cuaderno de apuntes, entusiasmado de contemplar la ecuación que gobernaba el universo. Más adelante en ese mismo año intenté aplicar la mecánica cuántica para analizar un experimento, y me sorprendió que el polo norte de un átomo pudiera apuntar en más de una dirección al mismo tiempo. Tras devanarme los sesos por un tiempo, desistí de intentar comprender, figurándome que lo acabaría entendiendo cuando hubiera aprendido más.

Me trasladé a la Universidad de California en Santa Cruz para doctorarme y allí conocí a Bruce, quien por entonces estaba experimentando con superconductores. Me cayó bien, pero a mí me interesaba más la teoría que el trabajo de laboratorio.

Cuando el profesor del curso de mecánica cuántica para graduados nos pidió a cada alumno que escribiéramos un artículo sobre algún aspecto del tema, recordé un experimento inspirado por el teorema de Bell que evidenciaría una extraña y no comprobada predicción de la teoría cuántica. Encontré el artículo original de Bell en una oscura revista archivada en el sótano de la biblioteca de ciencias. A veces me parecía que lo entendía, y un momento después me invadía la confusión. Al final me limité a presentar el aparato matemático.

Para mi tesis doctoral hice un análisis mecanocuántico de transiciones de fase en sistemas magnéticos. Llegué a dominar las ecuaciones, pero no tuve tiempo de pensar en su significado. Estaba demasiado atareado en publicar artículos y obtener mi título de doctor.

Tras doctorarme trabajé como ejecutivo en una gran empresa electrónica y luego en otras dos empresas de nuevo cuño. Durante años apenas me acordé de la física, hasta que volví al mundo académico. Por entonces había decidido que sólo me interesaban los estudios realmente

fundamentales. Bruce y yo pronto reconocimos el interés compartido que se convirtió en el centro de nuestra investigación y también nos llevó a escribir este libro.

Cuando ambos comenzamos a explorar la frontera donde la física se encuentra con la filosofía especulativa e incluso, según algunos, con el misticismo, nuestros colegas se mostraron sorprendidos, ya que nuestras áreas de investigación anteriores habían sido bastante convencionales, incluso prácticas.

El secreto de familia de la física

Hemos comenzado este capítulo hablando de las reticencias de Einstein hacia la teoría cuántica. Pongamos dichas reticencias en su justa perspectiva. La teoría cuántica se concibió a principios del siglo XX para explicar la «mecánica» —el mecanismo— que rige el comportamiento de los átomos. Se comprobó que la energía de un átomo cambia sólo a intervalos discretos, o *cuantos*, de ahí la denominación de «mecánica cuántica», que se refiere tanto a las observaciones experimentales como a la *teoría* que las explica.

La teoría cuántica está en la base de todas las ciencias de la naturaleza, desde la química hasta la cosmología. La necesitamos para comprender el brillo del Sol, las imágenes de un televisor, el verde de la hierba y el *Big Bang* que dio origen al universo. Buena parte de la tecnología moderna se basa en dispositivos que aprovechan efectos cuánticos.

La física precuántica, lo que se conoce como «mecánica clásica» o «física clásica», también llamada «física newtoniana», suele ser una aproximación excelente para objetos mucho más grandes que una molécula, y por lo general más sencilla que la mecánica cuántica. Pero no es más que una aproximación, y no sirve en absoluto para los átomos de los que está hecho todo. Aun así, la física clásica es básica para nuestro saber convencional, nuestra visión newtoniana del mundo. Pero ahora sabemos que es una visión del mundo fundamentalmente defectuosa.

Desde antiguo los filósofos se han entregado a especulaciones esotéricas sobre la naturaleza de la realidad física. Pero antes de la mecánica cuántica la gente tenía la opción lógica de rechazar tales teorizaciones y adherirse a una visión del mundo llana y de sentido común. Hoy, a la luz de lo que demuestran los experimentos cuánticos, esa concepción de sentido común ha dejado de ser una opción lógica.

¿Puede tener alguna relevancia la visión del mundo sugerida por la

mecánica cuántica más allá de la ciencia? Preguntémosnos qué relevancia han tenido la negación copernicana de que la Tierra era el centro del cosmos o la teoría de la evolución de Darwin fuera del ámbito científico. En cierto sentido, la relevancia de la mecánica cuántica es más inmediata que la de esas otras teorías, que tratan de lo muy remoto en el espacio o en el tiempo. La teoría cuántica trata del aquí y ahora, y hasta de la esencia de nuestra humanidad, nuestra conciencia.

¿Por qué, entonces, la teoría cuántica no ha tenido un impacto intelectual y social comparable al que tuvieron las ideas de Copérnico o Darwin? Quizá sea porque éstas son más fáciles de entender... y mucho más fáciles de creer. Las implicaciones de las tesis de Copérnico y de Darwin pueden resumirse en unas pocas frases. Al menos para la mentalidad moderna, esas ideas parecen razonables. Si uno intenta resumir las implicaciones de la teoría cuántica, lo que se obtiene suena a misticismo.

Intentémoslo de todos modos. Para explicar los hechos demostrados, la teoría cuántica nos dice que la observación de un objeto puede influir instantáneamente en el comportamiento de otro objeto muy distante, *sin que estén conectados por ninguna fuerza física*. Einstein rechazó estas influencias como «acciones fantasmales», pero ahora sabemos que existen. La teoría cuántica también nos dice que la observación misma de la posición de un objeto *causa* su presencia ahí. Por ejemplo, de acuerdo con la teoría cuántica, un objeto puede estar en dos, o muchos, sitios a la vez (incluso muy distantes entre sí). Su existencia en el punto particular donde se detecta su presencia se convierte en una realidad sólo si es objeto de observación (¿consciente?).

Esto parece negar la existencia de una realidad física independiente de nuestra observación de la misma. Se comprende la preocupación de Einstein.

Erwin Schrödinger, uno de los fundadores de la teoría cuántica moderna, formuló su ahora famosa metáfora del gato encerrado en una caja para ilustrar que, puesto que la teoría se aplica tanto a lo microscópico como a lo macroscópico, lo que dice es un «absurdo». De acuerdo con la teoría cuántica, el gato de Schrödinger estaba muerto o vivo a la vez... hasta que la observación de su estado *causa* una u otra posibilidad. Además, la constatación de que el gato está muerto crearía una historia de instalación del *rigor mortis*, mientras que si estuviera vivo tendríamos otra historia de hambre en aumento, *hacia atrás en el tiempo*.

Cualquiera que se tome en serio las implicaciones de la teoría cuántica presumiblemente convendría en que esto no puede dejarle a uno impasible. Niels Bohr, el principal intérprete de la teoría, dijo: «Todo aquel a quien la mecánica cuántica no le parezca insólita es que no la ha en-

tendido». Pero un físico dispuesto a diseñar un láser o explicar el comportamiento de los quarks, los semiconductores o las estrellas debe dejar al margen las «insólitas» implicaciones de la teoría y concentrarse en su objetivo más mundano. Ésta es la razón de que, a la hora de enseñar mecánica cuántica a estudiantes de física, química e ingeniería evitamos tratar cosas tales como la naturaleza de la realidad o la conciencia.

Es más, la sola mención de estos asuntos nos hace levantar las cejas. Se cuenta que una vez un estudiante le preguntó a Richard Feynman: «Aparte de una herramienta de cálculo, ¿qué es realmente la función de onda cuántica?». La única respuesta que se escuchó fue: «¡Shh! Primero cierra la puerta». Como dice J.M. Jauch: «Para muchos físicos juiciosos, [el significado profundo de la mecánica cuántica] ha seguido siendo una suerte de secreto de familia».

En los años cincuenta se decía que ningún miembro no fijo de un departamento de física pondría en peligro su carrera manifestando algún interés en las implicaciones de la teoría cuántica. Esto sólo es un poco menos cierto hoy. Pero los tiempos están cambiando. La exploración de las cuestiones fundamentales que plantea la mecánica cuántica está ya en marcha y, aparte de la física, se extiende a la psicología, la filosofía y la informática.

Puesto que este libro se concentra en el «secreto de familia» en cuestión, seguramente algunos de nuestros colegas físicos no lo aprobarán. Pero no encontrarán nada *científicamente* incorrecto en lo que digamos. Los hechos que exponemos son incontestables. La discusión sólo atañe al significado *subyacente* tras los hechos. Lo que nos dicen estos hechos sobre nuestro mundo (y quizá sobre nosotros mismos) es hoy un asunto controvertido que va más allá de la física. Hay intrigantes indicios de una conexión entre lo que llamamos mundo físico y lo que llamamos mente.

El enigma cuántico ha desafiado a los físicos durante ocho décadas. ¿Podría ser que algunas claves cruciales residan fuera de sus dominios? Es curioso que el enigma pueda exponerse en sus términos esenciales sin demasiado aparato físico. ¿Es posible que alguien no lastrado por años de instrucción en la *aplicación* de la teoría cuántica pueda tener alguna nueva intuición? Después de todo, fue un niño quien señaló que el emperador estaba desnudo.

3

La visita a Eug Ahne Poc

Una parábola cuántica

Si vas a ponerte histriónico, no te quedes corto.

G.I. Gurdjieff

Tendrán que pasar unos cuantos capítulos hasta que demos de lleno con el enigma que nos plantea la mecánica cuántica. Pero, a modo de adelanto, echemos un vistazo a la paradoja. La tecnología actual limita nuestra percepción del enigma cuántico a los objetos diminutos. Pero ésta es sólo una limitación técnica. La mecánica cuántica se aplica a todo.

Comencemos, pues, con un cuento en el que un físico visita Eug Ahne Poc, una tierra con una tecnología mágica que permite poner de manifiesto algo parecido al enigma cuántico, pero con objetos grandes —un hombre y una mujer— en vez de átomos, algo imposible en el mundo real. Fijémonos en lo que desconcierta a nuestro visitante, porque su desconcierto es la clave de nuestra parábola. En capítulos posteriores el lector probablemente también experimentará un desconcierto similar. En nuestro relato, la explicación que el *Rhob* ofrece a su visitante equivale a la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica.

*Prólogo de nuestro muy seguro de sí mismo
visitante a Eug Ahne Poc*

Permítaseme explicar por qué me estoy pateando esta empinada senda. Puesto que la mecánica cuántica puede hacer que la Naturaleza adopte tintes casi místicos, algunos se vuelven susceptibles a ideas del todo injustificadas, lo que les puede llevar a aceptar majaderías de índole sobrenatural.


Hace un mes me encontraba con unos amigos en California. Allí la gente parece particularmente susceptible a tales sandeces. Mis amigos me hablaron del *Rhob* en Eug Ahne Poc, una aldea situada en lo alto


de las montañas Hima-Ural. Afirmaban que este chamán podía poner de manifiesto fenómenos cuánticos con objetos grandes. ¡Una ridiculez, por supuesto!


Cuando les expliqué a mis amigos que semejante demostración es imposible, me acusaron de tener una mente cerrada. Me retaron a investigar el asunto, y uno de ellos, un magnate de las empresas «punto.com», se ofreció a financiar mi viaje. Aunque mis colegas del departamento de física me aconsejaron no perder el tiempo inútilmente, creo que un científico filántropo debería dedicar algún esfuerzo a investigar ideas injustificadas para frenar su propagación. Así que aquí estoy.


Observaré con una mente completamente abierta. Cuando vuelva a California pondré en evidencia a ese charlatán; pero mientras permanezca en Eug Ahne Poc, seré discreto. Esos trucos chamánicos probablemente forman parte de la religión local.


La senda se va haciendo menos empinada y más ancha hasta que de pronto desemboca en una espaciosa plaza. Nuestro visitante ha llegado a Eug Ahne Poc. Le alivia comprobar que los preparativos a larga distancia de sus amigos han funcionado. Le estaban esperando. El Rhob y unos cuantos aldeanos le brindan un cálido recibimiento.

 Saludos, Curioso Inquisidor, Concienzudo Experimentador. Bienvenido a nuestra aldea.


 Gracias, muchas gracias. Agradezco vuestra calurosa acogida.


 Nos alegra tu visita. Tengo entendido que vienes con la misión de desentrañar la verdad. Puesto que eres norteamericano, estoy seguro de que quieres ir deprisa. Intentaremos acomodarnos a tu ritmo, pero, por favor, sé comprensivo con nuestro calmoso proceder.


 Oh, aprecio mucho vuestra disposición. Espero no causaros muchas molestias.

 En absoluto. Tengo entendido que vosotros los físicos habéis aprendido hace poco —en el siglo pasado, de hecho— a poner de manifiesto algunas de las verdades más profundas de nuestro universo. Pero vuestra tecnología sólo os permite trabajar con objetos pequeños y simples. Nuestra «tecnología», si puede llamarse así, puede ofrecer demostraciones con las entidades más complejas.


 (*Expectante, pero suspicaz*): Estoy ansioso por verlo.

 Lo he dispuesto todo. Tendrás que hacer una pregunta apropiada, y la respuesta se te revelará. Creo que el procedimiento de plantear una pregunta y obtener una respuesta se parece mucho a lo que los científicos llamáis «hacer un experimento». ¿Quieres probar?


 (Un tanto desconcertado): Bueno, sí...


 Muy bien, voy a preparar una situación para hacer el experimento.


El Rhob se encamina hacia dos pequeñas chozas con una separación mutua de unos treinta metros. Junto a la puerta de cada choza hay un aprendiz del Rhob, y en el espacio entre ambas hay dos jóvenes cogidos de la mano.

 La «preparación del estado», como dirías tú, debe hacerse sin observación. Haz el favor de ponerte esta capucha.


Nuestro visitante se cubre la cabeza con una capucha negra que no le permite ver nada. Al poco rato, el Rhob continúa.


 El estado está preparado. Ya puedes quitarte la capucha. En una de las chozas hay una pareja, un hombre y una mujer juntos. La otra choza está vacía. Tu primer «experimento» es determinar en qué choza está la pareja y cuál de las dos está vacía. Hazlo mediante una pregunta apropiada.


 Vale, ¿en qué choza está la pareja, y cuál está vacía?

 ¡Bien hecho!


A una señal del Rhob, el aprendiz abre la puerta de la choza situada a la derecha para revelar a los dos jóvenes abrazados y sonriendo tímidamente. Luego el otro aprendiz abre la puerta de la otra choza para mostrar que está vacía.

 Como puedes comprobar, amigo mío, has recibido una respuesta apropiada a tu pregunta. La pareja ciertamente estaba en una de las chozas, y la otra estaba vacía.


 (Nada impresionado, pero intentando no ser descortés): Ya veo.


 Pero comprendo que la reproducibilidad es crucial para los científicos, así que repitamos el experimento.

El procedimiento se repite seis veces más para nuestro visitante. Unas veces la pareja resulta estar en la choza de la derecha y otras veces en la de la izquierda. Notando que nuestro visitante comienza a aburrirse, el Rhob detiene la demostración y explica:


 (Con tono jubiloso): ¡Atiende, amigo mío! Tus preguntas sobre el paradero de la pareja causaron que ambos jóvenes estuvieran juntos, y que

la pareja se localizara en una única choza. Si tienes dudas de lo que digo, podemos repetirlo muchas más veces.


 (Molesto por haber viajado tan lejos para asistir a una demostración aparentemente trivial, y conteniéndose para no ofender): ¿Mis preguntas causaron que la pareja estuviera en una de las chozas? ¡Sí, hombre! Fuiste tú quien la situó en una u otra choza cada vez que yo me tapaba los ojos. Oh, pero, lo siento, esto es un detalle irrelevante. Muchas gracias por tu demostración. De verdad que agradezco tu empeño, pero se está haciendo tarde, y tengo que bajar de esta montaña.


 No, soy yo quien debe disculparse. No he tenido en cuenta que los norteamericanos no podéis mantener la atención mucho tiempo. He oído que, de hecho, escogéis a los líderes de vuestra nación sobre la base de unas cuantas apariciones de treinta segundos en una pequeña pantalla de vidrio.

Por favor, hagamos un segundo experimento. Ahora tienes que hacer una pregunta *diferente*, una pregunta que haga que el hombre y la mujer estén en chozas *separadas*.


 Vale, de acuerdo, pero tengo que bajar...


Antes de que nuestro visitante acabe de hablar, el Rhob le tiende la capucha y él, encogiéndose de hombros, se la pone. Al cabo de un minuto, el Rhob vuelve a hablar.


 Ya puedes quitarte la capucha. Haz una pregunta para determinar en cuál de las dos chozas está el hombre y en cuál la mujer.

 Vale, vale, ¿en qué choza está el hombre y en qué choza está la mujer?


Esta vez el Rhob indica a sus aprendices que abran las puertas de las dos chozas al mismo tiempo. El hombre aparece en la choza de la derecha y la mujer en la choza de la izquierda, y ambos se dedican una sonrisa a través de la plaza.


 (Visiblemente aburrido): Oooh.


 ¡Atención! Has recibido una respuesta apropiada a la nueva pregunta que hiciste, un resultado conforme al experimento *diferente* que hiciste. En efecto, el hombre estaba en una choza y la mujer en la otra. Tu pregunta causó que la pareja se distribuyera entre las chozas. Ahora cumplamos la condición de reproducibilidad repitiendo el experimento.

 Por favor, tengo que irme despidiendo ya. ¿Podemos ahorrarnos ese


trámite? (*Ahora con un tono sarcástico.*) Concedo que tus «experimentos» pueden repetirse un número arbitrariamente grande de veces con resultados igualmente impresionantes.


 Oh, lo siento.


 (*Un tanto turbado por su propia descortesía*): Oh no, discúlpame tú. Me encantaría ver una repetición del experimento.


 Bueno, ¿qué tal dos o tres veces más?

(*Y la demostración se repite tres veces.*)


 Pareces impaciente, así que tres repeticiones quizá te basten para convencerte de que tus preguntas sobre las localizaciones del hombre y de la mujer causaron que la pareja se repartiera entre ambas chozas. ¿Estás de acuerdo?

 (*Aburrido y decepcionado, pero con cierta sensación de triunfo*): Desde luego, estoy de acuerdo en que *tú* puedes distribuir la pareja entre las chozas como te dé la gana. Pero ahora ya sí que tengo que bajar de esta montaña. Pensaba que me ibas a demostrar algo más. De todas maneras, muchísimas gracias por...


 (*Interrumpiendo*): Aún no has visto la versión *final* de estos experimentos, y es el paso *crucial* que completa nuestra demostración. Permíteme probártelo, sólo dos veces. Dos veces y nada más.


 (*Condescendiente*): Muy bien, de acuerdo, dos veces.

Nuestro visitante vuelve a ponerse la capucha.


 Por favor, ahora quítate la capucha y formula tu pregunta.


 ¿Qué debo preguntar?


 Ah, amigo mío, ahora tienes experiencia con *ambas* preguntas. Puedes formular *cualquiera* de las dos preguntas. Puedes optar por *cualquiera* de los dos experimentos.

 (*Sin pensárselo mucho*): Bueno, ¿en qué choza está la pareja?


El Rhob abre la puerta de la choza de la derecha para revelar un hombre y una mujer cogidos de la mano. Luego abre la puerta de la otra choza para mostrar que está vacía.


 (*Un tanto intrigado, pero no sorprendido*): Hummm...

 Fíjate en que la pregunta que hiciste, el experimento que *elegiste*, causó la presencia de la pareja en una única choza. Ahora hagamos un segundo intento, tal como convinimos.


 (*Bien dispuesto*): Desde luego, probemos de nuevo.


Nuestro visitante vuelve a ponerse la capucha.


 Ya puedes quitarte la capucha y formular cualquiera de las dos preguntas.


 (*Con un toque de escepticismo*): Muy bien, esta vez haré la otra pregunta: ¿en qué choza está el hombre, y en qué choza está la mujer?

El Rhob indica a sus aprendices que abran ambas chozas a la vez para revelar que el hombre está en la choza de la derecha y la mujer en la de la izquierda.


 Hummmmm... (*un pensamiento en voz alta*): Curioso, otra vez has sido capaz de responder a mi pregunta. Dos veces seguidas. Y sin saber qué iba a preguntar yo.


 Fíjate, amigo mío, en que cualquier pregunta que *elijas* siempre obtiene la respuesta correspondiente. Y ahora debes estar deseando dejarnos.

 Bueno, el caso es que no me importaría intentar este último experimento una vez más.


 Desde luego, me encanta que estés tan interesado en esta demostración.


Nuestro visitante vuelve a ponerse la capucha.


 Ya puedes quitarte la capucha y formular tu pregunta.


 Muy bien, esta vez preguntaré en qué choza está la pareja.

El Rhob abre la choza de la izquierda para revelar a los dos jóvenes juntos, y luego abre la choza de la derecha para mostrar que está vacía.


 Vaya, me has dado la respuesta apropiada a la pregunta que hice tres veces seguidas. ¡Tienes mucha suerte!


 No es cuestión de suerte, amigo mío. La observación que eliges libremente determina si la pareja estará en una misma choza o separada en dos.


 (*Perplejo*): ¿Cómo puede ser? (*Ahora ansioso.*) ¿Podemos probar de nuevo?


 Desde luego, si así lo quieres.


La demostración se repite, y nuestro cada vez más desconcertado visitante demanda nuevas repeticiones. Hasta ocho veces obtiene un resultado correspondiente a la pregunta formulada y no a la otra pregunta que podía haber hecho.


 (Un aparte agitado): ¡No puedo creerlo! Por favor, querría probar otra vez.


 Me temo que ya está oscureciendo, y hay una peligrosa pendiente montaña abajo. Puedes estar seguro de que siempre obtendrás una respuesta correspondiente a la pregunta que formules, apropiada a la situación cuya existencia fue causada por tu pregunta.


 (Farfulla y parece irritado).


 Me parece que algo te corroe, amigo mío.


 ¿Cómo sabías qué pregunta iba a hacerte antes de colocar a tu gente en las chozas?

 No lo sabía. Podías haber preguntado una cosa o la otra.


 (Agitado): Pero, pero... ¡seamos *razonables!* ¿Y si hubiera formulado la pregunta que no se *correspondía* con la situación real del hombre y la mujer?


 Amigo mío, ¿acaso vuestro gran físico danés, Bohr de Copenhague, no os enseñó que la ciencia no tiene por qué dar respuesta a experimentos que no se han realizado?

 Sí, claro, pero no me vengas con ésas: tu gente tenía que estar junta o separada justo *antes* de que yo hiciera mi pregunta.

 Ya veo lo que te preocupa. A pesar de tu formación como físico y tu experiencia con la mecánica cuántica en el laboratorio, aún estás imbuido con la idea de la existencia de una realidad física independiente de tu observación consciente de la misma. Parece que a los físicos les cuesta comprender del todo la gran verdad que han cosechado en tiempos tan recientes.

Pero ya es hora de darnos las buenas noches, amigo mío. Has visto lo que viniste a ver. Ahora debes dejarnos. Que tengas un viaje de vuelta sin contratiempos.

 (Obviamente desconcertado mientras toma el camino de vuelta): Ah, sí, esto... voy a... muchas gracias, sí, yo, bueno... gracias...

 (Hablando para sí mientras descende por la empinada y pedregosa senda): Veamos, *tiene que haber* una explicación razonable. Si yo preguntaba dónde estaba la *pareja*, él me mostraba la pareja en una de las dos chozas. Pero si yo preguntaba dónde estaban el hombre y la mujer *por separado*, entonces me mostraba uno en cada choza.

Pero antes de que yo preguntara tenían que estar en una u otra situación. ¿Cómo lo habrá hecho?

¿Acaso me engatusó para hacerme formular la pregunta que le convenía, como en uno de esos trucos de cartas de movimiento forzado?

No, sé que elegí libremente todas las veces.

¡No puede ser! Pero lo he visto. Ciertamente se parece a un experimento cuántico. Hay quienes afirman que la decisión consciente de qué observar crea la realidad, pero la conciencia no es algo que deba intervenir en la física. En cualquier caso, la mecánica cuántica no se aplica a objetos grandes como las personas. Bueno, por supuesto, esto no es del todo cierto. *En principio*, la mecánica cuántica se aplica a todo. Pero es imposible demostrarlo con cosas grandes (y sin un experimento de interferencia). ¿Estaba alucinando?

¿Cómo desmiento al tal *Rhob* cuando vuelva a California? Peor aún, ¿qué les diré a mis colegas del departamento de física cuando me pregunten por mi viaje? ¡Ay, madre!

Por supuesto, no hay ningún Eug Ahne Poc. Lo que nuestro visitante contempló es ciertamente imposible. Pero en capítulos posteriores nos encontraremos con una paradoja similar: veremos que un objeto puede localizarse en un sitio o, mediante un experimento diferente, estar en dos sitios a la vez. Aunque la tecnología actual limita esta demostración a los objetos pequeños, los avances técnicos están permitiendo hacerla extensiva a objetos cada vez más grandes. La concepción ortodoxa de la paradoja es la interpretación de Copenhague, cuyo principal arquitecto es Niels Bohr. No es diferente de la explicación ofrecida por el *Rhob* en Eug Ahne Poc («Copenhague» al revés).

Nuestra visión newtoniana del mundo

Una ley universal del movimiento

La Naturaleza y sus leyes permanecían en la oscuridad:

Dios dijo: ¡Hágase Newton! Y la luz se hizo.

Alexander Pope

La mecánica cuántica choca violentamente no sólo con nuestra intuición, sino también con la visión científica del mundo establecida desde el siglo XVII. No obstante, los físicos no tienen inconveniente en aceptar la mecánica cuántica como los cimientos de toda la física y, por ende, de toda la ciencia. Para entender por qué esto es así, repasemos la historia.

La audaz actitud intelectual de Galileo *creó* la ciencia, en el sentido moderno del término. Y unas décadas más tarde, el descubrimiento por Isaac Newton de una ley universal del movimiento se convirtió en modelo de explicación racional. La física newtoniana condujo a una visión del mundo que hoy sigue conformando el pensamiento de todos y cada uno de nosotros. La mecánica cuántica descansa sobre ese pensamiento y, a la vez, lo desafía. Para apreciar este desafío, comenzaremos por revisar el pensamiento newtoniano.

Galileo insistió en que las teorías científicas deben aceptarse o rechazarse únicamente sobre la base de pruebas experimentales. El que una teoría se acomode o no a la intuición de uno debería ser irrelevante. Este dictado desafiaba la visión científica renacentista, que, de hecho, era la de la antigua Grecia. Echemos un vistazo al problema con el que tuvo que enfrentarse Galileo en la Italia renacentista: el legado de la ciencia griega.

La ciencia griega: sus contribuciones y su defecto fatal

Debemos a los filósofos de la antigua Grecia el reconocimiento de haber preparado la escena para la entrada de la ciencia al contemplar la Na-

turalidad como explicable. Cuando se redescubrieron los escritos de Aristóteles, fueron reverenciados como la sabiduría de una «Edad de Oro».

Aristóteles señaló que todo lo que ocurre es esencialmente movimiento de materia (incluso, digamos, la germinación de las bellotas para convertirse en robles). Así pues, comenzó por considerar el movimiento de objetos *simples*, partiendo de unos pocos principios fundamentales. Ésta es ciertamente la manera de proceder de los físicos de hoy. Pero el método aristotélico para elegir los principios fundamentales hacía imposible el progreso. Aristóteles asumió que dichos principios podían captarse *intuitivamente* como verdades autoevidentes.

He aquí unos cuantos: un objeto material busca el reposo en línea con el centro cósmico, que «obviamente» era la Tierra. Un objeto cae por su ansia de alcanzar dicho centro cósmico. Un objeto pesado, con su mayor ansia, *sin duda* caerá más deprisa que un objeto ligero. Por otro lado, en la perfección de los cielos, los objetos celestiales se mueven describiendo la más perfecta de las figuras, el círculo. Estos círculos estarían sobre las «esferas celestiales» centradas en el centro cósmico, la Tierra.

La ciencia griega tenía un defecto fatal: *no incluía ningún mecanismo para imponer un consenso*. Para los griegos, las comprobaciones experimentales de las conclusiones científicas no eran más relevantes que las comprobaciones experimentales de ideas políticas o estéticas. Las opiniones contrapuestas podían debatirse indefinidamente.

Aquellos pensadores de la Edad de Oro pusieron en marcha la empresa científica, pero, sin un método para establecer un acuerdo, el progreso era inviable. Aunque Aristóteles no estableció ningún consenso en su época, a finales de la Edad Media sus ideas se convirtieron en el dogma oficial de la Iglesia, sobre todo a través de la obra de Tomás de Aquino.

Tomás de Aquino concilió la cosmología y la física de Aristóteles con las doctrinas morales y espirituales de la Iglesia para crear una síntesis elocuente. La Tierra, hacia donde caían las cosas, también era el reino del hombre moralmente «caído». El Cielo, donde las cosas se movían en círculos perfectos, era el reino de Dios y los ángeles. En el punto más bajo del universo, el centro de la Tierra, estaba el Infierno. Cuando, a principios del Renacimiento, Dante introdujo este esquema cosmológico en su *Divina Comedia*, se convirtió en una visión que influyó profundamente en el pensamiento occidental.

Desde la antigüedad, la posición de las estrellas en el cielo presagiaba el cambio de estación. ¿Cuál era, entonces, la significación de los cinco objetos brillantes que vagaban a través del fondo estrellado? Una conclusión «obvia» era que el movimiento de aquellos planetas («planeta» significa vagabundo) presagiaba asuntos humanos erráticos y, por lo tanto, merecían una seria atención. Las raíces de la astronomía se hunden en la astrología.

En el siglo II de nuestra era, Ptolomeo de Alejandría describió tan bien los movimientos celestiales que la navegación y los calendarios basados en su modelo funcionaban primorosamente. Las predicciones de los astrólogos (al menos en lo que respecta a las posiciones de los planetas) eran igualmente precisas. La astronomía de Ptolomeo, con una Tierra estacionaria como centro cósmico, requería que los planetas describieran «epiciclos», curvas sinuosas complicadas construidas mediante círculos girando sobre otros círculos dentro de otros círculos. Según se cuenta, cuando le explicaron el sistema ptolemaico, el rey Alfonso X de Castilla dijo: «Si Dios Todopoderoso me hubiera consultado antes de embarcarse en la Creación, le habría recomendado algo más simple». No obstante, la combinación de la física y la cosmología aristotélicas con la astronomía ptolemaica se aceptó como verdad práctica y doctrina religiosa, y la Santa Inquisición se encargó de imponerla.

En el siglo XVI, una manzana podrida surgió dentro de la misma Iglesia. El clérigo y astrónomo polaco Nicolás Copérnico estaba convencido de que la Naturaleza tenía que ser más simple de lo que sugería la astronomía de Ptolomeo. Su propuesta simplificadora fue que la Tierra y los otros cinco planetas orbitaban en torno a un sol central estacionario. El movimiento errático de los planetas en relación al fondo estrellado se debía a que los veíamos desde una Tierra también en órbita alrededor del sol. Nuestro mundo no era más que el tercer planeta de la lista. Sí, era un cuadro más simple.

La simplicidad era un argumento apenas convincente. La Tierra estaba «obviamente» quieta. Nadie *notaba* ningún movimiento. Si la Tierra se desplazara, ¿acaso una piedra que cayera no quedaría atrás? Y puesto que se presumía que el aire ocupaba todo el espacio, ¿acaso no debería notarse un fuerte viento? Además, una Tierra en movimiento entraba en conflicto con la sabiduría de la Edad de Oro. Estos argumentos eran difíciles de refutar. Y, lo que era más perturbador, se consideró que el sistema copernicano contradecía la Biblia, y dudar de la Biblia ponía en peligro la salvación.

La obra de Copérnico, publicada poco después de su muerte, incluía un prólogo (probablemente añadido por un colega) donde el autor advertía que su descripción era sólo una conveniencia matemática que no pretendía describir movimientos *reales*, con lo que se eludía cualquier contradicción con las enseñanzas de la Iglesia.

Unas décadas más tarde, el brillante análisis de Johannes Kepler puso en evidencia que los nuevos datos más precisos sobre el movimiento de los planetas se ajustaban perfectamente a un modelo de órbitas elípticas con el Sol en uno de los focos. También descubrió una regla simple que daba el tiempo exacto que tardaba cada planeta en completar su órbita alrededor del Sol. Kepler no pudo explicar su regla, y le desagradaban aquellos «círculos imperfectos», pero, sobreponiéndose a sus prejuicios, aceptó lo que observó.

Kepler hizo astronomía de primera, pero su visión del mundo no estaba guiada por la ciencia. Inicialmente consideraba que los planetas eran empujados por ángeles, y también se dedicaba a confeccionar horóscopos, en los que probablemente creía. También tuvo que robar tiempo a sus investigaciones astronómicas para defender a su madre de acusaciones de brujería.

La nueva concepción del movimiento de Galileo

En 1591, con sólo veintisiete años, Galileo accedió a una cátedra en la Universidad de Padua, pero pronto la dejó por una plaza en Florencia. El universitario de hoy entendería por qué: se le ofrecía más tiempo para dedicar a la investigación y menos a la docencia. Sus dotes incluían la música y el arte además de la ciencia. Brillante, ingenioso y encantador, Galileo también podía ser arrogante, grosero y mezquino. Tenía una elocuencia envidiable. Le gustaban las mujeres, y él a ellas.

Galileo era un copernicano convencido. Encontraba que aquel sistema más simple tenía más sentido. Pero, a diferencia de Copérnico, para Galileo no era sólo un recurso técnico de cálculo, sino que representaba una nueva visión del mundo. Una interpretación más modesta no habría sido su estilo.

La Iglesia tenía que detener el llamamiento de Galileo al pensamiento independiente (la incumbencia de la Iglesia era salvar almas, no la validez científica). Juzgado culpable por la Santa Inquisición, y tras visitar las cámaras de tortura, Galileo se retractó de su herejía heliocéntrica. A pesar de ello, tuvo que pasar sus últimos años en arresto domiciliario (una pena menor que la de Giordano Bruno, otro copernicano que fue quemado en la hoguera).

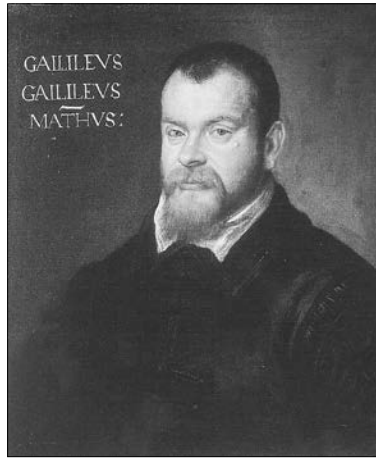


Figura 4.1. Galileo Galilei. Cortesía de Cambridge University Press.

A pesar de su retractación pública, para Galileo resultaba evidente que la Tierra se movía, y que ello era incompatible con la explicación aristotélica del movimiento. Era la fricción, y no el anhelo de descansar en el centro cósmico, lo que hacía que un bloque deslizante se parase; y era la resistencia del aire, y no la menor afinidad por el centro cósmico, lo que hacía que una pluma cayese al suelo más lentamente que una piedra.

Contraviniendo el legado aristotélico, Galileo afirmó: «En ausencia de fricción u otra fuerza aplicada, un objeto continuará desplazándose horizontalmente a velocidad constante». Y también: «En ausencia de la resistencia del aire, los objetos pesados y los ligeros caerán con la misma rapidez».

Las ideas de Galileo eran obvias... para él. ¿Cómo podía convencer al resto de la humanidad? Rechazar las enseñanzas de Aristóteles acerca del movimiento de la materia no era lo que se dice una cuestión menor. La visión aristotélica del mundo lo abarcaba todo y estaba sancionada por la Iglesia. Rechazar una parte equivalía a rechazar la totalidad.

El método experimental

Para ganar puntos a su favor, Galileo necesitaba ejemplos que entraran en conflicto con la mecánica aristotélica y se conformasen a sus ideas. Pero no acababa de encontrar fenómenos lo bastante ilustrativos. Su solución a este problema fue ¡crearlos!

Galileo concibió situaciones especiales, o «experimentos». Un experimento sirve para comprobar una predicción teórica. Hoy en día este en-

foque puede parecer obvio, pero entonces era una idea original y profunda.

En su experimento más famoso, Galileo supuestamente dejó caer una bola de plomo y una bola de madera desde la Torre de Pisa. El golpe simultáneo de las bolas de madera y de plomo contra el suelo demostró que la liviana madera caía tan deprisa como el pesado plomo. Esta y otras demostraciones proporcionaban razones suficientes, argumentaba él, para abandonar la teoría aristotélica y adoptar la suya.

Pero el método experimental de Galileo fue objeto de crítica. Aunque los hechos observados eran innegables, las demostraciones de Galileo eran situaciones *amañadas* y, por ende, no significativas, porque entraban en conflicto con la naturaleza intuitivamente obvia de la materia. Además, las ideas de Galileo *tenían que* estar equivocadas, porque contravenían la filosofía aristotélica.

Galileo ofreció una réplica de largo alcance: la ciencia debería ocuparse sólo de cuestiones demostrables. La intuición y la autoridad no cuentan en ciencia. *El único criterio para el juicio científico es la demostración experimental.*

Sólo unas décadas después de su proceso, el enfoque de Galileo fue abrazado incondicionalmente por los científicos. La ciencia progresó con un vigor nunca visto antes.

Ciencia fiable

Pongámonos de acuerdo sobre algunas reglas para aceptar una teoría como ciencia fiable. Estos preceptos nos serán útiles cuando entremos a considerar la mecánica cuántica.

Pero antes, una precisión sobre la palabra «teoría». Hablamos de la *teoría* cuántica y, por otro lado, de las *leyes* de Newton. «Teoría» es el término moderno. No podemos pensar en una única «ley» de la física del siglo XX o la del XXI. Aunque la palabra «teoría» se emplea a veces para denotar una idea especulativa, *no necesariamente* implica incertidumbre. Hasta donde sabemos, la *teoría* cuántica es completamente correcta. Las *leyes* de Newton son una aproximación.

Para que una teoría sea científicamente consensuable, antes que nada debe hacer predicciones comprobables con resultados que puedan exponerse objetivamente. En otras palabras, debe lanzar un desafío a los eventuales refutadores.

«Si eres bueno, irás al Cielo.» Esta predicción puede muy bien ser correcta, pero no es objetivamente comprobable. Las religiones, las ideo-

logías políticas o las filosofías en general no son teorías científicas. La teoría aristotélica de la caída de los cuerpos (con su predicción de que una piedra de dos kilos de peso caerá dos veces más deprisa que una piedra de un kilo) es comprobable, lo que la convierte en una teoría científica, aunque incorrecta.

Una teoría que haga predicciones comprobables es una *candidata* a ciencia fiable. Sus predicciones deben comprobarse mediante experimentos que la pongan a prueba intentando refutarla. Y los experimentos deben resultar convincentes incluso para los escépticos. Por ejemplo, las teorías que sugieren la existencia de una percepción extrasensorial hacen predicciones, pero hasta ahora las presuntas comprobaciones no han convencido a los escépticos.

Para ganarse la calificación de ciencia fiable, una teoría debe tener muchas de sus predicciones confirmadas sin un solo tropiezo. Una sola predicción fallida obliga a modificar o a abandonar la teoría. Esta exigencia es muy severa (un mal paso y fuera). En realidad, ninguna teoría científica es *totalmente* fidedigna (siempre es posible que no pase alguna prueba futura). En la práctica, una teoría científica es, a lo sumo, *provisionalmente* fiable.

El método científico, con sus elevados estándares de verificación experimental, es exigente con las teorías. Pero puede serlo asimismo con nosotros. Si una teoría cumple dichos estándares, estamos obligados a aceptarla como ciencia fiable, por mucho que entre en conflicto con nuestras intuiciones. Es el caso de la teoría cuántica.

La visión newtoniana del mundo

Isaac Newton nació en 1642, el mismo año que murió Galileo. Con la aceptación creciente del método experimental, había una sensación de progreso científico, aunque la errónea física aristotélica todavía se seguía enseñando a menudo. La Royal Society de Londres, hoy una de las principales organizaciones científicas, se fundó en 1660. Su lema, *Nullius in verba*, puede traducirse más o menos como «En palabras de nadie». A Galileo le hubiera encantado.

Se supone que Newton, un tipo hábil, se hizo cargo de la granja familiar. Pero, más interesado en los libros que en los arados, se las arregló para ir a la Universidad de Cambridge, a base de aceptar trabajos ingratos para pagarse el viaje. Como estudiante no brilló, pero la ciencia —o «filosofía natural», como se la llamaba entonces— le fascinaba. Cuando la peste bubónica forzó el cierre de la universidad, Newton volvió a su granja por un periodo de un año y medio.

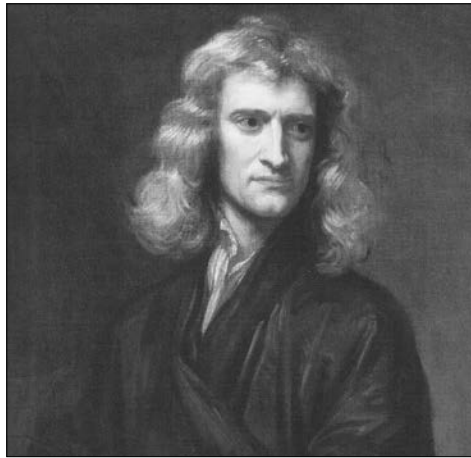


Figura 4.2. Isaac Newton. Cortesía de Cambridge University Press.

El joven Newton comprendió la enseñanza de Galileo de que, en una superficie horizontal perfectamente lisa, un bloque puesto en movimiento continuaría deslizándose para siempre. Sólo hay que empujarlo para vencer la fricción. Si se le aplica una fuerza mayor, el bloque se acelerará. Sin embargo, Galileo había aceptado la concepción aristotélica de la caída como un movimiento «natural» que no requería fuerza alguna. También aceptó que los planetas se movían «de manera natural» en círculo, sin ninguna fuerza que los mantuviera en su órbita, e ignoró las elipses descubiertas por su contemporáneo Kepler. Para concebir sus leyes universales del movimiento y de la gravedad, Newton tenía que desmarcarse de la aceptación galileana de la «naturalidad» aristotélica.

Newton contó que su inspiración le sobrevino al contemplar la caída de una manzana. Probablemente se preguntó: puesto que se necesita una fuerza para la aceleración *horizontal*, ¿por qué no postular una fuerza también para la aceleración *vertical*? Y si hay una fuerza sobre la manzana que la empuja hacia abajo, ¿por qué no también sobre la Luna? Y si es así, ¿por qué la Luna no cae hacia la Tierra como la manzana?

En la famosa ilustración de Newton del cañón en lo alto de una montaña, la bala de cañón dejada caer baja en línea recta al suelo, mientras que las disparadas a velocidades crecientes aterrizan cada vez más lejos. Si una bala sale disparada a suficiente velocidad, nunca llega a tocar la superficie planetaria. Pero continúa «cayendo». Continúa acelerándose hacia el centro de la Tierra a la vez que también se desplaza «horizontalmente». El resultado es una órbita alrededor del planeta, de manera que la bala dará la vuelta, ¡y el cañonero hará bien en agacharse!

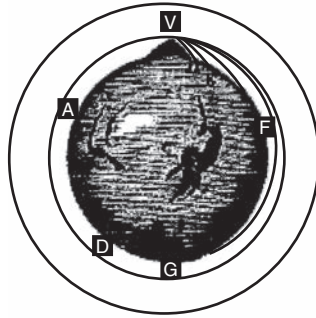


Figura 4.3. Dibujo de Newton de un cañón en lo alto de una montaña.

Si la Luna no se precipita sobre la Tierra es porque, al igual que una bala de cañón muy rápida, tiene una velocidad perpendicular al radio planetario. Newton percibió lo que nadie había advertido antes: que la Luna está cayendo.

*La ley universal del movimiento y, simultáneamente,
una fuerza de gravedad*

Galileo pensaba que su movimiento uniforme sin fuerza se restringía al desplazamiento paralelo a la superficie terrestre, describiendo un círculo en torno al centro de la Tierra. Newton lo corrigió al establecer que también se necesita una fuerza para hacer que un cuerpo se desvíe de su trayectoria *rectilínea*.

¿Cuánta fuerza se necesita? Cuanto más masivo sea un cuerpo, más fuerza se requiere para acelerarlo. Newton pensó que la fuerza necesaria era justo la masa del cuerpo por la aceleración, o $F = Ma$. Ésta es la ley universal del movimiento de Newton.

No obstante, en los tiempos de Newton parecía haber un contraejemplo de esta ley. La caída libre era un movimiento de aceleración hacia el suelo, pero no parecía que hubiera ninguna fuerza impulsora. Así, el joven Newton tuvo que concebir *simultáneamente* dos ideas de gran profundidad: su ley del movimiento y la fuerza de gravedad.

Cuando la peste remitió, Newton volvió a Cambridge. Isaac Barrow, que entonces ocupaba de la cátedra lucasiana de matemáticas, enseguida quedó tan impresionado por el logro de su discípulo que renunció a su puesto para cedérselo a Newton. El circunspecto joven se convirtió en un soltero recluso. (Entonces la Universidad de Cambridge obligaba a sus facultativos a mantenerse célibes.) Newton era reservado y malhu-

morado, y no toleraba las críticas, aunque fueran bienintencionadas. Hubiera sido preferible pasar la tarde con Galileo.

Las ideas de Newton tenían que verificarse. El problema era que la fuerza de gravedad entre objetos manejables experimentalmente era demasiado pequeña para ser medible. Así que volvió la vista a los cielos. Aplicando su ecuación del movimiento y su ley de la gravedad, derivó una fórmula simple. Tuvo que sentir un escalofrío recorriéndole la espalda cuando la vio. La fórmula no era otra que la inexplicada regla de Kepler para el tiempo que tarda cada planeta en completar su órbita alrededor del Sol.

Newton también calculó que el periodo orbital de la Luna era el que cabía esperar si un objeto en caída se acelerara diez metros por segundo cada segundo (justo la aceleración determinada experimentalmente por Galileo). Las ecuaciones de Newton del movimiento y de la gravedad gobernaban tanto las manzanas como la Luna: en la Tierra como en el cielo. Las leyes de Newton eran universales.

Principia

Newton era consciente de la significación de sus descubrimientos, pero la controversia que su primer artículo suscitó le había disgustado tanto que la idea de volver a publicar algo le aterraba.

Veinte años después de su inspiración en la granja, Newton recibió la visita del joven astrónomo Edmund Halley. Sabedor de que otros estaban especulando sobre una ley de la gravedad que diese las órbitas elípticas de Kepler, Halley le preguntó a Newton cómo eran las órbitas predichas por su ley de la gravitación. Newton respondió de inmediato: «Elípticas». Impresionado por la rápida respuesta, Halley le pidió que le mostrase los cálculos. Pero Newton no pudo encontrar sus notas. Como ha señalado un historiador de la ciencia: «Mientras otros aún estaban buscando una ley de la gravedad, Newton ya había perdido la suya».

Después de que Halley le previniera de que otros podrían apropiarse de sus ideas, Newton dedicó unos frenéticos dieciocho meses a escribir *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. La obra que hoy se conoce simplemente como *Principia* se publicó en 1687, con los gastos de edición a cargo de Halley. Los temores de Newton a la crítica se cumplieron con creces: hubo incluso quienes pretendieron que les había robado su idea.

Aunque los *Principia* obtuvieron un amplio reconocimiento como la revelación profunda de las leyes de la Naturaleza, su matemática rigu-

rosa y el hecho de estar escrito en latín hicieron que el libro de Newton tuviera pocos lectores. Pero pronto aparecieron versiones más populares. *Newtonianism for Ladies* fue un éxito de ventas. Voltaire, en sus *Elements du Newton*, asistido por el talento científico de su compañera Madame du Châtelet, intentó «reducir a este gigante a la medida de los simplones de mis colegas».

La revelada racionalidad de la Naturaleza era revolucionaria. Parecía implicar, al menos en principio, que el mundo podía ser tan inteligible como un mecanismo de relojería. Esto quedó espectacularmente corroborado cuando Halley predijo con precisión el retorno del cometa que lleva su nombre. Antes de eso se pensaba que un cometa presagiaba la muerte de un rey.

Los *Principia* encendieron el movimiento intelectual conocido como la Ilustración. La sociedad dejó de buscar la sabiduría en la Edad de Oro griega. Alexander Pope plasmó la atmósfera de los tiempos: «La Naturaleza y sus leyes permanecían en la oscuridad: / Dios dijo, ¡hágase Newton! Y la luz se hizo».

Cuando necesitó matemáticas mejores, Newton inventó el cálculo diferencial e integral. Sus estudios del comportamiento de la luz transformaron el campo de la óptica. Ocupó la presidencia del Parlamento, entonces reservada a Cambridge. Fue nombrado director de la Casa de la Moneda, cargo que ejerció con mano de hierro. En sus últimos años, Sir Isaac (el primer científico nombrado caballero) quizá fuera la persona más respetada en el mundo occidental. Paradójicamente, Newton también fue un místico que se enfrascó en la alquimia y la interpretación de las profecías bíblicas.

El legado de Newton

El impacto más inmediato de la visión newtoniana del mundo fue la ruptura con la síntesis medieval de lo físico y lo espiritual. Si Copérnico, quizá sin pretenderlo, había iniciado la destrucción de esta relación fomentada por la Iglesia al negar que la Tierra fuera el centro del cosmos, Newton completó la faena al demostrar que las mismas leyes físicas valen para lo terrenal y para lo celestial. Bajo su inspiración, los geólogos, presuponiendo que las mismas leyes eran aplicables también en el pasado, encontraron que la Tierra era mucho más antigua que los 6000 años bíblicos. Esta constatación condujo directamente a la teoría de la evolución de Darwin, la idea socialmente más subversiva de la ciencia moderna.

Aunque muchos aspectos del legado de Newton perdurarán para siempre, la visión mecanicista del mundo, y lo que hoy llamamos «física clásica», ha sido cuestionada por la física moderna. Aun así, esta visión mecanicista que es nuestra herencia newtoniana sigue conformando no sólo nuestra concepción de sentido común del mundo, sino nuestro pensamiento en cualquier esfera intelectual.

Ahora examinaremos cinco premisas newtonianas «de sentido común» que, como pronto veremos, quedan comprometidas por la mecánica cuántica.

Determinismo

Las bolas de billar son el modelo de determinismo favorito de los físicos. Si conocemos las posiciones y velocidades de un par de bolas a punto de colisionar, con la física newtoniana podemos predecir sus posiciones y velocidades en cualquier momento futuro. Un ordenador puede calcular las posiciones futuras de gran número de bolas colisionantes.

Lo mismo valdría, en principio, para los átomos que rebotan en una caja llena de gas. Llevando esta idea a sus últimas consecuencias, para un «ojo que todo lo ve» y que conozca la posición y velocidad de cada átomo del universo en un momento dado, el futuro del universo entero sería predecible. En principio, el futuro de un universo newtoniano semejante está *determinado*, tanto si lo *conocemos* como si no. El universo newtoniano determinista es una Gran Máquina. Los intrincados engranajes de su mecanismo de relojería se mueven siguiendo un curso pre-determinado.

Dios se convierte así en el Maestro Relojero, el Gran Ingeniero. Algunos fueron más lejos: tras haber creado una máquina completamente determinista, Dios ya no tiene nada que hacer. Es un ingeniero *retirado*. Y del retiro a la inexistencia sólo había un pequeño paso.

El determinismo nos afecta personalmente: nuestras decisiones aparentemente libres, ¿están en realidad predeterminadas? De acuerdo con Isaac Bashevis Singer: «Tenemos que creer en el libre albedrío. No tenemos elección». Aquí tenemos una paradoja: la libertad humana entra en conflicto con el determinismo newtoniano.

¿Qué era del libre albedrío antes de Newton? Ningún problema. En la física aristotélica hasta una piedra seguía su inclinación individual mientras rodaba cuesta abajo a su manera. Es el determinismo de la física newtoniana lo que plantea una paradoja.

No obstante, es una paradoja benigna. Aunque afectamos al mundo físico a través de nuestro libre albedrío, el único efecto externamente observable de nuestras decisiones conscientes en el mundo físico se verifica indirectamente a través de nuestros músculos, que son los que mueven cosas físicamente. Nuestra conciencia puede verse como confinada dentro de nuestro cuerpo.

La física clásica permite el aislamiento tácito de la conciencia, y su libertad asociada, del dominio de competencia de los físicos. Hay mente, y hay materia. La física se ocupa de la materia. Con esta división, los físicos precuánticos podían soslayar lógicamente la paradoja; y podían hacerlo porque la paradoja se derivaba de la *teoría* determinista, no de ninguna demostración experimental. Así, limitando el alcance de la teoría para excluir al observador, los físicos podían relegar el libre albedrío y el resto de la conciencia a la psicología, la filosofía y la teología. Y ésa era su inclinación.

Veremos que la irrupción de la mecánica cuántica, con el movimiento aleatorio de los electrones de Planck, desafía el determinismo. Un desafío más profundo vendrá dado por la inclusión del observador consciente en el *experimento* cuántico efectivo. La cuestión del libre albedrío ya no puede simplemente excluirse de la física a base de limitar el alcance de la teoría. Se plantea en la *demonstración experimental*. Con la mecánica cuántica, la paradoja del libre albedrío deja de ser benigna.

Realidad física

Antes de Newton, las explicaciones eran místicas (y mayormente inútiles). Si los planetas eran empujados por ángeles, las piedras caían en virtud de su anhelo innato por el centro cósmico, y las semillas germinaban por su afán de emular a las plantas maduras, ¿quién podía negar la influencia de otras fuerzas ocultas? ¿O que las fases de la Luna, o los encantamientos, podían ejercer algún influjo? La «influenza» (la gripe común) tenía este nombre porque antiguamente se explicaba en términos de una *influencia* sobrenatural.

En la visión newtoniana del mundo, en cambio, la Naturaleza era una máquina cuyo funcionamiento, aunque incompletamente conocido, no tenía por qué ser más misterioso que el de un reloj cuyos engranajes no vemos. La aceptación de ese mundo físicamente real se ha convertido en nuestra sabiduría convencional. Aunque digamos que «el coche no quiere arrancar», esperamos que el mecánico encuentre una explicación física de su comportamiento.

Si planteamos la cuestión de la «realidad» es porque la mecánica cuántica desafía nuestra concepción clásica de la misma. Pero antes que nada queremos prevenir un malentendido semántico. No estamos hablando de la realidad *subjetiva*, una realidad que puede diferir de una persona a otra. Por ejemplo, podemos decir que uno crea su propia realidad en el sentido *psicológico* del término. Por el contrario, aquí estamos hablando de la realidad *objetiva*, de realidades sobre las que todos podemos estar de acuerdo, como puede ser la posición de una piedra.

Los filósofos han adoptado posturas muy diversas sobre la realidad mucho antes de la mecánica cuántica. El «realismo» convencional asume la existencia del mundo físico con independencia de su observación. Una versión más drástica niega la existencia de cualquier cosa *más allá* de los objetos físicos. En esta visión «materialista», la conciencia, por ejemplo, debería ser completamente inteligible, al menos en principio, en términos de las propiedades electroquímicas del cerebro. La aceptación tácita de este materialismo, y hasta su defensa explícita, no es infrecuente en la actualidad.

En contraste con el realismo newtoniano o el materialismo, el «idealismo» sostiene que el mundo que percibimos no es el mundo real. Aun así, el *auténtico* mundo real puede aprehenderse con la mente.

Una posición idealista extrema es el «solipsismo». En esencia establece que *todo* lo que puedo experimentar son mis propias sensaciones. Todo lo que puedo conocer de mi lápiz, por ejemplo, es la sensación del color amarillo en mi retina y la presión contra mis dedos. No puedo demostrar que haya algo de «real» en el lápiz, ni en ninguna otra cosa, aparte de las sensaciones que experimento. (Este párrafo está deliberadamente escrito en primera persona del singular. Para el solipsista, el mundo exterior sólo existe como sensaciones en su mundo mental.)

Si un árbol cae en el bosque y nadie lo oye, ¿hay algún ruido? El realista respondería: «Aunque las ondas de presión que experimentaríamos como sonido no fueran oídas por nadie, existirían como fenómeno con realidad física». El solipsista respondería: «Ni siquiera habría un árbol a menos que yo lo experimentara; y aun entonces, sólo mis sensaciones conscientes existirían realmente». A este respecto, permítasenos citar al filósofo Woody Allen: «¿Y si todo fuera una ilusión y nada existiese? En tal caso, ciertamente he pagado por mi alfombra más de lo que vale».

Veremos que la intrusión del observador consciente en el experimento cuántico sacude nuestra visión newtoniana del mundo tan violentamente que las cuestiones filosóficas del realismo, el materialismo y el idealismo, ¡incluso el absurdo solipsismo!, saldrán de nuevo a relucir.

Separabilidad

La ciencia renacentista de base aristotélica estaba repleta de conectividades misteriosas. Las piedras tenían afinidad por el centro cósmico. Las bellotas querían emular a los robles cercanos. Los alquimistas creían que su pureza personal influía en las reacciones químicas de sus matraces. En la visión newtoniana del mundo, en cambio, un pedazo de materia, sea un planeta o una persona, interacciona con el resto del mundo sólo a través de las fuerzas físicamente reales aplicadas por otros objetos. Por lo demás, cualquier pedazo de materia es *separable* del resto del universo. Aparte de las fuerzas físicas ejercidas sobre él, un objeto está «desconectado» del resto del universo.

Las fuerzas físicas pueden ser sutiles. Por ejemplo, cuando un sujeto que ha visto a una amiga ajusta su movimiento para alcanzarla, la fuerza atractiva reside en la luz reflejada por ella y se ejerce sobre las moléculas de rodopsina en la retina de él. Por otro lado, tendríamos una *violación* de la separabilidad si un hechicero practicante del vudú pudiera causarnos dolor con sólo clavar una aguja en un muñeco, sin ninguna fuerza física conectiva.

La mecánica cuántica incluye influencias instantáneas que violan la separabilidad. Einstein las ridiculizó como «fuerzas de vudú». Sin embargo, los experimentos han certificado su existencia.

Reduccionismo

A menudo implícita en la hipótesis de que el mundo es comprensible, aparece la hipótesis reduccionista, la idea de que, al menos en principio, un sistema complejo puede explicarse en términos de —o «reducirse» a— sus partes más simples. El funcionamiento de un motor de automóvil, por ejemplo, puede explicarse en términos de la presión de la gasolina inflamada que impulsa los pistones.

Explicar un fenómeno psicológico en términos de su base biológica sería una reducción de un aspecto de la psicología a la biología. («Hay en ti más salsa de carne que carne de tumba», dijo Scrooge al espectro de Marley, reduciendo su sueño a un problema digestivo.)

Un químico podría explicar una reacción química en términos de las propiedades físicas de los átomos involucrados, algo que hoy es factible en casos simples. Esto sería reducir un fenómeno químico a la física.

Podemos pensar en una jerarquía que va desde la psicología hasta la física, estando esta última firmemente basada en hechos empíricos. Las

explicaciones científicas suelen ser reduccionistas (se remiten a principios básicos más generales). Aunque uno avance en esa dirección, esto sólo puede conseguirse en general mediante pasos cortos. Siempre necesitaremos principios generales específicos de cada nivel jerárquico.

El ejemplo clásico de violación del reduccionismo es la «fuerza vital», otrora propuesta para dar cuenta de los procesos vitales. Se suponía que la vida emergía al nivel biológico, sin que su origen pudiera encontrarse en la química o la física. Este pensamiento vitalista no condujo a ninguna parte y, por supuesto, no tiene ninguna vigencia en la biología actual.

En los estudios de la conciencia, la reducción suscita controversia. Algunos aducen que, una vez se comprendan los correlatos electroquímicos nerviosos de la conciencia, no quedará nada más por explicar. Otros insisten en que la «luz interior» de nuestra experiencia consciente eludirá la comprensión reduccionista, que la conciencia es primordial, y que se necesitarán nuevos «principios psicofísicos». La mecánica cuántica se ha esgrimido como prueba en apoyo de esta postura antirreduccionista.

Una explicación suficiente

Newton fue retado a *explicar* su fuerza de gravedad. Una fuerza transmitida a través del espacio vacío, a través de la *nada*, era algo difícil de tragar.

Newton tenía una respuesta sucinta: «*Hypotheses non fingo*» («No hago hipótesis»). Para Newton, una teoría científica sólo necesitaba proporcionar predicciones sistemáticamente correctas. Esta actitud vuelve a valer para la mecánica cuántica, donde el reto es explicar observaciones que nos fuerzan a negar la realidad física directa. Esto resulta aún más difícil de tragar que una fuerza transmitida a través del vacío.

Más allá de la física por analogía

En las décadas posteriores a Newton, los ingenieros aprendieron a construir las máquinas que impulsaron la revolución industrial. Los químicos se desmarcaron de la alquimia mística, que al cabo de los siglos seguía sin haber conseguido casi nada. La agricultura se hizo más científica a medida que el conocimiento fue reemplazando la tradición popular. Aunque los primeros creadores de tecnología casi no acudían a la

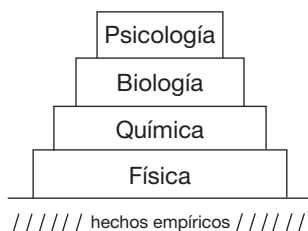


Figura 4.4. Jerarquía de la explicación científica.

física, sus rápidos avances les obligaron a adoptar la perspectiva newtoniana y aceptar que el mundo físico está gobernado por leyes discernibles.

La física newtoniana se convirtió en el paradigma de toda empresa intelectual. Las analogías con la física eran cada vez más amplias y osadas. Auguste Comte acuñó el término «sociología», que definió como una «física social», donde las personas eran «átomos sociales» motivados por fuerzas. Nunca antes el estudio de la sociedad se había contemplado como una disciplina científica.

Estirando la analogía con la física newtoniana, el liberal Adam Smith defendió el *laissez faire* sobre la base de que, si a la gente se le permitía perseguir sus propios intereses, una «mano invisible», una ley fundamental de la economía política, regularía la sociedad para el bien general.

Las analogías son flexibles. Karl Marx pensaba que era él, y no Adam Smith, quien había descubierto la ley correcta. En *Das Kapital* afirmó haber «puesto al descubierto la ley económica del movimiento de la sociedad moderna». Aplicando dicha ley predijo el futuro comunista. Por analogía con un sistema mecánico, sólo necesitaba conocer la condición inicial, que, pensaba, era el capitalismo de su tiempo. Así, la gran obra de Marx es un estudio del capitalismo.

También surgieron analogías en psicología. Sigmund Freud escribió: «Es la intención de este proyecto dotarnos de una psicología que sea una ciencia natural. Su objetivo es representar los procesos psíquicos como estados cuantitativamente determinados de partículas materiales específicas... ». Suena bastante newtoniano. Por último, considérese la declaración de B.F. Skinner: «La hipótesis de que el hombre no es libre es esencial para la aplicación del método científico al estudio del comportamiento humano». Skinner niega explícitamente el libre albedrío, adoptando un polémico materialismo determinista.

El atractivo de estos enfoques en las ciencias sociales se ha enfriado. Los estudiosos en áreas tan complejas son hoy más conscientes de las limitaciones de un método que funciona bien para situaciones físicas más

simples. Pero la perspectiva newtoniana *en sentido amplio*, la búsqueda de principios generales que luego se someten a comprobación empírica, es el modo de obrar aceptado.

Hacer explícita nuestra herencia newtoniana nos ayuda a apreciar personalmente el desafío que lanza la mecánica cuántica a esa visión del mundo, un desafío que difícilmente podemos eludir.

5

El resto de la física clásica

En física ya no queda nada nuevo por descubrir. Todo lo que resta por hacer son mediciones más y más precisas.

Lord Kelvin (en 1894)

Seis años después de que Kelvin hiciera esta afirmación, la matizó así: «La física está esencialmente completada: sólo hay dos nubes oscuras en el horizonte». Dio en el clavo, porque una nube escondía la relatividad y la otra la mecánica cuántica. Pero antes de que miremos lo que había tras esas nubes, revisemos un poco más de la física decimonónica, esa que hoy llamamos «clásica». Describiremos el fenómeno de la «interferencia», indicativo de que algo es una onda extensa. También necesitaremos el concepto de campo eléctrico. La luz es un campo eléctrico vibrante, y fue a propósito de la luz como surgió por primera vez el enigma cuántico. También hablaremos de la energía y su «conservación», su totalidad invariante. Y no dejaremos de mencionar la teoría de la relatividad de Einstein. Sus predicciones bien confirmadas pero difíciles de creer son una buena preparación psicológica para las implicaciones «increíbles» de la teoría cuántica. Este capítulo contiene más de lo estrictamente necesario para comprender el enigma cuántico, pero es un buen bagaje.

La historia de la luz

Newton decidió que la luz era un haz de partículas diminutas. Tenía buenos argumentos para creerlo: conforme a su ley universal del movimiento, la luz viaja en línea recta a menos que tropiece con algo que ejerza una fuerza sobre ella. En palabras del propio Newton:

¿Acaso los rayos de luz no son cuerpos sumamente pequeños emitidos por las sustancias radiantes? Porque tales cuerpos atravesarán medios uniformes en línea recta sin desviarse en su camino hacia la oscuridad, y tal es la naturaleza de los rayos de luz.

En realidad, Newton tenía un conflicto. Investigó una propiedad de la luz que ahora llamamos «interferencia», un fenómeno característico de las ondas extensas. Pero al final se decantó decididamente por las partículas. Las ondas parecían requerir un medio de propagación, y este medio frenaría el movimiento de los planetas, algo que su ecuación del movimiento parecía negar:

Contra el rellenado de los cielos con medios fluidos, a menos que estén extremadamente enrarecidos, una gran objeción emana de los movimientos regulares y duraderos de los planetas y cometas en toda suerte de cursos a través de los cielos... [L]os movimientos de los planetas y cometas se explican mejor sin eso... [A]sí que no hay prueba de su existencia y, por lo tanto, debería descartarse. Y si se descarta esa posibilidad, la hipótesis de que la luz consiste en presión o movimiento propagado a través de dicho medio también queda descartada.

Otros científicos propusieron teorías ondulatorias de la luz, pero la aplastante autoridad de Newton hizo que su «teoría corpuscular» de la luz dominara durante más de cien años. De hecho, los newtonianos estaban más seguros de la existencia de los corpúsculos de luz que el propio Newton... hasta comienzos del siglo XIX.

Thomas Young fue un niño prodigio que, según se cuenta, a los dos años ya leía con fluidez. Estudió medicina y, además de ganarse la vida como médico, fue un eminente traductor de jeroglíficos. Pero su principal interés era la física. A comienzos del siglo XIX, Young ofreció una demostración concluyente de que la luz era una onda.

En una placa de vidrio embadurnada de hollín, Young trazó dos líneas paralelas próximas. La luz que atravesaba estas dos rendijas para proyectarse en una pared o pantalla reflectante producía un patrón de bandas claras y oscuras, lo que se conoce como «patrón de interferencia». Esto demostraba que la luz era un fenómeno ondulatorio.

Podemos representar una «onda» como una serie móvil de picos y valles, o crestas y depresiones. Estas sinuosidades pueden verse, por ejemplo, a través de la cara frontal de un acuario como olas en la superficie del agua. Otra manera de representar las ondas es vistas desde arriba, donde las líneas indican las crestas. Las olas del mar vistas desde un avión tienen este aspecto. Usaremos ambas representaciones.

Las ondas procedentes de una fuente pequeña, como una piedra caída en el agua, se propagan en todas direcciones. Similarmente, la luz de un objeto radiante pequeño se difunde en todas direcciones. Por lo mismo, la luz procedente de una fuente pequeña, como una rendija, iluminará una

pantalla de manera bastante uniforme. (El diagrama de la página siguiente muestra la rendija en visión transversal.)

Podría esperarse que la luz procedente de dos rendijas próximas iluminase la pantalla con el doble de intensidad. Esto es lo que cabría esperar si la luz fuera un flujo de partículas diminutas. Pero cuando Thomas Young hizo pasar la luz a través de sus dos rendijas, observó bandas de luz y sombra. Y lo más importante, *la distancia entre las bandas claras y oscuras dependía de la separación de las rendijas*. Un flujo de partículas independientes no podía dar cuenta de este resultado.

La interferencia es crucial para la teoría cuántica y el enigma cuántico, y en los párrafos que siguen explicaremos con más detalle por qué. En física, la interferencia se acepta como la demostración concluyente del comportamiento ondulatorio. Si el lector prefiere dar por bueno este criterio y no leer a fondo, o incluso saltarse, el resto de esta sección, ello no le impedirá captar el enigma cuántico.

La explicación de la interferencia es la siguiente. En el centro de la pantalla (punto A en la figura 5.2) las ondas de luz procedentes de la rendija superior recorren la misma distancia que las ondas de luz procedentes de la rendija inferior. Por lo tanto, las crestas que vienen de arriba y las que vienen de abajo llegan a la vez, y al sumarse generan más luminosidad de la que proporcionaría una sola rendija.

Pero para llegar a un punto por encima del centro de la pantalla (digamos el punto B en la figura 5.2) las ondas lumínicas que parten de la rendija inferior tienen que recorrer más distancia que las ondas procedentes de la rendija superior. Así pues, en el punto B las crestas que vienen de abajo llegan *más tarde* que las crestas que vienen de arriba. Si las crestas de arriba llegan a la vez que las depresiones de abajo, unas y otras se cancelan mutuamente para dar una banda oscura. Puesto que la luz es una onda, luz más luz puede dar oscuridad.

En un punto aún más arriba (punto C de la figura 5.2) tendremos otra banda luminosa, porque las crestas procedentes de ambas rendijas vuelven a sumarse. A lo largo de la pantalla las bandas luminosas y oscuras se alternarán como resultado del reforzamiento o cancelación mutua de las ondas emitidas por ambas rendijas, dando lugar al patrón de interferencia. En realidad, «interferencia» es una denominación equívoca. Las ondas de ambas rendijas no se interfieren: se suman y se restan, como las imposiciones y los reintegros de una cuenta bancaria.

Si pensamos en la geometría, podemos ver que cuanto mayor es la separación entre las rendijas, mayor es la separación entre las bandas del patrón de interferencia. Los detalles no nos importan aquí. Lo único que hay que recordar es que *el espaciado de las bandas de interferencia de-*

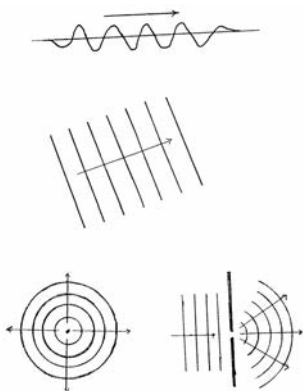


Figura 5.1. Representaciones de ondas.

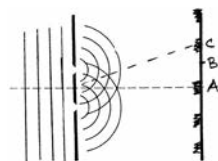


Figura 5.2. Interferencia en el experimento de la doble rendija.

pende del espaciado de las rendijas. Esto sólo puede ser cierto si las ondas lumínicas que alcanzan cada punto de la pantalla proceden de *ambas* rendijas. Si la luz fuera un flujo de partículas, no habría patrón de interferencia. Los diminutos proyectiles procedentes de una u otra rendija no podrían cancelarse mutuamente para producir un patrón dependiente de la separación de las rendijas.

¿Es irrefutable el argumento de Young? Probablemente no. Cuando Young lo presentó, fue acaloradamente contestado. Los colegas ingleses de Young estaban comprometidos hasta la médula con la escuela de pensamiento newtoniana. El que la hipótesis ondulatoria fuera la favorita de los científicos franceses también contribuía a la antipatía de los ingleses hacia ella. Pero no pasó mucho tiempo antes de que nuevos experimentos echaran abajo las objeciones a la naturaleza ondulatoria de la luz.

La fuerza electromagnética

Un pañuelo de seda que haya sido frotado con una varilla de vidrio será atraído por el vidrio y repelido por otro pañuelo tratado de la misma manera. Esta «carga eléctrica» revelada por el frotamiento mutuo de materiales distintos se conocía desde antiguo. El paso crucial para su comprensión fue la brillante idea de Benjamin Franklin, quien observó que, cuando dos cuerpos eléctricamente cargados entraban en contacto, su atracción mutua se debilitaba. Franklin razonó que las cargas respectivas se *cancelaban*.

Como la cancelación es una propiedad de los números positivos y negativos, Franklin asignó signos algebraicos, positivo (+) y negativo (-), a

los objetos eléctricamente cargados. Los cuerpos con cargas de signo opuesto se atraen. Los cuerpos con cargas del mismo signo se repelen.

(La obra de Franklin sobre la electricidad es en buena parte responsable de la existencia de los Estados Unidos. Como embajador en Francia, no fue sólo su ingenio, su encanto personal y su inteligencia política, sino también su talla como científico, lo que le permitió recabar la ayuda francesa que fue tan vital para el éxito de la revolución norteamericana.)

Ahora sabemos que los átomos tienen un núcleo compuesto de protones con carga positiva (junto con neutrones sin carga). Los electrones, cada uno con una carga negativa de la misma magnitud que la del protón, rodean el núcleo. El número de electrones en un átomo iguala el de protones, de manera que el conjunto tiene carga nula. Cuando dos cuerpos quedan eléctricamente cargados por frotamiento mutuo, son los electrones los que pasan de uno a otro.

Por ejemplo, una varilla de vidrio frotada con un pañuelo de seda adquiere carga positiva porque el vidrio cede sus electrones con más facilidad que la seda, de manera que el vidrio pierde electrones y la seda los gana. La seda, ahora con más electrones que protones, queda cargada negativamente y es atraída por la carga positiva del vidrio. En cambio, si le acercamos otro pañuelo de seda con carga negativa, ambos se repelen.

Una fórmula simple, la ley de Coulomb, nos da la fuerza eléctrica que ejerce un cuerpo cargado (o «carga») sobre otro. Con esa fórmula uno puede calcular las fuerzas en cualquier disposición de cargas. Y ahí se acababa la historia de la fuerza eléctrica: no había nada más que decir, o así lo pensaba al menos la mayoría de físicos a principios del siglo XIX.

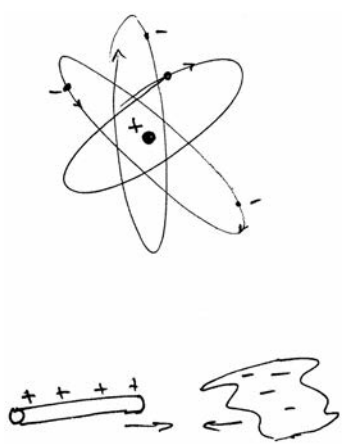


Figura 5.3. Cargas positivas y negativas.



Figura 5.4. Michael Faraday. Cortesía de Stockton Press.

Pero a Michael Faraday le intrigaba la electricidad. Retrocedamos un poco. En 1805, a la edad de catorce años, Michael Faraday, hijo de un herrero, empezó a trabajar como aprendiz de encuadernador. A Faraday, que era muy curioso, le fascinaban los libros de divulgación científica de Sir Humphrey Davy. Tomó concienzudos apuntes, los encuadernó, fue a presentárselos a Sir Humphrey y le pidió trabajar en su laboratorio. Aunque contratado como asistente no cualificado, a Faraday pronto se le permitió hacer algún experimento de su propia cosecha.

Faraday se preguntaba cómo podía un cuerpo ejercer una fuerza sobre otro a través del espacio vacío. Que las matemáticas de la ley de Coulomb predijeran correctamente lo que se observaba no le satisfacía, así que postuló que una carga crea un «campo» eléctrico en el espacio, y es este campo físico el que ejerce fuerzas sobre otras cargas. Faraday representó su campo mediante líneas que salían de una carga positiva y entraban en una carga negativa. La densidad de líneas indicaba la intensidad de la fuerza ejercida por el campo.

La mayoría de científicos consideraron que el concepto de campo introducido por Faraday era superfluo. Según ellos, la ignorancia matemática de Faraday le obligaba a pensar mediante dibujos; el pensamiento abstracto sin duda era una empresa difícil para aquel joven de «clase baja». La idea de campo fue ridiculizada como «la muleta mental de Faraday».

El caso es que Faraday fue aún más lejos y afirmó que el campo debido a una carga necesita tiempo para propagarse. Por ejemplo, si una carga positiva y otra negativa de igual magnitud se cancelaran mutua-

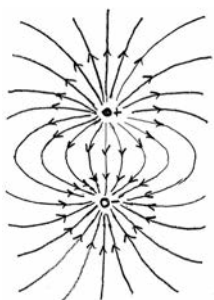


Figura 5.5. Campo eléctrico en torno a dos cargas.

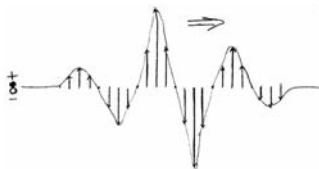


Figura 5.6. Un campo eléctrico oscilante.

mente, el campo desaparecería en su vecindad inmediata, pero a Faraday le parecía improbable que el campo desapareciera en toda su extensión instantáneamente.

Faraday pensó que el campo remoto seguiría existiendo por un tiempo aunque las cargas que lo crearon se hubieran cancelado y ya no existieran. De ser así, el campo tendría una realidad física propia. Además, razonó, si dos cargas iguales de signo opuesto se acercaran y separaran repetidamente, se generaría un campo eléctrico alternante que se propagaría desde el par oscilante. Aunque las cargas se cancelaran y la oscilación cesara, el campo seguiría propagándose en el espacio.

La intuición de Faraday era buena. Unos años después, James Clerk Maxwell tomó prestada la idea del campo de Faraday para concebir un conjunto de cuatro ecuaciones que abarcaban todos los fenómenos eléctricos y magnéticos. Hoy las llamamos «ecuaciones de Maxwell». Su predicción más llamativa era la existencia de vibraciones del campo eléctrico que se propagaban junto con vibraciones del campo magnético, es decir, «ondas electromagnéticas». Maxwell comprobó que la velocidad de dichas ondas coincidía con el valor medido de la velocidad de la luz. En consecuencia, propuso que la luz es una onda electromagnética, lo que de hecho se demostró poco después de su muerte.

Como había predicho Faraday, la vibración de las cargas produce radiación electromagnética. La frecuencia de la vibración es la frecuencia de la onda producida. Las frecuencias altas producen luz violeta y ultravioleta, mientras que las frecuencias bajas producen luz roja e infrarroja.

Las teorías más fundamentales de la física están formuladas en términos de campos. La «muleta mental» de Faraday se ha convertido en el pilar sobre el que descansa toda la física.

La fuerza eléctrica —por no decir electromagnética— es la única fuerza de la que necesitamos hablar en este libro. Junto con la gravedad, es la

única que experimentamos en la vida cotidiana. (Aunque todos los cuerpos ejercen fuerzas gravitatorias, la gravedad sólo es apreciable cuando al menos uno de los cuerpos implicados es muy masivo, como es el caso de un planeta.) Las fuerzas entre átomos son esencialmente eléctricas.

Cuando tocamos a alguien, la presión de nuestro contacto es una fuerza eléctrica. Los electrones de los átomos de nuestra mano repelen los electrones de los átomos de la otra persona. Si llamamos a alguien por teléfono, es la fuerza eléctrica la que transporta el mensaje a través de los hilos y del espacio. Los átomos que componen la materia sólida están cohesionados por fuerzas eléctricas. Las fuerzas eléctricas son responsables de toda la química y, por consiguiente, subyacen tras toda la biología. Vemos, oímos, olemos, gustamos y tocamos con fuerzas eléctricas. Los procesos cerebrales son electroquímicos y, por ende, en última instancia eléctricos.

¿Cabe explicar nuestro pensamiento, nuestra conciencia, totalmente y en última instancia a partir de de la electroquímica cerebral? ¿Acaso nuestra sensación de ser conscientes es una «mera» manifestación de las fuerzas eléctricas? Algunos así lo creen. Otros sostienen que la conciencia es algo más que electroquímica. Exploraremos esta cuestión más adelante.

En la naturaleza hay otras fuerzas aparte de la gravedad y el electromagnetismo. Pero parece que sólo hay otras dos: las llamadas «fuerza fuerte» y «fuerza débil». Ambas tienen que ver con las interacciones de las partículas que componen los núcleos atómicos (así como objetos creados fugazmente por las colisiones entre partículas de alta energía). Estas fuerzas no tienen efectos apreciables más allá de las dimensiones del núcleo atómico, y no son relevantes para el tema de este libro.

Energía

La energía es un concepto que empapa la física, la química, la biología y la geología, así como la tecnología y la economía. Ha habido guerras por la energía química almacenada en el petróleo. El aspecto crucial de la energía es que, aunque su forma puede cambiar, la cantidad total de energía permanece constante. Este hecho, la «conservación de la energía», es la «primera ley de la termodinámica». Pero ¿qué es la energía? La definiremos desde varias de sus diferentes formas.

Para empezar, está la energía del movimiento. Cuanto mayor sea la masa y la velocidad de un objeto móvil, mayor es su «energía cinética». La energía asociada al movimiento de objetos es energía cinética.

Cuanto mayor es la altura desde la que cae una piedra, más veloci-

dad adquiere y mayor es su energía cinética. Una piedra sostenida a cierta altura tiene el *potencial* de adquirir cierta velocidad de caída y, con ello, cierta energía cinética. Tiene una «energía potencial» gravitatoria, que es mayor cuanto más grande es el objeto o mayor es su altura sobre el suelo. La suma de la energía cinética y la energía potencial de una piedra, su energía *total*, permanece constante mientras la piedra cae. Éste es un ejemplo de la ley de conservación de la energía.

Por supuesto, una vez la piedra choca contra el suelo tanto su energía cinética como su energía potencial se anulan. La energía de la piedra misma no se conserva. Pero la energía total sí. En el impacto, la energía de la piedra se transfiere al movimiento aleatorio interno de los átomos del suelo y de la propia piedra. Ahora esos átomos vibran con más energía. El movimiento aleatorio de los átomos es la descripción microscópica de la energía térmica (el calor). Allí donde impacta la piedra, el suelo se calienta. La energía transferida a los átomos vibrantes es igual a la energía perdida por la piedra en el impacto.

Aunque la energía total se conserve, la energía utilizable decrece. La energía cinética de las piedras en movimiento, o de una cascada, podría emplearse para hacer girar una rueda. Pero en cuanto la energía se convierte en movimiento aleatorio atómico, es inutilizable, salvo como energía térmica. Además, la «segunda ley de la termodinámica» dice que cualquier acción conlleva la inutilización de una parte de la energía. Cuando por razones medioambientales se nos insta a «ahorrar energía», se nos está pidiendo que conservemos la energía *útil*.

Sólo hay una clase de energía cinética, pero muchas de energía potencial. La energía de una piedra a cierta altura es energía potencial gravitatoria. Un muelle comprimido o una goma estirada tienen energía potencial elástica. La energía elástica del muelle puede convertirse en energía cinética si se emplea para lanzar una piedra hacia arriba.

Cuando una carga eléctrica positiva y otra negativa se mantienen separadas, dichas cargas tienen energía potencial eléctrica. Si las liberamos, volarán la una hacia la otra con creciente velocidad y energía cinética. En un átomo, los electrones que orbitan el núcleo tienen energía tanto cinética como potencial.

La energía química de una botella de moléculas de hidrógeno y oxígeno es mayor que la energía que tendrían esas moléculas si se combinaran formando moléculas de agua a la misma temperatura. Si una chispa enciende la mezcla de hidrógeno y oxígeno, la diferencia de energía se manifestará como energía cinética de las moléculas de agua resultantes. En consecuencia, el vapor de agua estará caliente. La energía química almacenada en la mezcla de hidrógeno y oxígeno se habrá convertido en energía térmica.

La energía nuclear es análoga a la energía química, sólo que entre los protones y neutrones que componen el núcleo hay fuerzas nucleares además de eléctricas. Un núcleo de uranio tiene una energía total mayor que los productos de fisión en los que se descompone. Esa diferencia de energía se convierte en energía cinética de los productos de fisión, que a su vez es energía térmica que puede emplearse para producir vapor de agua que impulse turbinas que hagan girar generadores que produzcan potencia eléctrica. También puede convertirse en una bomba.

Cuando un cuerpo caliente emite luz, la energía se transfiere al campo electromagnético en forma de radiación y el cuerpo se enfría, a menos que se le suministre energía adicional. Cuando un átomo emite luz, pasa a un estado de menos energía.

¿Cuántas formas de energía hay? Eso depende de cómo la consideremos. Por ejemplo, la energía química es en última instancia energía eléctrica, aunque a menudo conviene clasificarla aparte. Puede haber formas de energía que aún no conozcamos. Hace pocos años se descubrió que la expansión del universo no se está retardando, como se creía, sino que se está acelerando. La energía causante de esta aceleración tiene un nombre: «energía oscura». Pero todavía se sabe muy poco de ella.

¿Y qué hay de la «energía psíquica»? Los físicos no pueden reclamar la patente del término «energía». Ya se usaba mucho antes de que se introdujera en la física a principios del siglo XIX. Si la presunta energía psíquica pudiera convertirse en una energía manejable por los físicos, sería una forma de la energía de la que hemos estado hablando. Por supuesto, no hay ninguna prueba aceptada de ello.

Relatividad

Alicia rió. «No tiene objeto intentarlo», dijo.
«No se puede creer en cosas imposibles.»
«Se te nota que tienes poca práctica», dijo la Reina. «Cuando yo tenía tu edad, siempre lo hacía durante media hora diaria. Vaya, he llegado a creer hasta seis cosas imposibles antes del desayuno.»

Lewis Carroll, *A través del espejo*

Cuando se aceptó que la luz era una onda, se asumió que algo tenía que oscilar. Los campos eléctrico y magnético serían distorsiones de este

medio vibrante. Puesto que los cuerpos materiales lo atravesaban sin resistencia, dicho medio tenía que ser etéreo. Por eso se le llamó «éter». Y puesto que nos llega luz de las lejanas estrellas, el éter presumiblemente llenaba todo el universo. El movimiento respecto del éter definiría una velocidad *absoluta*, algo que no tendría sentido sin un éter que permita definir una referencia estacionaria en el universo.

En la década de 1890, Albert Michelson y Edward Morley se propusieron determinar la rapidez del movimiento de nuestro planeta a través del éter universal. Un barco viajando en el sentido de las olas las ve pasar más despacio que si viaja en sentido opuesto. La diferencia entre las dos velocidades aparentes de las olas permite determinar la rapidez con la que navega el barco. En esencia, éste es el experimento que Michelson y Morley plantearon, cambiando el barco por la Tierra y las olas por ondas lumínicas.

Para su sorpresa, parecía que la Tierra no se movía en absoluto. Sus medidas de la velocidad de la luz parecían dar el mismo resultado en cualquier dirección. Hubo ingeniosos intentos de resolver esta paradoja mediante la teoría electromagnética, pero todas fracasaron. Albert Einstein tomó otro camino diferente y deshizo el nudo gordiano. Tuvo la audacia de *postular* lo observado: que la velocidad de la luz es siempre la misma con independencia del movimiento del observador. Tomó este extraño resultado como una nueva propiedad de la naturaleza. Dos observadores, aunque se moviesen a velocidades diferentes, verían pasar los rayos de luz a la misma velocidad. Por lo tanto, la velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, llamada «*c*».

En tal caso es imposible medir velocidades absolutas. Cualquier observador que se mueva a velocidad constante puede considerarse en reposo. Puesto que no hay ninguna velocidad absoluta, tan sólo las velocidades *relativas* tienen sentido; de ahí la denominación de «teoría de la relatividad».

Con sólo un poco de álgebra simple, Einstein derivó unas cuantas predicciones comprobables a partir de su postulado. La más importante para nosotros en este libro es que ningún objeto, ni señal, ni información, puede viajar más rápido que la luz. Otra predicción es que la masa es una forma de energía que puede convertirse en otras formas de energía. Se resume como $E = mc^2$. Ambas predicciones se han confirmado, a veces espectacularmente.

La predicción más difícil de creer es que el paso del tiempo es relativo: el tiempo pasa más despacio para un objeto a gran velocidad que para un objeto en reposo.

Supongamos que una mujer de veinte años parte hacia una estrella

distante en un cohete superveloz, dejando a su hermano gemelo aquí en la Tierra. A su vuelta después de treinta años, su hermano ya se ha convertido en un cincuentón. Pero ella, para quien el tiempo ha pasado mucho más lentamente a una velocidad de crucero cercana a la de la luz (digamos un 95%), sólo ha envejecido diez años. La viajera sería ahora veinte años más joven que su hermano gemelo en todos los sentidos físicos y biológicos.

Esta «paradoja de los gemelos» se esgrimió inicialmente como una refutación de la teoría de Einstein. ¿Acaso la viajera no podría haberse considerado en reposo en relación a su hermano, quien se alejaría de ella a gran velocidad? Entonces debería ser ella quien volviera veinte años más vieja que su hermano. Para algunos, este argumento demostraba que la teoría era inconsistente. Pero no es así, porque la situación de ambos hermanos no es simétrica. Sólo los observadores que se mueven a velocidad *constante* (sin cambio ni de rapidez ni de dirección) pueden considerarse en reposo. Esto no valdría para la viajera, que tiene que dar la vuelta (un movimiento acelerado) para volver a casa.

Aunque no es factible construir naves espaciales que trasladen a la gente a velocidades cercanas a la de la luz, la teoría de la relatividad ha sido ampliamente comprobada y confirmada. La mayoría de comprobaciones se ha efectuado con partículas subatómicas. Pero también se han comparado relojes de gran precisión girando alrededor del planeta con relojes en reposo, y se ha comprobado que, a su regreso, los relojes viajeros eran más «jóvenes»: estaban algo atrasados, justo en la medida prevista. Hoy la validez de la teoría de la relatividad está tan bien establecida que sólo una prueba extremadamente comprometedor valdría la pena. Si el lector ha oído hablar de una comprobación de la «relatividad», probablemente se refiere a la teoría de la relatividad *general*, que es la teoría einsteiniana de la gravitación. La teoría de la que hemos estado hablando aquí se conoce más precisamente como teoría de la relatividad *especial*.

Las cosas tan extrañas que nos dice la teoría de la relatividad de Einstein (como que uno podría hacerse más viejo que su propia madre, por ejemplo) resultan difíciles de creer. Pero aceptar el hecho, sancionado experimentalmente, de que los sistemas en movimiento tardan más en envejecer es un buen ejercicio para luego aceptar las cosas aún más extrañas que nos dice la mecánica cuántica.

Ahora estamos preparados para hablar de esas cosas tan extrañas.

Hola, mecánica cuántica

El universo comienza a parecerse más a un gran pensamiento que a una gran máquina

Sir James Jeans

A finales del siglo XIX, la búsqueda de las leyes básicas de la Naturaleza parecía próxima a su meta. Había una sensación de trabajo cumplido. Los físicos presentaban un escenario ordenado que casaba bien con la mentalidad victoriana de la época.

Los objetos tanto en la Tierra como en el cielo obedecían las leyes de Newton. Se presumía que lo mismo hacían los átomos, aunque su naturaleza no estaba clara. Pero, para la mayoría de científicos, lo que restaba de la tarea de describir el universo era un mero relleno y acabado de los detalles de la Gran Máquina.

El determinismo de la física newtoniana, ¿negaba el «libre albedrío»? Los físicos dejaban estas borrosas cuestiones a la filosofía. La definición del territorio que los físicos consideraban propio parecía simple. Había pocos motivos para la búsqueda de un significado más profundo tras las leyes de la Naturaleza. Pero esta visión del mundo intuitivamente sensata no podía dar cuenta de lo que los físicos comenzaban a ver en sus laboratorios. Al principio, las discrepancias parecían sólo pequeños «detalles».

La física clásica explica el mundo bastante bien; son los detalles los que se le resisten. La física cuántica maneja los detalles perfectamente; es el mundo lo que no puede explicar.

La física cuántica no reemplaza la física clásica tal como el sistema heliocéntrico reemplazó la visión antigua con la Tierra en el centro del cosmos. Más bien, la física cuántica *abarca* la física clásica como caso especial. La física clásica es una aproximación extremadamente buena para el comportamiento de objetos mucho mayores que los átomos. Pero si uno escarba en cualquier fenómeno natural —físico, químico, biológico o cosmológico— acaba tropezando con la mecánica cuántica.

La teoría cuántica ha sido sometida a rigurosas pruebas durante ocho décadas. Ninguna de sus predicciones se ha demostrado errónea. Es la teoría más comprobada de toda la ciencia: no tiene rivales. No obstante,

si tomamos en consideración sus implicaciones, nos encontramos con un enigma. La teoría nos dice que la realidad del mundo físico depende de nuestra *observación* del mismo. Esto resulta ciertamente difícil de creer.

Ser difícil de creer plantea un problema. Una respuesta probable a una afirmación difícil de creer es: «No lo entiendo». También está la tendencia a reinterpretarla para hacerla parecer más razonable. La razonabilidad no es un criterio válido de comprensión. Pero he aquí uno: Niels Bohr, uno de los fundadores de la teoría cuántica, dijo que si la mecánica cuántica no le deja a uno perplejo, es que no la ha entendido.

Aunque nuestra presentación pueda parecer novedosa, los hechos experimentales que describimos y las explicaciones cuánticas que ofrecemos no son objeto de discusión. Pero dejaremos de pisar suelo firme cuando exploremos la *interpretación* de la teoría y el encuentro de la física con la conciencia. El significado más profundo de la mecánica cuántica sí es objeto de un creciente debate.

No se requiere una formación técnica para ir hasta la frontera donde la física toca cuestiones que parecen más allá de su dominio, y que los físicos no pueden reclamar como de su competencia exclusiva. Una vez ahí, el lector puede tomar partido en el debate.

6 La intrusión del cuanto en la física

Fue un acto de desesperación.

Max Planck

Los cursos de física raramente optan por una presentación histórica. El curso introductorio de mecánica cuántica es una excepción. Para que los estudiantes entiendan por qué aceptamos una teoría que violenta tanto el sentido común, deben ver cómo los físicos se vieron arrastrados fuera de su complacencia decimonónica por la cruda realidad de sus observaciones de laboratorio.

El revolucionario a su pesar

En la última semana del siglo XIX, Max Planck hizo un anuncio escandaloso: las leyes más fundamentales de la física estaban siendo violadas. Era el primer indicio de la inminente revolución cuántica, de que la visión del mundo que ahora llamamos «clásica» debía abandonarse.

Max Planck, hijo de un distinguido catedrático de Derecho, era cuidadoso, correcto y reservado. Siempre vestía trajes oscuros y camisas bien almidonadas. Educado en la estricta tradición prusiana, Planck respetaba la autoridad, en la sociedad y en la ciencia. No sólo la gente debía cumplir rigurosamente las leyes, sino también la materia. Debía hacerlo. No era lo que se dice un revolucionario.

En 1875, cuando el joven Planck le comunicó al jefe de su departamento de física su intención de convertirse en físico, éste le aconsejó que se dedicara a algo más interesante. La física, le dijo, estaba casi completa: «Todos los descubrimientos importantes ya se han hecho». Pero Planck no se amilanó y, tras completar sus estudios de física, durante años subsistió como *Privatdozent*, un profesor aprendiz, viviendo sólo de las exiguas cuotas pagadas por los estudiantes que asistían a sus clases.

Planck escogió la especialidad más legislada de la física, la termodinámica, el estudio del calor y su interacción con otras formas de energía. Su sólido pero nada espectacular trabajo le valió finalmente una cátedra (aunque se dice que la influencia de su padre también tuvo algo que ver).

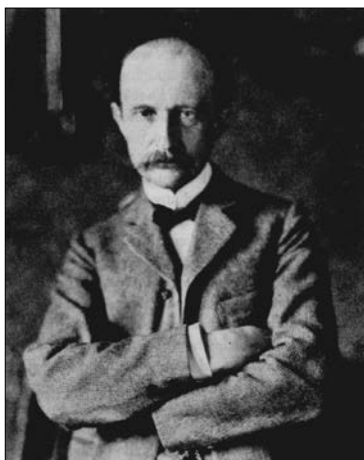


Figura 6.1. Max Planck.

Un fenómeno que seguía inexplicado en termodinámica era la radiación térmica: el espectro —la gama de colores— de la luz emitida por los cuerpos incandescentes. (Este problema era una de las dos «nubes» de Kelvin.) Planck se propuso resolverlo.

Primero veamos lo explicable y luego el problema. Que un atizador calentado al rojo debería radiar luz parece obvio. En el cambio de siglo, aunque la naturaleza de los átomos —ni siquiera su existencia— no estaba clara, se acababan de descubrir los electrones. Se presumía que, en un cuerpo caliente, estas partículas cargadas vibraban, y al hacerlo emitían radiación electromagnética. Puesto que la radiación era la misma con independencia del material de procedencia, esa luz radiada parecía un aspecto fundamental de la Naturaleza cuya comprensión era importante.

La radiación que se observaba parecía razonable. A medida que se calienta un trozo de hierro, sus electrones deberían vibrar con más energía y, presumiblemente, más deprisa, lo que quiere decir a una frecuencia mayor. Por lo tanto, cuanto más caliente está el metal más brillante es la radiación que emite. Al calentarse, su color pasa del infrarrojo invisible al rojo, luego al naranja y finalmente al blanco, cuando la luz emitida cubre toda la gama de frecuencias visibles.

Puesto que nuestros ojos no pueden ver las frecuencias por encima del violeta, los objetos supercalientes, que radian mayormente en el ultravioleta, nos parecerían azulados. En realidad, aquí en la Tierra los materiales se vaporizan antes de alcanzar una temperatura suficiente para volverse azules, pero en el cielo podemos ver estrellas calientes azules.

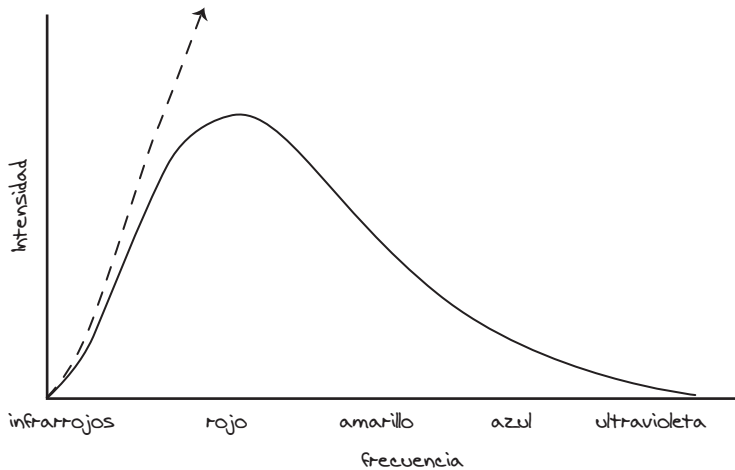


Figura 6.2. Radiación térmica a 6000 °C (línea continua) comparada con la predicción clásica (línea discontinua).

Incluso los objetos fríos «brillan», aunque débilmente y a bajas frecuencias. Si uno se pone la palma de la mano en la mejilla, puede sentir el calor de la luz infrarroja emitida por la piel. El firmamento brilla con una radiación de microondas invisible que es el remanente del destello del *Big Bang*.

En la figura 6.2 hemos representado la intensidad real de la radiación emitida por la superficie del Sol a 6000 °C para cada frecuencia del espectro de colores. Un objeto más caliente que el Sol emite más radiación a todas las frecuencias, con una intensidad máxima a una frecuencia más alta. Pero la intensidad siempre cae a frecuencias muy altas.

La línea discontinua nos indica dónde está el problema. Es la gráfica de la intensidad en función de la frecuencia calculada con las leyes de la física aceptadas en 1900. La predicción se cumplía para el infrarrojo, pero a frecuencias más altas la física clásica daba una respuesta no sólo errónea, sino ridícula: predecía un incremento indefinido de la intensidad de radiación a frecuencias más allá del ultravioleta.

Si esto fuera cierto, todo objeto caliente perdería enseguida su calor mediante una erupción de energía a frecuencias por encima del ultravioleta. Esta embarazosa deducción se conocía como la «catástrofe ultravioleta». Pero nadie podía decir en qué se equivocaba el razonamiento aparentemente correcto que conducía a la catástrofe.

Max Planck se debatió durante años con el problema para derivar una fórmula que se ajustara a los datos experimentales. Frustrado, decidió buscar la solución en sentido inverso. Primero intentaría *adivinar* una

fórmula acorde con los datos y luego, con esa guía, intentaría concebir la teoría apropiada. En una sola tarde, estudiando los datos que le habían proporcionado otros, encontró una fórmula bastante simple que se adecuaba perfectamente.

Si Planck introducía la temperatura del cuerpo, su fórmula le daba la intensidad de radiación correcta a cada frecuencia. La ecuación requería un «factor de corrección» para ajustarla a los datos, una constante que llamó h . Hoy la conocemos como «constante de Planck» y, al igual que la velocidad de la luz, la reconocemos como una propiedad fundamental de la Naturaleza.

Con su fórmula como pista, Planck intentó explicar la radiación térmica en términos de los principios básicos de la física. En los modelos simples, un electrón, aunque ligado al átomo padre, comenzaría a vibrar si fuera empujado por un átomo vibrante vecino en un metal caliente. Esta partícula cargada perdería luego su energía gradualmente emitiendo luz. Esta pérdida de energía se representa en la figura 6.3. De modo similar, un péndulo, o un niño en un columpio, al que se le haga oscilar de un empujón perdería energía continuamente debido a la resistencia del aire.

Sin embargo, toda descripción de electrones radiando energía conforme a la física del momento llevaba a la misma absurda predicción, la catástrofe ultravioleta. Tras una larga pelea, Planck aventuró un supuesto que violaba del todo los principios universalmente aceptados de la física. Al principio no lo tomó en serio. Luego lo describiría como «un acto de desesperación».

Planck asumió que un electrón sólo podía radiar energía en paquetes, o «cuantos». Además, cada cuanto emitido tendría una energía igual al número h de su fórmula multiplicado por la frecuencia de vibración del electrón.

De esta forma, un electrón vibraría por un tiempo sin perder energía en forma de radiación. Luego, de manera aleatoria y *sin causa*, sin ninguna fuerza aplicada, radiaría súbitamente un cuanto de energía en la forma de un pulso de luz. (Los electrones también ganarían energía cedida por los átomos calientes mediante tales «saltos cuánticos».) La figura 6.4 representa dicha pérdida de energía a saltos (la línea discontinua es la pérdida de energía gradual predicha por el modelo clásico).

Planck estaba permitiendo a los electrones pasar por encima de las leyes del electromagnetismo y la ley universal del movimiento de Newton. Sólo esta alocada premisa le permitía obtener la fórmula que describía correctamente la radiación térmica.

Si este comportamiento de saltos cuánticos es una ley de la Naturaleza, debería aplicarse a todo. ¿Por qué, entonces, las cosas que vemos a

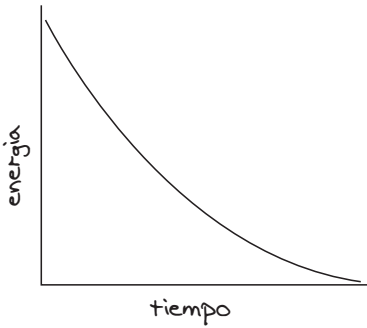


Figura 6.3. Energía perdida por una partícula cargada según la física clásica.

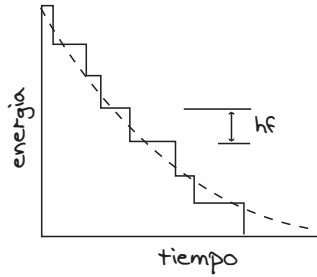


Figura 6.4. Energía perdida por una partícula cargada según Planck.

nuestro alrededor se comportan de manera continua? ¿Por qué no vemos a los niños columpiarse a saltos cuánticos? Es cuestión de número, y h es un número extremadamente pequeño.

Aparte de la pequeñez de h , la frecuencia de la oscilación de un niño en un columpio es mucho más baja que la frecuencia de vibración del electrón, por lo que los saltos cuánticos de energía (h veces la frecuencia) son mucho menores para el niño. Y, por supuesto, la energía total de un niño columpiándose es mucho mayor que la de un electrón vibrando. Por lo tanto, el número de cuantos implicados en el movimiento del niño es inmensamente mayor que el número de cuantos implicados en el movimiento del electrón. Así pues, un salto cuántico (un incremento de energía de la magnitud de un cuanto) es de lejos demasiado pequeño para ser apreciable por el niño en su columpio.

Pero volvamos a la época de Planck y la reacción a su solución del problema de la radiación térmica. Su fórmula se ajustaba bien a los datos experimentales, pero su explicación parecía introducir más confusión que el problema que pretendía resolver. La propuesta de Planck parecía ridícula. Pero nadie rió, al menos no en público. Herr Professor Planck era un hombre demasiado importante. Su sugerencia de los saltos cuánticos simplemente fue desestimada.

Los físicos no estaban dispuestos a tirar por la borda las leyes fundamentales de la mecánica y el electromagnetismo. Aunque las leyes clásicas ofrecieran una predicción absurda de la luz emitida por los cuerpos radiantes, esos principios básicos parecían cumplirse en el resto de fenómenos. Y tenían sentido. Los colegas de Planck pensaban que al final se encontraría una solución razonable al problema. El propio Planck estaba de acuerdo y prometió seguir buscándola. La revolución cuántica llegó pidiendo excusas, y casi sin hacer ruido.

En los años que siguieron, Planck llegó incluso a temer las consecuencias *sociales* negativas de la mecánica cuántica. Si los constituyentes fundamentales de la materia estaban eximidos del cumplimiento de las leyes que dictan el comportamiento correcto, también la gente podría creerse eximida de sus responsabilidades y deberes. Al revolucionario a su pesar le habría gustado apagar la revolución que él mismo encendió.

El técnico de tercera

Su tardanza en comenzar a hablar hizo que los padres de Albert Einstein llegaran a temer que el pequeño padeciera retraso mental. Más adelante, sin embargo, se convirtió en un estudioso ávido e independiente de aquello que le interesaba. Pero su disgusto por la maquinales instrucciones del *Gymnasium* (instituto de enseñanza secundaria) hizo que se le tomara por un mal estudiante. Cuando el director del instituto fue inquirido acerca de la orientación profesional de Albert, predijo sin dudar: «No importa; nunca tendrá éxito en nada».

Los padres de Einstein dejaron Alemania para afincarse en Italia después de que el negocio electroquímico familiar se fuera a pique. Allí les fue algo mejor con su nuevo negocio. El joven Einstein pronto se independizó. Se presentó al examen de ingreso en el Instituto Politécnico de Zúrich, pero no pasó. Al año siguiente lo volvió a intentar y esta vez sí fue admitido. Ya graduado, no consiguió optar a un puesto de *Privatdozent*. Tampoco prosperó su solicitud de una plaza de profesor en el *Gymnasium*. Por un tiempo Einstein vivió de dar clases particulares a estudiantes de secundaria con problemas. Al final, a través de la influencia de un amigo, obtuvo un empleo en la oficina suiza de patentes.

Su cometido como experto técnico de tercera clase consistía en escribir resúmenes de solicitudes de patente para que sus superiores las evaluaran. A Einstein le gustaba aquel empleo porque, aunque vigilando la puerta por si entraba un supervisor, le dejaba tiempo para trabajar en sus propios proyectos.

Inicialmente, Einstein continuó trabajando en el tema de su tesis doctoral, la estadística del movimiento de los átomos en un líquido. Este trabajo pronto se convirtió en la mejor evidencia de la naturaleza atómica de la materia (algo que aún era objeto de debate por entonces). A Einstein le llamó la atención la similitud matemática entre la ecuación del movimiento atómico y la ley de radiación de Planck. ¿Podría ser que la luz no sólo se pareciera a los átomos matemáticamente, sino también físicamente?

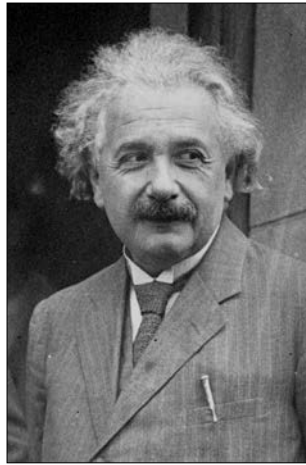


Figura 6.5. Albert Einstein. Cortesía del California Institute of Technology y de la Universidad Hebrea de Jerusalén.

Si así fuera, ¿podría la luz, al igual que la materia, venir en paquetes compactos? Puede que los pulsos de energía lumínica emitidos en los saltos cuánticos no se expandan en todas direcciones como había supuesto Planck. ¿Podría ser que la energía estuviera confinada en una región pequeña? ¿Podría haber átomos de luz, igual que hay átomos de materia?

Einstein supuso que la luz es un flujo de paquetes compactos o «fotones» (un término que se acuñaría más tarde). Cada fotón tendría una energía igual al cuanto de Planck (la constante de Planck multiplicada por su frecuencia). Los fotones se crearían cuando los electrones emiten luz, y desaparecerían cuando la luz es absorbida.

Para aportar alguna prueba de su hipótesis, Einstein se puso a buscar algo que pusiera de manifiesto el aspecto granular de la luz. No tardó en encontrarlo. Se sabía que la luz que incidía sobre un metal podía hacer que se desprendieran electrones. Este «efecto fotoeléctrico» se conocía desde hacía veinte años.

La situación era confusa. A diferencia de la radiación térmica, donde una ley universal valía para todos los materiales, el efecto fotoeléctrico era diferente para cada sustancia. Además, los datos eran imprecisos y poco reproducibles.

Pero la calidad de los datos no importaba. Las *ondas* de luz no deberían arrancar electrones de los metales. Los electrones están fuertemente ligados. Aunque dentro de un metal pueden moverse libremente, no pueden escapar de él con facilidad. Se pueden extraer electrones a

base de calentar el metal, pero se requieren temperaturas muy elevadas. También se puede someter el metal a un campo eléctrico, pero éste debe ser muy intenso. No obstante, incluso una luz tenue, correspondiente a un campo eléctrico extremadamente débil, es capaz de arrancar electrones. Cuanto más tenue es la luz, menos electrones se desprenden. Pero, por muy débil que sea la iluminación, siempre se desprenden algunos.

Einstein extrajo aún más información de sus deficientes datos. Los electrones salían despedidos con más energía cuando la luz era azul o ultravioleta. Con luz amarilla, de frecuencia más baja, su energía era inferior. La luz roja no solía arrancar electrones. Cuanto mayor era la frecuencia de la luz, mayor era la energía de los electrones emitidos por el metal.

El efecto fotoeléctrico era justo lo que Einstein necesitaba. La ley de radiación de Planck implicaba que la luz venía dada en paquetes, los cuantos, cuya energía era mayor cuanto más alta era la frecuencia. Si los cuantos realmente eran paquetes compactos, toda la energía de cada fotón podía concentrarse en un solo electrón. Un único electrón que absorbiera un fotón ganaría un cuanto de energía.

En tal caso, la luz (sobre todo la luz de alta frecuencia con sus fotones de alta energía) podía dar a los electrones energía suficiente para hacerles salir despedidos del metal. Cuanto mayor fuera la energía del fotón, mayor sería la energía del electrón desprendido. Por debajo de cierta frecuencia, los fotones no tendrían energía suficiente para arrancar un electrón del metal, y no habría emisión electrónica.

Einstein explicó todo esto con claridad en 1905:

De acuerdo con la propuesta aquí presentada, la energía en un rayo de luz que emana de una fuente concreta no se distribuye de manera continua sobre volúmenes de espacio cada vez más grandes, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía, localizados en puntos del espacio, que se mueven sin subdividirse, y que se absorben y se emiten sólo como unidades.

Aceptando que la luz viene dada como un flujo de fotones y que un solo electrón absorbe toda la energía de un fotón, Einstein aplicó el principio de conservación de la energía para obtener una fórmula simple que relacionaba la frecuencia de la luz con la energía de los electrones emitidos. La hemos representado en la figura 6.6. Los fotones con una energía menor que la energía de enlace de los electrones en el material no podían arrancar ningún electrón.

Un aspecto llamativo de la hipótesis fotónica de Einstein es que la

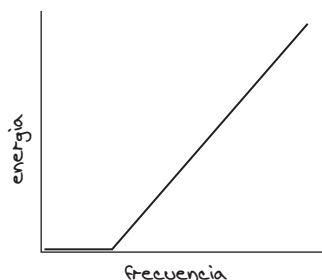


Figura 6.6. Energía de los electrones emitidos en función de la frecuencia de la luz.

pendiente de la línea recta representada es precisamente la constante de Planck, h . Hasta entonces, la constante de Planck sólo había sido un número introducido en la fórmula de Planck para ajustarla a la radiación térmica observada. No aparecía en ninguna otra parte de la física. Antes de la hipótesis fotónica de Einstein, no había ninguna razón para pensar que la emisión electrónica inducida por la luz tuviera algo que ver con la radiación emitida por los cuerpos calientes. Esta pendiente fue el primer indicio de que el cuanto era universal.

Diez años después del trabajo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, el físico norteamericano Robert Millikan comprobó que la fórmula de Einstein predecía «exactamente los resultados observados» en cada caso. Aun así, Millikan dijo que la hipótesis fotónica en la que se basaba la fórmula era «totalmente insostenible», y calificó la sugerencia de Einstein de «temeraria».

Millikan no era el único que pensaba así. La comunidad de físicos recibió el postulado del fotón «con incredulidad y un escepticismo que rayaba la sorna». No obstante, ocho años después de su controvertida propuesta, Einstein se había ganado una considerable reputación como físico teórico por muchos otros logros, lo que le valió una nominación a la Academia Prusiana de la Ciencia. Max Planck, en su carta de apoyo a Einstein, se sintió obligado a defenderle: «El que a veces haya errado el tiro en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis de los cuantos de luz, ciertamente no puede tomarse demasiado en su contra...».

Incluso cuando Einstein recibió el Premio Nobel en 1922 por su investigación del efecto fotoeléctrico, la citación evitó toda mención explícita del fotón, que seguía sin ser admitido a pesar de haber cumplido ya diecisiete años. Un biógrafo de Einstein escribe: «De 1905 a 1923, [Einstein] fue un caso aparte al ser el único, o casi el único, que se tomaba el cuanto de luz en serio». (Explicaremos lo que ocurrió en 1923 más adelante en este mismo capítulo.)

Aunque la reacción de la comunidad de físicos a los fotones de Einstein fue, en una palabra, de rechazo, no se debió a una especial torpeza. Estaba *probado* que la luz era una onda. La luz exhibía interferencia, cosa que no podía decirse de un flujo de partículas discretas.

Recordemos nuestra explicación de la interferencia en el capítulo 5. La luz que atraviesa una rendija ilumina una pantalla de manera más o menos uniforme. Si se abre una segunda rendija, aparece un patrón de bandas oscuras cuyo espaciado depende de la separación entre las rendijas. En estas bandas oscuras, las crestas de onda procedentes de una rendija coinciden con los valles procedentes de la otra, de manera que las ondas procedentes de una y otra rendija se cancelan mutuamente. La interferencia demuestra que la luz es una onda que se propaga.

A pesar de ello, Einstein sostenía que el efecto fotoeléctrico mostraba que la luz era un flujo de fotones (diminutos proyectiles compactos). Ahora bien, ¿cómo podían aquellos diminutos proyectiles producir los patrones de interferencia exhibidos por la luz?

En el capítulo anterior decíamos que el argumento de que unos proyectiles diminutos no podían causar interferencia no era incuestionable. ¿No podrían desviarse mutuamente de algún modo para dar el patrón de bandas luminosas y oscuras alternadas? Esta vía de escape en el argumento ha sido sellada. La interferencia puede observarse incluso con una luz tan débil que sólo haya un fotón presente cada vez.

Si tomamos la interferencia, algo explicable sólo en términos de ondas, podemos *probar* que la luz es una onda que se propaga. En cambio, si tomamos el efecto fotoeléctrico, donde cada electrón absorbe un cuanto de luz, podemos *probar* que la luz es un flujo de diminutos objetos compactos. Aquí parece haber una incongruencia. (Recordemos que algo parecido se veía en Eug Ahne Poc: nuestro visitante podía optar por



Figura 6.7. Un patrón de interferencia.

probar que la pareja era una entidad repartida entre ambas chozas, o podía optar por probar que la pareja era una entidad concentrada en una sola choza.)

Aunque la naturaleza paradójica de la luz turbaba a Einstein, siguió aferrado a su hipótesis fotónica. Declaró que en la Naturaleza existía un misterio al que debíamos enfrentarnos. No pretendía resolver el problema. Tampoco nosotros pretendemos resolverlo en este libro. Cien años después, el misterio sigue con nosotros. Las implicaciones de nuestra opción de probar dos cosas contradictorias van más allá de la física, hasta la naturaleza de la observación consciente. Es el enigma cuántico. Como veremos, para desentrañarlo se han propuesto con toda seriedad hipótesis que van muy lejos.

En 1906, un año después de que descubriera la naturaleza cuántica de la luz, estableciera firmemente la naturaleza atómica de la materia y formulara la teoría de la relatividad, Einstein fue ascendido por la oficina de patentes suiza a experto técnico de *segunda* clase.

El posdoc

Niels Bohr creció en el seno de una familia acomodada y respetada que cultivaba el pensamiento independiente. Su padre, un eminente catedrático de fisiología en la Universidad de Copenhague, estaba interesado en la filosofía tanto como en la ciencia, e inculcó estos intereses en sus dos hijos. El hermano de Niels, Harald, se convirtió en un sobresaliente matemático. Los primeros años de Niels Bohr fueron de comprensión y atención. A diferencia de Einstein, nunca fue el rebelde de la familia.

En el colegio universitario, todavía en Dinamarca, Bohr obtuvo una medalla por sus ingeniosos experimentos con fluidos. Pero pasemos a 1912, cuando, recién doctorado, Bohr viajó a Inglaterra como «posdoc», es decir, estudiante de posdoctorado.

Por entonces la naturaleza atómica de la materia ya contaba con una aceptación generalizada, pero la estructura interna del átomo se desconocía. En realidad, ésta era una cuestión controvertida. Los electrones, partículas con carga negativa miles de veces más ligeras que cualquier átomo, habían sido descubiertos una década antes por J.J. Thompson. Un átomo eléctricamente neutro debía tener en alguna parte una carga positiva que igualara la de sus electrones negativos, y esa carga positiva presumiblemente correspondía a la mayor parte de la masa del átomo. ¿Cómo se distribuían los electrones y la carga positiva de un átomo?

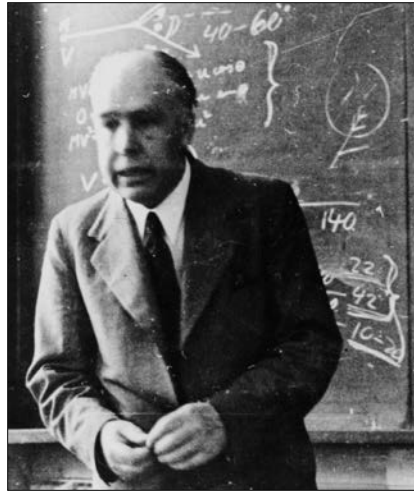


Figura 6.8. Niels Bohr. Cortesía del American Institute of Physics.

Thompson había optado por el supuesto más simple: la carga positiva masiva llenaba uniformemente el volumen atómico, y los electrones (uno en el hidrógeno y casi un centenar en los átomos más pesados conocidos) se distribuían por la masa positiva como pasas en un pudín. Los teóricos intentaban calcular cómo las distintas distribuciones electrónicas podrían dar a cada elemento sus propiedades características.

Había otro modelo alternativo de átomo. En la Universidad de Manchester, Ernest Rutherford había explorado el átomo a base de disparar partículas alfa (átomos de helio desprovistos de sus electrones) a través de una lámina muy fina de oro, y había observado algo inconsistente con la presunta uniformidad de la distribución de la masa positivamente cargada. Alrededor de una partícula alfa de cada 10.000 salía rebotada con un ángulo grande, a veces incluso hacia atrás. El experimento se comparó con lanzar ciruelas (partículas alfa) a través de un pudín de pasas: la colisión de una ciruela con una pequeña pasa (un electrón) no podía modificar mucho su trayectoria. Rutherford concluyó que sus partículas alfa estaban colisionando con una carga positiva, y que casi toda la masa del átomo estaba concentrada en una pequeña bola de carga positiva, un «núcleo».

Ahora bien, si los electrones negativos eran atraídos por el núcleo positivo, ¿por qué no caían hacia el centro del átomo? Por la misma razón por la que los planetas no se precipitan hacia el Sol: porque están en órbitas fijas alrededor del centro del sistema solar. Rutherford decidió que los electrones orbitaban en torno a un núcleo positivo pequeño y masivo.

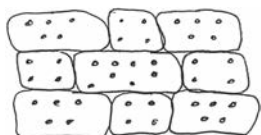


Figura 6.9. El modelo atómico del pudín de pasas de Thompson.

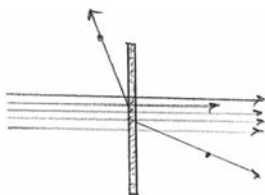


Figura 6.10. El experimento de Rutherford con partículas alfa.



Figura 6.11. Inestabilidad del modelo atómico de Rutherford.

Pero el modelo planetario de Rutherford tenía un problema: la inestabilidad. Puesto que un electrón tiene carga, debería emitir radiación a medida que recorre su órbita. Los cálculos mostraban que un electrón debería perder su energía en forma de luz y caer en espiral hasta chocar con el núcleo en menos de una millonésima de segundo.

La mayoría de físicos consideraba que la inestabilidad del modelo planetario del átomo era una dificultad más insalvable que la incapacidad del modelo del pudín de pasas para explicar las desviaciones de las partículas alfa al atravesar una lámina de oro. Pero Rutherford, un individuo con una confianza en sí mismo a toda prueba, *sabía* que su modelo planetario era esencialmente correcto.

Cuando el joven posdoctorado Bohr llegó a Manchester, Rutherford le asignó la tarea de explicar la estabilidad del átomo planetario. La estancia de Bohr en Manchester duró sólo seis meses, presumiblemente porque se le acabó el dinero (aunque parece probable que su ansia de volver a Dinamarca para casarse con la bella Margrethe contribuyera a adelantar su regreso). Pero durante el año siguiente, mientras enseñaba en la Universidad de Copenhague, Bohr continuó trabajando en el problema de la estabilidad.

Cómo encontró la solución no está claro. Pero mientras otros físicos intentaban derivar el cuanto de energía y la constante de Planck, h , de las leyes físicas clásicas, Bohr optó por la estrategia de «si no puedes vencerles, únete a ellos». Simplemente aceptó la cuantización como algo fundamental. Después de todo, le había funcionado a Planck, y también a Einstein.

Bohr escribió una fórmula muy simple que venía a decir que el «momento angular», el movimiento de rotación de un objeto, sólo podía darse en unidades cuánticas. Si así fuera, sólo estarían permitidas ciertas órbitas. Y lo que es más importante, la fórmula implicaba que había una órbita que era la mínima posible. Así, por decreto, la fórmula de Bohr «prohibía» que un electrón cayera hasta el núcleo. Si su fórmula ad hoc era correcta, el átomo planetario era estable.

Sin otras pruebas, la idea de la cuantización de Bohr habría sido rechazada sin contemplaciones. Pero, con su fórmula, Bohr pudo calcular fácilmente todas las energías permitidas para un átomo con un solo electrón, esto es, para el átomo de hidrógeno. Y a partir de esas energías pudo calcular las frecuencias particulares, o colores, de la luz que podían emitir los átomos de hidrógeno eléctricamente excitados en una «descarga» (algo parecido a una luz de neón, sólo que con hidrógeno en lugar de neón).

Esas frecuencias habían sido detenidamente estudiadas durante años, aunque Bohr no lo sabía de entrada. Por qué se emitían sólo ciertas frecuencias era un completo misterio. El espectro de frecuencias, característico de cada elemento, exhibía una bonita gama de colores, pero no se sabía si esto tenía más significado que los patrones específicos de las alas de las mariposas. Ahora, sin embargo, la regla cuántica de Bohr predecía el espectro de frecuencias del hidrógeno con una asombrosa precisión (del orden de las diezmilésimas). Aun así, aunque lo que Bohr tenía ante sus ojos eran *cuantos* de luz emitidos por átomos, él, como la práctica totalidad de sus colegas, seguía sin adherirse a la idea del fotón compacto de Einstein.

Algunos físicos desmerecieron la teoría de Bohr como «malabarismos numéricos». Einstein, en cambio, dijo que era «uno de los más grandes descubrimientos». Otros pronto estuvieron de acuerdo. La idea básica de Bohr enseguida se aplicó ampliamente en física y química. Nadie entendía por qué funcionaba; pero funcionaba. Y para Bohr eso era lo importante. La actitud pragmática de Bohr hacia el cuanto le reportó un éxito rápido.

El triunfo temprano de Bohr con sus cuantizaciones contrasta con la larga marginación de Einstein y su creencia en el casi universalmente rechazado fotón. Obsérvese cómo se reflejan las experiencias de ambos hombres al principio de su carrera en su amigable y sempiterno debate sobre la mecánica cuántica.

El príncipe

Louis de Broglie era el *príncipe* Louis de Broglie. Su aristocrática familia quería que hiciera carrera en el servicio diplomático francés, y el joven príncipe Louis estudió historia en La Sorbona. Pero, tras licenciarse en filosofía y letras, se pasó a la física teórica. Antes de que pudiera hacer mucha física, estalló la primera guerra mundial y De Broglie sirvió en el ejército francés, destinado en una estación de telégrafo ubicada en la Torre Eiffel.



Figura 6.12. Louis de Broglie. Cortesía del American Institute of Physics.

Cuando acabó la guerra, De Broglie comenzó a trabajar en su tesis doctoral, atraído, en sus propias palabras, «por el extraño concepto del cuanto». Tres años más tarde leyó el reciente trabajo del físico norteamericano Arthur Compton. Entonces le vino una idea a la cabeza. Esa idea condujo a una corta tesis doctoral que al final le valió el Premio Nobel.

En 1923, casi dos décadas después de que Einstein propusiera la idea del fotón, Compton había descubierto para su sorpresa que cuando la luz rebotaba en un electrón cambiaba de frecuencia. Esto no es propio de las ondas: cuando una onda se refleja en un objeto estacionario, cada cresta incidente da lugar a otra cresta reflejada, de manera que la frecuencia de la onda no cambia al reflejarse. Por otro lado, si Compton aceptaba que la luz era un flujo de partículas, *cada una con la energía de un fotón de Einstein*, todo cuadraba.

El «efecto Compton» hizo que los físicos finalmente aceptaran la realidad de los fotones. Era verdad que en ciertos experimentos la luz exhibía propiedades ondulatorias y en otros exhibía propiedades corpusculares. Siempre que se conocieran las condiciones en las que aparecían unas u otras propiedades, la idea del fotón parecía menos problemática que buscar una explicación alternativa del efecto Compton. Pero Einstein, que seguía siendo «un caso aparte», insistió en que el misterio no se había resuelto: «Todo hijo de vecino piensa que sabe lo que es el fotón, pero se equivoca».

De Broglie compartía la impresión de Einstein de que había un significado profundo en la dualidad de la luz, que podía ser o bien una onda extensa o bien un flujo de partículas compactas. Se preguntó si en la Na-

	Onda	partícula
luz	✓	✓
Materia	?	✓

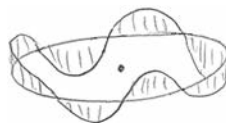


Figura 6.13. La simetría de De Broglie.

Figura 6.14. Longitudes de onda alrededor de la órbita de un electrón.

turalidad habría simetría. Si la luz era o bien onda o bien partícula, quizá la materia también fuera o bien partícula o bien onda. Dedujo una expresión simple para la longitud de onda de una partícula de materia. Esta fórmula de la «longitud de onda de De Broglie» para una partícula es una de las primeras cosas que aprende todo estudiante de mecánica cuántica.

La primera prueba de fuego de la fórmula provino de un enigma que había inspirado a De Broglie: si un electrón en un átomo de hidrógeno fuera una partícula compacta, ¿cómo «sabía» calibrar una órbita para instalarse sólo en las permitidas por la entonces ya famosa fórmula de Bohr?

Las longitudes de onda de una cuerda de violín requeridas para producir un tono dado están determinadas por el número de longitudes de onda de vibración que encajan en la longitud de la cuerda. Similarmente, si el electrón fuera una onda, las órbitas permitidas vendrían dadas por el número de longitudes de onda del electrón que encajan en la circunferencia de la órbita. Aplicando esta idea, De Broglie fue capaz de *derivar* la regla cuántica, hasta entonces ad hoc, de Bohr. (En el violín, lo que vibra es el material de la cuerda. Lo que vibra en el caso de la «onda» del electrón era un misterio entonces y lo sigue siendo, incluso más profundo, ahora.)

No está claro hasta qué punto De Broglie se tomó en serio su propia conjetura, pero es seguro que en su momento no la reconoció como la avanzadilla de una visión revolucionaria del mundo. Más adelante, él mismo afirmó:

Quien adelanta las ideas fundamentales de una nueva doctrina a menudo no advierte de entrada todas las consecuencias; guiado por sus intuiciones personales, constreñido por la fuerza interna de las analogías matemáticas, se deja llevar, casi a pesar suyo, hacia un camino de cuyo destino final él mismo es ignorante.

De Broglie presentó su especulación a su director de tesis, Paul Langevin, famoso por su obra sobre el magnetismo. Langevin no se mostró

impresionado. Le dijo que, para derivar la fórmula de Bohr, no había hecho más que reemplazar una premisa ad hoc por otra, y que la suposición de que los electrones podían comportarse como ondas parecía ridícula.

Si De Broglie hubiera sido un estudiante graduado corriente, Langevin posiblemente hubiera descartado su idea sin más. Pero se trataba del *príncipe* Louis de Broglie. La aristocracia tenía peso, incluso en la república francesa. Así que, sin duda para cubrirse las espaldas, Langevin le pidió un comentario sobre la idea de su discípulo al físico más eminente del mundo. Einstein replicó que aquel joven había «levantado una esquina del velo que cubre al Viejo».

Mientras tanto, en los laboratorios de la compañía telefónica de Nueva York hubo un accidente menor. Clinton Davisson estaba experimentando con la dispersión de electrones por superficies metálicas. Aunque los intereses de Davisson eran mayormente científicos, la compañía telefónica estaba concibiendo amplificadores de válvulas de vacío para transmisiones telefónicas, y para eso el comportamiento de los electrones que colisionan con el metal era importante.

Sobre una superficie metálica rugosa, los electrones solían rebotar en todas direcciones. Pero después de advertir que una fuga había dejado entrar aire en su sistema de vacío, lo que había causado la oxidación de una superficie de níquel, Davisson calentó el metal para eliminar el oxígeno. El níquel cristalizó formando una serie de grietas. Ahora los electrones rebotaban en unas pocas direcciones bien definidas. Era un patrón de interferencia que demostraba la naturaleza ondulatoria del electrón. Aquel descubrimiento venía a confirmar la suposición de De Broglie de que los objetos materiales también podían comportarse como ondas.

Abríamos este capítulo con el primer indicio del cuanto en 1900. Fue un indicio en gran medida desestimado. Lo cerramos en 1923, con unos físicos finalmente obligados a admitir la dualidad onda-partícula: un fotón, un electrón, un átomo, una molécula, en principio cualquier objeto, puede ser compacto o extenso. Podemos demostrar que algo es mayor que una hogaza de pan o menor que un átomo. Podemos escoger cuál de estas dos características contradictorias queremos poner de manifiesto. La realidad física de un objeto depende de cómo *elijamos* observarlo.

Los físicos habían topado con la conciencia, pero aún no se habían dado cuenta. La constatación de ese contacto llegó unos años más tarde, tras el descubrimiento por Schrödinger de una nueva ley universal del movimiento. Ese descubrimiento es el tema del próximo capítulo.

La ecuación de Schrödinger

La nueva ley universal del movimiento

Si vamos a tener que seguir aguantando esos malditos saltos cuánticos, lamento haber tenido algo que ver con la teoría cuántica.

Erwin Schrödinger

A principios de los años veinte del pasado siglo, los físicos habían aceptado el hecho de que, según el experimento elegido, tanto la materia como la luz podían manifestarse como paquetes compactos o como ondas extensas. Pocos se molestaban en intentar comprender esta aparente contradicción. La significación de esta paradoja vino de la mano de la ecuación de Schrödinger. Pero su descubridor, Erwin Schrödinger, no buscaba significación alguna. Por entonces contemplaba las ondas de materia de De Broglie sólo como una manera de librarse de «los malditos saltos cuánticos» de Bohr.

Erwin Schrödinger, hijo único de una próspera familia vienesa, fue un estudiante sobresaliente. En su adolescencia se sintió intensamente atraído por el teatro y el arte. Ambos eran ámbitos de rebelión contra la sociedad burguesa de la Viena de finales del siglo XIX. El propio Schrödinger rechazaba la moralidad victoriana en la que fue educado. A lo largo de su vida dedicó mucha energía a intensos romances, a pesar de que siempre estuvo casado con la misma mujer.

Tras servir en la primera guerra mundial como teniente del ejército austriaco en el frente italiano, Schrödinger comenzó a ejercer de profesor en la Universidad de Viena. Fue entonces cuando abrazó las enseñanzas del misticismo Vedanta, de procedencia india, pero parece haber mantenido esta inclinación filosófica separada de su pensamiento científico. En 1927, justo después de su espectacular trabajo en mecánica cuántica, fue invitado por la Universidad de Berlín a suceder a Planck. Aunque no era judío, la llegada de Hitler al poder en 1933 le hizo abandonar Alemania. Tras pasar por Inglaterra y Estados Unidos, Schrödin-

ger retornó a su nativa Austria para aceptar un puesto en la Universidad de Graz. Pero la anexión de Austria por Hitler le creó un nuevo problema, porque su salida de Alemania le había puesto en el punto de mira de los nazis. Tras escapar a Italia, pasó el resto de su carrera en la Escuela de Física Teórica de Dublín, Irlanda.

Una ecuación de onda

A pesar de los éxitos de la primera época de la teoría cuántica, centrada en la regla de Bohr, Schrödinger rechazaba una física donde los electrones se movían sólo en «órbitas permitidas» y luego, sin ninguna causa, saltaban abruptamente de una órbita a otra. Y lo expresó con toda franqueza:

Señor Bohr, seguramente debe usted entender que la idea de los saltos cuánticos necesariamente lleva a un disparate. Se dice que el electrón en una órbita estacionaria de un átomo da vueltas periódicamente en una suerte de órbita sin emitir radiación. No hay explicación de por qué no debería radiar; de acuerdo con la teoría de Maxwell, tiene que radiar. Luego el electrón salta a otra órbita y entonces sí emite radiación. ¿La transición es gradual o súbita?... ¿Y qué leyes determinan su movimiento en el salto? En fin, la idea entera de los saltos cuánticos debe considerarse simplemente absurda.

Schrödinger atribuye a las «observaciones breves pero de infinitamente largo alcance» de Einstein el haber llamado su atención sobre la hipótesis de De Broglie de que los objetos materiales podían exhibir una naturaleza ondulatoria. A Schrödinger le gustaba la idea. Las ondas pueden pasar de un estado a otro de manera continua. Los electrones no necesitarían orbitar sin radiar. Podría librarse de los «malditos saltos cuánticos» de Bohr.

Schrödinger quería enmendar las leyes de Newton para dar cabida al comportamiento cuántico de los objetos pequeños y, a la vez, una descripción del mundo donde los electrones y los átomos se comportaran razonablemente. Buscaba una ecuación que rigiese las ondas de materia. Sería una física nueva, una conjetura que debería comprobarse. Lo que buscaba era la *nueva* ecuación universal del movimiento.

Puesto que una ecuación universal tendría que aplicarse también a objetos grandes, comencemos por aquí. A partir de la posición y el movimiento de una piedra lanzada en un momento dado, la ley de Newton predice la posición y el movimiento futuro de la piedra. Similarmente, a partir



Figura 7.1. Erwin Schrödinger. Cortesía del American Institute of Physics.

de la forma inicial de una onda, una ecuación de onda predice la forma de la onda en cualquier momento posterior; describe cómo se propagan las olas a partir del punto donde una piedra ha caído en el agua, o la propagación de las ondas en una cuerda tensa.

El problema es que la ecuación de onda que vale para las olas, la luz y el sonido no vale para las ondas de materia. Las olas, la luz y el sonido se mueven a la velocidad determinada por el medio de propagación. El sonido, por ejemplo, viaja a 330 metros por segundo en el aire. La ecuación de onda que Schrödinger buscaba tenía que permitir a las ondas de materia moverse a *cualquier* velocidad, porque así lo hacen los electrones, los átomos y las pelotas de béisbol.

La inspiración le llegó en 1925, durante unas vacaciones en la montaña con una amiga (su mujer se quedó en casa). Para facilitar su concentración, Schrödinger se llevó con él dos perlas para taparse los oídos y evitar el ruido. Exactamente qué ruido quería evitar no está claro. Tampoco conocemos la identidad de la amiga, ni si fue una inspiración o una distracción. Schrödinger escribió diarios discretamente codificados, pero precisamente el correspondiente a este periodo se ha perdido.

En cuatro artículos publicados a lo largo de los siguientes seis meses, Schrödinger estableció las bases de la mecánica cuántica moderna con una ecuación que describía las ondas de materia. El trabajo fue reconocido de inmediato como un triunfo. Einstein dijo que era obra de un «auténtico genio». Planck dijo que «hacía época». El propio Schrödinger se complacía en pensar que se había librado de los saltos cuánticos:

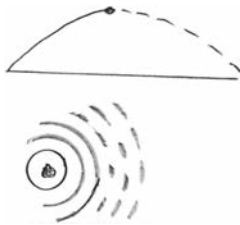


Figura 7.2. La trayectoria de una piedra y la propagación de olas en el agua.

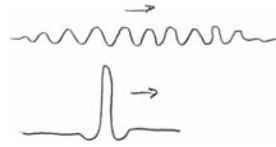


Figura 7.3. Función de onda como una serie de crestas o como una sola.

Apenas es necesario señalar cuánto más gratificante sería concebir una transición cuántica como un cambio de energía de un modo de vibración a otro en vez de contemplarla como un salto de electrones. La variación de modos de vibración puede tratarse como un proceso continuo en el espacio y el tiempo, y que dura mientras persiste el proceso de emisión.

(La ecuación de Schrödinger es en realidad una aproximación no relativista. Esto es, se cumple sólo cuando las velocidades no se acercan demasiado a la de la luz. Las cuestiones conceptuales de las que tratamos siguen estando presentes en el caso más general, y es más simple, más claro y más habitual tratar el enigma cuántico en términos de la ecuación de Schrödinger. Y aunque los fotones viajan a la velocidad de la luz, esencialmente todo lo que decimos vale igualmente para los fotones.)

La historia es más complicada que lo que acabamos de contar, y más agria. Casi a la vez que Schrödinger, un joven discípulo de Bohr, Werner Heisenberg (de quien volveremos a hablar), presentó su propia versión de la mecánica cuántica. Era un método matemático abstracto para obtener resultados numéricos, que excluía cualquier representación gráfica de lo que ocurría. Schrödinger criticó el enfoque de Heisenberg: «Me sentí desalentado, si no repelido, por lo que me parecía un método bastante difícil de álgebra trascendental que se resistía a cualquier visualización». Heisenberg sentía el mismo desdén hacia la concepción ondulatoria de Schrödinger. En una carta a un colega decía: «Cuanto más pondero la parte física de la teoría de Schrödinger, más me disgusta».

Parecía que dos teorías intrínsecamente diferentes explicaban los mismos fenómenos físicos, una posibilidad inquietante sobre la que los filósofos han especulado desde hace tiempo. Pero al cabo de unos meses, Schrödinger demostró que la teoría de Heisenberg era lógicamente equivalente a la suya, sólo que con una representación matemática diferente. La versión

de Schrödinger, más manejable matemáticamente, es la que se suele emplear hoy día.

La función de onda

No obstante, Heisenberg tenía una objeción relativa al aspecto físico de la teoría de Schrödinger. ¿Qué es lo que oscila en la onda de materia de Schrödinger? La representación matemática de la onda se conoce como «función de onda». En cierto sentido, la función de onda de un objeto es el objeto. En la teoría cuántica no existe ningún átomo además de la función de onda del átomo. Pero ¿qué es exactamente la función de onda de Schrödinger en sentido físico? Al principio Schrödinger no lo sabía, y cuando aventuró una respuesta se equivocó. Por ahora, sigamos adelante y veamos algunas funciones de onda que son soluciones de la ecuación. Eso es lo que hizo Schrödinger.

Lo esencial de la mecánica cuántica puede apreciarse con la función de onda de un objeto pequeño simple moviéndose en línea recta, como podría ser un electrón o un átomo. Para generalizar hablaremos de un «objeto», aunque a veces nos concretaremos a un «átomo». Más adelante examinaremos funciones de onda para objetos mayores: una molécula, una pelota de béisbol, un gato y hasta un amigo. Los cosmólogos contemplan la función de onda del universo entero, y así lo haremos nosotros.

Un par de años antes de la inspiración vacacional de Schrödinger, Compton había mostrado que los fotones colisionaban con los electrones como si ambos fueran diminutas bolas de billar. Por otro lado, para exhibir interferencias, los fotones y los electrones tenían que ser cosas extensas. Por ejemplo, cada fotón tenía que atravesar *ambas* rendijas a la vez. ¿Cómo puede un objeto ser a la vez compacto y extenso? Una onda puede ser o compacta o extensa, pero, por supuesto, no puede ser las dos cosas al mismo tiempo.

La función de onda de un átomo móvil podría parecerse mucho a una serie de olas, un «paquete de ondas», viajando en el agua. Una ecuación de onda, para ondas sobre el agua o para ondas de materia, puede describir tanto un paquete extenso con numerosas crestas como un paquete compacto con sólo unas pocas, o incluso una sola cresta desplazándose.

Para objetos grandes, mucho mayores que un átomo, la ecuación de Schrödinger se *convierte* esencialmente en la ecuación universal del movimiento de Newton. Así pues, la ecuación de Schrödinger gobierna no sólo el comportamiento de los electrones y los átomos, sino también el

comportamiento de todo lo que está hecho de átomos: moléculas, pelotas de béisbol y planetas. Dada una función de onda inicial, la ecuación nos dice cómo será la función de onda en cualquier momento posterior. Es la *nueva* ley universal del movimiento. La ecuación de Newton no es más que la aproximación para objetos grandes.

Ondulatoriedad

La ecuación de Schrödinger dice que un objeto en movimiento es un paquete de ondas que viaja. Pero, una vez más, ¿qué es lo que oscila? Piénsese en estas analogías (Schrödinger sin duda lo hizo):

De una zona tormentosa en el océano con grandes olas diremos que es una región de elevada «ondulatoriedad». El ruido de un tambor, en su camino hacia nosotros desde un tamborilero distante, está allí donde la ondulatoriedad de la presión del aire es elevada; ahí es donde *está* el sonido. La parcela brillante donde la luz solar incide en la pared, la región de elevada ondulatoriedad del campo eléctrico, es donde *está* la luz. De algún modo, la ondulatoriedad nos dice dónde *está* algo. Parece razonable trasladar esta idea al caso cuántico.

La ondulatoriedad de un paquete de ondas cuánticas es elevada donde la amplitud de las ondas es grande. Quizá sea ahí donde *está* el objeto. (En la teoría cuántica, la expresión técnica de la ondulatoriedad es el «cuadrado absoluto de la función de onda», y hay una operación matemática para obtenerlo a partir de la función de onda. Mencionamos este término sólo porque puede aparecer en otros textos. «Ondulatoriedad» es más descriptivo.) La ondulatoriedad puede ser fácil de representar si tenemos la función de onda. La indicaremos mediante sombreado: cuanto más oscuro sea el sombreado, mayor la ondulatoriedad.

Cuando consideramos un átomo simplemente como un objeto desplazándose en una dimensión, estamos ignorando su estructura interna. Por supuesto, hay funciones de onda electrónicas *dentro* del átomo. Schrödinger no tardó en calcular la función de onda del electrón en el átomo de hidrógeno y duplicó los resultados de Bohr para los niveles de energía y el espectro del hidrógeno observado, sin necesidad de supuestos arbitrarios. Este logro le convenció de que se había salido con la suya. Estaba eufórico. Pensó que se había librado de los saltos cuánticos. Pero, como veremos, no era así.

La figura 7.5 representa la ondulatoriedad de los tres primeros estados energéticos del único electrón del hidrógeno como secciones transversales de la ondulatoriedad tridimensional del electrón. Se puede vi-

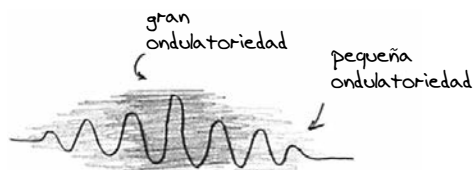


Figura 7.4. Una función de onda y su ondulatoriedad.

sualizar la ondulatoriedad como una nube más o menos densa: cuanto mayor es la densidad, mayor es la ondulatoriedad. Esta clase de representaciones permiten a los químicos hacerse idea de cómo se enlazan átomos y moléculas.

¿Nos dice la ondulatoriedad dónde *está* realmente el objeto? No del todo.

La interpretación inicial (y errónea) de Schrödinger de la ondulatoriedad

Schrödinger sospechó que la ondulatoriedad de un objeto era la distribución del objeto mismo. Por ejemplo, allí donde la nube electrónica es más densa, el material del electrón está más concentrado. Así pues, el electrón mismo estaría distribuido por la extensión de su ondulatoriedad. En tal caso, la ondulatoriedad de uno de los estados del electrón del hidrógeno representados en la figura 7.5 podría metamorfosearse gradualmente en otro estado sin el salto cuántico que Schrödinger tanto detestaba.

Esta interpretación aparentemente razonable de la ondulatoriedad es errónea. La razón es que, aunque la ondulatoriedad de un objeto puede extenderse por una región muy amplia, cuando nos fijamos en un punto particular o bien encontramos allí el objeto en su totalidad o bien no hay ni rastro de él.

Por ejemplo, la ondulatoriedad de una partícula alfa emitida por un núcleo podría abarcar kilómetros; pero tan pronto como un contador Geiger registra un clic, encontraremos una partícula alfa en su interior. O considérese la ondulatoriedad de un electrón que acaba de pasar a través de dos rendijas en un experimento de interferencia: estará repartida en varias parcelas, quizá separadas por milímetros, apuntando cada una a una región permitida de la pantalla. Pero un instante después se observa un destello en un *punto* de la pantalla, y ahí encontramos un electrón. La ondulatoriedad previamente extendida del electrón se concentra súbitamente en el punto donde puede detectarse como partícula. Por otro



Figura 7.5. La ondulatoriedad de los tres primeros estados de un átomo de hidrógeno.

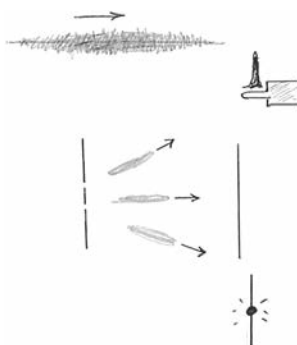


Figura 7.6. Arriba: ondulatoriedad de una partícula alfa antes y después de su detección por un contador Geiger. Abajo: ondulatoriedad de un electrón antes y después de su detección en una pantalla.

lado, si observáramos el electrón en su tránsito hacia la pantalla, lo localizaríamos siempre en algún punto dentro de alguna de las parcelas de ondulatoriedad.

Si un objeto físico real estuviera distribuido por toda la extensión de su ondulatoriedad, como pensó Schrödinger en un principio, sus partes remotas tendrían que concentrarse instantáneamente en el sitio donde el objeto fuera localizado. La materia tendría que moverse a velocidades mayores que la de la luz, lo cual es imposible.

La ecuación de Schrödinger consigue predecir lo que se observa, pero en su propósito de exorcizar el «sinsentido» de la física, como lo llamó él, Schrödinger fracasó. En una ocasión declaró que si había que seguir aguantando esos «malditos saltos cuánticos», entonces lamentaba haber tenido algo que ver con la teoría cuántica. Cuando más adelante abordemos su objeción a lo que la teoría cuántica dice de la realidad física, le veremos oponerse a algo mucho más inaceptable que los meros saltos de los electrones de una órbita a otra.

La interpretación aceptada de la ondulatoriedad

Lo que diremos en las páginas que siguen puede convertir este capítulo en el más difícil del libro, no porque cueste entenderlo, sino porque cuesta *creerlo*.

La ondulatoriedad en una región es la *probabilidad* de encontrar el objeto en esa región. Cuidado: no es la probabilidad de que el objeto *esté*

ahí. ¡Hay una gran diferencia! El objeto no estaba allí antes de que lo encontráramos. Es nuestra localización del objeto lo que *causó* que estuviera allí. Esta idea es traicionera, y es la esencia del enigma cuántico. Demos marcha atrás y veamos qué puede significar esta probabilidad cuántica. Debemos contrastar nuestra comprensión usual de la probabilidad con su papel en la mecánica cuántica. Antes de considerar la probabilidad cuántica, comencemos con un ejemplo de probabilidad clásica.

En un carnaval, un tipo que habla deprisa y de manos aún más rápidas maneja un juego de cubiletes. Coloca un guisante bajo uno de dos cubiletes invertidos. Los revuelve tan deprisa que perdemos la pista del guisante. Ahora la probabilidad de que el guisante esté en uno u otro cubilete es la misma. Asociamos una probabilidad de $\frac{1}{2}$ a cada cubilete, lo que significa que la mitad de las veces que miremos encontraremos el guisante bajo el cubilete de la derecha, y la otra mitad bajo el cubilete de la izquierda. (La suma de las probabilidades para ambos cubiletes es $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$, lo que corresponde a la certeza de que el guisante estará debajo de uno u otro cubilete.)

Tras un poco de cháchara (mientras acepta apuestas) el individuo levanta, digamos, el cubilete de la derecha, y vemos el guisante. Instantáneamente, nuestra incertidumbre se convierte en la certeza (probabilidad uno) de que el guisante no está en el cubilete de la izquierda. La probabilidad de que el guisante esté bajo el cubilete de la izquierda colapsa a cero. Aunque el cubilete de la izquierda hubiera sido trasladado al otro lado de la ciudad antes del descubrimiento del guisante, el colapso de la probabilidad seguiría siendo instantáneo. La distancia no afecta a la velocidad del cambio de probabilidad.

Los juegos de azar hacen casi obvio lo que la ondulatoriedad cuántica debería representar. (Obvio al menos para los que conocemos la respuesta.) De hecho, sólo unos meses después de que Schrödinger diera a conocer su ecuación, Max Born se percató de que la ondulatoriedad en una región equivalía a una probabilidad: la de encontrar el objeto en esa región. Como la probabilidad en el juego de los cubiletes, cuando descubrimos dónde está el objeto, su ondulatoriedad se convierte al instante en la unidad para la región donde lo localizamos y cero para el resto.

No obstante, hay una diferencia fundamental entre la probabilidad clásica ilustrada por el juego de los cubiletes y la probabilidad representada en la mecánica cuántica por la ondulatoriedad. La probabilidad clásica es un enunciado sobre el conocimiento de uno. En nuestro ejemplo, el desconocimiento de qué cubilete esconde el guisante significa que, para nosotros, la probabilidad de que sea el de la derecha (o el de la izquierda) es $\frac{1}{2}$. El manipulador de los cubiletes probablemente tenía un conoci-



Figura 7.7.



Figura 7.8.

miento mejor, en cuyo caso la probabilidad sería diferente desde su punto de vista.

La probabilidad *clásica* representa el conocimiento de una situación. Pero esto no es todo. Se presume que existe algo físico *además* de dicho conocimiento, algo a lo que se asigna la probabilidad. Por ejemplo, había un guisante real bajo uno de los cubiletes. Si alguien acertó a ver por un resquicio dónde estaba el guisante de antemano, la probabilidad se convertiría en certeza para esa persona, pero para su acompañante que no lo vio seguiría siendo $\frac{1}{2}$ para cada cubilete. La probabilidad clásica es subjetiva.

La probabilidad cuántica, en cambio, es *objetiva*. Es la misma para todo el mundo. La función de onda es todo lo que hay: la descripción cuántica de la situación física completa no añade un átomo a la función de onda del átomo. Como dice un conocido texto de física cuántica, la expresión «función de onda de un átomo» es una sinonimia de «átomo».

Si alguien mirara en un punto particular y acertara a ver un átomo, esa observación colapsaría la función de onda del átomo, el cual quedaría localizado en ese punto particular para todo el mundo. Esto es, un segundo observador que mirara inmediatamente después encontraría el átomo donde lo localizó el primer observador. Pero, como veremos, un experimento de interferencia *podía haber* demostrado que el átomo no había estado allí antes de que el primer observador mirara.

(Por supuesto, la incertidumbre ordinaria puede superponerse a la probabilidad cuántica. El segundo observador podría no saber que su compañero ya ha colapsado la función de onda. Podemos dejar de lado esta posibilidad.)

Parece que estamos diciendo que, de algún modo, la observación de que un átomo está en cierto sitio ha creado su presencia allí. ¡En efecto! Habíamos advertido que lo que íbamos a decir era difícil de creer.

Pero al hablar así hemos derivado hacia la interpretación del *signifi-*

cado de la función de onda. Y la discusión de este asunto nos transporta más allá de los resultados experimentales efectivos. Y tratándose de significado, los expertos pueden discrepar, y lo hacen. Pero lo que hemos presentado aquí es una visión bastante estándar. Más adelante exploraremos las acaloradas disputas sobre lo que ocurre realmente, y veremos que las alternativas son tan difíciles de creer como este cuadro estándar.

Hemos estado hablando de átomos porque la teoría cuántica se concibió para tratar con objetos microscópicos. Más adelante sólo hablaremos de «objetos», porque, en principio, la teoría cuántica se aplica a todo y su cumplimiento se ha demostrado para objetos mucho mayores que los átomos. La teoría cuántica se ha aplicado a entidades tan grandes como el universo y tan íntimas como la mente. En este punto, si la mecánica cuántica le causa perplejidad al lector, lo mismo les ocurre a los expertos.

A continuación expondremos el experimento cuántico arquetípico que *demuestra* lo que hemos venido diciendo. O, en palabras de Pascual Jordan, uno de los artífices de la teoría cuántica, demostraremos que «las observaciones no sólo *perturban* lo que se mide, sino que lo *producen*». Se trata del llamado «experimento de las dos rendijas». Estos resultados experimentales que nadie pone en duda se incluyen en cualquier texto de mecánica cuántica. Nuestra versión se parece un poco al juego de los cubiletes.

Un átomo en un par de cajas

En el juego de los cubiletes, el guisante tenía la misma probabilidad de estar en el de la izquierda que en el de la derecha. Aquí asignaremos partes iguales de la ondulatoriedad de un átomo a cada una de las dos cajas.

Cualquier onda puede reflejarse. Un espejo semitransparente refleja parte de la onda y deja pasar el resto. El cristal de una ventana, por ejemplo, deja pasar parte de la luz que incide sobre él y refleja otra parte. Un espejo semitransparente para la luz es un espejo semitransparente para los fotones. La función de onda de cada fotón individual que golpea un espejo semitransparente se divide en una parte reflejada y una parte transmitida. También podemos tener espejos semitransparentes para los átomos. Cuando se encuentra con un espejo de esta clase, la función de onda de un átomo se divide en dos paquetes de onda, uno que atraviesa el espejo y otro que se refleja.

La disposición de espejos y cajas mostrada en la figura 7.9 permite atrapar las dos partes de la función de onda de un átomo cerrando las ca-

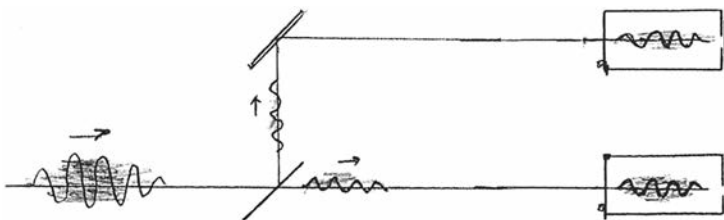


Figura 7.9. Dispositivo de espejos y cajas para atrapar funciones de onda. Se muestra una función de onda en tres momentos diferentes.

jas tras asegurarnos de que ambos paquetes están dentro. Hemos ilustrado la función de onda y la ondulatoriedad en tres instantes sucesivos.

Mantener un átomo en un par de cajas sin perturbar su función de onda sería complicado, pero factible. Dividir la función de onda de un átomo en dos regiones bien separadas no es difícil, y es todo lo que necesitamos en realidad. Hemos querido definir cada región mediante una caja porque así el experimento se parece más al juego de los cubiletes. Pero nuestra demostración no requiere cajas físicas.

A diferencia del juego de los cubiletes, donde el guisante estaba de hecho bajo uno de los dos cubiletes, la teoría cuántica dice que la ondulatoriedad del átomo y, por ende, el átomo mismo está *simultáneamente en ambas cajas*. ¿Qué puede significar esto? Podemos establecer el significado que buscamos mediante un experimento de interferencia, la demostración estándar de que algo es una onda extensa. (Recuérdese nuestra descripción de la interferencia en el capítulo 5.)

Abrimos un pequeño agujero en cada caja a la vez, para dejar que la función de onda salga de *ambas* cajas y vaya a parar a la pantalla donde el átomo se fijará. En algunas regiones de la pantalla las ondas procedentes de una y otra caja se reforzarán al sumarse las crestas de ambas, mientras que en otras las crestas de una y los valles de la otra se cancelarán mutuamente. Así pues, habrá regiones de ondulatoriedad aumentada y regiones de ondulatoriedad nula. Si se repite el procedimiento con un montón de pares de cajas dispuestos idénticamente, siempre encontraremos los átomos en las regiones de elevada ondulatoriedad y nunca en las de ondulatoriedad nula.

El punto crucial es que *todos y cada uno* de los átomos cumple una regla que le obliga a ir a parar a regiones de elevada ondulatoriedad (separadas por una distancia d en la figura 7.10) y evitar las regiones de ondulatoriedad nula. Como hemos descrito en el capítulo 5, esta pauta depende de la separación entre las cajas, s . Por lo tanto, cada átomo debe «conocer» de algún modo dicha separación. Según la teoría cuántica,

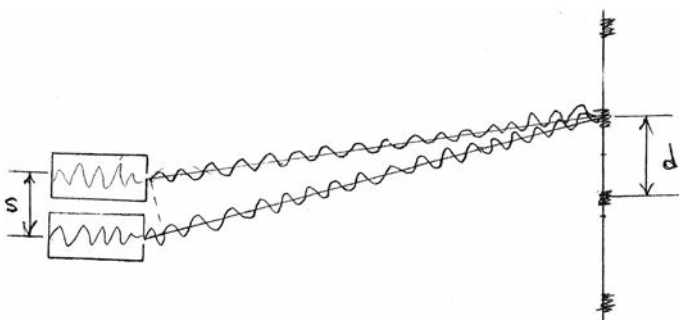


Figura 7.10. Experimento de interferencia con un par de cajas.

cada átomo conoce la pauta porque cada átomo estaba en *ambas* cajas a la vez.

¿No tendría más sentido decir que había una *parte* del átomo en cada caja? No lo tiene. Veamos por qué.

Supongamos que, en vez de hacer un experimento de interferencia, simplemente miramos dentro de una caja para ver en cuál de ellas está el átomo. No importa cómo miremos. Por ejemplo, podemos proyectar un rayo de luz apropiado dentro de la caja y ver un destello del átomo. Pues bien, alrededor de la mitad de las veces veremos un átomo *entero* en la caja inspeccionada, y la otra mitad de las veces encontraremos que la caja está totalmente *vacía*. Si no hay átomo en la caja que miramos primero, entonces estará en la otra.

Pero *antes* de que miráramos, un experimento de interferencia como el que acabamos de describir podría haber establecido que el átomo estaba en ambas cajas. Al mirar, en cambio, encontramos el átomo entero en una u otra caja. Por supuesto, esto plantea un problema conceptual: podemos optar por demostrar *cualquiera* de dos situaciones *contradictorias*.

La manera más precisa de describir el estado del átomo aún por observar es traducir en palabras las matemáticas que describen el estado del átomo: éste estaba en *dos estados a la vez*, en la caja de arriba y no en la caja de abajo y, *simultáneamente*, en la caja de abajo y no en la caja de arriba. En otras palabras, el átomo estaba en ambas situaciones al mismo tiempo.

Dicho así, la mente se nubla. Es como decir que un objeto físico está en dos sitios al mismo tiempo. La expresión mecanocuántica para esta situación es que el átomo se encuentra en un «estado de superposición».

La mecánica cuántica dice que el procedimiento de observación crea la situación presente del átomo concentrado en una caja o distribuido entre las dos. Aún dice más: el procedimiento de observación crea la his-

toria del átomo (aparentemente hacia el pasado). Localizar el átomo en una caja implica que ha seguido una trayectoria única tras su encuentro previo con el espejo semitransparente. La interferencia establece que ha seguido ambas trayectorias.

No deberíamos dejar esta discusión sin señalar que lo que hemos dicho sobre la posición de un objeto creada por su observación vale también para cualquier otra propiedad. Por ejemplo, un núcleo atómico es un diminuto imán con un polo norte y un polo sur. Pues bien, puede encontrarse en un estado de superposición con su polo norte orientado hacia arriba y hacia abajo simultáneamente.

El que un objeto esté en dos sitios a la vez es algo tan contraintuitivo que inevitablemente genera confusión. Parte de esta confusión se disipará en los capítulos posteriores. ¡Pero no toda! Nos enfrentamos al todavía no resuelto, y ciertamente controvertido, enigma cuántico. En este punto, veamos dos actitudes ante la probabilidad cuántica. Una sorteja el enigma, mientras que la otra le hace frente.

Dos actitudes ante la ondulatoriedad como probabilidad

Una actitud pragmática: La ondulatoriedad es la probabilidad de lo que *observaremos*. Sí, depende de cómo observamos. En el caso de nuestro par de cajas, depende de si inspeccionamos una caja o hacemos un experimento de interferencia y miramos la pantalla tras abrir sendos agujeros en las cajas. En cada caso, la teoría cuántica predice el resultado correcto. Y todo lo que uno necesita son predicciones correctas, a todos los efectos prácticos. Defenderemos esta actitud pragmática, conocida como la interpretación de Copenhague, en el capítulo 10.

Una actitud de incomodidad: ¿acaso la ley fundamental de la Naturaleza, la ecuación de Schrödinger, sólo nos proporciona probabilidades? Einstein estaba convencido de que tenía que haber una explicación determinista subyacente. «Dios no juega a los dados» es uno de sus comentarios más citados. (Bohr le replicó que no le dijera a Dios cómo debía regir el universo.)

Pero la aleatoriedad no era el problema más serio de Einstein con la mecánica cuántica. Lo que incomodaba tanto a Einstein como a Schrödinger, y a más gente hoy, es su aparente negación de la realidad física ordinaria (o lo que quizá sea lo mismo, la necesidad de incluir la *elección* del observador en la descripción del mundo físico).

En el juego de los cubiletes, la probabilidad era la de encontrar un guisante bajo un cubilete concreto. Pero había un guisante real que lo-

calizar. De acuerdo con la mecánica cuántica, *no* había ningún átomo real en una caja concreta antes de que lo localizáramos. Pero el caso es que *hay* átomos reales, y las cosas reales están hechas de átomos. ¿O no?

Si en este punto el lector no se siente desconcertado, es que no se ha enterado de nada. Como dijo Richard Feynman, que entendió la mecánica cuántica mejor que nadie: «Nadie entiende la mecánica cuántica».

En el corto capítulo que sigue haremos un paréntesis para hablar de cuestiones prácticas. Luego nos enfrentaremos al secreto de familia de la física, su encuentro con la conciencia.

El desarrollo de la teoría cuántica fue «la coronación intelectual del último siglo», dice el físico John Preskill, del California Institute of Technology. Es el principio que subyace tras numerosos aparatos de hoy, desde los láseres hasta las máquinas de resonancia magnética. Y puede que éstos sean sólo los frutos de las ramas más bajas. Muchos científicos auguran tecnologías revolucionarias basadas en las ciertamente extrañas propiedades del mundo cuántico.

Business Week, 15 de marzo de 2004

En la cuarta semana de nuestro curso sobre el «Enigma cuántico», dirigido a estudiantes no especializados en ciencias (aunque siempre hay algunos estudiantes de física), nos habíamos internado un buen trecho en los misterios cuánticos. La mano de una joven se alzó con una pregunta: «¿Tiene alguna utilidad *práctica* la mecánica cuántica? Yo (Bruce) me quedé mudo durante al menos diez segundos. En la estrechez de mi perspectiva de físico, había dado por sentado que todo el mundo tenía claro el fundamento cuántico de nuestra tecnología. Dejé a un lado mis notas y dediqué el resto de la hora a hablar de aplicaciones prácticas de la mecánica cuántica.

Este breve capítulo es una digresión sobre el mismo tema. El objetivo de nuestro libro es presentar los hechos incuestionables que revelan el encuentro de la física con la conciencia. Pero esos mismos hechos cuánticos son la base no sólo de la ciencia moderna, sino de la tecnología actual. Tras las cuestiones de altos vuelos del capítulo anterior, es bueno tomar contacto con suelo firme antes de volver a despegar.

La mecánica cuántica es esencial para toda la ciencia natural. Cuando los químicos hacen algo más que aplicar reglas empíricas, sus teorías son fundamentalmente mecanocuánticas. Por qué la hierba es verde, qué hace

que el Sol brille, o cómo se comportan los quarks dentro de los protones son cuestiones que requieren una respuesta mecanocuántica. La naturaleza aún por comprender de los agujeros negros o del *Big Bang* se estudia en términos cuánticos. Las teorías de supercuerdas que podrían tener la clave de tales asuntos parten todas de la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica es la teoría más correcta de toda la ciencia. Una prueba extrema es el cálculo de la «razón giromagnética del electrón» con una precisión de una billonésima. (Lo que es la razón giromagnética no nos importa aquí.) Medir algo con tanta exactitud es como medir la distancia de un punto en Nueva York a un punto en San Francisco con un margen de error menor que el grosor de un cabello humano. Pero se hizo, y la predicción de la teoría dio en el clavo.

La mecánica cuántica funciona bien en ciencia, ¿pero cuál es su importancia práctica? De hecho, un tercio de nuestra economía tiene que ver con productos basados en la mecánica cuántica. Aquí describiremos tres tecnologías cuyos aspectos cuánticos saltan a la vista: el láser, el transistor y las imágenes por resonancia magnética. No entraremos en detalles: nuestra intención es mostrar el lugar de los fenómenos cuánticos en el cuadro del manejo por los físicos e ingenieros de las propiedades aparentemente contradictorias de las entidades microscópicas.

El láser

Los láseres son muy variados. Algunos miden muchos metros y pesan toneladas. Otros miden mucho menos de un milímetro. El haz de luz roja que lee los códigos de barras en las cajas de los supermercados procede de un láser. También es un láser lo que lee los discos compactos y escribe en las impresoras láser. Un láser potente puede horadar el hormigón. Los láseres generan la luz para la comunicación por fibra óptica, tienden líneas para los topógrafos y guían «bombas inteligentes». Con un láser muy enfocado, un cirujano puede reparar una retina despegada.

Un láser genera un haz no divergente de luz de cierta frecuencia que puede enfocarse hasta un punto diminuto. El principio físico esencial es la «emisión de radiación estimulada»: cuando un fotón de la frecuencia adecuada golpea un átomo excitado, estimula la emisión de un segundo fotón de la misma frecuencia que viaja en la misma dirección (un clon). Donde antes teníamos un fotón, ahora tenemos dos fotones idénticos. Si mantenemos muchos átomos en un estado excitado, el proceso continúa como una reacción en cadena produciendo numerosos fotones idénticos. «Láser» es un acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Un problema que el diseñador de un láser debe resolver es que la probabilidad de que un fotón golpee un átomo al atravesar una sola vez el material emisor de luz es pequeña. Por eso la luz se hace pasar una y otra vez a través del material, resonando entre un par de espejos. Una cuerda de guitarra resonante debe vibrar en un número entero de longitudes de onda. Igualmente, los espejos de un láser deben estar separados por un número entero de longitudes de onda de luz. Uno de los espejos es semitransparente, lo que permite que una parte de la luz salga del láser a cada rebote.

Nótese que hemos pasado de hablar de la luz como un flujo de fotones compactos, cada uno de los cuales golpea un único átomo, a hablar de una onda extendida entre dos espejos macroscópicos. (Esto es análogo al átomo de nuestro ejemplo, que podía estar compactado en una sola caja o distribuido entre dos cajas.)

El transistor

El transistor es la invención más importante del siglo xx. Sin él, nada que dependa de la electrónica moderna sería posible. El transistor puede actuar como conmutador, permitiendo o no que fluya la corriente eléctrica, o como amplificador, tomando una señal eléctrica débil y transformándola en otra más potente. Antes de la invención del transistor en los años cincuenta, estas operaciones corrían a cargo de válvulas de vacío. Cada válvula tenía el tamaño de un puño, generaba casi tanto calor como una bombilla y costaba unos cuantos dólares.

Hoy día caben mil millones de transistores en un solo microprocesador, y cada uno cuesta una millonésima de centavo y ocupa una millonésima de milímetro. Un ordenador personal puede tener más de diez mil millones de ellos. Si tuviéramos que emplear válvulas de vacío, un ordenador con la potencia de un portátil moderno sería ridículamente caro, ocuparía un vasto territorio y requeriría toda la energía eléctrica generada por la central de una gran ciudad.

Los transistores están por todas partes: en los televisores, en los vehículos, en los teléfonos móviles, en los hornos de microondas y en los relojes de pulsera. La vida moderna depende del transistor. En el año 2005 se manufacturaron más de cien mil millones de transistores... cada segundo.

La mayoría de transistores se basa en el silicio, cada átomo del cual tiene catorce electrones. De éstos, cuatro son «electrones de valencia» que enlazan cada átomo de silicio con sus vecinos. Los otros diez elec-

trones se mantienen ligados al núcleo padre, pero cada electrón de valencia se extiende por el cristal de silicio como una onda. Cada electrón de valencia está en todas partes del cristal simultáneamente.

Los electrones directamente implicados en las funciones de conmutación o amplificación del transistor son otra historia. Éstos pueden ser liberados por átomos de fósforo añadidos al cristal de silicio. Los diseñadores de transistores deben tener en cuenta que estos «electrones de conducción» liberados pueden verse frenados al toparse con átomos extraños individuales o quedar atrapados por tales impurezas. Deben tratarlos como objetos compactos a escala atómica.

¿Cómo se las arreglan los ingenieros y físicos que diseñan láseres y transistores para manejar fotones y electrones que unas veces son más pequeños que un átomo y otras veces abarcan distancias macroscópicas? Lo consiguen cultivando una esquizofrenia benigna. Simplemente aprenden cuándo pensar de una manera y cuándo de otra. Y, a todos los efectos prácticos, con eso basta.

Imágenes por resonancia magnética

La resonancia magnética genera imágenes claras y detalladas de cualquier tejido del cuerpo. Va camino de convertirse en la herramienta de diagnóstico más importante de la medicina. Las máquinas de imágenes por resonancia magnética todavía son voluminosas y caras (cuestan más de un millón de dólares). Un examen con esta técnica puede costar bastante más de mil dólares. Por fortuna, el tamaño y los costes se están reduciendo a la vez que aumenta la capacidad de diagnóstico.

Las imágenes por resonancia magnética determinan la distribución de un elemento dado, normalmente el hidrógeno, en un material concreto de la región del cuerpo examinada. Los diferentes tejidos, hueso o carne, tumoral o normal, quedan delineados por las concentraciones variables de una sustancia química particular.

Los detalles de esta técnica son complicados, pero lo único que queremos destacar es que, como en los casos del láser y del transistor, los físicos e ingenieros que diseñan dispositivos de resonancia magnética deben recurrir explícitamente a la mecánica cuántica. La idea básica es la resonancia magnética de los núcleos atómicos. (Inicialmente la técnica se llamaba «resonancia magnética *nuclear*», antes de que se eliminara la inquietante última palabra.)

Los núcleos atómicos son como pequeños imanes con un polo norte y un polo sur. En un campo magnético, el núcleo de hidrógeno, que es un

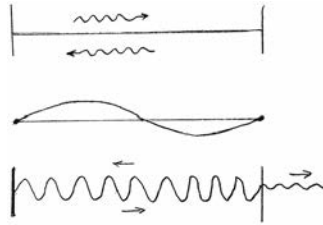


Figura 8.1. Ondas de luz entre los espejos de un láser.

protón, está «cuantizado espacialmente». Esto es, tiene dos estados: en uno, su polo norte está orientado hacia arriba respecto del campo magnético, y en el otro hacia abajo. En una máquina de resonancia magnética, una onda de radio de la frecuencia apropiada coloca los núcleos de hidrógeno situados en la zona del cuerpo que se quiere retratar en un estado de superposición cuántica tal que los polos norte apuntan hacia arriba y hacia abajo simultáneamente. Estos núcleos emiten ondas electromagnéticas al volver a su estado de baja energía, y la cantidad de esta radiación revela su concentración. Luego un ordenador compone la imagen.

Una pieza fundamental de la mayoría de dispositivos de resonancia magnética es un imán superconductor de varias toneladas mantenido a una temperatura de apenas unos grados por encima del cero absoluto. En un metal superconductor, los electrones se condensan en un estado cuántico tal que todos se mueven como una unidad. Cada electrón está simultáneamente en todos los puntos de una masa de metal de casi una tonelada. Una vez se les da un empuje inicial, no se requiere ninguna potencia eléctrica para mantener la corriente de electrones y el campo magnético.

Las imágenes por resonancia magnética son posibles por la confluencia de los fenómenos cuánticos responsables de la resonancia magnética nuclear, la superconductividad y el transistor. Cada una de estas tecnologías, igual que la del láser, ha valido un Premio Nobel de física, el último por la técnica de la resonancia magnética en 2004.

El futuro

Puntos cuánticos. La implicación de la mecánica cuántica en la tecnología y la biotecnología se expande rápidamente. En 2003, la revista *Science* citó la investigación de los «puntos cuánticos» como uno de los principales avances científicos del año. Los puntos cuánticos, constituidos por unos cientos de átomos, son construcciones artificiales con to-

das las propiedades cuánticas de un solo átomo. Algunos se han concebido para revelar el funcionamiento del sistema nervioso o actuar como detectores ultrasensibles del cáncer de mama. Cuando se les acoplan electrodos, los puntos cuánticos pueden emplearse para controlar corrientes como transistores ultrarrápidos o para procesar señales ópticas. Esperamos oír hablar mucho de los puntos cuánticos en el futuro.

Ordenadores cuánticos. Un elemento operativo de un ordenador digital clásico debe estar en uno de dos estados: «0» o «1». Un elemento operativo «no observado» en un ordenador *cuántico* puede estar en un estado de superposición de «0» y «1» simultáneamente. Esto se parece mucho a la situación descrita en el capítulo anterior, donde un único átomo no observado se encontraba en un estado de superposición tal que estaba simultáneamente en dos cajas.

Mientras que cada elemento de un ordenador clásico sólo puede efectuar una computación cada vez, la superposición permite a cada elemento de un ordenador cuántico efectuar numerosas computaciones simultáneamente. Este vasto paralelismo permitiría a un ordenador cuántico resolver en minutos ciertos problemas que a un ordenador clásico le llevarían mil millones de años. No obstante, las aplicaciones comerciales no son inminentes. Los ordenadores cuánticos tropiezan con importantes dificultades técnicas, pero se están investigando.

Los ingenieros y físicos que trabajan con las tecnologías citadas pueden tratar de manera íntima y cotidiana con la mecánica cuántica, pero no tienen por qué afrontar las cuestiones más profundas que plantea. Muchos ni siquiera son conscientes del problema. Al enseñar mecánica cuántica, los físicos, nosotros incluidos, minimizamos el aspecto enigmático. No distraemos a los estudiantes del conocimiento práctico que necesitarán en el futuro. También evitamos el enigma porque resulta un tanto embarazoso. Se ha dicho que es nuestro «secreto de familia». En el capítulo 9 vamos a mirarlo de frente.

La interpretación [de la mecánica cuántica] ha seguido siendo una fuente de conflicto desde su introducción... Para muchos físicos juiciosos, ha seguido siendo una suerte de «secreto de familia».

J.M. Jauch

Sólo los hechos, señora, sólo los hechos.

Sargento Friday de *Dragnet*

En su libro *El sueño de la teoría final*, el premio Nobel Steven Weinberg escribe: «La parte de la física de hoy que me parece más probable que sobreviva inmutada en una teoría final es la mecánica cuántica». Compartimos la intuición de Weinberg acerca de la corrección última de la mecánica cuántica.

John Bell, un personaje principal de los capítulos posteriores de este libro, quien probablemente obtendría el Premio Nobel si se le pudiera conceder a título póstumo, tenía la impresión de que «la descripción mecanocuántica quedará obsoleta... Lleva consigo la semilla de su propia destrucción». En realidad, Bell no discrepaba de Weinberg. Su sospecha con la mecánica cuántica no es que vaya a encontrarse un error en cualquiera de sus predicciones, sino que es una teoría incompleta. Para él, la mecánica cuántica revela la falta de compleción de nuestra visión del mundo. Bell pensaba que es probable que «la nueva manera de ver las cosas implicará un salto imaginativo que nos asombrará». (Dicho sea de paso, Bell contaba que fue una lección de Jauch —citado en el epígrafe de este capítulo— lo que inspiró sus investigaciones sobre los fundamentos de la mecánica cuántica.)

Igual que Bell, sospechamos que algo más allá de la física ordinaria está por descubrir. No todos los físicos estarían de acuerdo. Muchos, si

no la mayoría, quitarían importancia al enigma, nuestro «secreto de familia», como algo a lo que simplemente deberíamos acostumbrarnos.

Sin embargo, la existencia de un enigma no es una cuestión física. Es *metafísica* en el sentido original de la palabra. (*Metafísica* es el título del texto de Aristóteles que seguía a su texto científico *Física*, y que trata temas filosóficos más generales.) Cuando se trata de metafísica, los no físicos con una comprensión general de los *hechos* experimentales —sobre los que no hay discusión— pueden tener una opinión tan válida como la de los físicos.

Ilustraremos este punto con un diálogo en el que una doctora en física de mentalidad ortodoxa demuestra algunos hechos experimentales básicos de la mecánica cuántica a un Grupo Racional, Inteligente y de Mente Abierta (GRIMA) que desconoce la teoría cuántica que los explica. Lo que nuestra científica muestra al GRIMA es análogo a la experiencia del visitante de Eug Ahne Poc. Aunque lo que allí se mostraba *no* es posible en realidad, el desconcierto del visitante es el mismo que siente el GRIMA ante una demostración que *sí* es realizable. Puede que el lector comparta ese mismo desconcierto. Nosotros lo compartimos: es el enigma cuántico.

Tras su demostración, nuestra científica ofrece la explicación estándar de lo que se observa, una explicación que suele satisfacer a los estudiantes de nuestras clases de mecánica cuántica, más preocupados por los problemas que tendrán que resolver en sus exámenes que por el significado de lo que calculan. Al GRIMA, en cambio, sí le preocupa el *sentido* de todo ello. Esperamos que el lector se identifique con el GRIMA.

El «aparato» que emplea nuestra científica es una caricatura de un dispositivo de laboratorio real. Pero los fenómenos cuánticos que pone de manifiesto están bien establecidos para objetos muy pequeños. Estos fenómenos se están evidenciando en objetos cada vez más grandes. En la actualidad se está experimentando con proteínas de tamaño medio. ¿Serán los virus los próximos? La teoría cuántica no impone límites. El tamaño de los objetos susceptibles de evidenciar efectos cuánticos parece restringido sólo por la tecnología y el presupuesto.

Podríamos optar por un tratamiento completamente general y decir que los experimentos se hacen con «objetos». Pero esto suena vago. No hay razón por la que nuestros objetos no puedan ser canicas verdes. El experimento ciertamente podría efectuarse con «canicas verdes», siempre que fueran lo bastante pequeñas (digamos del tamaño de moléculas grandes). Así que, en nuestro relato, hablaremos de canicas.

☯ Nuestra científica da la bienvenida a los miembros del GRIMA y les dice: «Se me ha encomendado demostrarles la extraña naturaleza de la observación y contarles la explicación que da la teoría cuántica de lo que verán. A veces los físicos recelamos de llamar la atención sobre tal extrañeza, porque puede hacer que la física parezca mística. Pero estoy segura de que ustedes son personas racionales y de mente abierta para las que eso no supone un problema. Creo que puedo mostrarles algo ciertamente notable».

El primer experimento de nuestra científica es comparable al del visitante de Eug Ahne Poc cuando preguntaba en qué choza estaba la pareja. Siempre obtenía una respuesta que demostraba que la pareja se encontraba junta en una u otra choza.

☯ Nuestra científica señala un conjunto de cajas ordenadas por pares. Explica que con su aparato inyectará una canica en cada *par* de cajas. «Los detalles del funcionamiento de mi aparato», dice, «no importan.» El GRIMA acepta la omisión. Observan cómo ella monta un par de cajas en el extremo derecho de su aparato, deja caer una canica en el embudo de la izquierda y luego saca las cajas. Luego repite el procedimiento hasta sumar unas cuantas decenas de cajas pareadas.

(A diferencia del GRIMA, el lector ya ha tenido contacto con la teoría cuántica, así que hacemos notar que el aparato de nuestra científica incluye un juego de espejos apropiados para repartir la ondulatoriedad de cada «canica» entre las dos cajas de cada par.)

☯ «Mi primer experimento», explica nuestra científica, «determinará cuál de las cajas de cada par contiene la canica.» Señalando un par de cajas, mira a un miembro del GRIMA que parece bien dispuesto y le pide que abra cada caja y observe cuál de ellas contiene la canica. Tras abrir la primera caja, el joven anuncia: «Aquí está».

☯ «Asegúrese de que la otra caja está completamente vacía», requiere nuestra científica. Tras mirar bien, el joven dice resueltamente: «Aquí dentro no hay nada». Luego nuestra física pide a una atenta joven que repita el procedimiento de observar en cuál de las cajas está la canica. Tras abrir la primera caja, la joven dice: «Está vacía; la canica debe estar en la otra caja». Y, en efecto, ahí la encuentra.

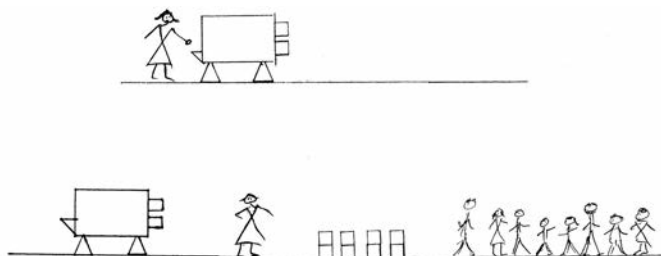
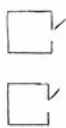


Figura 9.1.

Nuestra física repite el mismo proceso varias veces más. La canica aparece aleatoriamente en la primera o la segunda caja abierta. Pronto nota que los miembros del GRIMA no prestan mucha atención y murmuran entre ellos. De lejos oye a uno decirle a la mujer que tiene al lado: «¿Qué pretende? Esto no es la extraordinaria demostración que nos prometieron».

✂ Aunque el comentario no iba dirigido a ella, nuestra científica responde: «Lo siento, sólo pretendo convencerles de que cuando miramos para comprobar en qué caja está la canica, demostramos que hay una canica completa en una caja y que la otra está completamente vacía. Por favor, aguanten un poco, porque ahora querría mostrarles que no importa *cómo* revelamos en qué caja está nuestra canica. Hay otra manera de hacerlo».

A continuación coloca un par de cajas enfrente de una pantalla adhesiva y abre una caja. La luz es demasiado tenue para ver la canica que sale disparada, pero se escucha un «plinc» y se ve una canica pegada a la pantalla. «Ah, la canica estaba en la primera caja», dice. «Por lo tanto, ninguna canica golpeará la pantalla cuando abra la segunda caja.» «Obviamente», murmura alguien desde la retaguardia del grupo.



Aunque de nuevo se hace difícil mantener la atención del GRIMA, nuestra persistente científica repite la demostración con otros pares de cajas. Si una canica golpea la pantalla cuando ella abre la primera caja, no aparece ninguna canica cuando abre la segunda. Si no aparece nada en la pantalla después de abrir la primera caja, la canica siempre resulta estar en la segunda caja. La pantalla se va llenando de canicas adheridas con una distribución uniforme.

Figura 9.2. Apertura secuencial de las cajas y resultado en la pantalla.

☯ «¿Entienden que esto también es una demostración de que hay una canica en una de las cajas de cada par, y que la otra está vacía?», pregunta ella.

«Desde luego, pero ¿dónde está la *extraordinaria* demostración que nos prometió?», refunfuña uno de los asistentes. «Por supuesto que no importa cómo miremos. Su aparato coloca una canica en una caja de cada par. ¿Y qué?» Otros asienten con la cabeza, y una mujer exclama: «¡Tiene razón!».

☯ «En realidad», dice nuestra científica un tanto vacilante, «lo extraordinario — como espero demostrar — es que lo que él acaba de decir no es del todo cierto. Pero antes permítanme hacer otro experimento.»

El segundo experimento de nuestra científica es comparable al del visitante de Eug Ahne Poc cuando preguntaba en qué choza estaba la mujer y en cuál el varón. Siempre obtenía una respuesta que demostraba que la pareja estaba distribuida entre ambas chozas.

El GRIMA recupera educadamente la compostura para contemplar el siguiente experimento.

☯ Nuestra científica sitúa un nuevo conjunto de cajas pareadas enfrente de la pantalla adhesiva y abre las dos cajas del primer par: «La diferencia ahora», remarca, «es que abro ambas cajas al mismo tiempo». Un «plinc» indica el impacto de una canica en la pantalla. Tras desecher el primer par de cajas, la científica coloca un segundo par en el mismo sitio y vuelve a abrir ambas cajas a la vez. Se oye otro «plinc» y aparece otra canica en la pantalla.

Las canicas se acumulan en la pantalla a medida que ella continúa abriendo cajas pareadas. Un tipo con una camisa roja inquiera con tono flemático: «¿No cree que este experimento demuestra aún menos que el primero? Puesto que ahora abre ambas cajas a la vez, ni siquiera podemos decir de qué caja ha salido la canica».

Pero antes de que la científica comience a hilvanar una respuesta, una mujer hasta entonces callada se adelanta y dice: «Parece que las canicas forman un patrón en la pantalla».

Ahora todos miran interesados. Cuantas más canicas se pegan a la pantalla, más visible se va haciendo el patrón. Las canicas inciden sólo en ciertas zonas de la pantalla, y en otras no hay canicas. Cada canica obedece una regla que le dice dónde puede ir a parar y dónde no.

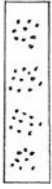


Figura 9.3. Resultado en la pantalla de la apertura simultánea de las cajas.

La primera mujer que advirtió el patrón parece intrigada y pregunta: «En el primer experimento, cuando las cajas de cada par se abrían por separado, las canicas se distribuían uniformemente por la pantalla. ¿Cómo puede afectar la apertura simultánea de la caja vacía y la que contiene la canica al comportamiento de las canicas?».

☞ Nuestra científica, complacida con la pregunta, responde exaltada: «¡Muy bien! Abrir una caja que estaba realmente vacía no podía afectar a la canica. Había una canica por cada par de cajas. Pero no es del todo correcto decir que una caja contenía la canica y la otra estaba vacía. Cada canica de un par estaba en ambas cajas a la vez».

En respuesta a las expresiones de duda en las caras de la mayoría de miembros del GRIMA, nuestra científica insiste: «De hecho, hay una manera muy convincente de demostrar lo que digo, aunque llevará un poco de tiempo».

El GRIMA conversa y se relaja mientras ella prepara tres conjuntos de cajas pareadas, cada uno con una separación diferente entre las cajas de cada par. Tras recabar de nuevo la atención del grupo, repite el experimento de la apertura simultánea de las cajas con el primero, el segundo y el tercer conjunto de cajas pareadas.

☞ «Fíjense en que cuanto más separadas están las cajas del par, menos espaciado es el patrón resultante. La regla que obedecen *todas y cada una* de las canicas, la regla que les dice dónde pueden incidir, depende de la separación de su par de cajas. Así pues, cada canica «conoce» esa separación, por lo que cada canica debe haber ocupado ambas cajas de su par».

«Un momento, señora», exclama un niño. «Está diciendo que la canica estaba en *dos sitios a la vez*, que salió de ambas cajas. ¡Eso es una estupidez!... Ah, oh, lo siento, señora.»

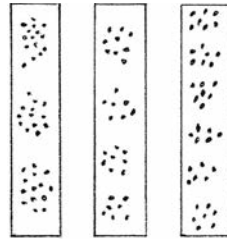


Figura 9.4. Resultados de la apertura simultánea de las cajas para distintas separaciones entre las cajas de cada par.

☞ «Tranquilo, muchacho», responde nuestra científica. «Tienes mucha ra-

zón. La canica estaba en dos sitios a la vez. Estaba en ambas cajas. La actitud científica consiste en aceptar lo que nos dice la Naturaleza con independencia de nuestras intuiciones. Una canica saliendo de dos cajas a la vez puede sonar absurdo, pero las demostraciones experimentales no nos dejan alternativa.»

Nadie responde. Pero al cabo de un minuto, el tipo de la camisa roja vuelve a hablar: «Hay una alternativa obvia. En el primer experimento, donde usted abría primero una caja y después la otra, veíamos que una caja de cada par estaba completamente vacía. Pero, como acaba usted de decir, para estos otros conjuntos de cajas pareadas cada canica se dividió de manera que algo de ella fue a parar a cada caja de su par. Está claro que estos conjuntos de cajas pareadas se han preparado de manera diferente».

☪ Nuestra científica hace una pausa con las manos en las caderas para dejar que el grupo rumie la idea, y luego comenta: «Es una hipótesis razonable. Pero lo cierto es que los pares de cajas para ambos experimentos se prepararon de manera idéntica. Podría haber hecho cualquiera de los dos experimentos con cualquiera de los dos conjuntos de cajas pareadas. Permítanme probarlo».



Figura 9.5.

El tercer experimento de nuestra científica es comparable al del visitante de Eug Ahne Poc cuando hacía cualquiera de las dos preguntas, pudiendo elegir libremente entre demostrar que la pareja estaba en una misma choza o demostrar que estaba repartida entre ambas chozas.

Tras la pausa para el café, durante la que nuestra científica ha preparado y apilado varios conjuntos de cajas pareadas, el grupo vuelve a reunirse. Una mujer toma la palabra: «Hemos estado comentando lo que ha dicho antes, y al menos algunos de nosotros estamos confundidos. Unos cuantos pensamos que usted afirmó haber demostrado que una caja de cada par estaba vacía, y también que ninguna caja estaba vacía, pero ambas situaciones son contradictorias. ¿Hemos entendido mal?».



Figura 9.6. Dibujo de Charles Addams. © Tee & Charles Addams Foundation.

☾ «Bueno, su interpretación es casi correcta. ¿Qué situación querría demostrar con este grupo de cajas pareadas?»

Un tanto intimidada, la portavoz duda, pero la otra mujer que está a su lado se ofrece voluntaria: «Muy bien, muéstranos que una caja de cada par está vacía».

☾ Nuestra científica repite el primer experimento de apertura sucesiva de las cajas, revelando cada vez una canica en una de las cajas y nada en la otra. Luego comenta: «Y les aseguro que no importa cómo se examinen las cajas vacías: nunca encontraremos nada en ellas».

Otro de los presentes con ganas de cooperar señala otro conjunto de cajas pareadas y pregunta: «¿Puede mostrarnos ahora que ninguna caja de este otro conjunto está vacía?».

☾ «Desde luego.» Y nuestra científica, abriendo ambas cajas de cada par simultáneamente, repite el experimento una docena de veces para demostrar que cada canica debe haber ocupado ambas cajas de su par.

Unas cuantas veces más, nuestra científica demuestra una de las dos situaciones aparentemente contradictorias, a voluntad de un miembro del GRIMA.

En medio de una de las demostraciones, un individuo no puede más y exclama: «Lo que nos está diciendo —y admito que parece haber demostrado— no tiene sentido. Es lógicamente inconsistente... Perdón por la interrupción».

☯ «No pasa nada», le tranquiliza ella. «Lo que usted plantea es importante».

Así que él continúa: «Usted afirma poder demostrar que ambas cajas de cada par contienen al menos algo de la canica, pero se supone que también puede demostrar que una de las cajas de cada par está vacía del todo. Y eso es lógicamente inconsistente».

☯ «Sería así», replica nuestra científica, «si demostráramos ambos resultados para el *mismo* conjunto de cajas pareadas. Pero como hemos empleado un conjunto diferente de canicas para cada demostración, no veo ninguna inconsistencia lógica.»

Una mujer objetora: «Pero las cajas pareadas con las que usted demostró una cosa *podrían* haber servido para demostrar la otra si nosotros se lo hubiéramos pedido».

☯ «Pero no lo hicieron», es la respuesta casi automática de nuestra científica. «Las predicciones de experimentos no realizados no pueden comprobarse. Por lo tanto, *lógicamente*, no hay necesidad de que la ciencia dé cuenta de ellas.»

«Oh, no, no puede escurrir el bulto así», protesta el objetor inicial. «Somos seres humanos conscientes, tenemos libre albedrío. Podríamos haber elegido la otra opción.»

☯ Nuestra científica, un tanto azorada, replica: «La conciencia y el libre albedrío son temas que competen a la filosofía. Admito que la mecánica cuántica invita a entrar en estos asuntos, pero la mayoría de físicos preferimos evitar esta clase de discusiones».

Otro objetor anterior expresa su insatisfacción: «Muy bien, pero estará de acuerdo en que, antes de que miráramos, una caja de cada par contenía una canica o estaba vacía. Ustedes los físicos creen en un mundo físicamente real, ¿o no?».

Él considera que su pregunta es puramente retórica. Al menos espera un «sí, por supuesto» como respuesta.

☯ Pero nuestra científica titubea, y de nuevo responde con evasivas: «Lo que existía antes de que miráramos, lo que usted llama “un mundo físicamente real”, es otro tema que la mayoría de físicos preferimos dejar a los filósofos. A todos los efectos prácticos, todo lo que necesitamos considerar es lo que vemos cuando efectivamente miramos».

«¡Lo que está usted diciendo acerca del mundo es descabellado!»,

exclama el insatisfecho objetor. «Está diciendo que lo que existía antes de mirar algo es creado por el modo de mirarlo.» La mayoría del grupo asiente con la cabeza; otros parecen desconcertados.

☯ «Bueno, les había prometido enseñarles algo extraordinario, y lo he hecho, ¿no?» En respuesta a algunos entrecejos fruncidos y negaciones con la cabeza, nuestra científica continúa: «Descubrimos que el mundo es más extraño de lo que nunca habíamos imaginado, quizá más extraño de lo que *podemos* imaginar. Pero así es como es». «¡Espere!», dice con firmeza una mujer hasta entonces callada. «No puede seguir eludiendo las cuestiones que suscita su demostración. Tiene que haber una explicación. Por ejemplo, en vez de estar en ambas cajas, puede que cada canica tenga una suerte de radar indetectable que le informa de la separación de su par de cajas.»

☯ «Nunca podemos excluir la existencia de cosas “indetectables”, es cierto», admite nuestra física. «Pero una teoría sin consecuencias comprobables más allá de aquello que pretende explicar no es científica. Igual de útil que su teoría del “radar indetectable” sería suponer que un hada invisible guía cada canica.» Advirtiendo que ha abochornado a la proponente de la teoría del radar, la científica se excusa: «Lo siento, he sido demasiado sarcástica. Las especulaciones como la suya pueden servir de lanzaderas para la concepción de teorías comprobables». «No pasa nada, no me he ofendido.»

☯ «En realidad, ya tenemos una teoría que explica todo lo que he demostrado experimentalmente aquí», continúa nuestra física, «y muchísimo más. Es la teoría cuántica. Es la base de toda la física y la química, y de buena parte de la tecnología moderna. Incluso las teorías cosmológicas se basan en ella.» «¿Por qué no la usa para explicarnos lo que nos ha mostrado?», pregunta una mujer sentada con la barbilla apoyada en sus manos.

☯ «Podría haberlo hecho», replica nuestra científica, «pero quería que comprendieran algo importante: que la conclusión extraordinaria a la que hemos llegado (que la condición física de la canica depende de nuestra libre elección del experimento) emana *directamente de los hechos experimentales*. “Sólo los hechos, señora, sólo los hechos”, como solía decir el sargento Friday. Es el *experimento* cuántico el que plantea el enigma, no es algo puramente *teórico*. Pero ahora que

ya han visto las demostraciones, permítanme revelarles la explicación que da la teoría cuántica de lo que hemos visto.»

«Mi aparato», continúa, «coloca una canica en cada par de cajas, pero no mete la canica en una de las cajas. Hablemos del primer experimento, en el que encontrábamos una canica en una de las cajas y veíamos que la otra estaba vacía.

»La teoría cuántica nos dice que, antes de que miráramos, la canica estaba en lo que llamamos un “estado de superposición”, simultáneamente en ambas cajas. Nuestro conocimiento de su presencia en una caja particular *causó* que se encontrara en esa caja en su totalidad. Aunque obtuviéramos ese conocimiento comprobando que la caja está vacía y ni siquiera viéramos la canica, la mera constatación de que se encuentra en la otra caja haría que estuviera allí en su totalidad. Adquirir conocimiento como sea es suficiente.»

El GRIMA (como grupo de gente razonable, inteligente y de mente abierta que es) escucha educadamente. Pero las palabras de nuestra científica no cuentan con su aceptación.

De pronto un hombre brama: «¿Está diciendo que antes de que miráramos y la encontráramos en una de las cajas, la canica no estaba allí, que nuestra observación creó su presencia en la caja? Eso sería absurdo».

«Un momento, creo que entiendo lo que está diciendo», dice la mujer sentada junto a él, acudiendo voluntariamente al quite. «He leído algo sobre mecánica cuántica. Creo que quiere decir que la función de onda de la canica, que es la probabilidad de su presencia, se repartía entre ambas cajas. Por supuesto, la canica real estaba en una de las dos cajas.»

✂ «La primera parte de lo que dice es correcta», dice nuestra física con tono alentador. «Lo que había en cada una de las cajas era, en efecto, la mitad de la función de onda de la canica. La ondulatoriedad es la probabilidad de encontrar una canica en la caja. Pero no hay ninguna “canica real” aparte de la función de onda. La función de onda es lo único que describe la física y, por lo tanto, es la única cosa *física*.» Nuestra científica observa ceños fruncidos y ojos mirando hacia arriba. Menos mal que es gente (presuntamente) de mente abierta. «Fíjense de qué modo tan elegante explica la teoría cuántica los patrones que obtenemos cuando se abren las cajas al mismo tiempo», continúa. «Las partes de la función de onda que estaban en cada caja se despliegan sobre la pantalla detectora.»

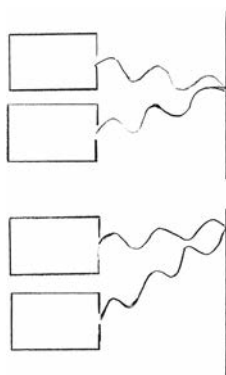


Figura 9.7. Refuerzo y cancelación mutua de las ondas procedentes de un par de cajas.

Prosigue haciendo ondear ambas manos mientras habla: «Las dos partes de la función de onda son ondas que salen de cada caja y llegan a la pantalla. En algunas zonas de la pantalla las crestas procedentes de una caja llegan al mismo tiempo que las crestas procedentes de la otra caja, de manera que las funciones de onda de ambas cajas se suman. Tenemos así una zona de gran ondulatoriedad, con una elevada probabilidad de encontrar una canica. En otras zonas de la pantalla, las crestas procedentes de una caja coinciden con los valles procedentes de la otra, de manera que las funciones de onda de ambas cajas se cancelan. Lo que tenemos entonces es una zona de ondulatoriedad nula, donde la probabilidad de encontrar una canica es cero. Ésta es la regla que le dice a cada canica

dónde puede incidir. La adición y cancelación de ondas se denomina “interferencia”, y es lo que explica el llamado “patrón de interferencia” que vemos».

Satisfecha con su explicación, nuestra científica espera sonriente con las manos en las caderas.

Una joven de aspecto pensativo responde pausadamente: «Entiendo que las ondas —usted las llama funciones de onda— puedan crear patrones de ondulatoriedad. Podemos verlo incluso en la superficie del agua. Pero la probabilidad tiene que ser *de* algo. ¿De qué es la probabilidad representada por la ondulatoriedad, si no de la presencia de una canica real situada en alguna parte?».

✂ «La función de onda de la canica en un punto da la probabilidad de *encontrarla* en ese punto», subraya nuestra científica. «No había ninguna canica real antes de que mirásemos y la encontrásemos allí.» «Sé que lo que digo no es fácil de aceptar», continúa comprensiva. «Lo diré de otra manera. Consideremos una canica cuya función de onda está igualmente repartida entre ambas cajas. Si miramos dentro de cualquier caja, descubrimos dónde está la canica. La probabilidad se hace uno en una caja y cero en la otra. La ondulatoriedad colapsa totalmente en una sola caja. Esa ondulatoriedad concentrada, *creada* por nuestra observación, es lo que ustedes llaman canica real. Pero el hecho de que podamos ver un patrón de interferencia prueba que no había ninguna canica real en una de las dos cajas antes de que miráramos.»

«¡Espere un segundo!», dice un individuo que ha estado frunciendo el entrecejo y negando con la cabeza. «Si usted lo dice de otra manera, yo también lo diré de otra manera: si la teoría cuántica dice que al observar que algo está en algún sitio lo estoy haciendo aparecer ahí, entonces lo que dice es ridículo.»

☪ «¿No querrá decir “chocante”, por casualidad?», replica nuestra física. «Niels Bohr, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, dijo una vez que cualquiera que no se sintiera desconcertado por la mecánica cuántica es que no había entendido nada. Pero ninguna de las predicciones de la teoría se ha demostrado errónea. Estará de acuerdo conmigo en que hacer predicciones sistemáticamente correctas es el *único* criterio que debe satisfacer una teoría científica. Así ha obrado el método científico desde Galileo. El que se ajuste o no a nuestras intuiciones debería ser irrelevante.»

En este punto, otra integrante del GRIMA ya no puede contenerse: «Si está diciendo que las cosas no observadas no son más que probabilidades, que nada es real hasta que lo observamos, está diciendo que vivimos en un mundo onírico. ¿Está intentando vendernos un neocio solipsismo?».

☪ «Bueno», replica nuestra científica calmadamente, «hay una gracia salvadora. Los objetos grandes que manejamos son bien reales. Recuerden que para demostrar la creación por la observación debemos hacer algún experimento de interferencia. Y esto no es factible con los objetos grandes. Así que, a todos los efectos prácticos, no hay de qué preocuparse.»

Mientras la destinataria de la respuesta se sulfura en silencio, otro miembro del GRIMA levanta un vacilante brazo y dice: «Si las cosas pequeñas no son reales, ¿cómo pueden serlo las grandes? Después de todo, las cosas grandes no son más que colecciones de cosas pequeñas. Una molécula de agua es un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, y un cubito de hielo es una colección de moléculas de agua, y un glaciar no es más que un gran cubo de hielo. ¿Acaso creamos el glaciar al observarlo?».

☪ Ahora nuestra científica está visiblemente incómoda. «Bueno, en cierto sentido... es un poco complicado... pero, como he dicho, a todos los efectos prácticos realmente la cosa no tiene importancia, así que... » Luego, al ver a un miembro del GRIMA con una expresión amigable, ella le invita a intervenir con una sonrisa.

Intentando ser conciliador, él le confía: «Quizás a donde nos quiere usted llevar es a la idea de que “nosotros creamos nuestra propia realidad”. A veces estoy mucho en esa línea».

☪ «Oh, puedo compartir eso», asiente nuestra física. «Pero esa clase de “realidad” es algo distinto. Cuando digo “yo creo mi propia realidad”, estoy hablando de realidad *subjetiva*. Estoy diciendo que acepto la responsabilidad de mis percepciones personales y mi situación social (o al menos algo parecido). La realidad de la que estamos hablando aquí es una realidad *objetiva*, una realidad física. Una observación crea una situación objetiva, que es la misma para todo el mundo. Después de que la observación de una de las cajas colapse la función de onda de la canica en una caja particular, cualquiera que eche un vistazo encontrará la canica allí, aunque pudiéramos haber demostrado que no estaba antes de abrir la caja.»

La mujer que se sulfuraba en silencio al final estalla: «¡Esta creación de realidad de la que habla es una locura! ¡Puede que su teoría cuántica *funcione* perfectamente, pero es absurda! ¿Es que a ustedes los físicos les dejan actuar con impunidad?».

☪ «Supongo», replica nuestra científica.

«¡Entonces la cosa tiene delito, y están saliendo bien librados!»

☪ «Bueno, tenemos por costumbre dejar escondido el secreto de familia.»

Esperamos que el lector se identifique con el GRIMA. Nosotros lo estamos, al menos cuando, con la mente abierta, intentamos comprender lo que en verdad ocurre. Lo mejor que uno puede hacer cuando se siente desconcertado es volver atrás y ponderar la demostración neutral de los hechos puros y duros. Y ahora, para dejar de preocuparnos y aprender a amar la mecánica cuántica desde un punto de vista pragmático, volvamos a la interpretación de Copenhague.

Maravillosa, maravillosa Copenhague

Maravillosa, maravillosa Copenhague...
 Salada vieja reina del mar
 Una vez navegué lejos
 Pero hoy he vuelto a casa
 Cantando Copenhague, maravillosa, maravillosa
 Copenhague para mí.

«Maravillosa Copenhague», de Frank Loesser

El significado de la mecánica newtoniana estaba claro. Describía un mundo razonable, un «universo de relojería». No necesitaba interpretación. Es verdad que la relatividad de Einstein es contraintuitiva, pero nadie interpreta la relatividad. Simplemente acabamos aceptando la idea de que los relojes en movimiento andan más despacio. La idea de que la observación *crea* la realidad observada es más difícil de aceptar. Eso sí requiere interpretación.

Los estudiantes entran en las facultades de física para estudiar el mundo físico tangible. El *Oxford English Dictionary* define este sentido de «físico» así de bien: «De naturaleza material o perteneciente a ella, *en oposición a lo psíquico, mental o espiritual*» (la cursiva es nuestra). Hace poco, el *New York Times* citaba estas palabras del historiador de la ciencia Jed Buchwald: «Los físicos... han sentido desde hace tiempo un especial aborrecimiento por admitir cuestiones con el más mínimo contenido emocional en su trabajo profesional». Es cierto que la mayoría de físicos prefiere no tener que vérselas con ese secreto de familia que es el papel del observador consciente. La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica permite eludir la cuestión. Es la postura «ortodoxa» en nuestra disciplina.

La interpretación de Copenhague

Niels Bohr reconoció enseguida que la física había topado con el observador, y que el asunto debía abordarse:

De hecho, el descubrimiento del cuanto de acción no sólo nos muestra la limitación natural de la física clásica, sino que, al arrojar nueva luz sobre el viejo problema filosófico de *la existencia objetiva de los fenómenos con independencia de nuestras observaciones, nos enfrenta a una situación hasta ahora desconocida en la ciencia natural.* (La cursiva es nuestra.)

La interpretación de Copenhague se concibió durante el año siguiente a la publicación de la ecuación de Schrödinger, con Niels Bohr como principal arquitecto. Werner Heisenberg, su colega más joven, fue el otro proponente principal. No hay una interpretación de Copenhague «oficial». Pero todas las versiones agarran el toro por los cuernos y afirman que *una observación produce la propiedad observada*. La palabra clave aquí es «observación». ¿Observación implica necesariamente observación *consciente*? Depende del contexto. (Cuando nos refiramos específicamente a observación consciente, intentaremos avisar al lector.)

La interpretación de Copenhague rebaja la afirmación de que la observación produce las propiedades observadas estableciendo que una observación tiene lugar allí donde un objeto microscópico a escala atómica interacciona con un objeto macroscópico. Cuando una película fotográfica es golpeada por un fotón y registra dónde ha incidido éste, la película ha «observado» el fotón. Cuando un contador Geiger emite un chasquido en respuesta a la entrada de un electrón en su tubo de descarga, el contador ha observado el electrón.

Así pues, la interpretación de Copenhague considera dos dominios: el dominio macroscópico clásico de nuestros instrumentos de medida, regido por las leyes de Newton, y el dominio microscópico cuántico de los átomos y otros objetos muy pequeños, regido por la ecuación de Schrödinger. Según esta interpretación, nunca tratamos *directamente* con los objetos cuánticos del dominio microscópico, así que no tenemos que preocuparnos por su realidad —o irrealdad— física. Todo lo que necesitamos es una «existencia» que permita el cálculo de sus efectos sobre nuestros instrumentos macroscópicos. Después de todo, lo único que reportamos es el comportamiento de esos instrumentos macroscópicos. Puesto que la diferencia de escala entre átomos y contadores Geiger es tan vasta, no hay problema en considerar lo microscópico y lo macroscópico como dominios separados.

Hay que decir que en 1932, sólo unos años después de que Bohr formulara la interpretación de Copenhague, John von Neumann presentó un tratamiento riguroso también referenciado como la interpretación de Copenhague. Von Neumann demostró que si —como se dice— la mecánica cuántica tiene validez universal, el encuentro *final* con la conciencia es

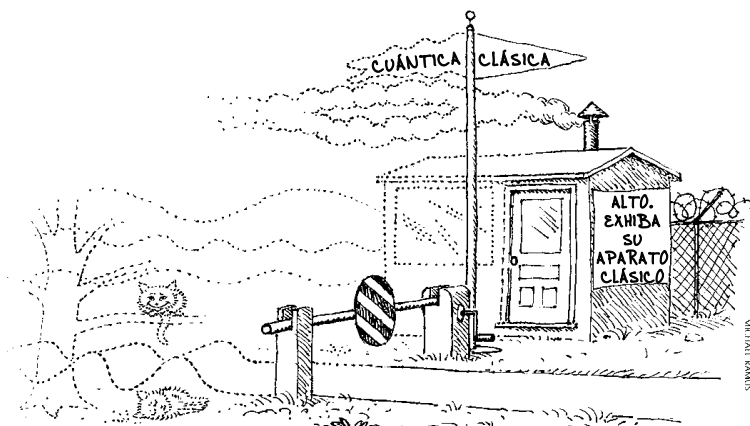


Figura 10.1. Dibujo de Michael Ramos, 1991. © American Institute of Physics.

inevitable, aunque a todos los efectos *prácticos* podemos considerar los aparatos macroscópicos como clásicos. Desde esta perspectiva, la separación de Bohr entre lo microscópico y lo macroscópico es sólo una muy buena aproximación. Discutiremos la conclusión de Von Neumann en el capítulo 16. Pero siempre que aludimos a la «observación», la cuestión de la conciencia acecha.

La mayoría de físicos, deseosos de evitar problemas filosóficos, aceptan por conveniencia la versión de Bohr de la interpretación de Copenhague. Ocasionalmente los físicos navegamos hasta orillas especulativas, pero cuando *hacemos* o enseñamos física, todos regresamos a la maravillosa Copenhague.

Aun así, a algunos físicos les incomoda que contemplemos los átomos como entes de algún modo irreales y, en cambio, aceptemos alegremente la realidad de los objetos hechos de átomos. Esta crítica es cada vez más pertinente a medida que la tecnología se adentra cada vez más en la mal definida tierra de nadie entre los dominios clásico y cuántico. Debemos explorar la interpretación de Copenhague, la postura aceptada tácitamente por los físicos en su trabajo diario.

Lo que la interpretación de Copenhague debe hacer aceptable

Aunque en el capítulo anterior hemos presentado nuestro «secreto de familia» en forma de relato, los experimentos descritos, y muchos otros parecidos, se efectúan cada dos por tres (incluso como demostraciones en clase). En nuestro relato, una caricatura de un experimento cuántico

de verdad, se envía un objeto pequeño a un par de cajas bien separadas. Al mirar dentro de las cajas, siempre encontraremos el objeto en una caja, mientras que la otra estará vacía.

De acuerdo con la teoría cuántica, sin embargo, antes de ser observado el objeto estaba en *ambas* cajas a la vez, y no en una de las dos. Además, podríamos haber optado por efectuar un experimento de interferencia para establecer este hecho. Así, en virtud de nuestra libre elección, podríamos establecer dos realidades previas contradictorias. Y, en principio, la mecánica cuántica se aplica a todo (a átomos tanto como a pelotas de béisbol). Es la tecnología la que restringe las demostraciones experimentales de fenómenos cuánticos a los objetos pequeños. Lo que la interpretación de Copenhague debe hacer aceptable es que la realidad física depende de cómo la observemos.

Comenzábamos nuestra exploración del enigma cuántico con algo de fantasía, relatando las peripecias de un visitante a Eug Ahne Poc. En este lugar mágico, nuestro visitante experimentaba un desconcierto como el que suscitan los fenómenos cuánticos. Pero allí las demostraciones se hacían con objetos macroscópicos. Cuando él preguntaba en qué choza estaba la pareja, se le mostraba la pareja junta en una misma choza. Cuando preguntaba en cuál de las chozas estaba el hombre y en cuál la mujer, se le mostraba un ocupante por choza. La realidad previa de la pareja dependía de la pregunta del visitante, del «experimento» que elegía. La explicación ofrecida por el *Rhob* era en esencia la interpretación de Copenhague (Eug Ahne Poc es Copenhague al revés).

Los tres pilares de la interpretación de Copenhague

La interpretación de Copenhague descansa sobre tres ideas básicas: la interpretación probabilística de la función de onda, el principio de incertidumbre de Heisenberg, y la complementariedad. Examinémoslas por este orden.

La interpretación probabilística de la función de onda

Como hemos venido diciendo, la ondulatoriedad de un objeto en una región (técnicamente, el cuadrado absoluto de la función de onda) es la probabilidad de encontrar el objeto en esa región. Esta interpretación probabilística de la ondulatoriedad ocupa un lugar central en la interpretación de Copenhague. Mientras que la física clásica es estrictamente determinista, la mecánica cuántica nos habla de la aleatoriedad última de la Naturaleza. Al nivel atómico, Dios juega a los dados (por mucho que

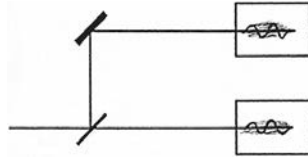


Figura 10.2. El experimento del átomo en un par de cajas.

Einstein lo negara). Que la Naturaleza tenga un carácter en última instancia estadístico no es demasiado difícil de aceptar para la mayoría. Después de todo, mucho de lo que ocurre en la vida diaria tiene una componente aleatoria. Si esto fuera todo, el «enigma cuántico» no preocuparía demasiado. Pero, en la mecánica cuántica, la probabilidad implica algo mucho más profundo que la simple aleatoriedad.

La probabilidad clásica en el juego de los cubiletes, por ejemplo, es la probabilidad *subjetiva* de la localización del guisante (para quien no la conoce). Pero hay un guisante real bajo uno u otro cubilete. La probabilidad cuántica, en cambio, *no* es la probabilidad de que el átomo *esté* en una localización dada, sino que es la probabilidad objetiva de que cualquiera de nosotros lo *encuentre* allí. El átomo no estaba en la caja antes de que *observáramos* su presencia en ella.

En la teoría cuántica no hay átomo aparte de la función de onda del átomo. Puesto que la función de onda del átomo abarca ambas cajas, el átomo mismo está simultáneamente en ambas cajas hasta que su observación *causa* su presencia en una de ellas.

Esto último es difícil de aceptar. Por eso insistimos una y otra vez (y pedimos perdón por ello). A la pregunta de qué nos dice la función de onda, incluso los estudiantes que han completado un curso de mecánica cuántica suelen responder incorrectamente que nos da la probabilidad de la presencia del objeto. El texto en el que basamos nuestras lecciones (y que incluimos en la lista de «lecturas recomendadas») subraya la respuesta correcta mediante una cita de Pascual Jordan, uno de los fundadores de la teoría cuántica: «Las observaciones no sólo *perturban* lo que se va a medir, sino que lo *producen*». Pero somos comprensivos con nuestros alumnos. El dominio de la mecánica cuántica ya es lo bastante difícil sin entrar en lo que significa.

Aunque hemos estado hablando una y otra vez de «observación», en realidad no hemos dicho qué constituye una observación. Éste es un tema controvertido. Cuando un fotón rebota en un átomo aislado, ¿se puede decir que el fotón observa al átomo?

En este caso la respuesta está clara: el fotón *no* observa al átomo. Tras el encuentro, el fotón es una onda de probabilidad que se propaga

en todas direcciones. El fotón y el átomo están en un estado de superposición conjunto que incluye todas las posiciones posibles del átomo antes de su encuentro. Esto puede confirmarse mediante un complejo experimento de interferencia de dos cuerpos. Según la interpretación de Copenhague, sólo cuando un instrumento de medida macroscópico registra la dirección del fotón rebotado, la existencia del átomo en una posición concreta se convierte en una realidad. Sólo entonces se observa la posición del átomo.

En términos más generales, la interpretación de Copenhague presume que allí donde una propiedad de un objeto microscópico afecta a un objeto macroscópico, la propiedad es «observada» y se convierte en una realidad física.

Siendo estrictos, un objeto macroscópico también debe obedecer a la mecánica cuántica y, si está aislado del resto del mundo, simplemente se une al estado de superposición del objeto microscópico que lo afecta. Así pues, tampoco «observaría». Pero, por razones prácticas, no es posible demostrar que un objeto macroscópico está en un estado de superposición. Veremos el porqué de esta imposibilidad dentro de unas cuantas páginas.

Precisemos lo que quiere decir «no observado». Consideremos nuestro átomo en su par de cajas. Hasta que se observa la posición del átomo en una de las cajas, el átomo no existe en ninguna caja *en particular*. No obstante, inicialmente habíamos «observado» el átomo cuando lo atrapamos y lo introdujimos en un par de cajas. Así pues, la posición del átomo en el *par* de cajas sí es una realidad observada. Pero, tomando el caso extremo de cajas muy grandes, podemos decir simplemente que el átomo no tiene posición alguna. No tiene la propiedad de posición. El mismo argumento vale para cualquier otra propiedad de un objeto.

La interpretación de Copenhague suele adoptar el punto de vista simple de que sólo las propiedades *observadas* de los objetos microscópicos existen. El cosmólogo John Wheeler lo expresó de manera concisa: «Ninguna propiedad microscópica es una propiedad hasta que es una propiedad observada».

Si llevamos este parecer a su conclusión lógica, los objetos microscópicos mismos no son cosas reales. Esto es lo que dice Heisenberg:

En los experimentos sobre sucesos atómicos tenemos que tratar con cosas y con hechos, con fenómenos que sean tan reales como cualquier fenómeno de la vida cotidiana. *Pero los átomos o las partículas elementales en sí no son reales; constituyen un mundo de potencialidades o posibilidades y no de cosas o hechos. (La cursiva es nuestra.)*

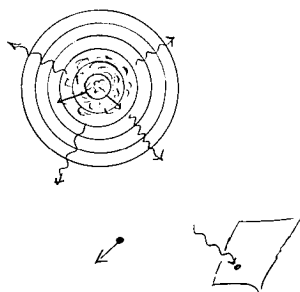


Figura 10.3. El rebote de un fotón en un átomo no crea la posición del átomo hasta que se detecta el fotón.

Según este punto de vista, los objetos a escala atómica existen sólo en algún dominio abstracto, no en el mundo físico. Si es así, no importa que no tengan «sentido». Nos basta con que afecten a nuestros instrumentos de medida conforme a la teoría cuántica. Esos objetos grandes sí tienen sentido, podemos considerarlos físicamente reales y aplicarles la física clásica. Pero, por supuesto, la descripción clásica de su comportamiento es sólo una *aproximación* a la descripción cuántica correcta. Si es así, en cierto sentido, el dominio microscópico no observado es el más real. A Platón le gustaría esto.

No obstante, si el dominio microscópico consiste meramente en posibilidades, ¿cómo da cuenta la física de las cosas pequeñas de las que están hechas las cosas grandes? La declaración más famosa sobre este punto suele atribuirse a Bohr:

No hay mundo cuántico. Sólo hay una descripción cuántica abstracta. Es un error pensar que la tarea de los físicos consiste en descubrir cómo *es* la naturaleza. La física tiene que ver con lo que podemos *decir* de la naturaleza. (La cursiva es nuestra.)

En realidad, esto es una síntesis del pensamiento de Bohr por uno de sus asociados. Pero se ajusta a lo que Bohr expresó en términos más complicados. La interpretación de Copenhague elude involucrar al observador consciente en la física a base de redefinir lo que ha sido la meta de la ciencia desde la antigua Grecia: explicar el mundo real.

Einstein rechazó la actitud de Bohr como derrotista, aduciendo que él acudió a la física para descubrir lo que pasa realmente, para conocer «los pensamientos de Dios». Schrödinger, por su parte, también rechazó la interpretación de Copenhague en términos muy amplios:

El punto de vista de Bohr de la imposibilidad de una descripción espacio-temporal [dónde *está* un objeto en un momento dado] lo rechazo desde un principio. La física no consiste sólo en investigación atómica, la ciencia no consiste sólo en física, y la vida no consiste sólo en ciencia. El objetivo de la investigación atómica es encajar nuestro conocimiento empírico concierne a ella en nuestro otro pensamiento. Todo este pensamiento, hasta donde concierne al mundo exterior, es activo en el espacio y en el tiempo. Si no puede encajarse en el espacio y en el tiempo, entonces fracasa por completo en su objetivo, y uno no sabe a qué propósito sirve realmente.

¿Negó Bohr realmente que una meta de la ciencia es explicar el mundo natural? Quizá no. Una vez dijo: «Lo opuesto de un enunciado correcto es un enunciado incorrecto, pero lo opuesto de una gran verdad puede ser otra gran verdad». El pensamiento de Bohr es notoriamente difícil de aprehender.

Un colega de Heisenberg sugirió una vez que el problema de la dualidad onda-partícula era una cuestión puramente semántica que podía resolverse diciendo que los electrones no eran ni ondas ni partículas, sino «ondículas». Heisenberg, insistiendo en que las cuestiones filosóficas planteadas por la mecánica cuántica incluían lo grande además de lo pequeño, replicó:

No, esa solución es un poco demasiado simple para mí. Después de todo, no estamos tratando con una propiedad especial de los electrones, sino con una propiedad de toda la materia y toda la radiación. Tomemos electrones, cuantos de luz, moléculas de benzol o *pedras*, siempre iremos a parar a estas dos características, lo corpuscular y lo ondulatorio. (La cursiva es nuestra.)

Lo que Heisenberg nos está diciendo es que, en principio (y eso es lo que nos importa aquí), *todo* es mecanocuántico y está sujeto en última instancia al enigma. Esto nos lleva al segundo pilar de la interpretación de Copenhague, el principio de incertidumbre, la idea por la que Heisenberg es más conocido.

El principio de incertidumbre de Heisenberg

Heisenberg demostró que cualquier ensayo experimental para refutar la tesis de la realidad creada por el observador está condenada al fracaso. He aquí un ejemplo:

Supongamos que, en el curso de un experimento de interferencia, echamos un vistazo para comprobar de qué caja ha salido cada átomo. La

constatación de que cada átomo *procede* de una caja demostraría que el átomo había *estado* en esa caja antes de incidir en la pantalla, aunque parezca obedecer una regla que implica que procedía de ambas cajas. En tal caso la teoría cuántica se demostraría inconsistente y, por ende, incorrecta. Para probar que cualquier demostración experimental de esta clase debe fracasar, Heisenberg ideó el experimento mental ahora conocido como el «microscopio de Heisenberg». (Los detalles no son esenciales para lo que sigue.)

Para ver de qué caja procede un átomo, podríamos reflejar luz en él (nuestro modo usual de ver cosas). Para no desviarlo de la banda permitida en el patrón de interferencia donde debería incidir, lo iluminaríamos con la mínima cantidad de luz posible: un solo fotón. Para discernir de qué caja ha salido el átomo, la longitud de onda de la luz debe ser menor que la separación de las cajas.

Pero una longitud de onda corta significa muchas crestas por segundo o, lo que es lo mismo, una frecuencia elevada. Y un fotón de alta frecuencia es una partícula de alta energía. En consecuencia, el átomo recibiría un buen golpe. Heisenberg calculó que los fotones con una longitud de onda lo bastante corta desviarían los átomos lo suficiente para difuminar cualquier patrón de interferencia al hacer que muchos de ellos fueran a parar a zonas prohibidas de la pantalla. Así, si viésemos salir cada átomo de una sola caja, no podríamos ver a la vez un patrón de interferencia indicador de que cada átomo salió de ambas cajas. Así pues, no se puede refutar la tesis de la realidad creada por el observador.

Orgulloso de su resultado, Heisenberg fue a mostrárselo a Bohr. Éste quedó impresionado, pero le dijo a su joven colega que el cálculo no era del todo correcto. Heisenberg había olvidado que, si se conocía el ángulo de reflexión del fotón, entonces sí se podía calcular de qué caja procedía el átomo. Pero la idea básica era buena. Bohr le mostró que podía volver a obtener su resultado si en su análisis incluía el tamaño de la lente microscópica necesaria para medir el ángulo del fotón. Esta omisión sin duda azoró a Heisenberg, quien luego contó que determinar la dirección de una onda de luz con un microscopio era una pregunta que había fallado en su examen doctoral.

Heisenberg generalizó su idea del microscopio convirtiéndola en el «principio de incertidumbre de Heisenberg». Cuanto más precisa sea la medida de la posición de un objeto, más incierta será su velocidad. Y viceversa, cuanto más precisa sea la medida de la velocidad de un objeto, más incierta será su posición.

El principio de incertidumbre también puede derivarse directamente de la ecuación de Schrödinger. De hecho, la observación de cualquier

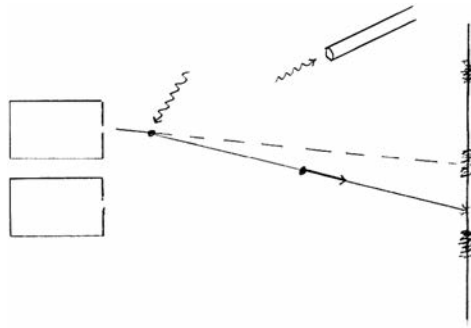


Figura 10.4. El microscopio de Heisenberg.

propiedad hace incierta una magnitud «complementaria». La posición y la velocidad son magnitudes complementarias. La energía y el tiempo de observación son otro par complementario. Lo que cuenta para nosotros es que cualquier observación perturba la propiedad observada lo bastante para evitar la refutación de la tesis mecanocuántica de que la observación crea la propiedad observada.

(Éste es un buen lugar para poner un ejemplo de por qué no se puede poner de manifiesto la extrañeza cuántica con objetos grandes. Para apreciar la interferencia, las ondas de un objeto deben pasar a través de una abertura menor que su longitud de onda. Incluso un grano de arena a poca velocidad tendría un momento de energía suficiente para hacer que su longitud de onda fuera más corta que el grano mismo. Pero si el grano es más ancho que su longitud de onda y la abertura deber ser más estrecha que la longitud de onda, entonces el grano no podría pasar a través de la abertura para participar en la creación de un patrón de interferencia. De hecho, la interferencia sería posible si el grano de arena viajara lo bastante despacio; pero entonces tendría que recorrer una longitud menor que la de un átomo en un siglo. Nuestra paciencia no da para tanto.)

Dicho sea de paso, el principio de incertidumbre asoma también en algunas discusiones sobre el libre albedrío. En la visión del mundo de la física clásica, si un «ojo que todo lo ve» conociera la posición y velocidad de cada objeto del universo en un momento dado, todo el futuro podría predecirse con certeza. En la medida en que somos parte del universo físico, la física clásica descarta el libre albedrío. Puesto que el principio de incertidumbre niega este determinismo newtoniano, ha estimulado discusiones filosóficas acerca del determinismo y el libre albedrío. Pero la aleatoriedad o la cuantización no son lo mismo que la libre elección. Volveremos a este asunto en los últimos capítulos.

El principio de incertidumbre establece que cualquier observación de un objeto perturba necesariamente el objeto observado lo suficiente para impedir el incumplimiento de la teoría cuántica, pero eso no basta. También necesitamos el tercer pilar de la interpretación de Copenhague: la complementariedad.

Complementariedad

Consideremos un conjunto de cajas pareadas tal que cada par contiene un átomo en un estado de superposición que abarca ambas cajas. Miremos dentro de una caja de cada par. Más o menos la mitad de las veces veremos un átomo en la caja que hemos abierto. De acuerdo con el principio de incertidumbre, la observación de ese átomo lo ha perturbado por culpa de los fotones que lo han iluminado para que podamos verlo. Desechemos todos los pares de cajas en los que hemos visto, y por lo tanto perturbado, un átomo. De esta manera nos quedamos con un subconjunto de cajas pareadas cuyos átomos no han sido físicamente perturbados, ya que ningún fotón ha incidido sobre ellos. Pero ahora sabemos en qué caja de cada par está el átomo: en la que no hemos abierto.

Tratemos este subconjunto de cajas pareadas como cualquier otro y ensayemos un experimento de interferencia. Un patrón de interferencia probaría que cada átomo había estado a la vez en ambas cajas de su par. Pero ya hemos determinado que cada átomo estaba en la caja que no hemos abierto. Así pues, la aparición de un patrón de interferencia evidenciaría una inconsistencia en la mecánica cuántica.

Lo cierto es que estos átomos presuntamente no perturbados *no* generan un patrón de interferencia. ¿Qué es lo que hace que estos átomos no perturbados adopten un comportamiento diferente? Después de todo, si hubiéramos efectuado un experimento de interferencia antes de abrir las cajas vacías, esos mismos átomos habrían creado un patrón de interferencia.

Aunque los átomos no fueron perturbados físicamente —no colisionaron con ningún fotón— habíamos determinado en qué caja estaba cada uno. Nuestra adquisición de ese *conocimiento* bastó para concentrar la totalidad de cada átomo en una sola caja. No ver esto como algo misterioso requiere alguna explicación.

La explicación que ofrecemos en una clase de mecánica cuántica para estudiantes de física es que cuando miramos en una caja y no encontramos ningún átomo, instantáneamente provocamos el colapso de la función de onda del átomo en la otra caja. En el juego de los cubiletes, nuestra observación del guisante colapsa la probabilidad de su presencia,

que era de $\frac{1}{2}$ para cada cubilete, a 0 en el cubilete vacío y 1 —total certidumbre— en el cubilete que contiene el guisante. Lo mismo ocurre con la ondulatoriedad, que, después de todo, es una probabilidad.

La explicación es un poco facilona. La probabilidad clásica es, de entrada, una medida del conocimiento de uno. Por otro lado, la probabilidad cuántica, lo que hemos llamado ondulatoriedad, se supone que es todo lo que hay del átomo físico. Desde luego es todo de lo que se ocupa la física. Parece que tenemos un problema. Pero a los estudiantes de física, cuyo interés prioritario es aprender a calcular, raramente les distraemos con cuestiones filosóficas.

Niels Bohr comprendió que, para que los físicos se permitieran continuar haciendo física sin empantanarse en la filosofía, tenía que afrontar la influencia del conocimiento en los fenómenos físicos. Fruto de esta inquietud fue su principio de complementariedad: los dos aspectos de un objeto microscópico, el de partícula y el de onda, son «complementarios», y una descripción completa requiere ambos aspectos contradictorios, *pero debemos considerar sólo un aspecto cada vez*.

Evitamos la contradicción aparente a base de considerar que el sistema microscópico —el átomo— no existe por sí solo. Siempre debemos incluir en nuestra discusión, al menos implícitamente, los diferentes aparatos macroscópicos empleados para evidenciar cada uno de los aspectos complementarios. Entonces todo va bien, porque, *en última instancia, lo único que reportamos es el comportamiento clásico de esos aparatos*. En palabras de Bohr:

El punto decisivo es reconocer que la descripción del dispositivo experimental y el registro de las observaciones debe hacerse en lenguaje llano, adecuadamente refinado por la terminología física usual. Ésta es una simple demanda lógica, ya que por la palabra «experimento» sólo podemos entender un procedimiento en relación al cual somos capaces de comunicar a otros lo que hemos hecho y lo que hemos averiguado.

En los dispositivos experimentales reales, el cumplimiento de tales requerimientos está asegurado por el uso, como instrumentos de medida, de cuerpos rígidos lo bastante pesados para permitir un registro completamente clásico de sus posiciones y velocidades relativas.

Dicho de otra manera, aunque los físicos hablan de los átomos y otras entidades microscópicas como si fueran cosas físicamente reales, Bohr nos dice que las cosas microscópicas son sólo conceptos que empleamos para describir el comportamiento de nuestros instrumentos de medida. No son objetos con una realidad independiente, como los gui-

santes o las piedras, de los que podemos hablar directamente. Bueno, sí, los guisantes y las piedras son, en sentido estricto, entidades mecano-cuánticas. Pero, a todos los efectos prácticos, no necesitamos ir más allá de la física clásica a la hora de describir el comportamiento de nuestros aparatos.

Esta postura recuerda el *hypotheses non fingo* de Newton, su convicción de que la explicación de la gravedad no tiene por qué ir más allá de las ecuaciones que predicen los movimientos planetarios. Por supuesto, Einstein proporcionó una grandiosa intuición de la naturaleza del espacio y el tiempo al ir más allá de las ecuaciones de Newton con su propia teoría de la gravitación, la relatividad general.

En el espíritu de la complementariedad, hay otra salida ligeramente diferente que la flexible interpretación de Copenhague puede tomar para no tener que preocuparnos de la realidad creada por el observador. Afirma que no tiene sentido discutir experimentos que *podrían* haberse hecho, pero no se han hecho. Después de todo, si uno hace un experimento de interferencia que demuestra que cada objeto estuvo simultáneamente en ambas cajas, entonces no podría demostrar que *esos mismos objetos* han estado en una sola caja.

Si negamos la necesidad de tener en cuenta observaciones que *podrían* haberse hecho, pero *no* se hicieron, no veremos dónde está el problema. Podríamos simplemente asumir que, para los objetos que de hecho estaban en una caja, *eso* es lo que queríamos demostrar; y para los objetos que de hecho estaban simultáneamente en ambas cajas, *eso* es lo que queríamos demostrar. Nuestras elecciones estaban correlacionadas con lo que había en los pares de cajas. No fueron elecciones auténticamente libres.

Esta situación es indistinguible de un mundo completamente determinista. También es un mundo conspirativo. No sólo nuestras elecciones no fueron libres, sino que el universo conspiró para correlacionarlas con las distintas naturalezas de los objetos que estaban en los pares de cajas. En cualquier caso, al tomar esta salida, la interpretación de Copenhague parece negar el libre albedrío. Y puede que, en efecto, el libre albedrío sea una ilusión y el mundo sea completamente determinista, como algunos afirmarían.

Para la mayoría de nosotros el libre albedrío es una evidencia. Al menos nosotros (Fred y Bruce) estamos seguros de nuestro propio libre albedrío (aunque ninguno de nosotros pueda estar absolutamente seguro de que el coautor de este libro no es un robot sofisticado).

La aceptación de (y la incomodidad con) la interpretación de Copenhague

La interpretación de Copenhague nos pide que aceptemos la mecánica cuántica pragmáticamente. (Una síntesis del pragmatismo en forma de aforismo de pegatina: «Funciona, luego es verdad».)

Cuando los físicos queremos evitar meternos en berenjenales filosóficos (es decir, casi siempre) aceptamos tácitamente la interpretación de Copenhague. Los físicos tendemos a ser pragmáticos. Aunque hablamos de objetos microscópicos como si fueran canicas reales, en rigor lo que hacemos es analizar y registrar el comportamiento de nuestros aparatos de laboratorio. Estos objetos grandes no plantean ninguna paradoja: nunca hace falta considerar que están en estados de superposición.

Las propiedades de los objetos microscópicos se *infieren* a partir del comportamiento de nuestros aparatos. Aun así, hablamos de objetos microscópicos, los visualizamos y hacemos cálculos con modelos de ellos como si fueran tan reales como minúsculas canicas verdes. Pero si tenemos que enfrentarnos a la paradoja, nos escudamos en la interpretación de Copenhague, que los reduce a teorizaciones. Aunque deberían explicar con exactitud el comportamiento de nuestros equipos macroscópicos, los objetos microscópicos mismos no necesitan «tener sentido».

Considérese una analogía extraída de la psicología (como hizo Bohr). Básicamente, registramos y analizamos el comportamiento de una persona. El comportamiento físico mismo no plantea ninguna paradoja. Las motivaciones de una persona, sin embargo, son *teorías* que deberían predecir con exactitud su comportamiento. Pero las motivaciones no necesitan tener sentido, y a menudo no lo tienen. Adoptamos pragmáticamente esta postura a la hora de tratar con personas. La interpretación de Copenhague nos pide que hagamos lo mismo a la hora de tratar con fenómenos físicos microscópicos.

Bohr y otros dotaron a la interpretación de Copenhague de amplios fundamentos filosóficos. Pero incluso cuando se acepta literalmente sin más, proporciona una base lógica para que los físicos se ocupen de los aspectos prácticos de la física sin preocuparse de buscar significados más profundos.

Si el lector no se siente cómodo con la solución de la interpretación de Copenhague al problema del observador, no es el único. Cuando nosotros dos nos interrogamos honestamente sobre lo que ocurre en realidad, siempre sentimos perplejidad. Y no conocemos a nadie que entienda y se tome en serio lo que la mecánica cuántica parece estar diciéndonos y que no admita sentirse desconcertado.

No obstante, hasta hace poco la mayoría de libros de texto de mecánica cuántica daba a entender que la interpretación de Copenhague resolvía todos los problemas. Un texto de 1980 minimizaba el enigma cuántico con un chiste, un dibujo de un ornitorrinco con la leyenda «el análogo clásico del electrón». La idea era que, en el dominio de lo muy pequeño, uno no debería sentirse más sorprendido ante un objeto que es a la vez onda y partícula que un zoólogo en Australia ante un animal que es a la vez un mamífero y un «pato» que pone huevos. En el prefacio, otro autor promete «hacer la mecánica cuántica menos misteriosa para el estudiante». Lo consigue a base de no sacar nunca a la luz el misterio.

Esta actitud probablemente motivó el comentario de Murray Gell-Mann (en su discurso de aceptación del Premio Nobel en 1976) de que Niels Bohr lavó el cerebro de generaciones de físicos haciéndoles creer que el problema estaba resuelto. La inquietud de Gell-Mann ha perdido algo de relevancia hoy, ya que la mayoría de textos actuales al menos apunta los temas no resueltos.

Para la interpretación de Copenhague era esencial una separación clara entre el micromundo cuántico y el macromundo clásico. Esa separación dependía de la inmensa diferencia de escala entre los átomos y los objetos que manejamos directamente. En tiempos de Bohr había una amplia tierra de nadie entre ambos dominios. Parecía aceptable, pues, pensar en un macromundo regido por la física clásica y un micromundo regido por la física cuántica.

Pero la tecnología actual ha invadido esa tierra de nadie. Con un láser apropiado podemos ver átomos individuales a simple vista igual que vemos motas de polvo en un haz de luz. Con el microscopio de efecto túnel no sólo podemos ver átomos individuales, sino que podemos manipularlos. Unos físicos han escrito el nombre de su empresa ordenando treinta y cinco átomos de argón. Ahora los átomos pueden parecer tan reales como las canicas verdes.

La mecánica cuántica se está aplicando cada vez más a objetos cada vez más grandes. Incluso una barra de una tonelada pensada para detectar ondas de gravedad debe analizarse mecanocuánticamente. Para estudiar el *Big Bang*, los cosmólogos formulan una ecuación de onda para el universo entero. Cada vez resulta más difícil aceptar a la ligera que el dominio cuántico carece de realidad física.

De todas maneras, muchos físicos, cuando se les insta a dar respuesta a la extraña naturaleza del micromundo, dirían algo así como: «La Naturaleza *es* así. Simplemente, la realidad no es lo que intuitivamente pensaríamos que es. La mecánica cuántica nos fuerza a abandonar el realismo ingenuo». Y aquí dejarían el asunto. Todo el mundo está dispuesto

a abandonar el realismo *ingenuo*. Pero pocos físicos están dispuestos a abandonar el «realismo científico», definido como «la tesis de que los objetos de conocimiento científico existen y actúan con independencia del conocimiento que se tiene de ellos».


En realidad, la mayoría de físicos prefiere no hablar demasiado de las implicaciones de la mecánica cuántica. Pocos niegan la extrañeza cuántica, pero la mayoría cree que la interpretación de Copenhague (o su extensión moderna, la «decoherencia», discutida en el capítulo 14) se ha ocupado de ella a todos los efectos prácticos, y *eso es todo lo que cuenta*.


Pero otros físicos, especialmente los jóvenes, tienen la mente cada vez más abierta a ideas que van más allá de la interpretación de Copenhague. Han proliferado las propuestas descabelladas, que examinaremos más adelante. En los últimos años, la preocupación por la conciencia misma (así como su conexión con la mecánica cuántica) ha aumentado entre los filósofos, los psicólogos y hasta los neurólogos. Una explicación ofrecida de esta tendencia es que los estudiantes de «mente expandida» de los sesenta dirigen ahora los departamentos académicos.


La interpretación de Copenhague ha sido caricaturizada recientemente como «¡calla y calcula!». No es muy agudo, pero tampoco completamente injusto. De hecho, es el precepto correcto para la mayoría de físicos la mayor parte del tiempo. La interpretación de Copenhague es la mejor manera de tratar con la mecánica cuántica a todos los efectos prácticos. Nos asegura que en nuestros laboratorios y escritorios podemos hacer uso de la mecánica cuántica sin preocuparnos de lo que ocurre realmente. La interpretación de Copenhague nos enseña que la mecánica cuántica es una teoría plenamente consistente y suficiente como guía de los fenómenos físicos que nos rodean. ¡Eso está bien!

Pero quizá queramos algo más que un algoritmo para calcular probabilidades. La física clásica nos dio más: impartió una nueva visión del mundo que cambió nuestra cultura. Por supuesto, ahora sabemos que es una visión del mundo equivocada en lo fundamental. ¿Puede ser que en el futuro nos aguarde un impacto cuántico en nuestra visión del mundo?

Un resumen de la interpretación de Copenhague

 = objetor

 = copenhaguista

 La mecánica cuántica viola el sentido común. Debe haber algo incorrecto en ella.

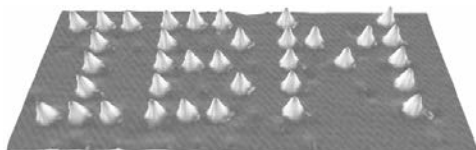


Figura 10.5. Treinta y cinco átomos de argón. Cortesía de IBM.

- No. Ninguna de sus predicciones se ha demostrado incorrecta. Funciona perfectamente.
- Cuanto mejor funciona, más absurda parece. No es lógicamente consistente.
- Oh, ya sabes que Einstein intentó demostrar eso, y abandonó.
- Pero la mecánica cuántica dice que las cosas muy pequeñas no tienen propiedades en sí mismas, que yo creo lo que veo por el acto de mirar.
- Cierto. Percibes la idea básica con bastante claridad.
- Pero si las cosas pequeñas sólo tienen propiedades creadas por el observador, entonces no tienen realidad física. Sólo se hacen reales cuando están siendo observadas. ¡Esto no tiene sentido!
- No te preocupes por la «realidad» o por el «sentido». Las cosas pequeñas, nunca observadas directamente, no son más que modelos. Y los modelos no necesitan tener sentido. Sólo tienen que funcionar. Las cosas grandes sí son bien reales. Así que todo está bien como está.
- Pero una cosa grande no es más que una *colección* de cosas pequeñas, de átomos. Para ser coherente, la mecánica cuántica tendría que decirnos que *nada* es real hasta que se observa.
- Bueno, si insistes. Pero eso no tiene importancia.
- ¡¿Que no tiene importancia?! Si la mecánica cuántica dice que mi gato y mi mesa no son reales hasta que son *observados*, lo que dice es una *insensatez*.
- No necesariamente. En realidad, nunca vemos nada insensato en el comportamiento de las cosas grandes. A todos los efectos prácticos, las cosas grandes *siempre* están siendo observadas.
- A todos los efectos *prácticos*, sí. Pero ¿cuál es el *significado* de esta realidad creada por el observador?
- La ciencia no proporciona significados. La ciencia sólo nos dice lo que pasa. Sólo predice lo que se observará.
- Pues yo quiero algo más que una receta para hacer predicciones. Si sostienes que el sentido común se equivoca, quiero saber lo que es correcto.

⌘ Pero hemos convenido en que la mecánica cuántica es correcta. La ecuación de Schrödinger nos dice todo lo que ocurrirá, todo lo que puede observarse.

⌘ ¡Quiero saber lo que ocurre realmente! ¡Quiero saber toda la verdad! La descripción mecanocuántica es todo lo que hay. Y nada más.

⌘ ¡Maldita sea! Hay un mundo real ahí fuera. Quiero saber la verdad acerca de la Naturaleza.

⌘ La ciencia no puede revelar ningún mundo real más allá de lo observado. Todo lo demás es filosofía. *Ésta* es la «verdad» (si tienes que quedarte con una).

⌘ ¡Eso es derrotismo! Nunca me daré por satisfecho con una respuesta tan superficial. Con la mecánica cuántica la ciencia renuncia a su meta filosófica básica, abandona su misión de explicar el mundo físico.

⌘ Es una pena. Pero no me vengas con filosofía. Tengo *trabajo* científico que hacer.

⌘ ¡La mecánica cuántica es manifiestamente absurda! Nunca la aceptaré como respuesta final.

⌘ (*Hace oídos sordos.*)

El controvertido gato de Schrödinger

El sistema entero contendría partes iguales de gato vivo y gato muerto.

Erwin Schrödinger

Cuando oigo hablar del gato de Schrödinger, saco la pistola.

Stephen Hawking

Hacia 1935, la estructura básica de la mecánica cuántica estaba clara. La ecuación de Schrödinger era la nueva ley universal del movimiento. Aunque sólo era obligatoria a escala atómica, la teoría cuántica presumiblemente regía el comportamiento de *todo*. La física anterior, que pasó a llamarse «clásica», era la aproximación, mucho más fácil, apropiada para el dominio macroscópico.

Aunque la teoría cuántica funciona perfectamente, nos dice algo muy extraño: un objeto es creado en alguna parte por nuestra observación del mismo. Enseguida contaremos la metáfora que ideó Schrödinger para dar a entender que la teoría cuántica es absurda. Los físicos toleran esta absurdidad porque la teoría funciona inmejorablemente. Pero la metáfora de Schrödinger sigue resonando con fuerza hoy.

En la discusión de cualquier teoría hay implícita alguna interpretación. En lo que sigue, entenderemos la mecánica cuántica según la interpretación de Copenhague, a menos que digamos otra cosa. Hay un aspecto de la interpretación de Copenhague que ha estado implícito en nuestra discusión desde que introdujimos el significado de la función de onda en términos de probabilidad.

La teoría cuántica establece que los átomos y las moléculas no están en ninguna parte hasta que nuestra observación los crea allí donde los detectamos. De acuerdo con Heisenberg, los objetos microscópicos no son «reales», sino que son meras «potencialidades». Pero si, de algún modo, los átomos no observados carecen de realidad física, ¿qué decir

de las cosas hechas de átomos? Por ejemplo, ¿son reales las sillas? Una galaxia no observada, ¿está realmente allí? Al hacernos estas preguntas nos estamos enfrentando al vergonzoso secreto de familia que la física suele mantener bien oculto.

¿Es que la teoría cuántica no es aplicable a las cosas grandes? No, la teoría cuántica subyace tras toda la física: sin ella no podríamos llegar ni a la primera base con objetos macroscópicos del estilo de los láseres, los microprocesadores de silicio o las estrellas. En última instancia, todo funciona de manera mecanocuántica. Pero, puesto que la extrañeza cuántica no se manifiesta con las cosas grandes, la interpretación de Copenhague insiste en que no hay de qué preocuparse, y así lo acepta pragmáticamente la mayoría de físicos.

Schrödinger, sin embargo, sí se sentía incómodo: si la teoría cuántica podía negar la realidad de los átomos, también negaría la realidad de las cosas hechas de átomos. Schrödinger estaba seguro de que algo tan estrafalario no podía ser la ley universal de la Naturaleza. Podemos imaginar una conversación entre un disgustado Schrödinger y un joven colega pragmático.

SCHRÖDINGER: La interpretación de Copenhague es una escapatoria. La Naturaleza está intentando decirnos algo. La interpretación de Copenhague nos dice que no escuchemos. La teoría cuántica nos propone una visión del mundo absurda.

COLEGA: Pero, señor Schrödinger, su teoría funciona la mar de bien. Ninguna de sus predicciones ha fallado, así que todo es perfecto.

S: Vamos a ver, resulta que miro y detecto un átomo en alguna parte. La teoría dice que justo antes de que yo mirara no estaba allí, no existía *en ninguna parte*.

C: Correcto. Antes de que usted mirara para localizarlo, era una función de onda, nada más que probabilidad. El átomo *no* existía en ningún lugar concreto.

S: ¿Está usted diciendo que mi observación *creó* el átomo donde lo localicé?

C: Bueno, sí. Eso es lo que dice su teoría.

S: Eso es un estúpido solipsismo. Está usted negando la existencia de un mundo físicamente real. Pero el sillón en el que estoy sentado es bien real.

C: Oh, por supuesto, profesor Schrödinger, su sillón es real. Sólo las propiedades de las cosas muy pequeñas son creadas por la observación.

S: ¿Está diciendo que la teoría cuántica sólo se aplica a las cosas pequeñas?

- c: No, señor Schrödinger, en principio su ecuación vale para todo. Pero es imposible hacer experimentos de interferencia con objetos grandes. Así que, a todos los efectos prácticos, no hay razón para preocuparse por la realidad de las cosas grandes.
- s: Pero un objeto grande no es más que una colección de átomos. Si un átomo no tiene realidad física, una colección de ellos tampoco puede ser real. Si la teoría cuántica dice que el mundo real es creado por nuestra observación del mismo, la teoría es absurda.

Aplicando una técnica lógica llamada *reductio ad absurdum*, o reducción al absurdo, Schrödinger urdió una metáfora para dar a entender que la teoría cuántica conducía a una conclusión absurda. El lector puede decidir por sí mismo si acepta o no el argumento, pero es mejor que espere a que hayamos expuesto el contraargumento estándar.

El cuento del gato en la caja

Pedimos disculpas por volver otra vez a nuestro ejemplo de las cajas pareadas, pero es nuestro primer paso en el argumento de Schrödinger. Recordemos que un átomo que incidía sobre un espejo semitransparente acababa con la mitad de su ondulatoriedad en cada una de dos cajas separadas. De acuerdo con la teoría cuántica, el átomo no está en una caja concreta antes de que lo veamos en una de las cajas, sino que está en un estado de superposición que abarca ambas cajas. Al mirar dentro de una caja, la ondulatoriedad colapsa y encontramos o bien un átomo *entero* o bien nada de nada. (El resultado de la observación es aleatorio y no podemos escogerlo.) Si la caja resulta estar vacía, el átomo estará en la otra caja. Pero con un montón de cajas pareadas podríamos haber generado un patrón de interferencia indicativo de que, *antes* de que miráramos, cada átomo había estado simultáneamente en las dos cajas de su par.

Nuestra versión del argumento de Schrödinger parte de aquí. Ahora supongamos que una de las cajas del par no está vacía, sino que contiene un contador Geiger que se «dispara» si registra la entrada de un átomo. Al dispararse, el contador acciona una palanca que destapa un frasco de cianuro de hidrógeno. En la caja también hay un gato, que morirá si el venenoso cianuro sale del frasco. Todo el conjunto del par de cajas, el átomo, el contador Geiger, el cianuro y el gato está aislado y es inobservable.

Nos apresuramos a puntualizar que Schrödinger nunca contempló poner en peligro a un gato de carne y hueso. Éste era un *experimento mental*. Él describió el aparato como un «artilugio infernal».

Ahora bien, como argumentó Schrödinger, un contador Geiger no es más que una colección de átomos ordinarios, aunque compleja y bien organizada, que está gobernada por las mismas leyes físicas —las de la mecánica cuántica— que gobiernan los átomos que la integran. Lo mismo vale, presumiblemente, para el gato.

Puesto que el espejo semitransparente divide en dos la ondulatoriedad del átomo, una mitad va a la caja que contiene el contador Geiger y el gato, y otra mitad va a la otra caja. Dado que el sistema está totalmente aislado y no es observable de ninguna manera, el átomo se encuentra en un estado de superposición que podemos describir como su presencia simultánea en la caja que contiene el contador y en la caja vacía. Para simplificar diremos que el átomo está a la vez en ambas cajas.

Por lo tanto, el contador Geiger aún por observar debe estar también en un estado de superposición: disparado y no disparado a la vez. El frasco de cianuro debe estar tapado y destapado. El gato debe estar vivo y muerto. Por supuesto, esto es difícil de imaginar. Imposible de imaginar, quizá. Pero no es más que una extensión lógica de lo que nos dice la teoría cuántica.

La figura 11.1 ilustra la versión mecanocuántica de nuestro gato aún no observado y el resto del «artilugio infernal» de Schrödinger con una imagen metafórica mixta. El átomo está representado por su función de onda en ambas cajas. Puesto que las funciones de onda de los contadores Geiger y los gatos son demasiado complicadas de representar, nos hemos limitado a dibujar el contador Geiger disparado y no disparado (palanca arriba y palanca abajo), el frasco de cianuro abierto y cerrado, y el gato simultáneamente muerto y vivo.

¿Qué veremos si miramos dentro de la caja para ver si el gato está muerto o vivo? Cuando en nuestro par de cajas sólo teníamos un átomo en un estado de superposición, la inspección de una caja colapsaba la función de onda totalmente en una de las dos cajas. Aquí un vistazo dentro de la caja colapsa la función de onda del sistema entero.

La teoría predice una situación autoconsistente. Si encontramos que el gato está muerto, entonces el contador Geiger se habrá disparado, el frasco de cianuro estará abierto y el átomo estará en la caja del gato. Si encontramos que el gato está vivo, entonces el contador Geiger no se habrá disparado, el frasco de cianuro estará cerrado y el átomo estará en la otra caja.

Pero, de acuerdo con la teoría cuántica, *antes* de que miráramos el átomo no estaba en una u otra caja. Estaba en un estado de superposición, simultáneamente en ambas cajas. Por lo tanto, si admitimos que los gatos no son entidades eximidas del cumplimiento de las leyes físicas,

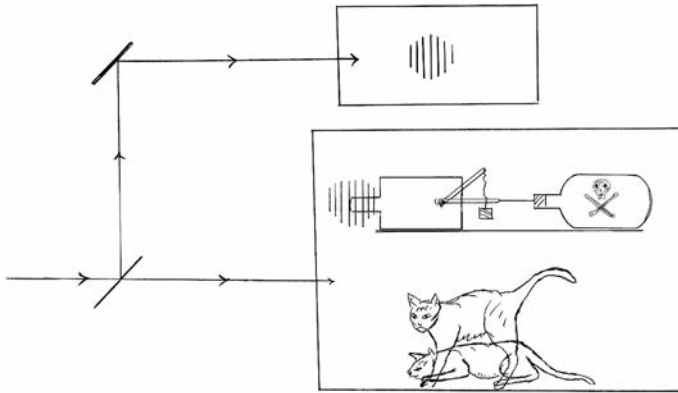


Figura 11.1. El gato de Schrödinger.

antes de que miráramos el gato estaba en un estado de superposición, vivo y muerto por igual. No hablamos de un gato desmejorado, sino de un gato bien sano y bien muerto al mismo tiempo.

Aunque la condición viva o muerta del gato no existía como realidad física antes de ser observada, la existencia del gato en la caja *era* una realidad. Pero sólo porque dicha existencia fue observada por quienquiera que metiera al gato en la caja.

Puesto que nuestra observación colapsó el estado de superposición del gato, ¿somos culpables de haberlo matado si lo encontramos muerto? En realidad no, si es que no lo dispusimos así en primera instancia. No podríamos haber decidido cómo colapsaría la función de onda del sistema entero. El colapso en gato vivo o gato muerto es aleatorio.

Aquí tenemos que ponderar lo siguiente: supongamos que el gato se colocó en la caja y el átomo se lanzó al dispositivo de espejos hace ocho horas. Durante esas ocho horas el sistema habrá evolucionado fuera de nuestra vista. Si encontramos que el gato está vivo, después de ocho horas sin probar bocado estará hambriento. Si el gato está muerto, un veterinario forense podrá determinar que murió hace ocho horas. Nuestra observación no sólo crea la realidad actual, sino una historia congruente con esa realidad.

Podríamos pensar que ésta es una idea absurda. ¡Precisamente eso es lo que pretendía Schrödinger! Lo que quería decirnos con la metáfora del gato era que, llevada a su conclusión lógica, la teoría cuántica es absurda. Por lo tanto, no es aceptable como descripción de lo que realmente ocurre.

Por supuesto, la idea de un gato simultáneamente vivo y muerto era tan ridícula para los otros físicos como para el propio Schrödinger. Pero pocos se preocuparon por su demostración de la absurdidad de la teoría.

Funcionaba demasiado bien para abandonarla sólo porque carecía de sentido.

Enseguida volveremos a la controversia que todavía hoy sigue suscitando el gato de Schrödinger. Pero antes, aclaremos una cuestión. Si el gato está simultáneamente vivo y muerto, ¿podemos *verlo* de algún modo en ese estado? No. Aunque en la figura 11.1 hemos superpuesto un gato vivo y otro muerto, nunca veríamos nada de esto. La observación colapsa el sistema entero colocando el gato en un estado vivo o muerto. ¿Y si echamos un vistazo mínimo? ¿Puede un vistazo mínimo colapsar la función de onda de un gato entero?

Consideremos la observación mínima posible, que sería la reflexión de un único fotón por el gato a través de minúsculos agujeros en la caja. Un solo fotón no puede darnos mucha información. Pero si vemos que queda bloqueado inferiremos que el gato está levantado y, por ende, vivo, lo que colapsará el estado de superposición en el estado vivo. La teoría cuántica nos dice que *cualquier* observación que aporte información colapsa el estado previo.

¡Un momento! ¿Acaso el *gato* no puede observar si el frasco de cianuro ha sido o no abierto y, por lo tanto, si el átomo ha entrado en la caja? ¿Los gatos no pueden considerarse observadores capaces de colapsar funciones de onda? Y si los gatos pueden, ¿por qué no los mosquitos? ¿Y los virus? ¿Y los contadores Geiger? ¿Hasta dónde podemos descender? Los dos inteligentes gatos que viven con cada uno de nosotros ciertamente son observadores conscientes. Pero ¿cómo podemos estar seguros de ello?

En rigor, todo lo que uno sabe con seguridad es que *uno mismo* es un observador que colapsa funciones de onda. Los otros podrían estar en un estado de superposición gobernado por la mecánica cuántica y colapsarse en una realidad concreta sólo cuando uno los observa. Por supuesto, dado que los otros se parecen más o menos a uno en todos los aspectos, uno da por sentado que también son observadores. (Pronto discutiremos la interpretación de «mundos múltiples» de la mecánica cuántica, según la cual todos estamos en estados de superposición.)

Aunque no es más que una extensión lógica de lo que dice la teoría cuántica, este estilo de discurso solipsista parece una soberana tontería. No obstante, algunos físicos consideran seriamente la posibilidad de que la mecánica cuántica insinúe una conexión misteriosa de la observación *consciente* con el mundo físico. Eugene Wigner, uno de los últimos artífices de la mecánica cuántica y premio Nobel de física, ofreció una versión de la paradoja del gato que sugería una implicación aún mayor del observador consciente en el mundo físico.

Wigner sustituyó el gato por una amiga no observada dentro de una de las cajas (que aquí es una habitación). Esta vez no hay cianuro. El contador Geiger se limita a emitir un chasquido cuando detecta un átomo, y la amiga hace una marca en un bloc cada vez que oye un chasquido. Puesto que Wigner no podía imaginar que él colapsara el estado de superposición de ella cuando abriera la puerta y mirara el bloc, asumió que cualquier persona tiene la condición de observador. Wigner supuso que el colapso tiene lugar al final del proceso de observación, y que la conciencia humana de su amiga colapsaba la función de onda del sistema físico. Yendo aún más lejos, supuso que la percepción consciente humana podría «extenderse» —de alguna manera no explicada— y cambiar el estado físico de un sistema.

No se puede probar que Wigner estuviera equivocado. Todo lo que sabemos es que en alguna parte de la escala entre las macromoléculas y los seres humanos reside este misterioso proceso de observación y colapso. Es concebible que se encuentre en el último escalón, el de la conciencia. En capítulos posteriores exploraremos algunas propuestas en esta línea.

La respuesta al argumento de Schrödinger

Hemos entrado en el terreno emocional. La mayoría de físicos se sofoca cuando su disciplina se asocia con temas «blandos» como el de la conciencia. Los hay que incluso se enfurecen cuando se les habla del gato de Schrödinger (como Stephen Hawking, que suele amenazar con sacar su pistola).

Vamos a dar una respuesta más o menos estándar al argumento de Schrödinger. Pero antes queremos hacer un ejercicio de honestidad y declarar que nuestras simpatías están con Schrödinger. De no ser así, no habríamos escrito este libro. Aun así, ahora defenderemos con toda la convicción que podamos la tesis de que la metáfora del gato de Schrödinger, y su relación con la observación consciente, es irrelevante y engañosa. En los párrafos que siguen adoptaremos esta postura.

El argumento de Schrödinger se viene abajo porque descansa sobre el supuesto de que los objetos macroscópicos pueden permanecer inobservados en un estado de superposición. A todos los efectos prácticos, cualquier objeto macroscópico está siendo constantemente «observado», porque no puede estar aislado: siempre está en contacto y entrelazado con el resto del mundo. ¡Y ese entrelazamiento equivale a una observación!

Es ridículo imaginar que un gato podría estar aislado. Todo objeto macroscópico en las proximidades del gato observa al gato. La llegada a las paredes de la caja de fotones emitidos por el cuerpo caliente del gato implica que la caja observa al gato. Consideremos un ejemplo extremo: ¡la Luna! La gravedad lunar, que atrae el agua de los océanos produciendo las mareas, también atrae al gato. Esa atracción sería ligeramente distinta para un gato vivo levantado que para un gato muerto tendido. Puesto que el gato también atrae a la Luna, la trayectoria de ésta se ve ligeramente alterada según la posición del gato. Es fácil calcular que durante una minúscula fracción de una millonésima de segundo la función de onda del gato quedaría entrelazada con la de la Luna y, por ende, con la de las mareas y, por ende, con la del resto del mundo. Este entrelazamiento *constituye* una observación, ya que colapsa el estado de superposición del gato de manera esencialmente instantánea.

Ya desde el principio puede verse lo absolutamente carente de sentido que es la ficción del gato. Cuando se envía un átomo a las cajas, su función de onda se entrelaza con la enormemente compleja función de onda del contador Geiger macroscópico. El átomo es así «observado» por el contador Geiger. Puesto que, en la práctica, algo tan grande como un contador Geiger no puede aislarse del resto del mundo, entonces el resto del mundo observa el átomo. El entrelazamiento con el mundo *constituye* la observación que colapsa el átomo en una caja u otra tan pronto como su función de onda entra en el par de cajas y tropieza con el contador Geiger, de resultas de lo cual el gato está muerto o vivo. ¡Y punto!

Aunque (¡innecesariamente!) introduzcamos la conciencia en el argumento, los objetos grandes están siendo constantemente observados aunque sólo sea porque siempre están en contacto con algo que *es* observado por alguien consciente.

Si tales argumentos no convencen al lector de que la historia del gato es insustancial, he aquí un golpe definitivo a la pretensión de Schrödinger de haber puesto en evidencia a la mecánica cuántica: ¡Hagamos el experimento! Siempre obtendremos el resultado predicho por la teoría cuántica: siempre veremos que el gato o está vivo o está muerto.

Además, la interpretación de Copenhague deja claro que el papel de la ciencia es predecir los resultados de las observaciones, no discutir sobre alguna «realidad última». Las predicciones de lo que ocurrirá son todo lo que necesitamos. La mitad de las veces encontraremos que el gato está vivo y la otra mitad que está muerto. La observación consciente es irrelevante. La metáfora del gato plantea un falso problema.

Ahora dejaremos de hablar por boca de un objetor al argumento de Schrödinger y recuperaremos nuestra propia voz. Por supuesto, Schrödinger era plenamente consciente de la dificultad de aislar algo tan grande como un gato. Pero diría que estos problemas prácticos son tangenciales. Puesto que la teoría cuántica no admite ninguna frontera entre lo pequeño y lo grande, al menos en principio *cualquier* objeto puede estar en un estado de superposición. Schrödinger (junto con Einstein) tachó de derrotista la postura de la escuela de Copenhague de que el papel de la ciencia se reduce a predecir los resultados de las observaciones, en vez de explorar lo que ocurre realmente.

Sea cual fuere el bando por el que uno tome partido, encontrará expertos que apoyen su opinión.

El gato de Schrödinger hoy

Siete décadas después de que Schrödinger formulara la paradoja del gato en la caja, casi cada año hay conferencias que abordan el enigma cuántico y suelen incluir el tema de la conciencia. Las referencias al gato de Schrödinger en las revistas de física profesionales están aumentando. Dos ejemplos: un artículo titulado «Estado de superposición a lo gato de Schrödinger de un átomo» ponía de manifiesto dicho estado; y en otro titulado «Ratón atómico sondea la vida de un gato cuántico», el «ratón» es un átomo y el «gato» es un campo electromagnético en una cavidad macroscópica resonante. Aunque se trata de proyectos de investigación serios y caros, los títulos ilustran la inclinación de nuestra disciplina a tomarse la extrañeza de la mecánica cuántica con un poco de humor.

Hablando de humor, la figura 11.2 es una viñeta del número de mayo de 2000 de *Physics Today*, la revista de más difusión del American Institute of Physics. Probablemente no se habría publicado hace veinte años.

Aunque los aspectos misteriosos de la mecánica cuántica siguen sin apenas tratarse en los cursos de física, el tema se infiltra cada vez más. Un texto reciente de mecánica cuántica ostenta las ilustraciones de un gato vivo y un gato muerto como portada y como contraportada, respectivamente. (Aunque en el interior apenas se habla del gato, por lo que sospechamos que fueron los editores y no los autores quienes eligieron la portada.)

Estudios experimentales de los aspectos misteriosos de la mecánica cuántica que hace años no se habrían financiado o siquiera propuesto, ahora recaban considerable atención. Objetos cada vez más grandes están siendo colocados en estados de superposición que implican su pre-



EL PERRO DE SCHRÖDINGER

Figura 11.2. Dibujo de Aaron Drake, 2000. © American Institute of Physics.

sencia en dos sitios al mismo tiempo. El físico austriaco Anton Zeilinger lo ha conseguido con macromoléculas de setenta átomos de carbono y forma de balón de fútbol. Ahora proyecta hacer lo mismo con proteínas de tamaño medio. En una conferencia le preguntaron cuál era el límite, y él contestó: «Sólo el presupuesto».

Se han demostrado superposiciones macroscópicas genuinas con miles de millones de electrones implicados, donde cada electrón se desplaza simultáneamente en dos direcciones. Se han creado condensaciones de Bose-Einstein en las que cada uno de más de un millar de átomos se distribuye por un área de varios milímetros. Un titular de un número reciente del boletín de noticias del American Institute of Physics decía: 3600 ÁTOMOS EN DOS SITIOS A LA VEZ. Y ésta era la primera frase de un artículo de 2007 publicado en *Physical Review Letters*, una de las revistas de física de mayor impacto: «La carrera para observar el comportamiento mecanocuántico en sistemas nanoelectromecánicos (NEMS) manufacturados nos está acercando más que nunca a la comprobación de los principios básicos de la mecánica cuántica». Se está haciendo cada vez más difícil desechar la inquietud de Schrödinger con el subterfugio de que la extrañeza de la mecánica cuántica sólo se evidencia con cosas pequeñas que nunca vemos en realidad.

Lo más difícil de aceptar quizá sea la implicación de que nuestra observación no sólo crea una realidad presente, sino que también crea un pasado congruente con esa realidad (que cuando nuestra observación colapsaba el estado de superposición del gato en vivo o muerto, también creábamos la historia de un gato hambriento tras ocho horas en ayunas o rígido tras ocho horas muerto).

El «experimento de elección aplazada» sugerido por el cosmólogo cuántico John Wheeler es lo que más se acerca a la comprobación de esta idea. Volvamos a nuestras cajas pareadas originales (sin el gato ni el resto del «artilugio infernal» de Schrödinger). Si elegimos un experimento de interferencia (átomo en ambas cajas), el átomo habría tenido que «decidir» de antemano (al encontrarse con el espejo semitransparente) meterse en ambas cajas. Si elegimos un experimento de mirar en la caja (átomo en una de las dos cajas), el átomo tendría que haber seguido una de las dos trayectorias posibles hacia una caja, de manera que tendría que haber tomado una «decisión» diferente delante del espejo semitransparente. La teoría cuántica dice que nuestra elección observacional posterior crea la historia previa del átomo; en otras palabras, que creamos algo *hacia atrás en el tiempo*.

Influir en el pasado es algo difícil de aceptar. Por lo tanto, quizá lo que ocurrió *realmente* es que nuestra preparación mecánica previa del equipo, en función de la observación que *íbamos* a hacer, de algún modo influyó en la decisión posterior del átomo ante el espejo semitransparente. Aunque no entendamos cómo pudo afectar la disposición mecánica al comportamiento posterior del átomo, al menos esa posibilidad eliminaría la causación futura del pasado. Para comprobar esta hipótesis, Wheeler sugirió una experiencia tal que la elección del tipo de experimento se aplazaba hasta que el átomo ya había atravesado el espejo semitransparente y había tomado su «decisión».

Si efectivamente la observación no ocasiona la historia previa, dicha «elección aplazada» muy bien podría dar un resultado diferente del predicho por la teoría cuántica. El experimento de Wheeler se llevó a cabo en 1987, aunque con fotones en vez de átomos. Para desolación de los experimentadores, la predicción de la teoría cuántica de que la elección posterior del tipo de experimento determina lo que hizo antes el fotón en el espejo semitransparente quedó confirmada. De haberse obtenido la primera refutación de una predicción mecanocuántica, sin duda los autores enseguida se habrían hecho acreedores al Premio Nobel.

Lástima que Schrödinger no pueda ser testigo del creciente interés en su gato. Él estaba convencido de que la Naturaleza quería decirnos algo, y que los físicos deberían ir más allá de la aceptación pragmática de la teoría cuántica. Estaría de acuerdo con John Wheeler: «En alguna parte algo increíble está esperando a suceder».

12

En busca de un mundo real

EPR

Pienso que una partícula debe tener una realidad separada, independiente de las mediciones. Es decir, un electrón tiene espín, localización y demás, aunque no esté siendo medido. Me gusta pensar que la Luna está ahí aunque no la esté mirando.

Albert Einstein

Schrödinger compuso su cuento del gato para dar a entender que la teoría cuántica negaba la existencia de un mundo físicamente real, que postulaba que la observación *creaba* la realidad observada. Esta afirmación parece descabellada. De hecho, si en un juicio alguien convenciese al jurado de que creía que su mirada creaba el mundo físico, probablemente obtendría un eximente de locura.

Por supuesto, la interpretación de Copenhague es más sutil que la simple negación del mundo físico. Sólo afirma que los objetos del dominio *microscópico* carecen de realidad hasta que se observan. Las Lunas, las sillas y los gatos son obviamente reales (a todos los efectos prácticos). Y eso, según la escuela de Copenhague, debería bastar. Pero eso no era bastante para Einstein.

En la conferencia Solvay de 1927, Einstein apuntó con su pulgar hacia abajo condenando la recién promulgada interpretación de Copenhague. El que por entonces era el científico más respetado de todos insistió en que incluso las cosas pequeñas tienen realidad, se observen o no. Y si la teoría cuántica decía otra cosa, tenía que estar equivocada. Niels Bohr, el principal artífice de la interpretación de Copenhague, se levantó en su defensa. Durante el resto de sus vidas Bohr y Einstein debatieron como amigables adversarios.

Sortear a Heisenberg

En la teoría cuántica, un átomo puede ser una onda extensa o una partícula concentrada. Si, por un lado, miramos y vemos que sale de una sola caja (o una sola rendija), demostraremos que es un objeto compacto. Por otro lado, puede participar en un patrón de interferencia que demuestra que es algo que se propaga, con lo que tenemos una contradicción aparente. Pero la teoría está protegida de la refutación por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que dice que al mirar de qué rendija sale un átomo lo golpeamos con fuerza suficiente para desdibujar cualquier patrón de interferencia. Así pues, no se puede *demonstrar* la contradicción.

Para justificar su convicción de que la teoría cuántica llevaba a una inconsistencia y por lo tanto era errónea, Einstein intentó mostrar que aunque un átomo participara en un patrón de interferencia, *en realidad* salía por una sola rendija. Para demostrar esto tenía que sortear el principio de incertidumbre. (Irónicamente, Heisenberg atribuyó su inspiración original del principio de incertidumbre a una conversación con Einstein.) He aquí el reto de Einstein a Bohr en la conferencia Solvay de 1927:

Enviemos un átomo cada vez a una barrera con dos rendijas. Permítanos que la barrera sea móvil (digamos que cuelga de un muelle ligero). Consideremos el caso más simple, un átomo que incide en el máximo central del patrón de interferencia (punto A en la figura 12.1). Si ese átomo provenía de la rendija inferior, tuvo que ser desviado hacia arriba por la barrera. En reacción, el átomo empujaría la barrera hacia abajo. Y viceversa si el átomo provenía de la rendija superior.

Midiendo el movimiento de la barrera tras el paso de cada átomo, podríamos saber de qué rendija provenía. Esta medición podría hacerse aun después de que el átomo quedara registrado dentro de un patrón de interferencia en una película fotográfica. Puesto que de esta forma uno podría *saber* de qué rendija procede cada átomo, la teoría cuántica tenía que estar equivocada al explicar el patrón de interferencia diciendo que cada átomo era una onda que atravesaba *ambas* rendijas.

Bohr enseguida señaló el fallo en el razonamiento de Einstein. Para la demostración descrita, uno tendría que conocer simultáneamente tanto la posición inicial de la barrera como cualquier movimiento que pudiera haber tenido. El principio de incertidumbre limita la precisión con la que se puede conocer simultáneamente la posición y el movimiento. Sin más que un poco de álgebra simple, Bohr demostró que dicha incertidumbre sería suficiente para hacer fracasar la demostración de Einstein.

Tres años más tarde, en otra conferencia, Einstein propuso un ingenioso experimento mental que, según él, violaba una versión del principio de incertidumbre al determinar tanto el momento en el que un fotón salía de una caja como su energía con una precisión arbitrariamente grande. Esta vez Bohr tuvo que dedicar toda una noche de insomnio al asunto. Pero por la mañana le sacó los colores a Einstein al hacerle ver que en su afán de sortear el principio de incertidumbre había ignorado su propia teoría de la relatividad. Años después, Bohr plasmó este triunfo en una caricatura del experimento del fotón en una caja con la que quería ilustrar que en cualquier experimento cuántico hay que tener en cuenta el aparato macroscópico empleado (figura 12.2).

Las refutaciones de Bohr de los experimentos mentales de Einstein han sido cuestionadas por algunos. En el capítulo 10 citábamos a Bohr diciendo que los «instrumentos de medida [deben ser] cuerpos rígidos lo bastante pesados para permitir un registro completamente clásico de sus posiciones y velocidades relativas». La aplicación por Bohr de la incertidumbre mecanocuántica a la barrera con rendijas y a su aparato del fotón en una caja, ambos dispositivos *macroscópicos*, ¿era coherente con su requerimiento de «un registro completamente clásico» de los instrumentos de medida macroscópicos? Al menos Bohr parece estar de acuerdo en que la teoría cuántica y, por ende, la cuestión de la realidad creada por el observador, se aplica en principio tanto a lo pequeño como a lo grande. Sólo a efectos *prácticos* las cosas grandes se comportan clásicamente. Pero los

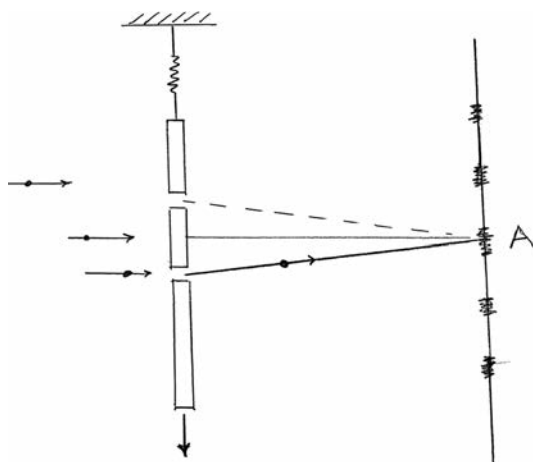


Figura 12.1. Átomos lanzados uno a uno a través de una barrera móvil de dos rendijas.

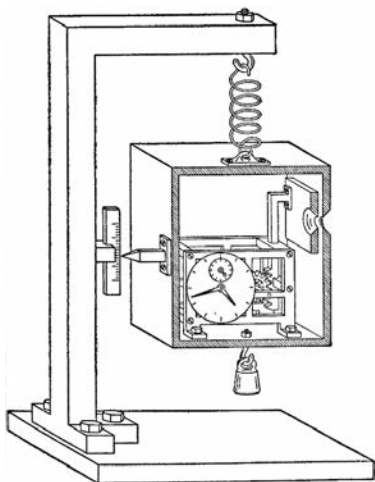


Figura 12.2. Dibujo de Bohr del experimento mental del fotón en la caja de Einstein. Cortesía de Harper-Collins.

dolsky y Nathan Rosen. Un asociado de Bohr cuenta que «la andanada nos cayó encima como un rayo en un día de sol. Su efecto sobre Bohr fue notable... tan pronto como le puse al corriente del argumento de Einstein, todo lo demás quedó aparcado».

El artículo, ahora conocido como «EPR» (por «Einstein, Podolsky y Rosen»), no defendía que la mecánica cuántica fuera incorrecta, sino tan sólo que era incompleta. La teoría cuántica negaba la existencia de un mundo físicamente real, y por eso requería una creación de la realidad por el observador; sólo porque le faltaba algo.

Einstein y compañía mostraban que, en efecto, uno podía conocer una propiedad de un objeto *sin* observarlo. Esa propiedad conocida de antemano, argumentaban, *no* era creada por el observador, sino que era una realidad física que la presuntamente incompleta teoría cuántica no contemplaba. He aquí una analogía clásica (la que estimuló el argumento EPR):

contraargumentos de Bohr convencieron a Einstein de que al menos la teoría era consistente y sus predicciones siempre serían correctas. De vuelta a casa tras la conferencia, un humillado Einstein dejó en paz la mecánica cuántica para concentrarse en la relatividad general, su teoría de la gravitación; o así lo creyó Bohr.

Un rayo en un día de sol

Bohr se equivocaba. Lejos de abandonar, Einstein seguía empeñado en desacreditar la teoría cuántica. Cuatro años después (en 1935) llegó a Copenhague un artículo firmado por Einstein y dos jóvenes colaboradores, Boris Po-



Figura 12.3. Albert Einstein y Niels Bohr en la conferencia Solvay de 1930 en Bruselas. Fotografía de Paul Ehrenfest. Niels Bohr Archives.

Consideremos dos vagones de tren idénticos, acoplados pero separados por un muelle apretado. Si de pronto quitamos el perno que los une, ambos vagones salen lanzados a la misma velocidad en sentidos opuestos. Alice, a la izquierda (véase la figura 12.4), está más cerca del punto de partida de los vagones que Bob, a la derecha. Al observar la posición del vagón que pasa ante ella, Alice inmediatamente conoce la posición del vagón del lado de Bob. Al no haber influido en dicho vagón, Alice no creó su posición. Y al no haber observado Bob su vagón todavía, Bob tampoco creó su posición. Puesto que la posición del vagón de Bob no es creada por el observador, dicha posición siempre fue una realidad física.

La conclusión de la analogía de Alice y Bob es tan obvia que parece trivial. Pero reemplacemos los vagones por dos átomos lanzados en sentidos opuestos: la teoría cuántica nos dice que su existencia en posiciones particulares no se convierte en una realidad hasta que se observa.

Luz polarizada

Por desgracia, pasar de la analogía fácilmente visualizable de los vagones a la situación cuántica es problemático. El principio de incertidumbre prohíbe el conocimiento simultáneo de la velocidad inicial y la posición de los vagones con precisión suficiente. Omitiremos el ingenioso pero difícil de visualizar truco matemático de Einstein y sus discípulos y expondremos la versión de Bohm, que cambia los vagones por fotones polarizados. Vale la pena examinar los fotones polarizados porque en las misteriosas «influencias» cuánticas reveladas por los experimentos tipo EPR suele haber fotones implicados. Tales influencias, calificadas de «fantasmales» por Einstein, serán el tema del próximo capítulo.

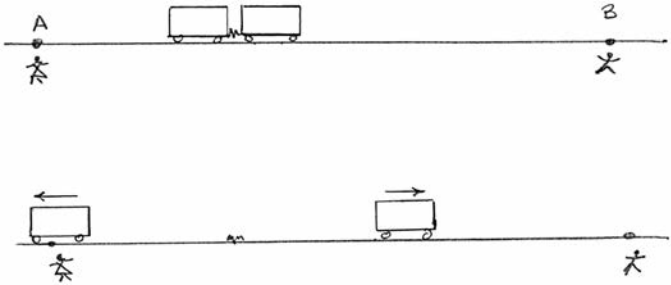


Figura 12.4. Una analogía clásica del argumento EPR.

En las páginas que siguen revisaremos algo de la física de la luz polarizada y los fotones polarizados para luego poder tratar en profundidad el argumento EPR de manera compacta. De todas maneras, si el lector prefiere pasar por encima de estos detalles, o incluso saltar hasta la sección titulada «EPR», aún podrá apreciar la esencia del argumento de Einstein.

Recordemos que la luz es una vibración del campo eléctrico (y magnético). El campo eléctrico de la luz puede orientarse en cualquier dirección perpendicular a la de propagación. En el dibujo de arriba de la figura 12.5, la luz viaja hacia la página con su campo eléctrico en dirección vertical. En tal caso diremos que esa luz está «verticalmente polarizada». El otro dibujo muestra una onda lumínica horizontalmente polarizada. La dirección del campo eléctrico de la luz es su dirección de polarización.

Por supuesto, no hay nada especial en las direcciones vertical y horizontal, aparte de que son mutuamente perpendiculares. Es sólo una convención.

La polarización de la luz procedente del Sol o de una bombilla (es decir, la mayoría de la luz) varía aleatoriamente. Dicha luz es «no polarizada». Ciertos materiales dejan pasar sólo la luz polarizada a lo largo de una dirección particular. Los «polarizadores» de las gafas de sol impiden que nos deslumbremos impidiendo el paso de la luz polarizada horizontalmente al reflejarse en superficies horizontales como el asfalto o el agua. Pero vamos a describir otra clase de polarizador.

El polarizador empleado en los experimentos reales que describiremos es un cristal transparente de calcita. Este cristal envía luz de distinta polarización en distintas direcciones. Digamos que la luz polarizada paralela a cierta dirección (o eje) del cristal sigue la Trayectoria 1, y la luz polarizada perpendicular a dicho eje sigue la Trayectoria 2.

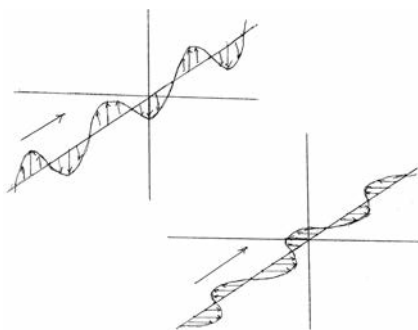


Figura 12.5. Luz polarizada vertical y horizontalmente.

La luz polarizada en un ángulo distinto, que no es ni paralela ni perpendicular al eje del cristal, puede verse como la composición de una componente paralela y otra perpendicular. (Igual que un viaje con rumbo nordeste puede verse como la composición de un viaje con rumbo norte y un viaje con rumbo este.) La componente paralela de la luz sigue la Trayectoria 1, y la perpendicular sigue la Trayectoria 2. Cuanto más paralela es la polarización, más luz sigue la Trayectoria 1.

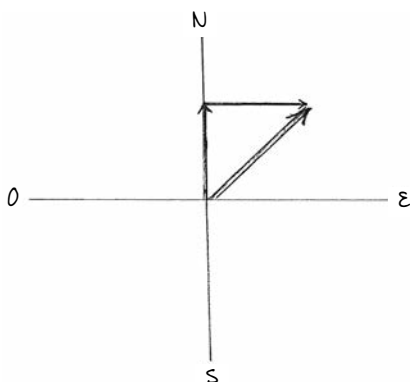


Figura 12.6. Desplazamiento hacia el nordeste como la suma de un desplazamiento hacia el norte y otro hacia el este.

Fotones polarizados

La luz es un flujo de fotones. Los detectores de fotones pueden contar fotones individuales, a razón de millones por segundo. Dicho sea de paso, nuestros ojos pueden detectar luz tan tenue como de unos pocos fotones por segundo.

La luz polarizada paralela al eje del cristal de calcita es un flujo de fotones polarizados paralelamente. Cada uno de ellos sigue la Trayectoria 1 hacia un detector de fotones. Similarmente, el detector en la Trayectoria 2 registra los fotones polarizados perpendicularmente al eje del cristal. Los fotones de luz corriente, no polarizada, están orientados aleatoriamente. Tras atravesar el cristal de calcita, cada fotón es registrado por el Detector 1 o el Detector 2. En nuestro esquema (figura 12.7) representamos cada fotón por un punto, su polarización como una flecha de doble punta, el cristal de calcita como una caja y los detectores como D1 y D2.

Tenemos que decir algo más de los fotones polarizados en una dirección ni paralela ni perpendicular al eje de nuestro cristal de calcita. Hay cierta *probabilidad* de que estos fotones sean registrados por el Detector 1 o el Detector 2. Por ejemplo, un fotón polarizado a cuarenta y cinco grados del eje del cristal tiene la misma probabilidad de ser registrado por uno u otro detector. Cuanto más paralela al eje del cristal es la polarización de un fotón, más probable es que sea registrado por el Detector 1.

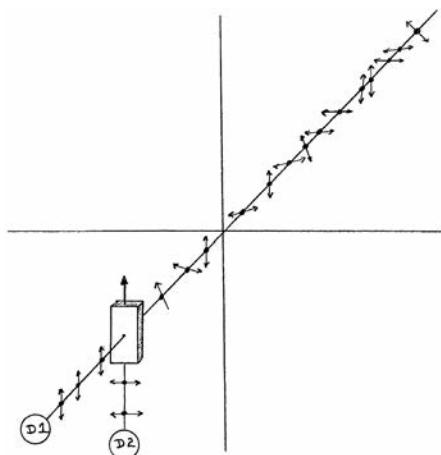


Figura 12.7. Fotones polarizados seleccionados por un cristal de calcita.

Hemos tenido cuidado de *no* decir que un fotón con un ángulo de polarización ni paralelo ni perpendicular seguiría una u otra trayectoria. En realidad está en un estado de superposición tal que sigue simultáneamente ambas trayectorias. Un fotón polarizado a cuarenta y cinco grados, por ejemplo, se reparte *igualmente* entre ambas trayectorias. Nunca vemos fotones parciales. Un detector registra un fotón entero, o no emite ningún chasquido. La situación de un fotón que sigue dos trayectorias es análoga a la de nuestro átomo presente simultáneamente en dos cajas.

(Podríamos demostrar que un fotón estaba en un estado de superposición mediante una experiencia análoga a un experimento de interferencia. En vez de un detector en cada trayectoria, coloquemos espejos que reflejen cada fotón haciéndolo pasar por un segundo cristal de calcita que recombinen las componentes paralela y perpendicular para reproducir el fotón original. Cambiemos la longitud de *cualquier* trayectoria y cambiaremos la polarización del fotón resultante, lo que demuestra que sigue *ambas* trayectorias.)

Al decir que los detectores de fotones registran fotones, estamos adoptando la interpretación de Copenhague. Estamos contemplando los detectores de fotones macroscópicos como observadores. Cuando uno de los detectores registra la presencia de un fotón en una trayectoria particular, el estado de superposición de éste colapsa. El fotón es absorbido, y lo que queda es su registro por el detector.

Por supuesto, Einstein no quería oír hablar de estados de superposición. Para él, los fotones y los átomos eran tan reales como los vagones

de tren. Un fotón que atravesaba un cristal de calcita *seguía* la Trayectoria 1 o la 2, no ambas. Antes de exponer el argumento EPR a favor de esta idea, debemos hablar de fotones en un «estado gemelo».

Fotones en estados gemelos

Algunos estados excitados de un átomo son tales que éste vuelve a su estado fundamental mediante dos saltos cuánticos en rápida sucesión. En dicha cascada, el átomo libera dos fotones. Puesto que ninguna dirección en el espacio tiene preferencia, la polarización observada de los fotones será completamente aleatoria.

Pero ocurre que, para ciertos estados atómicos, los dos fotones que viajan en direcciones opuestas siempre exhiben la *misma* polarización. Si, por ejemplo, el fotón que sale por la izquierda resulta tener una polarización vertical, su gemelo por la derecha también estará polarizado verticalmente.

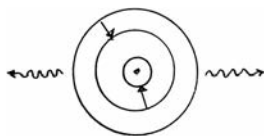


Figura 12.8. Una cascada de dos fotones.

Por supuesto, debemos asegurarnos de que ambos fotones proceden del mismo átomo. Esto no resulta demasiado difícil con los contadores de fotones electrónicos de alta velocidad. Si dos fotones llegan a polarizadores equidistantes justo al mismo tiempo, tienen que haber sido emitidos por el mismo átomo y, por lo tanto, son gemelos.

La razón por la que los fotones gemelos están polarizados idénticamente no nos interesa aquí. (El momento angular debe conservarse, y en este caso los estados atómicos inicial y final tienen el mismo momento angular.) Lo importante es que se puede demostrar que sus polarizaciones observadas siempre son idénticas.

Para verlo, volvamos a Alice y Bob, pero con fotones en vez de vagones de tren. Entre Alice, a la izquierda, y Bob, a la derecha, hay una fuente de fotones en estados gemelos (figura 12.9). Cada uno observa la polarización de los fotones gemelos con el eje de sus polarizadores orientado con el mismo ángulo. Los detectores de fotones situados en sus Trayectorias 1 y 2 chasquean aleatoriamente y registran la llegada de un fotón polarizado paralelo o perpendicular al eje de su cristal polarizador. Pues bien, cada vez que Alice observa que el detector 1 ha registrado un fotón, Bob *siempre* observa que su gemelo sigue la Trayectoria 1. Siempre que Alice observa que el Detector 2 ha registrado un fotón, Bob observa que su gemelo sigue su Trayectoria 2.

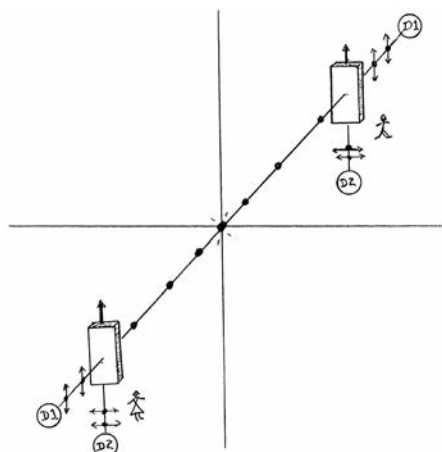


Figura 12.9. Alice y Bob con fotones en estados gemelos.

Puesto que los fotones son gemelos, ¿por qué debería parecernos extraño que siempre exhiban la misma polarización? Juguemos con una analogía: no es sorprendente que dos gemelos idénticos exhiban el mismo color de ojos, ya que los gemelos idénticos son *creados* con el mismo color de ojos. Ahora consideremos otra propiedad de los gemelos: el color de calcetines que eligen para ponerse cada día. Supongamos que siempre que un gemelo escoge calcetines verdes, el otro también (aunque ninguno de ellos tenga información acerca del color de los calcetines de su hermano). Eso sí sería extraño, porque los gemelos no tienen por qué coincidir en la elección diaria del color de sus calcetines.

¿Podemos explicar la coincidencia en la polarización de los fotones gemelos porque son creados así, igual que los gemelos humanos son creados con el mismo color de ojos? No. Por lo menos no según la teoría cuántica, que dice que *ninguna* propiedad existe antes de ser observada. En particular, de acuerdo con la teoría cuántica, la polarización del fotón de Alice no existiría como realidad física antes de su observación. Lo mismo vale para el fotón de Bob. Por eso no hemos asignado flechas de polarización a los fotones gemelos en su camino hacia Alice y Bob.

(Dicho sea de paso, en el caso de la luz polarizada corriente representada en la figura 12.7 si pusimos flechas en los fotones incidentes porque podíamos suponer que los átomos que los emitían eran observados, por ejemplo, por el filamento macroscópico de la bombilla que los emitía, por ejemplo.)

He aquí el punto importante: supongamos que Alice está un poco más cerca de la fuente de fotones que Bob. Entonces su fotón será detectado antes. El que siga una u otra trayectoria es completamente aleatorio, pero si el fotón de Alice es registrado por su Detector 1, su gemelo *siempre* exhibirá la misma polarización al ser registrado por el Detector 1 de Bob, aunque el fotón de Bob no pueda haber recibido ninguna información del comportamiento de su gemelo en el polarizador de Alice. Esto es como la extraña coincidencia en la elección del color de calcetines por los gemelos humanos.

La detección previa del fotón de Alice, que sigue una u otra trayectoria al azar, no pudo afectar *físicamente* al fotón de Bob. Éste estaba alejándose de Alice a la velocidad de la luz. Alice y Bob podrían incluso estar en galaxias diferentes y observar los fotones gemelos esencialmente al mismo tiempo. ¿Cómo, entonces, adquirieron ambos fotones la misma polarización tras la observación de la polarización de uno de ellos?

Ya que la explicación que da la teoría cuántica de este comportamiento es difícil de creer, vale la pena repetirla: los fotones gemelos no *tienen* una dirección de polarización concreta hasta que se observa la polarización de uno de ellos. Los fotones gemelos están confundidos en un estado de polarización *idéntica*, pero no tienen una polarización *particular*. Es la observación de que la polarización de uno de los fotones es vertical, por ejemplo, lo que instantáneamente colapsa *ambos* fotones en la polarización vertical, con independencia de la distancia que los separe.

No es el *hecho* de que los fotones en estados gemelos exhiban polarizaciones idénticas lo que es desconcertante. Podríamos pensar que simplemente fueron creados así. Lo desconcertante es la *explicación* mecanocuántica de este hecho: que los fotones *no* fueron creados con una polarización idéntica particular, ya que *ninguna* propiedad tiene realidad física hasta que se observa.

La negación mecanocuántica de la realidad física incomodaba a Einstein mucho más que su carácter probabilístico. Su frase «Dios no juega a los dados» es citada a menudo. Pero la no tan inmediatamente entendible cita que encabezaba este capítulo, «Me gusta pensar que la Luna está ahí aunque no la esté mirando», expresa su preocupación más seria.

EPR

El artículo EPR que cayó en Copenhague como una bomba se titulaba así: «*Can quantum-mechanical description of physical reality be*

considered complete?» («¿Puede considerarse completa la descripción mecanocuántica de la realidad física?»). (Los historiadores han atribuido la ausencia del artículo «*the*» a que fue Podolsky, cuya lengua polaca nativa no incluye artículos, el encargado de redactar el artículo.) En vez de polarización fotónica, el artículo hablaba de una compleja combinación de posición y momento de las partículas. Pero nosotros examinaremos la versión más simple y moderna en términos de fotones.

Aunque la descripción mecanocuántica de las polarizaciones idénticas de los fotones gemelos no incluye su dirección de polarización particular como propiedad físicamente real, la mecánica cuántica afirmaba ser una teoría completa de los fenómenos.

Para poner en cuestión esta pretensión de completitud, Einstein y compañía tenían que aclarar qué se entiende por realidad física. Definir la realidad ha sido un problema filosófico al menos desde los tiempos de Platón. Pero el trío EPR no necesitaba definir la realidad en general, sino sólo una condición *suficiente* para que algo tenga realidad física. Si esa realidad física no fuera descrita por la teoría, entonces sería una teoría incompleta. He aquí la condición ofrecida por EPR:

Si, sin perturbar un sistema de ninguna manera, podemos predecir con certeza... el valor de una magnitud física, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa magnitud física.

En otras palabras: si una propiedad física de un objeto puede conocerse *sin* observarse, entonces esa propiedad no puede haber sido creada por su observación. Y si dicha propiedad conocida no ha sido creada por su observación, debe haber existido como realidad física *antes* de su observación.

Sólo con que se encontrara una propiedad físicamente real quedaría demostrada la no compleción de la teoría cuántica. Esa propiedad sería la polarización particular de uno de los miembros de un par de fotones gemelos. El trío EPR afirmaba poder demostrar que dicha polarización existía *antes* de su observación.

Volvamos a Alice y Bob con sus polarizadores y sus detectores de fotones. Esta vez Alice está un poco más cerca de la fuente de fotones gemelos que Bob, por lo que recibe su fotón antes de que Bob reciba el fotón gemelo. Ahora supongamos que observa un fotón polarizado paralelamente a su eje de polarización convenido, que es registrado por su Detector 1. Alice sabe de inmediato que el fotón gemelo que va hacia Bob tiene polarización paralela, de manera que, cuando alcance el polarizador de Bob, seguirá la Trayectoria 1.

De hecho, Bob podría atrapar su fotón con un par de cajas, una en la Trayectoria 1 y otra en la Trayectoria 2. Una vez atrapado el fotón, Alice podría telefonarle y decirle sin temor a equivocarse en qué caja encontrará su fotón.

Pero Alice no puede haber perturbado físicamente el fotón de Bob. Éste salió de la fuente de fotones y se alejó a la velocidad de la luz. Puesto que nada puede ir más deprisa que la luz, nada que Alice pueda enviar tras el fotón de Bob puede atraparlo. Cuando Alice observó su fotón, el de Bob aún no había llegado a él, por lo que Bob tampoco podría haberlo perturbado.

Ni Alice ni Bob ni nadie ha observado la polarización del fotón de Bob. Pero dicha polarización inobservada puede conocerse con certeza.

¡Premio! El que Alice conozca con certeza la polarización del fotón de Bob —sin haberlo perturbado de ninguna manera— cumple el criterio EPR para que la polarización del fotón de Bob sea una realidad física. Puesto que la teoría cuántica no incluye esta realidad física, la conclusión del argumento EPR es que la teoría cuántica es incompleta. El artículo de Einstein, Podolsky y Rosen concluía con una declaración de los autores en la que expresaban su creencia en que una teoría completa es posible. Dicha teoría presumiblemente proporcionaría un cuadro razonable de un mundo existente con independencia de su observación.

La respuesta de Bohr

Cuando le llegó el artículo EPR, casi una década después de que se promulgara la interpretación de Copenhague, Bohr todavía no era plenamente consciente de las implicaciones de la teoría cuántica, en particular la que objetaba el trío EPR: que la observación, en y de sí misma, *sin ninguna perturbación física*, puede afectar instantáneamente a un sistema físico remoto.

Bohr reconoció que el «rayo en un día azul» de Einstein era un grave desafío a la teoría cuántica, y trabajó frenéticamente durante semanas para darle cumplida respuesta. Unos meses más tarde publicó un artículo con el mismo título que el del trío EPR: «*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*». (Incluso se dejó también el artículo «*the*».) Si la respuesta del trío EPR a la pregunta del título había sido «no», la de Bohr era un rotundo «sí».

He aquí un extracto de la larga respuesta de Bohr al argumento EPR, que contiene la esencia de su complejo contraargumento:

[El] criterio de realidad física propuesto por Einstein, Podolsky y Rosen contiene una ambigüedad en lo que respecta al sentido de la expresión «sin perturbar un sistema de ninguna manera». Por supuesto, en un caso como el que se acaba de considerar, es innegable que no hay perturbación mecánica alguna del sistema bajo investigación durante la última fase crítica del procedimiento de medida. Pero incluso en esta fase se plantea la cuestión esencial de una *influencia de las propias condiciones que definen los tipos de predicciones posibles en lo que respecta al comportamiento futuro del sistema*. Puesto que tales condiciones constituyen un elemento inherente de la descripción de cualquier fenómeno al que se le pueda aplicar con propiedad el término «realidad física», vemos que el argumento de los mencionados autores no justifica su conclusión de que la descripción mecano-cuántica es esencialmente incompleta.

Analicemos esta refutación. Para empezar, Bohr no cuestiona la lógica del argumento EPR. Lo que rechaza es su punto de partida, la condición para que algo sea una realidad física.

La condición de realidad del argumento EPR asume tácitamente la misma separabilidad que vemos en la física clásica. Esto es, si dos objetos no se ejercen ninguna fuerza física, lo que le ocurra a uno no puede de ninguna manera «perturbar» al otro. En el caso de los fotones gemelos, la observación por Alice de su fotón no puede ejercer ninguna fuerza física sobre el fotón de Bob, que se aleja de ella a la velocidad de la luz. Por lo tanto, según EPR, Alice no puede afectarlo.

Bohr estaba de acuerdo en que la observación de Alice no podía perturbar «mecánicamente» de ninguna manera el fotón de Bob. (Bohr aplicaba el adjetivo «mecánica» a *todas* las fuerzas físicas.) Pero sostenía que, incluso sin una perturbación física, la observación remota de Alice ejerce una «influencia» instantánea sobre el fotón de Bob. Y según Bohr, esto constituye una perturbación que incumple la condición EPR de realidad. Sólo después de que Alice *observara* que su fotón tenía una polarización paralela, por ejemplo, el fotón de Bob adquiriría una polarización paralela.

¿Afectaba físicamente la observación de Alice al fotón de Bob? Lo que se hace en un lugar distante, incluso en una lejana galaxia, ¿puede *causar* que ocurra algo aquí instantáneamente? Es seguro que ninguna fuerza física afectaba al fotón de Bob. ¿Qué le hacía la observación de Alice al fotón de Bob, entonces? En rigor, no deberíamos decir que su observación «afectó» al fotón de Bob o «causó» su comportamiento, porque no hay involucrada ninguna fuerza física, así que emplearemos el misterioso término sancionado por Bohr: Alice «influyó en» el comportamiento del fotón de Bob.

Hay que hacer notar, dicho sea de paso, que Alice no podía transmitir ninguna información a Bob mediante sus observaciones. Él siempre ve una serie de fotones polarizados aleatoriamente. Sólo cuando Alice y Bob se reúnen y comparan sus resultados, comprueban la asombrosa correlación: siempre que ella veía un fotón paralelo, él veía un fotón paralelo; y siempre que ella veía un fotón perpendicular, él veía un fotón perpendicular.

Para defender la teoría cuántica a pesar de esta componente «no física», Bohr redefinió la meta de la ciencia. Dicha meta, afirmó, no es *describir* la Naturaleza, sino sólo describir lo que podemos *decir* de la Naturaleza. En sus primeros debates con Einstein, Bohr argumentaba que cualquier observación perturba *físicamente* lo observado, lo bastante para impedir la refutación de la teoría cuántica. Esto se ha conocido como la «doctrina de la perturbación física». Puesto que la observación de Alice cambia lo que se puede *decir* correctamente acerca del fotón de Bob, la respuesta de Bohr al argumento EPR se ha conocido como la «doctrina de la perturbación semántica».

¿No resulta un tanto confuso todo esto? ¡Desde luego! No hay ningún enunciado correcto ni del argumento EPR ni del contraargumento de Bohr que no resulte confuso o tenga resonancias místicas.

Einstein rechazó la respuesta de Bohr. Insistió en que había un mundo real ahí fuera, y la ciencia debía intentar explicarlo. Si un fotón mostraba una polarización particular, afirmaba, no se debía a la observación de otro objeto, sino a que el fotón *tenía* una propiedad física que determinaba su polarización. Y si esa propiedad, posteriormente llamada «variable oculta», no estaba incluida en la mecánica cuántica, entonces la teoría era incompleta. Ridiculizó las «influencias» de Bohr llamándolas «fuerzas de vudú» y «acciones fantasmales». No podía aceptar que esa clase de cosas formaran parte de la manera de funcionar del mundo: «El Señor es sutil, pero no malicioso».

Queremos dejar claro que Bohr y Einstein estarían de acuerdo en cuanto a los resultados reales de un experimento EPR, como las observaciones de Alice y Bob que hemos descrito. Sería su *interpretación* de esos resultados la que diferiría.

Es lícito preguntarse por qué tanto Einstein como Bohr defendieron sus posturas filosóficas con tanto ahínco. Einstein siempre receló de la teoría cuántica; Bohr fue su defensor incondicional. Recordemos que durante casi veinte años la comunidad de físicos rechazó la propuesta del joven Einstein de que la luz consistía en fotones (una propuesta calificada de «temeraria» en su momento). Por el contrario, los primeros logros de Bohr en mecánica cuántica enseguida fueron aclamados. ¿Fue-

ron sus experiencias profesionales tempranas las que conformaron sus actitudes a lo largo de su vida?

Einstein pensaba que los físicos rechazarían la refutación de Bohr del argumento EPR. Se equivocaba. La teoría cuántica funcionaba demasiado bien. Proporcionaba una base firme para un rápido avance de la física y sus aplicaciones prácticas. Los físicos profesionales tenían pocas inclinaciones filosóficas.

En las dos décadas que vivió tras la publicación de su artículo con Podolsky y Rosen, Einstein nunca cejó en su convicción de que la física tenía algo más que decir que lo que nos contaba la teoría cuántica. Exhortó a sus colegas a no abandonar la búsqueda de los secretos que ocultaba «el Viejo». Pero puede que al final se desanimara. En una carta a un colega escribió: «Tengo segundos pensamientos. Puede que Dios sí sea malicioso».

En los años setenta, la investigación motivada por el argumento EPR evidenció que las «acciones fantasmales» de Einstein ciertamente existen. Pero siguen siendo fantasmales. De ello trata el próximo capítulo.

Acciones fantasmales

El teorema de Bell

... no puedes zarandear una flor
Sin perturbar una estrella

Francis Thompson

La mayoría de físicos prestaron poca atención tanto al argumento EPR como a la respuesta de Bohr. El que la mecánica cuántica fuera o no completa no importaba. El caso es que *funcionaba*. Nunca hacía predicciones equivocadas, y las aplicaciones prácticas proliferaban. ¿A quién le importaba que los átomos carecieran de «realidad física» antes de ser observados? Los físicos de a pie no tenían tiempo para entretenerse en cuestiones «meramente filosóficas».

Poco después estalló la segunda guerra mundial, y los físicos dedicaron su atención a desarrollar artefactos como el radar, la espoleta de proximidad o la bomba atómica. Luego vinieron los política y socialmente conservadores años cincuenta. En los departamentos de física, una mentalidad cada vez más conformista significaba que un profesor no numerario podía poner en peligro su carrera si cuestionaba la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. Aún hoy, es mejor dedicarse a explorar el significado de la mecánica cuántica sólo en los ratos libres. Desde el teorema de Bell, sin embargo, los físicos, sobre todo los más jóvenes, muestran un interés creciente por lo que la mecánica cuántica quiere decirnos.

Del teorema de Bell se ha dicho que es «el descubrimiento científico más profundo de la segunda mitad del siglo XX». Fue como si restregara en la cara de los físicos toda la extrañeza de la mecánica cuántica. Como resultado del teorema de Bell y de los experimentos que inspiró, una cuestión puramente filosófica de entrada se ha resuelto en el laboratorio: *existe* una conectividad universal. Las «acciones fantasmales» de Einstein *sí* existen. Cualesquiera objetos que hayan interactuado alguna vez continúan influyéndose mutuamente de manera instantánea. Lo que ocurre en los confines de la galaxia influye en lo que pasa en nuestro jardín. Aunque estas influencias son indetectables en cualquier situación compleja normal, ahora están mereciendo la atención de los laboratorios industriales porque también podrían hacer posible la creación de ordenadores fantásticamente poderosos.

John Bell nació en Belfast en 1928. Aunque nadie en su familia había completado siquiera la educación secundaria, su madre promovía el aprendizaje como vía hacia la buena vida, en la que uno «podía vestir de domingo toda la semana». Su hijo se convirtió en un estudiante entusiasta y, según su propia evaluación, «no necesariamente el más inteligente, pero sí entre los tres o cuatro primeros». Ávido de conocimiento, Bell pasaba las horas en la biblioteca en vez de salir con otros jóvenes de su edad, lo que le habría hecho, decía él, «más gregario, más aceptable socialmente».

Pronto se sintió atraído por la filosofía. Pero, al ver que cada filósofo era contestado por otro, se pasó a la física, donde «uno podía llegar a conclusiones de manera razonable». Bell estudió física en el Queen's, la universidad local. Lo que más le interesaba de la mecánica cuántica eran los aspectos filosóficos. Le parecía que los cursos se concentraban demasiado en los aspectos prácticos de la teoría.

Aun así, acabó desempeñando funciones casi ingenieriles en el diseño de aceleradores de partículas, con su último destino en el CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) de Ginebra. Pero también se hizo famoso por su importante obra teórica. Se casó con una colega, Mary Roos. Aunque siempre trabajaron cada uno por su lado, Bell escribió que, al repasar sus obras completas, «la veo por todas partes».

En el CERN, Bell se concentró en la física convencional, por la que se suponía que le pagaban, y que sus colegas aprobaban. Durante años aparcó su interés en la extrañeza de la mecánica cuántica, pero cuando tuvo la oportunidad de tomarse un año sabático en 1964, lo dedicó a explorar el tema. «Estar apartado de la gente que me conocía me dio más libertad, así que dediqué más tiempo a estas cuestiones cuánticas», recordaba. Su gran resultado fue lo que hoy llamamos «teorema de Bell», el cual ha permitido la demostración de aspectos de nuestro mundo que antes se consideraban cuestiones filosóficas más allá de la comprobación experimental.

Yo (Bruce) tuve ocasión de compartir un taxi y conversar con John Bell en 1989, de camino a un pequeño congreso en Erice, Sicilia, centrado en su obra. En el congreso, con ingenio, y con su acento irlandés, insistió con firmeza en la profundidad del aún no resuelto enigma cuántico. En la pizarra escribió con letras mayúsculas su famoso ATEP (acrónimo de «a todos los efectos prácticos») y nos advirtió de no caer en la TRAMPATEP (la trampa de aceptar una solución suficiente «a todos los efectos prácticos»). En mi calidad de jefe de departamento, invité a Bell

a pasar una temporada en nuestro departamento de física de la Universidad de California en Santa Cruz, y él aceptó de entrada. Pero al año siguiente John Bell falleció repentinamente.

La motivación de Bell

Recordemos que el argumento EPR, aunque no negaba la corrección de las predicciones de la teoría cuántica, sostenía que la idea de la realidad creada por la observación emanaba de su omisión de ciertos «elementos de realidad», propiedades físicamente reales de los objetos que la teoría cuántica no consideraba, y que se dieron en llamar «variables ocultas». El argumento EPR partía de la premisa de que el comportamiento de los objetos sólo podía verse afectado por fuerzas físicas y que, por lo demás, cualquier objeto podía considerarse separado del resto del mundo. En particular, dos objetos podían estar separados de manera que el comportamiento de uno no pudiera afectar al del otro en un tiempo inferior al que tardaría la luz en ir de uno a otro. Así pues, el argumento EPR *daba por sentada* la separabilidad.

Por otra parte, en su refutación del argumento EPR, Bohr *negaba* la separabilidad. Sostenía que lo que le ocurría a un objeto sí podía influir en el comportamiento de otro *instantáneamente*, aunque ninguna fuerza física los conectara. Como ya sabemos, Einstein ridiculizó las «influencias» de Bohr presentándolas como «acciones fantasmales» (*spukhafte Fernwirkung*, en su alemán original).

Durante treinta años ningún resultado experimental pudo decidir entre las variables ocultas de Einstein y las influencias misteriosas de Bohr. Además, los físicos aceptaban tácitamente un teorema matemático que pretendidamente demostraba la imposibilidad de que una teoría que incluyera variables ocultas reprodujera las predicciones de la teoría cuántica. Era un teorema que cortaba de raíz la posibilidad de variables ocultas.

Mientras John Bell disfrutaba de su libertad sabática para entregarse a la exploración de estas cuestiones, se vio sorprendido por el hallazgo de un *contraejemplo* del teorema de inexistencia de variables ocultas. Descubrió que, doce años antes, David Bohm había concebido una teoría que *incluía* variables ocultas y reproducía las predicciones de la mecánica cuántica. «Vi lo imposible conseguido», contó Bell.

Tras detectar el error en el teorema de imposibilidad de variables ocultas, y puesto que ahora las variables ocultas *podían* existir, Bell se preguntó si *de hecho* existían. ¿En qué podía diferir un mundo donde existen propiedades reales independientes del observador del extraño



Figura 13.1. John Bell. © Renate Bertlmann. Cortesía de Springer Verlag.

mundo descrito por la teoría cuántica? Bell quería entender el significado auténtico de los cálculos cuánticos que hacen los físicos: «Uno puede montar en bicicleta sin saber cómo funciona... Nosotros hacemos física teórica [habitualmente] de la misma manera. Quiero encontrar el conjunto de instrucciones para decir lo que estamos haciendo en realidad».

El teorema de Bell

Puesto que el argumento EPR no cuestionaba ninguna de las predicciones de la teoría cuántica, no había contraste experimental posible. Bell tomó un camino diferente. Buscó un resultado que *tenía que ser cierto* en cualquier mundo que incluyera variables ocultas y separabilidad. Por otro lado, tenía que ser un resultado *negado* por la teoría cuántica. Este resultado era un «hombre de paja» que los experimentadores podían intentar vapulear. Si el hombre de paja de Bell sobrevivía al desafío experimental, la teoría cuántica, que lo negaba, se demostraría incorrecta.

¿Qué dice, en síntesis, el teorema de Bell? Supongamos que los objetos de nuestro mundo tienen propiedades físicas reales, no creadas por la observación, y supongamos además que dos objetos pueden separarse de modo que lo ocurrido a uno no puede afectar al otro. Para abreviar, llamaremos a estas dos suposiciones «realidad» y «separabilidad». A partir de estas dos premisas (ambas aceptadas por la física clásica, pero ne-

gadas por la teoría cuántica) Bell dedujo que ciertas magnitudes observables tenían que ser mayores que otras magnitudes observables. Esta predicción *experimentalmente comprobable* del teorema de Bell es la «desigualdad de Bell».

Pronto discutiremos las variables más corrientes empleadas para comprobar la desigualdad de Bell: las tasas de variación de las polarizaciones de los fotones gemelos cuando sus polarizadores se colocan en ángulos diferentes. Pero por ahora no concretemos tanto.

Si se constata que la desigualdad de Bell no se cumple, entonces una o las dos premisas de las que parte debe ser falsa. En otras palabras: *si se viola la desigualdad de Bell en un experimento real, nuestro mundo no puede tener realidad y también separabilidad*.

Todo esto es bastante abstracto. Filósofos y místicos han hablado de realidad y separabilidad (o el concepto opuesto, la «conectividad universal») durante milenios. La mecánica cuántica pone estas cuestiones encima de la mesa, delante mismo de nosotros. Y el teorema de Bell permite someterlas a prueba.

En un mundo que calificaríamos de «razonable», los objetos deberían tener propiedades reales. Esto es, las propiedades de un objeto no deberían ser creadas por su observación. Además, en un mundo razonable, los objetos deberían ser separables. Esto es, deberían afectarse mutuamente sólo a través de fuerzas físicas, y no de las «influencias» más rápidas que la luz de Bohr, llamadas «acciones fantasmales» por Einstein. En este sentido, el mundo newtoniano descrito por la física clásica es un mundo razonable. El mundo descrito por la física cuántica no lo es. El teorema de Bell permite comprobar si nuestro mundo es, en efecto, razonable (y quizá sólo sea su *descripción* cuántica la que es irrazonable).

No mantengamos el suspense. Cuando se hicieron los experimentos, resultó que la desigualdad de Bell no se cumplía. Las premisas de realidad y separabilidad llevaban a una predicción *incorrecta* para nuestro mundo tal como es. El hombre de paja de Bell fue abatido (tal como él esperaba). Así pues, nuestro mundo *no* tiene realidad y separabilidad a la vez (y nos apresuramos a admitir que no comprendemos demasiado lo que puede significar la afirmación de que el mundo es irreal).

Ilustraremos el teorema de Bell con algo semejante a los fotones gemelos. Los fotones en estados gemelos fueron la prueba real más importante. El autor de la idea general a la que hemos recurrido es Nick Herbert.

Partiremos de las premisas de realidad y separabilidad, y acabaremos en una desigualdad de Bell. Más concretamente, supondremos que cada

uno de nuestros «fotones gemelos» tiene un «ángulo de polarización» real no creado por la observación; y también supondremos que los fotones gemelos son separables (que lo que le ocurra a uno no puede afectar de ninguna manera el comportamiento del que se aleja en sentido opuesto).

Al dar por sentadas la realidad y la separabilidad estamos asumiendo cosas que la teoría cuántica niega. Así pues, nuestros «fotones» no son como los descritos por la física cuántica. ¿Son como los fotones que hacen chasquear los contadores Geiger de nuestro mundo? Eso es lo que los *experimentos reales* deben decidir. Nosotros los llamaremos «fotones» en nuestra discusión; y hablaremos de su «polarización».

Para precisar, presentaremos un cuadro mecánico específico. No obstante, la lógica aplicada *no depende en absoluto de ningún aspecto de este modelo mecánico*, salvo la realidad y la separabilidad. El tratamiento matemático de Bell era completamente general. Ni siquiera se hablaba de fotones en particular. Sólo se daban por sentadas la realidad y la separabilidad.

Derivación de la desigualdad de Bell

Si el lector decide hojear por encima o incluso saltarse esta derivación a grandes rasgos de una desigualdad de Bell y simplemente aceptar el resultado, no tendrá demasiadas dificultades para entender el resto del libro. Incluso puede ir directamente a la sección siguiente, «Las pruebas experimentales». Por si lo prefiere así, he aquí la esencia de nuestra derivación.

Partimos de dos objetos (que llamamos «fotones») y *sólo* presuponemos que tienen propiedades reales y que lo que le ocurre a uno no afecta al otro. Estas premisas llevan a una predicción comprobable. Si la predicción resulta ser incorrecta en experimentos reales, al menos una de las premisas debe ser falsa, y el mundo en que vivimos no puede ser a la vez real y separable.

Un modelo explícito

Para mostrar la polarización asignada a cada fotón como *gráficamente* real, en la figura 13.2 hemos representado el fotón como un «palillo». Llamaremos «polarización» al ángulo aleatorio del palillo. Éste es el «elemento de realidad» de Einstein, o variable oculta, que determina la trayectoria que sigue el fotón al encuentro del polarizador.

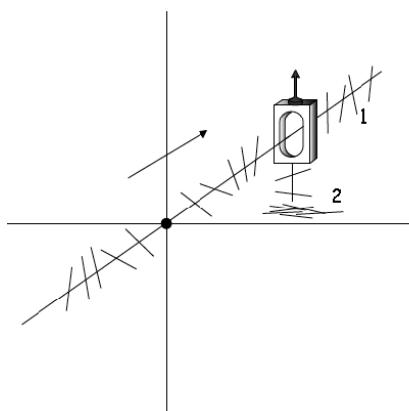


Figura 13.2. Un modelo de fotones (palillos) y polarizador.

En este modelo mecánico, un «polarizador» es una placa con una abertura oval cuya longitud es el «eje del polarizador». Un fotón cuya dirección de polarización se aproxime al eje del polarizador atravesará el polarizador y continuará por la Trayectoria 1. Un fotón cuya dirección de polarización se aparte del eje chocará con el polarizador y se desviará por la Trayectoria 2. Lo importante es que el comportamiento de cada fotón en el polarizador viene determinado por una propiedad físicamente real del fotón, no por algo creado por su observación. Ésta es nuestra versión de la premisa de realidad de la que parte la demostración de Bell.

Este modelo mecánico no representa fielmente todos los comportamientos de la luz polarizada. Pero estos palillos, que llamaremos simplemente «fotones», son fáciles de visualizar y sirven para nuestro propósito. A fin de cuentas, nuestra lógica no depende de nada que tenga que ver con estos elementos aparte de su realidad y su separabilidad.

Describiremos cuatro experimentos mentales. Estos experimentos se parecen mucho al experimento EPR descrito en el capítulo anterior. (De hecho, a veces se habla de experimentos EPR para referirse a los experimentos inspirados por el teorema de Bell.) Pero hay una diferencia fundamental: en el caso EPR, las «variables ocultas» de Einstein y las «influencias» de Bohr conducían al *mismo* resultado experimental; las diferencias entre Bohr y Einstein eran sólo de interpretación. En nuestro modelo, y en los experimentos reales para verificar el teorema de Bell, los resultados predichos por las «variables ocultas» de Einstein y por las «influencias» de Bohr son diferentes.

En cada uno de nuestros cuatro experimentos se emiten fotones gemelos con polarizaciones idénticas (idéntico ángulo de inclinación) en sen-

tidos opuestos desde una fuente situada entre Alice y Bob. Puesto que los fotones se alejan uno de otro a la velocidad de la luz, nada físico, ni siquiera la luz, puede ir de un experimentador al otro en el tiempo entre las llegadas de los fotones a sus respectivos polarizadores. Por lo tanto, lo que le ocurra a uno de nuestros fotones en un polarizador no puede afectar a su gemelo en el otro. Ésta es la premisa de separabilidad. Como en el caso EPR, Alice y Bob identifican dos fotones como gemelos por sus tiempos de llegada y su detección por sus respectivos Detectores 1 o 2.

Experimento I

Este primer experimento es esencialmente una repetición del experimento EPR original, pero con fotones que no pueden afectar a sus gemelos y cuyas polarizaciones damos por reales. Alice y Bob han alineado los ejes de sus polarizadores verticalmente. Ambos anotan un «1» cada vez que el detector en la Trayectoria 1 registra un fotón, y un «2» cada vez que es el detector en la Trayectoria 2 el que lo registra. Al final, cada uno tendrá una larga sucesión aleatoria de unos y doses.

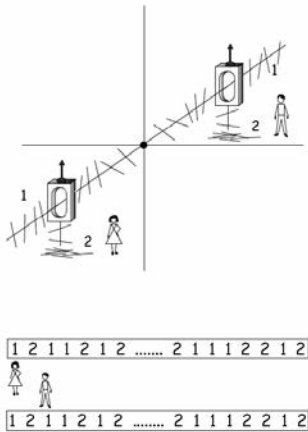


Figura 13.3. Experimento I.

Tras registrar un elevado número de fotones, Alice y Bob se reúnen y comparan sus resultados. Como en el experimento EPR original, comprueban que sus series de datos son idénticas. Siempre que el fotón de Alice siguió la Trayectoria 1, su gemelo idénticamente polarizado hizo lo mismo en el polarizador de Bob. Siempre que el fotón de Alice siguió la Trayectoria 2, lo mismo hizo su gemelo. No se observa ni una sola diferencia de comportamiento, lo que confirma que, en efecto, sus fotones eran idénticos.

Alice y Bob no ven nada extraño en esta correlación. A fin de cuentas, los fotones gemelos *tenían* polarizaciones idénticas, ángulos de inclinación iguales. (En la teoría cuántica, donde la polarización es creada por el observador, la correlación entre fotones gemelos debe explicarse por alguna «influencia» misteriosa ejercida de manera instantánea sobre un fotón por la observación de su gemelo.)

Experimento II

Este experimento es igual que el primero, salvo que esta vez Alice gira su polarizador un ángulo de unos cuantos grados, que llamaremos Θ (la letra griega theta). Bob, por su parte, mantiene su polarizador en posición vertical.

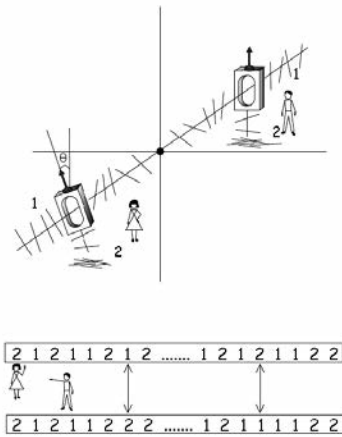


Figura 13.4. Experimento II.

De nuevo, ambos experimentadores anotan los registros de sus respectivos contadores. Esta vez, algunos de los fotones que habrían seguido la Trayectoria 1 si Alice no hubiera girado su polarizador seguirán ahora la Trayectoria 2, y viceversa. Después de todo, se presume que la polarización de esos fotones no se ve afectada por la observación de Alice ni por el eje de su polarizador. Ésta es la premisa de realidad. Y, conforme a la premisa de separabilidad, los fotones de Bob no se ven afectados por la rotación del polarizador de Alice ni por lo que les ocurra a sus gemelos.

Cuando Alice y Bob vuelven a confrontar sus series de datos, encuentran algunas discordancias (que llamaremos «errores»). Se deben a que los gemelos de algunos de los fotones que siguieron la Trayectoria 2 en el polarizador de Alice no hicieron lo propio en el polarizador de Bob,

sino que continuaron por la Trayectoria 1, y viceversa. El porcentaje de errores aumentaría con el ángulo Θ . (En el experimento I, Θ era cero y el porcentaje de errores también era cero.) Digamos que Alice alteró el comportamiento de un cinco por ciento de sus fotones, con lo que la tasa de error es del cinco por ciento.

Experimento III

Ahora los experimentadores invierten sus papeles: Bob gira su polarizador un ángulo Θ , mientras que Alice vuelve a poner el suyo en posición vertical. Puesto que la situación es simétrica de la anterior, la tasa de error volvería a ser del cinco por ciento (suponiendo que el número de pares de fotones registrados fuera lo bastante grande para minimizar el error estadístico).

Experimento IV

Esta vez tanto Alice como Bob giran sus polarizadores un ángulo Θ . Si ambos polarizadores rotaran en el mismo sentido, sería como si no hubiera rotación (los polarizadores seguirían alineados), así que Alice gira el suyo en sentido contrario a las agujas del reloj y Bob gira el suyo en el sentido de las agujas del reloj.

Al girar su polarizador un ángulo Θ , Alice altera el comportamiento de sus fotones en la misma medida que en el experimento II. El cambio afecta al cinco por ciento de sus fotones. En cuanto a Bob, al girar su polarizador un ángulo Θ altera simétricamente el comportamiento del cinco por ciento de sus fotones.

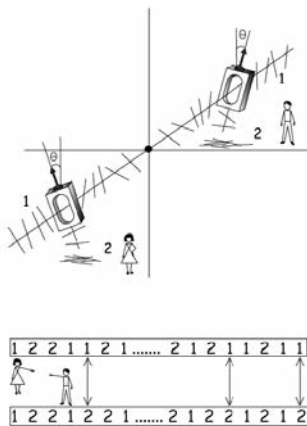


Figura 13.5. Experimento IV.

Puesto que Alice y Bob han alterado cada uno el comportamiento del cinco por ciento de sus fotones, y puesto que todo cambio se traduciría en un error al comparar sus series de datos, podríamos esperar una tasa máxima de error del diez por ciento. No hay manera de obtener una tasa de error mayor en una muestra lo bastante amplia en términos estadísticos.

Pero sí podríamos tener una tasa de error *menor*. Podría ser que, para algunos pares de fotones gemelos, tanto Alice como Bob modificaran el comportamiento de su gemelo, de modo que al final tuviésemos un comportamiento idéntico de ambos gemelos. En consecuencia, los datos de estos pares de gemelos no se registrarían como errores.

Como ejemplo de un doble cambio de comportamiento semejante, consideremos pares de fotones gemelos casi verticales que seguirían la trayectoria 1 si el eje de polarización estuviera en posición vertical. Si Alice y Bob giraran sus polarizadores en sentidos opuestos, como en el experimento IV, ambos podrían hacer que los dos gemelos de un par siguieran la Trayectoria 2. En tal caso, no consignarían este doble cambio como un error.

A causa de tales dobles cambios, cuando Alice y Bob comparen sus series de datos en el experimento IV, la tasa de error probablemente será *menor* que el cinco por ciento que causaría Alice sola más el cinco por ciento que causaría Bob solo. La tasa de error que observarán probablemente será *inferior* al diez por ciento. En una muestra lo bastante grande en términos estadísticos, *no puede ser mayor*.

¡Eso es! Acabamos de derivar una desigualdad de Bell: *La tasa de error cuando ambos polarizadores giran un ángulo Θ (en sentidos opuestos) es igual o menor que dos veces la tasa de error para un solo polarizador con el mismo ángulo de giro.*

Como hemos dicho, nuestros ángulos de inclinación (que hemos llamado «polarizaciones» eran meros sucedáneos de *cualquier* propiedad de un fotón no creada por su observación. Las inclinaciones de nuestros palillos representaban *alguna* propiedad real del fotón (o variable oculta en el fotón) que determinaba si seguiría la Trayectoria 1 o la 2 para una orientación del polarizador dada.

Para subrayar que los únicos supuestos verdaderos en nuestra derivación de una desigualdad de Bell han sido la realidad física de la polarización de cada fotón y la separabilidad de los dos gemelos de cada par, recurriremos a una metáfora deliberadamente ridícula. En vez de hablar de palillos y polarizadores ovales, podríamos haber dicho que cada fotón es guiado por un pequeño «piloto fotónico», y que el polarizador no

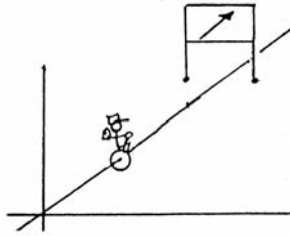


Figura 13.6. El piloto fotónico.

es más que una señal de tráfico que indica una «orientación» mediante una flecha. El piloto fotónico lleva una hoja de ruta que le indica que debe conducir su fotón por la vía 1 o la 2 según el ángulo de la flecha. Aquí la variable oculta es la instrucción físicamente real impresa en la hoja de ruta del piloto. Su hermana, que pilota el fotón gemelo, sigue las mismas instrucciones al encontrarse con el polarizador, con independencia del comportamiento de su hermano. Este modelo proporciona la misma desigualdad de Bell. Las únicas premisas obligatorias son la realidad y la separabilidad.

Supongamos que experimentos *reales* evidenciaran el incumplimiento de la desigualdad de Bell. Esto es, supongamos que la tasa de error para ambas rotaciones *no* fuera «igual o menor que dos veces la tasa de error para un solo polarizador», sino *mayor*. Puesto que nuestra desigualdad de Bell se dedujo a partir de dos *únicas* premisas, la realidad y la separabilidad, su incumplimiento implicaría que al menos una de dichas premisas es falsa. Esto significaría que nuestro mundo carece de realidad, o de separabilidad, o de ambas cosas. Y enseguida veremos que su incumplimiento en un solo caso (el de los fotones gemelos, por ejemplo) significa una ausencia de realidad o separabilidad en todo aquello con lo que tales fotones pueden interactuar; es decir, en *todo*.

Henry Stapp ha rededucido la desigualdad de Bell eliminando el supuesto de realidad. Esta importante extensión de la demostración de Bell supone que una refutación experimental de la desigualdad de Bell probaría que nuestro mundo ciertamente carece de separabilidad, pero dejaría abierta la cuestión de la realidad.

Las pruebas experimentales

En 1965, cuando se publicó el teorema de Bell, cuestionar la teoría cuántica, o siquiera dudar de que la interpretación de Copenhague zan-

jaba todas las cuestiones filosóficas, era una herejía leve para un físico. Aun así, John Clauser, entonces estudiante graduado en la Universidad de Columbia, estaba interesado en el asunto. Aunque la formulación de la desigualdad de Bell no se prestaba a la contrastación experimental (y el propio Bell pensaba que pasarían muchos años antes de que tal cosa ocurriera), Clauser ideó un procedimiento para ello.

De visita en Berkeley como posdoctorado para trabajar en radioastronomía con Charles Townes, Clauser expuso su idea para una comprobación de la desigualdad de Bell. Townes le eximió de su investigación astronómica y le animó en el proyecto. Incluso le prestó apoyo financiero (a pesar de que parte de la facultad consideraba que el proyecto era una pérdida de tiempo). Con material cedido por otro miembro de la facultad, Clauser y un estudiante graduado hicieron un brillante experimento.

Clauser y su ayudante midieron lo que hemos llamado la «tasa de error» para fotones en estados gemelos con polarizadores ajustados a distintos ángulos relativos. En esencia, hicieron los experimentos de Alice y Bob que hemos descrito. Lo que vieron fue que, para ciertos ángulos, la tasa de error cuando los polarizadores se hacían girar un ángulo Θ (en sentidos opuestos) era *mayor* que el doble de la tasa de error para un solo polarizador con el mismo ángulo de giro (no igual o menor, como establecía la desigualdad de Bell).

No sólo encontraron que se *violaba* la desigualdad de Bell, sino que se violaba tal como predice la teoría cuántica. (Para evitar un malentendido corriente, subrayamos que era la *desigualdad* de Bell lo que se incumplía. El *teorema* de Bell, la demostración matemática de la que se deriva la desigualdad, es, obviamente, un resultado lógico no sujeto a confirmación experimental.)

¿Qué predice la teoría cuántica, exactamente?

La teoría cuántica predice justo lo que se constató: la desigualdad de Bell no se cumplía. La *magnitud* de la discrepancia no es importante. El que la desigualdad se incumpliera en *alguna* medida negaba las premisas de realidad o separabilidad de las que se derivaba. (De haberse cumplido, la teoría cuántica se habría demostrado incorrecta, pero no se habría probado la realidad o la separabilidad; premisas incorrectas pueden llevar a predicciones correctas.) La *magnitud* de la violación de la desigualdad de Bell predicha por la teoría cuántica requiere un cálculo bastante complicado, y no es relevante para nuestra discusión.

Para los que quieran explorar esta física, daremos más detalles. Los demás lectores pueden saltarse este párrafo. Un cálculo clásico que trata la luz como un campo eléctrico da la respuesta correcta para la tasa de error, aunque no pueda manejar las correlaciones fotónicas necesarias para establecer la desigualdad de Bell. Aquí cabe señalar lo siguiente: (1) la observación por Alice de un fotón polarizado verticalmente, por ejemplo, implica que su gemelo también estará polarizado verticalmente; (2) la fracción de la intensidad de luz (o fotones) que no atraviesa el polarizador de Bob —la tasa de error— es proporcional al cuadrado de la componente del campo eléctrico perpendicular a su eje de polarización; (3) y ésta es proporcional al cuadrado del seno del ángulo Θ entre el polarizador de Bob y el de Alice, de manera que la tasa de error observada —y la predicha por la teoría cuántica— es proporcional a $\sin^2(\Theta)$; (4) así pues, la desigualdad de Bell establece que $2\sin^2(\Theta) \geq \sin^2(2\Theta)$. Si tomamos $\Theta = 22,5^\circ$, entonces $2\Theta = 45^\circ$, y obtenemos $0,29 \geq 0,5$. Muy mal. Vemos, pues, que en nuestro mundo físico la desigualdad de Bell puede incumplirse por mucho. Repetimos: este párrafo puede saltarse.

El balance de los resultados experimentales

Los experimentos de Clauser descartaron, como dicen los físicos, la «realidad local» o las «variables ocultas locales». Los experimentos probaron que las propiedades de los objetos en nuestro mundo tienen una realidad creada por la observación, o que existe una conectividad universal, o ambas cosas. Con estos experimentos, la teoría cuántica superó su desafío más serio en décadas.

Clauser escribe: «Mis propias [...] vanas esperanzas de derrotar a la mecánica cuántica quedaron hechas añicos por los datos». Al confirmar la violación de la desigualdad de Bell predicha por la teoría cuántica, lo que Clauser demostró es que nunca será posible una descripción «razonable» de nuestro mundo, esto es, una descripción con separabilidad y realidad.

Nunca podemos estar seguros de que una teoría científica particular es correcta. Algún día, una teoría mejor podría reemplazar la mecánica cuántica. Pero ahora sabemos que cualquier teoría rival también debe describir un mundo sin separabilidad. Antes del resultado de Clauser no podíamos estar seguros de esto.

Por desgracia para Clauser, a principios de los setenta la investigación de los fundamentos de la mecánica cuántica aún se consideraba inconveniente en la mayoría de sitios. Cuando quiso optar a un puesto académico (incluso en su propio departamento de la Universidad de California) su trabajo fue recibido con sorna. «¿Qué ha hecho aparte de comprobar la

teoría cuántica? ¡Todos *sabemos* que es correcta!», era una típica interpretación equivocada del logro de Clauser. Al final Clauser obtuvo una plaza, pero no le permitió participar en la investigación de gran alcance que había puesto en marcha.

Una década después, en París, con una tecnología más avanzada y una atmósfera algo más receptiva, Alain Aspect reprodujo los resultados de Clauser con una precisión mucho mayor, mostrando que la desigualdad de Bell se violaba *justamente* en la medida predicha por la teoría cuántica. Su electrónica más rápida permitió establecer que *ningún* efecto físico podía propagarse de un polarizador a otro a tiempo para que la observación de un fotón afectara físicamente al otro. Esto cerraba un pequeño vacío en los experimentos de Clauser, cuya electrónica no era lo bastante rápida para establecer ese hecho. Si John Bell no hubiera muerto, él mismo, Clauser y Aspect muy bien podrían haber compartido un Premio Nobel.

El resultado de Aspect no es el fin de la historia. En palabras de Bell:

Es un experimento muy importante, que quizá marque el punto donde uno debería pararse a pensar por un tiempo, pero desde luego espero que no sea el final. Pienso que el sondeo del significado de la mecánica cuántica debe continuar, y de hecho continuará, estemos o no de acuerdo en si vale la pena, porque mucha gente está lo bastante fascinada y turbada por este asunto.

¿Dónde nos deja la violación de la desigualdad de Bell?

Separabilidad

«Separabilidad» ha sido la palabra que hemos empleado para referirnos a que los objetos sólo pueden ser afectados por fuerzas físicas. Sin separabilidad, lo que ocurre en un sitio puede afectar instantáneamente a lo que ocurre a mucha distancia sin que ninguna fuerza física conecte ambos eventos. Bohr aceptó esta extraña predicción de la teoría cuántica como una «influencia». Pero para Einstein, cualquier efecto no mediado por una fuerza física real era una «acción fantasmal».

Los experimentos han demostrado tales influencias hasta una extensión de más de cien kilómetros. Por supuesto, la teoría cuántica establece que esta conectividad abarca el universo entero.

Es más, la conectividad cuántica puede ir de lo microscópico a lo macroscópico. La no separabilidad de dos objetos cualesquiera, como puede ser una pareja de fotones gemelos, establece una no separabilidad

generalizada. Consideremos el «artilugio infernal» de Schrödinger, y supongamos que se construye de manera tal que un fotón gemelo que entre en la caja del gato provoca la liberación de cianuro si está polarizado verticalmente y deja el frasco cerrado si está polarizado horizontalmente. El destino del gato estaría determinado por el comportamiento remoto, u observación, de la polarización del fotón gemelo. Por supuesto, dado que la polarización del fotón remoto es aleatoria, también lo es el destino del gato (no hay ningún control remoto).

Hablamos en términos de fotones gemelos sólo porque la situación es sencilla de describir y susceptible de comprobación experimental. Y la hacemos extensiva al gato de Schrödinger porque continúa siendo fácil de describir. Pero, en principio, cualquier par de objetos que hayan interactuado alguna vez queda entrelazado para siempre. El comportamiento de uno influye instantáneamente en el otro (y en el comportamiento de todo lo que esté entrelazado con ambos). En principio, nuestro mundo tiene una misteriosa conectividad universal que va más allá de lo que solemos considerar fuerzas físicas.

Aunque, por regla general, el entrelazamiento cuántico de objetos grandes o situaciones complejas es demasiado intrincado para resultar discernible, esto no tiene por qué ser así. Se espera que los entrelazamientos cuánticos de las estructuras esencialmente macroscópicas de los futuros ordenadores cuánticos hagan uso de esta conectividad. Y puede que esta conectividad universal tenga un significado más profundo aún por comprender.

Realidad

«Realidad» ha sido la palabra que hemos empleado para referirnos a las propiedades físicamente reales de los objetos que no son creadas por la observación. Si la polarización de un fotón no es una realidad física hasta que se observa, tampoco lo es, por ejemplo, el estado vivo o muerto del gato de Schrödinger entrelazado con ese fotón. La teoría cuántica no traza ninguna frontera entre lo microscópico y lo macroscópico.

Podríamos ampliar nuestras mentes para imaginar un mundo no separable, una conectividad universal. Concebir un mundo no real es más difícil. Sería un mundo donde lo que llamamos realidad física es creada por la observación. ¿Tendría que ser una observación *consciente*? Pospondremos la discusión de este asunto hasta que abordemos la conciencia misma.

Inducción

Hay que decir que el teorema de Bell, además de la realidad y la separabilidad, también da por sentada la validez del razonamiento induc-

tivo. «Todos los cuervos que hemos visto son negros; por lo tanto, todos los cuervos son negros» es un razonamiento por inducción. Se trata de pasar de lo particular a lo general. Nuestro ejemplo de los cuervos admite que los cuervos ya observados son representativos de todos los cuervos. En rigor, es posible que todos los cuervos aún por ver sean verdes. Razonar por inducción plantea problemas lógicos. Pero toda la ciencia se basa en la inducción.

En el caso de los fotones gemelos, los de nuestro modelo y los reales, la admisión de la inducción implica que el flujo de fotones para un ángulo de polarización particular es representativo de todos los fotones que puedan intervenir en el experimento. Por ejemplo, dábamos por sentado que Alice y Bob (y Clauser) podían haber *elegido* hacer el experimento IV con el flujo de fotones que *de hecho* emplearon para el experimento II, y que de haberlo hecho así habrían obtenido esencialmente los mismos resultados. Negar esto sería como negar el libre albedrío, y también admitir un mundo conspirativo aún más extraño que el mundo de la teoría cuántica.

Pero las «acciones fantasmales» más rápidas que la luz son tan contrarias al pensamiento de los físicos que los desafíos al teorema de Bell y los experimentos relacionados continúan. Por ejemplo, en 2007 se propuso una teoría de variables ocultas sin «influencias» instantáneas. Pero esto se conseguía a costa de rechazar la «realidad simultánea de los sucesos mecanocuánticos contrafactuales», lo que viene a ser un rechazo de la inducción. El determinismo completo requerido también debe negar el libre albedrío de los experimentadores. Aquí tenemos, pues, un ejemplo reciente del encuentro de la física con la conciencia.

*¿Es por Einstein por quien doblan las campanas?**

Tanto Einstein como Bohr murieron antes de que Bell presentara su teorema. Seguramente Bohr habría apostado por el resultado experimental que confirmaba la corrección de la teoría cuántica. Lo que habría apostado Einstein no está tan claro. Aunque declaró que creía que las predicciones de la teoría cuántica siempre serían correctas, no sabemos cómo se habría sentido si hubiera sido testigo de una demostración efectiva de lo que él había ridiculizado como «acciones fantasmales». ¿Habría seguido insistiendo en que los objetos separados son reales por derecho propio y no se influyen a través de conexiones más rápidas que la luz?

* Juego de palabras con Bell, «campana», en inglés. (*N. del T.*)

Bell, Clauser y Aspect demostraron que Bohr estaba en lo cierto y Einstein se equivocaba en lo que respecta al argumento EPR. Pero Einstein tenía razón en que había algo preocupante. Fue Einstein quien nos puso delante de los ojos toda la extrañeza de la teoría cuántica. Fueron sus objeciones las que motivaron la obra de Bell, y continúan resonando en los intentos actuales de entendernos con la extraña visión del mundo que la mecánica cuántica nos impone.

De acuerdo con Bell:

En sus discusiones con Bohr, Einstein estaba equivocado en todos los detalles. Bohr entendió la manipulación efectiva de la mecánica cuántica mucho mejor que Einstein. Pero en su filosofía de la física y su idea de en qué consiste, qué estamos haciendo y qué deberíamos hacer, Einstein parece absolutamente admirable... [S]in duda, para mí, él es el modelo de cómo debería uno pensar en la física.

¿Abona la mecánica cuántica el misticismo?

A veces se oye decir que los sabios de algunas religiones antiguas intuyeron ciertos aspectos de la mecánica cuántica contemporánea. Incluso se afirma que la mecánica cuántica proporciona evidencias de la validez de sus enseñanzas.

Aunque el razonamiento no es convincente, es verdad que la visión newtoniana del mundo puede verse como una negación completa de tales ideas. La mecánica cuántica, que nos habla de una conectividad universal e involucra la observación en la naturaleza de la realidad, se muestra más receptiva. En este sentido muy general, puede parecer que la física respalda el pensamiento de algunos sabios antiguos. (Cuando Bohr fue nombrado caballero, incluyó el símbolo del Yin-Yang en su escudo de armas.)

La mecánica cuántica nos dice cosas extrañas acerca de nuestro mundo, cosas que no comprendemos del todo. Esta extrañeza tiene implicaciones que van más allá de lo que en general se considera física. Así pues, podríamos mostrarnos tolerantes con los no físicos que incorporan ideas cuánticas a su pensamiento.

Pero nos molesta, y a veces nos avergüenza, el uso indebido de ideas cuánticas como fundamento de ciertos enfoques médicos o psicológicos (¡y hasta planes de inversión!). Una piedra de toque para este uso indebido es que tales propuestas se presenten con la implicación de que se *derivan* de la física cuántica, en vez de ser simplemente sugeridas por ella.

Aun así, la mecánica cuántica proporciona buenos trampolines para los saltos de la imaginación. La teleportación en *Star Trek* es una imaginativa pero aceptable extrapolación de la transmisión de influencias cuánticas en experimentos tipo EPR. Estas historias están bien si queda claro, como en *Star Trek*, que son pura ficción. Por desgracia, éste no siempre es el caso.

La percepción extrasensorial y otros «parafenómenos» concebibles merecen especial atención y se la dedicaremos en el capítulo 16.

La conectividad universal predicha por la teoría cuántica («no puedes zarandear una flor / Sin perturbar una estrella») ha quedado demostrada. Ello ha dado pie a algunas ideas descabelladas. Algunas son alternativas a la interpretación de Copenhague. Las trataremos en el capítulo siguiente.

¿Qué está pasando?

La interpretación del enigma cuántico

Sabes que algo está pasando, pero no sabes lo que es.

Bob Dylan

Toda interpretación de la mecánica cuántica involucra la conciencia.

Euan Squires

Los físicos y la conciencia

Los físicos dispuestos a abordar el enigma cuántico se afanan en *interpretar* lo que la mecánica cuántica podría querer decirnos. Varias interpretaciones rivalizan hoy con la de Copenhague. Antes de hablar de ellas, queremos hacer una reflexión sobre las distintas maneras de abordar el problema por parte de los físicos.

Hasta su muerte, Bohr y Einstein discreparon acerca de la teoría cuántica. Para Bohr, la interpretación de Copenhague era la base apropiada de la práctica física. Einstein, por su parte, rechazaba la concepción copenhuista de una realidad física creada por la observación. Aun así, aceptaba una *meta* de la interpretación de Copenhague, que era permitir a los físicos desenvolverse sin tener que vérselas con la conciencia. La mayoría de físicos (nosotros incluidos) convendría en que la conciencia misma no es competencia de la física, ni algo que deba estudiarse en un departamento de física.

No es que los físicos sintamos aversión a las excursiones interdisciplinarias. Por ejemplo, un famoso tratamiento matemático de las relaciones depredador-presa (zorros y conejos aislados en una isla) se publicó en *Reviews of Modern Physics*. En Wall Street, los físicos modelan el arbitraje (y se les llama «quants»). Uno de nosotros (Bruce) incluso

ha hecho incursiones en la biología para analizar la detección del campo magnético terrestre por los animales. Estas cosas son bien aceptadas como parte de nuestra disciplina. No ocurre lo mismo con el estudio de la conciencia. He aquí una definición operativa de la física que hace comprensible esa actitud: la física es el estudio de aquellos fenómenos naturales que son tratables con modelos comprobables y bien especificados.

Por ejemplo, la física se ocupa de los átomos y las moléculas simples. La química, por su parte, se ocupa de todas las moléculas, cuyas distribuciones de electrones son demasiado complejas en la mayoría de casos para ser tratables matemáticamente. Un físico podría estudiar un sistema biológico fácil de caracterizar, pero el funcionamiento de un organismo complejo es competencia de los biólogos.

Cualquier cosa que no sea tratable con un modelo bien especificado y comprobable se *define* como fuera de la física. Cuando nos ocupemos de la conciencia en el capítulo 15 no ofreceremos un modelo que cumpla esos requerimientos (nadie ha venido nunca con ninguno). Mientras no se conciba uno, el estudio de la conciencia no formará parte de la física.

Ésta es una razón suficiente para que la conciencia no se estudie en los departamentos de física, pero difícilmente puede explicar las emociones que suscita la simple mención del *encuentro* de nuestra disciplina con la conciencia. Yo mismo (Fred) di una charla hace poco en nuestro departamento de física para informar de dos congresos a los que había asistido. En uno, celebrado en honor de John Wheeler, el cosmólogo cuántico de Princeton, con ocasión de su noventa cumpleaños, varias ponencias sobre cosmología y los fundamentos de la mecánica cuántica aludieron a la conciencia. El otro congreso, auspiciado por la Universidad de Arizona, era «Mente Cuántica 2003».

Pues bien, cuando hablé de la conexión entre la conciencia y la mecánica cuántica planteada en ambos congresos, fui interrumpido por un alto cargo facultativo con este exabrupto: «¡Tíos, estáis llevando la física de vuelta a la Edad Oscura!», y «¡Dedicad vuestro tiempo a hacer buena física y dejáros de tonterías!».

Los estudiantes graduados de la audiencia, en cambio, parecían fascinados, lo cual es poco sorprendente. En general, los físicos de la nueva generación se muestran más abiertos a la idea de que los fundamentos de la mecánica cuántica son problemáticos.

La física clásica, con su cuadro mecanicista del mundo, se ha contemplado como una negación de cualquier contacto de la física con asuntos *más allá* de la física. La física cuántica niega esta negación. Insinúa

algo que está más allá de lo que solemos considerar física, más allá de lo que solemos considerar el «mundo físico». *¡Pero ahí se acaba todo!* Sí, la física puede sugerir direcciones para la especulación. Pero deberíamos ser cautelosos: al tratar con los misterios de la mecánica cuántica, caminamos por el filo de una resbaladiza pendiente.

Una buena ilustración del problema la proporciona una película reciente de extraño título: *What the #\$*! Do We (K)now!?* [cuya versión española es *¿Y tú qué sabes!?*]. La revista *Time* la describe como «un extraño híbrido entre documental científico y revelación espiritual donde aparece un coro griego de doctores y místicos hablando de física cuántica». La película recurre a efectos especiales para presentar fenómenos cuánticos con objetos macroscópicos (por ejemplo, exagerando la incertidumbre en la posición de una pelota de básquet). Eso es legítimo y se entiende como una hipérbole. La alusión a misterios mecanocuánticos conectados con el dominio de la conciencia también es válida. Pero luego la película se pierde en una «revelación espiritual» que lleva a una mujer a tirar a la basura su medicación antidepresiva, en la canalización cuántica del dios atlante Ramtha, de hace 35.000 años, y otras barbaridades aún mayores.

¿Qué queda en las mentes del público que sale del cine? Si la impresión es que los físicos que aplican la mecánica cuántica están todo el tiempo tratando con las «revelaciones espirituales» que describe la película, es para incomodarse. Si los espectadores piensan que los científicos que aparecen en la película expresando ideas místicas representan algo más que una ínfima fracción de la comunidad de físicos, se han quedado con una idea equivocada. La película no puede caer más bajo por la pendiente.

Un antídoto para los tratamientos sensacionalistas y engañosos de las implicaciones de la mecánica cuántica sería que nuestra disciplina se abriera a la discusión del enigma cuántico en los cursos introductorios de física. Mantener oculto nuestro secreto de familia es ceder el terreno a los promotores de la seudociencia.

¿Por qué tantas interpretaciones?

Si alguien digno de confianza nos dice algo que parece ridículo, seguramente intentaremos interpretar lo que ha querido decir en realidad. Demostraciones físicas dignas de confianza nos dicen algo que parece ridículo. En consecuencia, intentamos interpretar el verdadero significado de tales resultados. Aunque los resultados experimentales no se discuten,

no hay consenso en cuanto a su significado. En la actualidad hay muchas interpretaciones rivales. Y todas desafían nuestra razonable visión newtoniana del mundo.

La mecánica cuántica nos fuerza a admitir que la visión mecanicista del mundo es fundamentalmente incorrecta. La interpretación de Copenhague proporciona una escapatoria de la extrañeza cuántica que permite a los físicos concentrarse en las cuestiones prácticas. Con buen criterio, la mayoría de físicos se queda con eso. Pero también vale la pena explorar lo que la Naturaleza parece estar diciéndonos.

Como dijo John Bell:

¿Acaso no es bueno saber qué se sigue de qué, aunque no sea algo necesario ATEP [«a todos los efectos prácticos»]? Supongamos, por ejemplo, que la mecánica cuántica se resistiera a una formulación precisa. Supongamos que, cuando se intenta una formulación más allá de los propósitos prácticos, encontramos un dedo inamovible que apunta obstinadamente hacia fuera del tema, a la mente del observador, a los textos hindúes, a Dios, o incluso sólo a la gravitación. ¿Acaso esto no resultaría sumamente interesante?

La interpretación de la teoría cuántica es hoy una industria en auge, y un campo de batalla. Por supuesto, sólo una pequeña fracción de la comunidad de físicos está involucrada. Cada una de las distintas interpretaciones propuestas toma un camino diferente hacia las revelaciones de la mecánica cuántica acerca de nuestro mundo (y quizá también de nosotros). A veces, interpretaciones diferentes parecen decir lo mismo en términos distintos. Otras veces parecen contradecirse. Da igual, porque, aunque las teorías científicas deben ser comprobables, las interpretaciones no tienen por qué serlo.

No hay manera de interpretar la teoría cuántica sin encontrarse con la conciencia. La mayoría de interpretaciones acepta el encuentro, pero ofrece una justificación para no entablar una relación. En general parten de la *presunción* de que el mundo físico debería ser tratable con independencia del observador humano.

Murray Gell-Mann, por ejemplo, comienza una presentación popular de la física cuántica con estas palabras: «[A] universo presumiblemente no podría importarle menos que en un oscuro planeta evolucionaran seres humanos para estudiar su historia; sigue adelante obedeciendo las leyes mecanocuánticas de la física con independencia de su observación por los físicos». Si habláramos de física *clásica*, la presunción explícita de Gell-Mann de que las leyes de la física son independientes del observador humano se daría por sentada, sin necesidad de que él lo dijera.

Cada interpretación es presentada por sus proponentes como la mejor manera de apreciar lo que nos dice la mecánica cuántica. Todas, sin embargo, presentan una extraña visión del mundo. ¿Cómo no? Hemos contemplado la extrañeza de la mecánica cuántica ante nuestros ojos en los hechos experimentales teóricamente neutrales. Cualquier interpretación de esos hechos que vaya más allá del «¡calla y calcula!» *debe* ser extraña.

Aunque las interpretaciones que examinaremos se han formulado con extensivos análisis matemáticos y lógicos, las presentaremos en unos pocos párrafos no técnicos. Su comprensión detallada no es esencial para lo que sigue. Basta con hacerse una idea de la amplia variedad de opiniones expresadas y darse cuenta de que la física cuántica plantea cuestiones profundas sobre nuestro mundo que siguen bien abiertas. Nótese que cada interpretación se *encuentra* con la conciencia, pero elude cualquier relación seria.

Diez interpretaciones rivales

Copenhague

La interpretación de Copenhague, la más ortodoxa, es la que adoptamos a la hora de enseñar y aplicar la teoría cuántica. Aquí diremos poco de ella, porque ya le hemos dedicado un capítulo entero. En la versión estándar, la observación crea la realidad física del mundo microscópico, pero, a todos los efectos *prácticos*, el «observador» puede ser el instrumento macroscópico de medida, como por ejemplo un contador Geiger.

La interpretación de Copenhague solventa el enigma cuántico diciéndonos que hagamos un uso pragmático de la física cuántica para el micromundo y de la física clásica para el macromundo. Puesto que se supone que nunca vemos el micromundo «directamente», podemos limitarnos a ignorar su extrañeza y, con ello, ignorar el encuentro de la física con la conciencia. Sin embargo, a medida que la extrañeza cuántica se manifiesta con objetos cada vez más grandes, se hace cada vez más difícil ignorarla, y las interpretaciones alternativas proliferan.

Copenhague extrema

Aage Bohr (hijo de Niels Bohr, y también premio Nobel de física) y Ole Ulfbeck sostienen que la versión usual de la interpretación de Copenhague no va lo bastante lejos. Allí donde la versión estándar permite a la física ignorar su encuentro con la conciencia a base de confinar la

creación de la realidad por el observador al mundo cuántico microscópico, ellos niegan explícitamente la *existencia* del micromundo. Desde su punto de vista, no hay átomos.

Bohr y Ulfbeck pretenden que su panorama sea general, pero lo discuten en términos de los chasquidos de un contador Geiger y los cambios en un pedazo de uranio, cuya radiactividad causa los chasquidos de los contadores.

Normalmente consideramos que los núcleos de uranio emiten partículas alfa (núcleos de helio) aleatoriamente y al hacerlo se convierten en núcleos de torio. En la versión estándar, y a todos los efectos prácticos, la función de onda extensa de la partícula alfa es colapsada por el contador Geiger en la posición donde el contador la observa.

Bohr y Ulfbeck encuentran inaceptable esta solución de compromiso. Agarrando el toro por los cuernos, sostienen que los objetos a escala atómica no existen en absoluto. Nada ha atravesado el espacio entre el pedazo de uranio y el contador Geiger. Los chasquidos de los contadores son eventos «genuinamente fortuitos» correlacionados con cambios en un pedazo de uranio remoto sin la intermediación de partículas alfa. Como ellos dicen:

La concepción de las partículas como objetos en el espacio, tomada de la física clásica, queda así eliminada [...] Al ser genuinamente fortuito, el chasquido ya no es producido por la partícula que penetra en el contador, una conclusión abandonada en mecánica cuántica [...]. La vía descendente de los eventos macroscópicos en el espaciotiempo, que en la mecánica cuántica estándar se continúa en la región de las partículas, no se extiende más allá del origen de los chasquidos.

En consecuencia, cuando químicos, biólogos e ingenieros hablan de fotones, electrones, átomos y moléculas, están tratando con modelos carentes de realidad física. Ningún fotón atraviesa el espacio entre la bombilla y nuestros ojos. No hay moléculas de aire ahuecando la vela para empujar el velero por el agua. Esta interpretación muestra lo lejos que pueden llegar algunos físicos para eludir el encuentro con la conciencia.

Decoherencia e historias consistentes

Hace unos años, un físico probablemente emplearía el término «colapso» para describir el proceso de observación por el que una función de onda en estado de superposición se convierte en una única realidad observada. Hoy día, en vez de «colapso», puede que prefiera hablar de «decoherencia». El término se refiere al ahora bien estudiado proceso a

través del cual la función de onda de un objeto microscópico interactúa con el entorno macroscópico para producir el resultado que la interpretación de Copenhague describe como colapso.

Volvamos a nuestro ejemplo del par de cajas. Consideremos un átomo cuya función de onda abarca ambas cajas. Ahora enviamos un fotón a través de orificios en una de las cajas. Si el átomo estuviera en esa caja, entonces el fotón rebotaría en él y se desviaría. Si el átomo estuviera en la otra caja, el fotón seguiría recto sin cambiar de dirección. Puesto que, de hecho, el átomo está simultáneamente en ambas cajas, el fotón hace ambas cosas. La función de onda del átomo queda entrelazada con la del fotón. Las partes de la función de onda del átomo en cada caja dejarán de tener una relación de fase coherente *por sí mismas*; de ahí el término «decoherencia».

Si el fotón no interacciona con nada más, un complicado experimento de interferencia de dos cuerpos con un juego de cajas pareadas y fotones podría demostrar que el átomo todavía estaba simultáneamente en *ambas* cajas (y que el fotón había rebotado en el átomo y, a la vez, había seguido recto a través de una caja vacía).

Supongamos que el fotón atraviesa nuestras cajas y luego colisiona con un cuerpo sólido. Las interacciones con muchos otros átomos afectarán a su función de onda. Suponiendo aleatoriedad térmica, es posible calcular el tiempo fantásticamente corto después del cual deja de ser factible un experimento de interferencia, a todos los efectos prácticos. Por lo tanto, ya no se puede evidenciar ningún enigma cuántico. Promediando las funciones de onda posibles obtenemos una probabilidad seudoclásica de que el átomo esté, existiendo realmente, en una u otra caja de su par. De esta manera tenemos la *percepción* de una realidad única. Puesto que no es necesario hacer mención de ningún observador, consciente o no, algunos consideran que esto resuelve el problema del observador.

Pero estas probabilidades seudoclásicas siguen siendo probabilidades de lo que se observará, no *auténticas* probabilidades clásicas de lo que ya existe. Un examen más a fondo sigue encontrando la conciencia. W.H. Zurek, uno de los principales proponentes de esta interpretación, escribe en su tratamiento de la decoherencia:

Una respuesta exhaustiva a esta cuestión [la percepción de una realidad única] indudablemente tendría que involucrar un modelo de «conciencia», ya que lo que realmente estamos preguntando concierne a la impresión nuestra (del observador) de que «somos conscientes» de una sola de las alternativas.

Las «historias consistentes» pueden verse como una extensión de la idea de decoherencia. (A veces se habla de «historias decoherentes».) Esta interpretación se presenta con la audaz pretensión de aplicar la teoría cuántica al universo entero, desde el principio hasta el final. Presumiblemente no había observadores en el universo primordial, y nunca han existido observadores *externos*, ya que el universo lo incluye todo. Puesto que la complejidad infinita del universo es inacabable, uno trata sólo ciertos aspectos y promedia el resto.

Para hacerse una idea muy burda de cómo puede hacerse esto, consideremos que nuestro átomo en su camino hacia su par de cajas atraviesa un gas tenue de átomos mucho más ligeros. Las leves colisiones no lo desvían demasiado de su trayectoria, pero las partes de la función de onda en cada parcela, cambiando de fase mínimamente con cada colisión, se hacen lo bastante decoherentes para imposibilitar cualquier experimento de interferencia, a todos los efectos prácticos. Promediando el vasto número de historias posibles, una por cada serie de colisiones posible, obtenemos dos historias generales, una con el átomo en una caja y otra con el átomo en la otra caja. Ahora afirmamos que sólo una de las dos historias es una historia real, mientras que la otra sólo había sido una posibilidad.

En su desarrollo de esta interpretación, Gell-Mann y James Hartle discuten la evolución de un IGUS (acrónimo de «*information gathering and utilizing system*», es decir, sistema de recopilación y utilización de información). El IGUS puede acabar convirtiéndose en un observador que tiene al menos la ilusión de conciencia y libre albedrío. De nuevo, no vemos cómo escapar del encuentro con la conciencia.

Mundos múltiples

La interpretación de mundos múltiples hace una lectura *literal* de lo que dice la teoría cuántica. Si la interpretación de Copenhague postulaba que la observación induce un misterioso colapso de la función de onda del átomo en una u otra caja (y del gato de Schrödinger en el estado vivo o muerto), la interpretación de mundos múltiples simplemente niega el colapso. Si la teoría cuántica dice que el gato está simultáneamente vivo y muerto, ¡pues que así sea! En un mundo el gato de Schrödinger está vivo, y en otro mundo está muerto.

Hugh Everett propuso la interpretación de mundos múltiples en 1957, con objeto de permitir que la cosmología pudiera tratar con una función de onda para el universo entero. Sin necesidad de «observadores» que colapsen la función de onda, la interpretación de múltiples mundos resuelve el misterio de la conciencia mediante la estratagema de incluirla en el universo físico descrito por la mecánica cuántica.

La interpretación de mundos múltiples está adquiriendo una importancia creciente. La prestigiosa revista científica *Nature* conmemoró el cincuentenario de su promulgación, el 5 de julio de 2007, con un número especial que incluía un extenso artículo divulgativo sobre el tema y una espectacular portada.

En la interpretación de Copenhague, si uno elige hacer un experimento de interferencia puede demostrar que un átomo estaba en un estado de superposición que abarcaba un par de cajas. Pero si se mira dentro de una caja, se encuentra que el átomo está allí o no está (y entonces está en la otra caja). Uno puede elegir demostrar *cualquiera* de estas dos situaciones contradictorias.

En la interpretación de mundos múltiples, cuando uno mira dentro de una caja, queda entrelazado con el estado de superposición del átomo. Uno entra en un estado de superposición tal que ha visto el átomo en la caja y, *a la vez*, ha visto que la caja está vacía. Ahora hay dos versiones de uno mismo, cada una en un mundo paralelo. Cada conciencia individual desconoce la existencia de su otro yo. Ésta es una idea ciertamente fantástica, pero nada en nuestra experiencia de la realidad es lógicamente incompatible con ella.

En vez de mirar dentro de una caja, podríamos haber optado por un experimento de interferencia. Es este ejercicio de libre albedrío (nuestra libertad de elegir uno u otro experimento) lo que, una vez más, nos lleva al encuentro de la física con la conciencia. En la interpretación de mundos múltiples, uno forma parte de la función de onda universal. Todo lo que puede ocurrir al evolucionar la función de onda *ocurre*. Las dos opciones, mirar dentro de la caja y efectuar un experimento de interferencia, se cumplen. No hay libre albedrío.

Para introducir más de un observador en el cuadro, volvamos al gato de Schrödinger. Alice mira dentro de la caja mientras Bob está lejos. El mundo se escinde en dos. En un mundo, Alice (llamémosla Alice₁) ve un gato vivo. En el otro, Alice₂ ve un gato muerto. En este punto Bob también está en ambos mundos, pero Bob₁ y Bob₂ son esencialmente idénticos. Si Bob₁ se reúne con Alice₁, tendrá que ayudarla a conseguir leche para el gato hambriento. Bob₂, en cambio, tendrá que ayudar a Alice₂ a enterrar el gato muerto. Los objetos macroscópicos Alice₂ y Bob₁ existen en mundos diferentes y, a todos los efectos prácticos, nunca se encuentran.

Tras el teorema de Bell y los experimentos que inspiró, sabemos que no podemos tener realidad y separabilidad a la vez. En la interpretación de mundos múltiples no hay separabilidad. Y tampoco hay una realidad *única*, lo que parece equivalente a la no realidad.

La interpretación de mundos múltiples suscita intensas emociones. Un autor académico la ha tachado de «disoluta», y ha retratado a su proponente como «fumador empedernido, conductor de Cadillac con cuernos, multimillonario analista de investigación de armas». (Cuando Everett la propuso, no era más que un graduado.) Por otro lado, una eminencia de la computación cuántica escribe que la interpretación de mundos múltiples «tiene más sentido, en tantos aspectos, que cualquier visión del mundo anterior, y desde luego más que el pragmatismo cínico que con demasiada frecuencia sirve como sucedáneo de visión del mundo entre los científicos». (El «pragmatismo cínico» seguramente alude a la aceptación acrítica de la interpretación de Copenhague.)

Pero la interpretación de mundos múltiples plantea un problema no resuelto: ¿Qué constituye una observación? ¿Cuándo se escinde el mundo en dos? La escisión en un número finito de mundos es, presumiblemente, sólo una manera de hablar. ¿Se están creando continuamente infinitos mundos?

En cualquier caso, esta interpretación amplía vastamente lo que hizo Copérnico. No sólo hemos sido relegados del centro del cosmos a un punto insignificante en un universo ilimitado, sino que el mundo que experimentamos es sólo una ínfima fracción de todos los mundos. Aun así, «nosotros» existimos en muchos de ellos. «Mundos múltiples» quizá sea la descripción más fantástica de la realidad que se ha propuesto nunca. Proporciona una fascinante base para la especulación y la ciencia ficción.

Transaccional

La interpretación transaccional responde a los desafíos intuitivos que plantean los gatos de Schrödinger y las conectividades universales permitiendo que la función de onda evolucione no sólo hacia delante en el tiempo, sino también hacia atrás. De esta manera el futuro afecta al pasado. Por supuesto, esto altera nuestro modo de ver lo que ocurre.

Por ejemplo, he aquí una muestra ofrecida por su proponente, John Cramer:

Cuando nos paramos en la oscuridad y miramos una estrella a cien años luz de nosotros, no sólo las ondas de luz retardadas procedentes de la estrella han estado viajando durante cien años hasta llegar a nuestros ojos, sino que las ondas adelantadas generadas por procesos de absorción dentro de nuestros ojos han llegado cien años atrás en el pasado, completando la transacción que permitió a la estrella brillar en nuestra dirección.

Leyendo esto, parece que el enfoque hacia atrás en el tiempo tiene mucho que ver con un encuentro con el observador consciente. Pero acabamos con el enigma cuántico empaquetado en lo que parece ser un único misterio.

Bohm

En 1952, un joven e inconformista físico, David Bohm, hizo lo «imposible» al proporcionar un contraejemplo del teorema de inexistencia de variables ocultas, durante largo tiempo aceptado. Bohm mostró que la teoría cuántica *no* era incompatible con la existencia de partículas reales con posiciones y velocidades reales. (Bohm también fue inconformista políticamente. Después de que rehusara testificar ante el Comité de Actividades Antiamericanas, la Universidad de Princeton lo despidió, y no pudo acceder a ningún otro puesto académico en Estados Unidos.) El logro de Bohm fue la inspiración que llevó a John Bell a poner en duda la demostración del teorema de inexistencia de variables ocultas y, finalmente, a engendrar el teorema de Bell.

La interpretación de Bohm parte del supuesto de que sus partículas, en promedio, reproducen todos los resultados que demanda la ecuación de Schrödinger. Luego, con una matemática simple, deduce una «fuerza cuántica» (o «potencial cuántico») que actúa sobre sus partículas para que hagan precisamente eso.

La fuerza cuántica guía más que empuja. Bohm recurrió a la analogía del faro que guía un barco. La conectividad universal inherente a la teoría cuántica salta a la vista en esta interpretación. La fuerza cuántica sobre un objeto depende instantáneamente de las posiciones de los demás objetos con los que ha interactuado alguna vez, y los objetos que han interactuado con esos otros objetos: en esencia, con todo lo que hay en el universo.

La interpretación de Bohm describe un mundo físicamente real y completamente determinista. La aleatoriedad cuántica interviene sólo porque no podemos conocer con precisión la posición y la velocidad iniciales de cada partícula. No hay colapso inexplicado de la función de onda, como en la interpretación de Copenhague, ni escisión inexplicada de mundos como en la interpretación de mundos múltiples. Hay quienes afirman que la interpretación de Bohm resuelve el problema del observador, o al menos lo convierte en un problema benigno, como en la física newtoniana.

Otros lo ven de otra manera. A diferencia del átomo newtoniano, que se limita a entrar en una de un par de cajas, el átomo de Bohm que entra en la caja «conoce» la posición de la otra caja a través del potencial

cuántico. Puesto que el par de cajas y su juego de espejos macroscópicos están en contacto con el resto del mundo, el átomo también está en contacto con el dispositivo macroscópico que lo ha liberado. El potencial cuántico conecta todo esto desde el principio e incluso determina dónde incidirá el átomo en un eventual patrón de interferencia. La persona que preparó el experimento también influye en el potencial cuántico. En el universo indivisible de la interpretación de Bohm, no hay ningún mundo físico «ahí fuera» separado del observador.

Como en la interpretación de mundos múltiples, puesto que no hay colapso, la parte de la función de onda correspondiente a lo no observado sigue estando ahí. Podemos ver que el gato de Schrödinger sigue vivo, pero la parte de la función de onda que contiene la posibilidad del gato muerto —y su dueño enterrándolo— no desaparece. Podemos dejarla de lado a todos los efectos prácticos, pero en esta interpretación es una posibilidad real y, en principio, tiene consecuencias futuras.

La interpretación de Bohm parece entrar en conflicto con la relatividad especial, pero no nos parece que éste sea un problema insuperable. Hay que decir que el propio Bohm no creía que su interpretación evitara el encuentro de la física con la conciencia. En su altamente técnico libro de 1993 sobre la teoría cuántica, *The Undivided Universe*, cuyo título subraya la conectividad universal y la no separabilidad de lo microscópico y lo macroscópico, Bohm y Basil Hiley escriben:

A lo largo de este libro nuestra posición ha sido que la teoría cuántica misma puede entenderse sin introducir la conciencia y que *en lo que concierne a la investigación en física, al menos en el presente periodo general*, probablemente éste es el mejor enfoque. No obstante, la intuición de que la conciencia y la teoría cuántica están de alguna manera relacionadas parece ser buena, y por esta razón creemos apropiado incluir en este libro una discusión sobre cuál podría ser esta relación. (La cursiva es nuestra.)

Aquella tarde en la que Einstein intentó hablarnos a mí (Bruce) y a un colega graduado de sus tribulaciones con la mecánica cuántica, también nos dijo: «David [Bohm] ha hecho algo bueno, pero no es lo que yo le dije». Al no haber tenido ocasión de pensar en estos problemas durante nuestros estudios de mecánica cuántica, no sabía de qué estaba hablando Einstein. Me hubiera gustado poder preguntarle qué fue lo que le dijo a Bohm.

Ithaca

David Mermin, de la Universidad de Cornell en Ithaca, Nueva York, proponente de lo que él llama «interpretación de Ithaca», identifica dos

«grandes enigmas»: la probabilidad objetiva, que aparece sólo en la teoría cuántica, y el fenómeno de la conciencia.

La probabilidad clásica es subjetiva, una medida de la ignorancia de uno. La probabilidad cuántica, en cambio, es *objetiva*, es la misma para todo el mundo. Para el átomo en un par de cajas, la probabilidad cuántica no es la probabilidad de lo que hay, sino de lo que cualquiera *observaría*. La interpretación de Ithaca toma la probabilidad objetiva como un concepto primario irreducible, y reduce los misterios de la mecánica cuántica a este único enigma.

De acuerdo con esta interpretación, la mecánica cuántica nos está diciendo que «las correlaciones tienen realidad física; aquello que correlacionan no la tiene». Por ejemplo, los fotones gemelos no observados no tienen una polarización *particular*, pero tienen la *misma* polarización. Sólo la correlación de sus polarizaciones es una realidad física, no así las polarizaciones mismas.

Pero, por ejemplo, ¿y si observamos un fotón con un aparato macroscópico cuya escala da una lectura diferente para dos estados de superposición del fotón? Si consideramos el aparato desde el punto de vista mecanocuántico, simplemente se establece una correlación con el fotón. Si es así, la escala debería dar ambas lecturas. Pero siempre vemos una lectura o la otra.

Mermin explica la cuestión de este modo:

Quando yo miro la escala del aparato sé lo que indica. Esas correlaciones sistémicas globales absurdamente delicadas, desesperanzadoramente inaccesibles, obviamente se esfuman por completo cuando conectan *conmigo*. Si esto es porque la conciencia está más allá de la variedad de fenómenos con los que la mecánica cuántica es capaz de tratar, o porque tiene infinitos grados de libertad o reglas propias especiales de superselección, no me aventuraría a adivinarlo. Pero éste es un enigma acerca de la conciencia que no debería mezclarse con los esfuerzos por comprender la mecánica cuántica como una teoría de correlaciones subsistémicas en el mundo no consciente. (La cursiva es nuestra.)

La interpretación de Ithaca deja a un lado el encuentro de la física con la conciencia para restringir el enigma cuántico al problema de la probabilidad objetiva. Pero el encuentro no se niega. La interpretación de Ithaca asigna la conciencia a una «realidad» más amplia que la «realidad física» a la que la ciencia física, al menos de momento, debería limitarse.

Información cuántica

Una interpretación que cuenta con el favor de los estudiosos de la computación cuántica, y que podemos llamar «interpretación de la información cuántica», sostiene que la función de onda sólo representa *información* sobre mediciones posibles en un sistema físico. Aquí la función de onda no se identifica con el sistema físico real. Ni siquiera *describe* el sistema físico considerado.

En esta interpretación, la función de onda, o el estado cuántico, sólo proporciona un aparato matemático compacto para calcular lo máximo que se puede conocer mediante la predicción de correlaciones entre observaciones, por ejemplo entre una medición inicial y otra subsiguiente. El estado cuántico deja de ser una entidad física objetiva: *sólo es conocimiento*. Esta interpretación puede verse como una combinación de la interpretación de Ithaca, con su énfasis en las correlaciones, y una versión de la interpretación de Copenhague, para la que el propósito de la ley física es, en palabras de Bohr, «sólo buscar y encontrar, hasta donde sea posible, las relaciones entre los aspectos polifacéticos de nuestra experiencia».

La interpretación de la información cuántica elude el encuentro de la física con la conciencia a base de reducir el estado cuántico a mero *conocimiento* acerca de *observaciones* posibles. Pero, en cierto sentido, limita el alcance de la mecánica cuántica *sólo* a la conciencia. Ésta es una interpretación útil para los teóricos de la información cuántica que quieren estudiar la computación cuántica sin empantanarse en la cuestión de lo que ocurre realmente. Un aparte: si la ciencia no tiene como meta describir el mundo físico, sino sólo nuestra información sobre éste, ¿a quién le asignamos esa meta? ¿A los filósofos? ¿O es que, de algún modo, con la mecánica cuántica hemos descubierto que la descripción del mundo físico real es imposible?

Lógica cuántica

La elección del tipo de experimento parece capacitarle a uno para demostrar lógicamente cosas contradictorias. En vez de buscar una explicación de este hecho, podemos cambiar las reglas de la lógica para ajustarlas a los hechos observados. Éste es el enfoque de la lógica cuántica. Pocos la consideran una solución satisfactoria del enigma cuántico. ¿Acaso no pueden «explicarse» cualesquiera observaciones concebibles adoptando reglas lógicas convenientes? La lógica cuántica puede ser un interesante ejercicio intelectual y puede ser útil para analizar los ordenadores cuánticos, pero no parece arrojar mucha luz sobre lo que la Naturaleza quiere decirnos.

GRW

Para explicar por qué los objetos grandes nunca se ven en estados de superposición, Ghirardi, Rimini y Weber —GRW— modifican la ecuación de Schrödinger para que las funciones de onda colapsen aleatoriamente de vez en cuando. Para objetos tan pequeños como los átomos, el colapso tiene lugar más o menos cada cien millones de años.

Un colapso tan infrecuente no afectaría a un experimento de interferencia efectuado en un plazo mucho más corto. Pero allí donde un átomo entra en correlación con otros átomos integrantes de un objeto mayor, como puede ser el gato de Schrödinger, el colapso del átomo en una localización propia de un gato vivo o muerto induciría el colapso del gato entero en el estado vivo o muerto. Hay tantos átomos en un gato que incluso si un solo átomo colapsara espontáneamente cada cien millones de años, colapsaría al menos un átomo cada micromicrosegundo. Así pues, el gato sólo podría permanecer en estado de superposición vivo y muerto durante un tiempo sumamente breve.

En rigor, el esquema GRW no es una *interpretación* de la teoría, ya que lo que propone es una *modificación* de la teoría. No hay ninguna prueba experimental del fenómeno GRW, y la ventana de posibilidades experimentales para encontrarla se estrecha. En cualquier caso, la realidad de los objetos pequeños y la experimentalmente confirmada ausencia de separabilidad en nuestro mundo siguen siendo un enigma.

Interpretaciones de Penrose y Stapp

Dos propuestas, una de Roger Penrose y otra de Henry Stapp, podrían considerarse interpretaciones, aunque incluyen especulaciones físicas que involucran la conciencia. Las trataremos en el capítulo 16.

¿Hasta dónde pueden llegar las interpretaciones?

Algunas interpretaciones de la mecánica cuántica resuelven el problema de la medida a todos los efectos prácticos. Pero, a todos los efectos *prácticos*, ahí nunca hubo ningún problema. Las predicciones de la teoría funcionan perfectamente: es a su extraña visión del mundo a la que queremos darle sentido.

La teoría cuántica insiste en que nuestra razonable visión cotidiana del mundo es fundamentalmente incorrecta. Las diferentes interpretaciones de la teoría ofrecen distintas visiones del mundo. Pero en todas y cada una de ellas está involucrado el misterioso encuentro de la conciencia con el mundo físico. ¿Es posible que alguna interpretación aún no propuesta resuelva el enigma?

No. El encuentro con la conciencia emana directamente de la demostración experimental *teóricamente neutral*. Ninguna *interpretación* de la teoría cuántica puede eludir el encuentro. Pero todas eximen a los físicos de tener que *tratar* con la conciencia. Nos gusta cómo expresa Wheeler la dicotomía:

Útil como es en las circunstancias cotidianas decir que el mundo existe «ahí fuera» con independencia de nosotros, esa visión ya no puede sostenerse. Hay un extraño sentido en el que éste es un «universo participatorio».

Pero justo después de decir esto, Wheeler nos advierte:

La «conciencia» no tiene absolutamente nada que ver con el proceso cuántico. Estamos tratando con un suceso que se hace conocido mediante un acto irreversible de amplificación, una impresión indeleble, un acto de registro... [El significado] es otra parte separada de la historia, importante, pero que no debe confundirse con el «fenómeno cuántico».

Interpretamos estas palabras como una exhortación a que los físicos (*como tales*) se dediquen a estudiar sólo los fenómenos cuánticos mismos, y no el *significado* de los fenómenos. Pero algunos de nosotros, como físicos, o sólo como curiosos, queremos reflexionar sobre el significado, intentar comprender lo que ocurre realmente. Ésta ha sido desde hace tiempo la actitud de muchos físicos eminentes (incluyendo, en ocasiones, al propio Wheeler). Y es una actitud que está ganando aceptación.

Pero esa aceptación creciente molesta a algunos físicos y suscita posturas reaccionarias. Además, los cada vez más frecuentes tratamientos pseudocientíficos de la mecánica cuántica —como la película *¿Y tú qué sabes!?*— hacen que los físicos se retraigan y tiendan a minimizar el enigma. No sólo mantenemos oculto nuestro secreto de familia, sino que a veces incluso negamos su existencia.

Por ejemplo, un artículo de 1998 titulado «Teoría cuántica sin observadores», que ocupaba dos números de la revista *Physics Today*, argumentaba que varias interpretaciones, sobre todo la de Bohm, eliminaban el papel activo del observador en la mecánica cuántica. (El propio Bohm, cuya opinión hemos citado antes, no estaría de acuerdo.) Cuando tales argumentos se examinan a fondo, no suele quedar claro si la eliminación del observador es una cuestión de principio o sólo a todos los efectos prácticos (una TRAMPATEP, por emplear la expresión de Bell para los argumentos a-todos-los-efectos-prácticos que presuntamente re-

suelven problemas fundamentales). Pero, ahora mismo, la actitud del artículo de *Physics Today* cuenta con las simpatías de la mayor parte de la comunidad de físicos.

Ocho décadas después de la ecuación de Schrödinger, el sentido del encuentro de la física con la conciencia sigue siendo objeto de debate. Cuando los expertos no se ponen de acuerdo, uno puede elegir a qué experto creer, o especular por su cuenta.

«¿Qué está pasando?» sigue siendo una cuestión abierta. «Sabes que algo está pasando, pero no sabes lo que es.» La física ha topado con algo que está más allá del dominio de la física «ordinaria». Y «Toda interpretación de la mecánica cuántica involucra la conciencia».

Hemos partido de la mecánica cuántica y nos hemos encontrado con la conciencia. En el capítulo siguiente iremos en sentido contrario, de la conciencia a la física.

Lo que se entiende por conciencia no requiere discusión; está más allá de toda duda.

Sigmund Freud

La conciencia plantea los problemas más desconcertantes en la ciencia de la mente. No hay nada que conozcamos más íntimamente que la experiencia consciente, pero no hay nada más difícil de explicar.

David Chalmers

Cuando en este libro hemos discutido los hechos cuánticos demostrados y la *teoría* cuántica, hemos descrito una posición generalmente aceptada (otra cosa son las diversas interpretaciones rivales de la teoría). No podemos hablar de un consenso semejante en lo que respecta a la conciencia: no existe. Es más, las posiciones defendidas pueden ser diametralmente opuestas. Nosotros tenemos nuestra propia opinión, pero, como habrá notado el lector, tenemos dudas.

Hasta los años sesenta, la psicología dominada por el conductismo evitaba el término «conciencia» en cualquier discusión que se preciara de ser científica. ¿Qué fue lo que causó la explosión del interés en la conciencia en las décadas posteriores?

Algunos atribuyen este interés a los llamativos avances en la imaginación cerebral que permitieron observar las partes del cerebro que se activaban en respuesta a estímulos particulares. Pero, de acuerdo con un editor de la revista *Journal of Consciousness Studies*:

Es más probable que el resurgimiento de los estudios de la conciencia se debiera a razones sociológicas: los estudiantes de los años sesenta, que disfrutaron de una rica aproximación extraacadémica a los «estudios de la con-

ciencia» (aunque algunos de ellos no se los tragaran), están ahora dirigiendo los departamentos de ciencias.

El interés en los fundamentos de la mecánica cuántica y la conexión con la conciencia ha florecido al mismo tiempo que los estudios de la conciencia. Algo se respira en el aire.

¿Qué es la conciencia?

Hemos estado hablando de la conciencia, pero nunca la hemos definido del todo. Las definiciones de «conciencia» de los diccionarios apenas son mejores que las de «física». Hemos estado usando el término «conciencia» como más o menos equivalente a «percatación», o quizás a la *sensación* de percatación. El concepto ciertamente incluye la percepción del libre albedrío. Nuestro empleo del término «conciencia» es el estándar en el tratamiento del problema de la medida en física cuántica. (En cualquier caso, como le dijo Humpty Dumpty a Alicia: «Cuando yo uso una palabra... quiere decir lo que yo quiero que diga», y el filósofo Wittgenstein estaría bastante de acuerdo.)

A menudo se puntualiza que la *única* manera que tenemos de conocer la existencia de la conciencia es a través de nuestra sensación en primera persona o del testimonio en segunda persona de otros. (En el próximo capítulo sugeriremos un desafío cuántico a esta limitación.)

No nos referiremos a buena parte de lo que se encuentra en los tratamientos de la conciencia desde el punto de vista psicológico. Por ejemplo, no hablaremos de ilusiones ópticas, ni de trastornos mentales, ni de autoconciencia, ni del sillón freudiano de las emociones ocultas, el *inconsciente*.

Lo que nos preocupa es la «conciencia» que tiene un papel central en el enigma cuántico, la que parece afectar a la realidad física. Esto no necesariamente implica que la conciencia es una «cosa física» que hace algo físico. Estamos describiendo un enigma, no proponiendo una solución al mismo.

Nuestro ejemplo simple era que la observación de la totalidad de un objeto dentro de una caja *causaba* su presencia allí. Decimos «causaba» porque, presumiblemente, uno *podría* haber optado por observar una interferencia y establecer una situación contradictoria con la anterior, en la que el objeto habría sido una onda presente a la vez en ambas cajas. (En vez de «causaba», tal vez deberíamos haber empleado el término preferido de Bohr, «influyó en».)

Una demostración semejante, ¿requiere necesariamente un observador *consciente*? Después de todo, ¿no podría efectuar la observación un robot no consciente, o incluso un contador Geiger? Esta objeción, la más habitual, al requerimiento de la conciencia se planteará —y refutará— en el próximo capítulo. (*No vamos a decir que la conciencia es un requerimiento obligado, sino sólo que el argumento del robot no es válido.*) Por ahora, sólo recuérdese que si ese robot contador no estuviera en contacto con el resto del mundo y obedeciera la mecánica cuántica, simplemente se entrelazaría convirtiéndose en parte de un estado de superposición total (como el gato de Schrödinger). En ese sentido no *observaría*.

Nuestra demostración del encuentro con la conciencia mediante el montaje de las cajas pareadas descansa en el supuesto de que *podríamos* haber optado por otro experimento distinto del que de hecho hicimos, de que tenemos libre albedrío. Lo mismo vale para nuestros experimentos tipo EPR que demuestran las «acciones fantasmales» de Einstein. La existencia de un enigma cuántico depende crucialmente del libre albedrío. Hablemos, pues, de libre albedrío.

Libre albedrío

El problema del libre albedrío surge en diversos contextos. He aquí uno antiguo: puesto que Dios es omnipotente, podría parecer injusto que a nosotros se nos haga responsables de *algo*. Después de todo, Dios tenía el control. Los teólogos medievales resolvieron este asunto decidiendo que cada tren de sucesos parte de una «causa eficiente remota» y acaba con una «causa final», ambas en manos de Dios. Las causas intermedias vienen dadas por nuestras elecciones libres, por las cuales tendremos que pasar cuentas el día del juicio.

Esta preocupación medieval no está tan lejos de la de los filósofos de la moralidad actuales. Y los abogados defensores la convierten en un tema práctico al argumentar que las acciones de sus defendidos estaban determinadas por la genética y el entorno en vez del libre albedrío. Nuestro planteamiento del problema del libre albedrío es más simple.

La física newtoniana clásica es completamente determinista. Un «ojo que todo lo ve», capaz de contemplar la situación del universo en un momento dado, puede conocer su futuro entero. Si la física clásica se aplicara a *todo*, no habría sitio para el libre albedrío.

No obstante, el libre albedrío puede coexistir tranquilamente con la física clásica. En nuestro capítulo sobre la visión newtoniana del mundo

explicábamos que, en otro tiempo, la física podía detenerse ante la frontera del cuerpo humano o, desde luego ante el entonces absolutamente misterioso cerebro. Los físicos podían decidir que el libre albedrío no era un asunto de su competencia y dejárselo a filósofos y teólogos.

Esa inhibición no resulta tan fácil hoy, cuando los científicos estudian las operaciones del cerebro, su electroquímica y su respuesta a los estímulos. Al hacerlo tratan el cerebro como un objeto físico cuyo comportamiento está gobernado por leyes físicas. El libre albedrío no encaja fácilmente en ese cuadro: se queda acechando como un espectro detrás de una esquina.

La mayoría de neurofisiólogos y muchos psicólogos ignoran tácitamente esa esquina. Algunos, quizá con más coherencia lógica, niegan la existencia del libre albedrío y afirman que nuestra *sensación* de libre albedrío es una ilusión. Otros simplemente lo aceptan como un misterio por ahora aparcado. Pero otros lo exploran. Trataremos la controversia generada por todo esto cuando discutamos el «problema difícil» de la conciencia.

¿Cómo podríamos *demostrar* la existencia del libre albedrío? Puede que todo lo que tengamos sea nuestra propia sensación de libre albedrío y la afirmación de su posesión por otros. Si tal demostración es del todo imposible, quizá la existencia del libre albedrío carezca de sentido. (En contra de este argumento, aunque uno no pueda demostrar su sensación de dolor a algún otro, uno sabe que existe, y desde luego no carece de sentido.)

El experimento más famoso sobre el libre albedrío ha suscitado un acalorado debate. A principios de los ochenta, Benjamin Libet hizo que sus sujetos flexionaran sus muñecas en un momento elegido a voluntad, pero no planeado de antemano. Libet determinó el orden de tres momentos críticos: el momento del «potencial de disposición», un voltaje que puede detectarse con electrodos en la cabeza casi un segundo antes de que tenga lugar una acción voluntaria; el momento de la flexión de muñeca, y el momento en que los sujetos decían haber *decidido* flexionar la muñeca (mirando un reloj de avance rápido).

Podría esperarse que el orden fuera (1) decisión, (2) potencial de disposición y (3) acción. En realidad, el potencial de disposición *precedía* al momento de la decisión. ¿Demuestra esto que alguna función determinista en el cerebro ocasionó la decisión supuestamente libre? Algunos así lo dirían (no necesariamente Libet). Pero estamos hablando de fracciones de segundo, y el sentido de la cronología de la decisión es difícil de evaluar. Además, puesto que se supone que la acción de flexionar la muñeca se inicia sin ningún plan previo, el resultado experimental pa-

rece, en el mejor de los casos, una prueba ambigua en contra del libre albedrío consciente.

Aunque el libre albedrío es difícil de encajar en una visión científica del mundo, nosotros mismos no podemos dudar seriamente de su existencia. El comentario de J.A. Hobson nos parece apropiado: «A los que tenemos sentido común nos asombra la resistencia que psicólogos, fisiólogos y filósofos ofrecen a la realidad obvia del libre albedrío».

No obstante, como hemos visto, al aceptar tanto el libre albedrío como los efectos cuánticos demostrados, nos encontramos con un enigma: la aparente creación de la realidad por la observación consciente. Además, para evitar el enigma a base de *negar* el libre albedrío, también debemos admitir que el mundo conspira para hacer que nuestras elecciones se correlacionen con las situaciones físicas que observamos a continuación. Mientras que en la física clásica el libre albedrío es un problema benigno, la mecánica cuántica nos obliga a considerar la introducción de aspectos humanos en nuestra física. Según John Bell:

Resulta que la mecánica cuántica no puede «completarse» en una teoría localmente causal, al menos si uno permite [...] experimentadores que operan libremente.

La creación de la realidad por la observación es difícil de aceptar. Pero no es una idea nueva.

De Berkeley al conductismo

La idea de una realidad física creada por su observación se remonta a la filosofía védica, que tiene miles de años de antigüedad. Pero demos un salto hasta el siglo XVIII. Tras la estela de la mecánica newtoniana, la visión materialista de que todo lo que existe es materia gobernada por fuerzas puramente mecánicas ganó una amplia aceptación. Pero esto no gustaba a todo el mundo.

Para el filósofo idealista George Berkeley, el pensamiento newtoniano degradaba nuestro estatuto de seres morales con libertad de elección. El que la física clásica pareciera dejar fuera a Dios le horrorizaba. Después de todo, él era obispo. (En aquellos tiempos era corriente que los académicos ingleses fueran ordenados sacerdotes anglicanos, aunque

el celibato de los días de Newton ya no era una obligación; de hecho, Berkeley se casó.)

Berkeley rechazaba de plano el materialismo con el lema *esse est percipi*, «ser es ser percibido», lo que significaba que todo lo que existe es creado por su observación. A la vieja pregunta, «Si un árbol cae en el bosque sin que haya nadie en los alrededores para oír el ruido de su caída, ¿hay algún sonido?», la respuesta de Berkeley presumiblemente sería que ni siquiera habría un árbol hasta que no fuera observado.

Aunque la postura casi solipsista de Berkeley pueda parecer un tanto lela, a muchos filósofos idealistas de la época les entusiasmaba. No era el caso de Samuel Johnson, de quien se dice que, tras tropezar con una piedra golpeándose el dedo gordo del pie, declaró: «¡Refutado queda!». Los tropezones con las piedras no impresionaron demasiado a los adictos al pensamiento de Berkeley, el cual, por supuesto, es imposible de rebatir.

Aunque no está en la línea de Berkeley, ni mucho menos, he aquí una vieja coplilla que ilustra la atención que se prestaba a tales ideas:

Había un joven llamado Todd
Que dijo: «es sumamente extraño
Pensar que este árbol
Debería seguir estando
Cuando no hay nadie en el patio».

La réplica:

No tiene nada de extraño;
Yo siempre estoy en el patio.
Y por eso este árbol
Puede continuar estando
Cuando es observado por
Su seguro servidor, Dios.

Dios puede ser omnipotente pero, como se desprende del espíritu de la coplilla, no es omnisciente. Si Dios colapsa las funciones de onda de objetos grandes haciéndolos reales por su observación, los experimentos cuánticos indican que no está observando lo pequeño.

La idea de que el mundo que nos rodea estaba siendo creado por su observación nunca arraigó. La mayoría de la gente práctica, y con seguridad la mayoría de científicos decimonónicos, consideraba que el mundo estaba hecho de partículas sólidas, que algunos llamaban «áto-

mos». Se presumía que éstos obedecían a leyes mecánicas a semejanza de aquellas otras partículas mucho mayores, los planetas. Aunque los físicos podían especular acerca de la mente, y algunos componían cuadros hidráulicos de ella en vez de los modelos informáticos de hoy, en su mayoría la ignoraban.

En el siglo XIX y buena parte del XX, el pensamiento científico se equiparaba en términos generales al pensamiento materialista. Ni siquiera en los departamentos de psicología se atendía seriamente a los estudios de la conciencia. El conductismo se convirtió en la filosofía dominante. Las personas tenían que estudiarse como «cajas negras» que recibían estímulos de entrada y daban comportamientos de salida. Las correlaciones entre comportamientos y estímulos eran todo lo que la ciencia tenía que decir de lo que ocurría en el interior. Si conociéramos el comportamiento correspondiente a cada estímulo, sabríamos todo lo que hay que saber de la mente.

El enfoque conductista tuvo éxito a la hora de revelar cómo responde la gente y, en cierto sentido, por qué actúa como lo hace. Pero ni siquiera *abordaba* el estado interno, la sensación de conciencia y la toma de decisiones aparentemente libres. Según el líder del conductismo, B.F. Skinner, la aceptación de un libre albedrío consciente era acientífica. Pero con el auge de la psicología humanista en la última parte del siglo XX, las ideas conductistas comenzaron a parecer estériles.

El «problema difícil» de la conciencia

El conductismo ya estaba de capa caída cuando, a principios de los noventa, David Chalmers, un joven filósofo australiano, sacudió el estudio de la conciencia al identificar lo que llamó «problema difícil». En síntesis, el problema difícil es el de explicar la generación por el cerebro biológico del mundo interno de la experiencia subjetiva. Los «problemas fáciles» de Chalmers incluyen cosas como la reacción a estímulos o la comunicabilidad de estados mentales (y el resto de estudios de la conciencia). Chalmers no quiere dar a entender que estos problemas sean fáciles en absoluto: sólo lo son en comparación con el problema difícil. Nuestro actual interés en el problema difícil de la conciencia emana de su aparente similitud (¿y conexión?) con el problema difícil de la mecánica cuántica, el de la observación.

Antes de continuar con el problema difícil y los encendidos debates que continúa suscitando, sepamos algo más de David Chalmers: estudió física y matemáticas y trabajó en matemáticas antes de pasarse a la filo-

sofía. Aunque no ocupa un lugar central en su argumentación, Chalmers considera que la mecánica cuántica probablemente tiene relevancia para el problema de la conciencia. El último capítulo de su gran obra, *La mente consciente*, se titula «La interpretación de la mecánica cuántica». David Chalmers estuvo en el departamento de filosofía de nuestra universidad antes de que (para desolación nuestra) se trasladara a la Universidad de Arizona para dirigir el Centro de Estudios de la Conciencia. Luego volvió a su nativa Australia, y en la actualidad es director del Centro de la Conciencia en la Universidad Nacional de Australia.

Los problemas fáciles de Chalmers tienen que ver a menudo con la correlación entre la actividad cerebral y aspectos de la conciencia, los «correlatos cerebrales de la conciencia». La tecnología de imágenes cerebrales permite hoy la visualización detallada de la actividad dentro del cerebro que piensa y siente, y ha estimulado estudios fascinantes de los procesos mentales.

La exploración de lo que ocurre dentro del cerebro no es nueva. Hace tiempo que los neurocirujanos han correlacionado la actividad y la estimulación eléctricas con informes de percepciones conscientes colocando electrodos directamente en el cerebro expuesto. Esto se hace sobre todo con propósitos terapéuticos, por supuesto, y la investigación científica está restringida. La electroencefalografía (EEG), la detección de potenciales eléctricos en la superficie craneal, es aún más antigua. La EEG puede detectar la actividad neuronal, pero no puede decirnos dónde se localiza dicha actividad en el cerebro.

La tomografía por emisión de positrones es más apta para situar la actividad de las neuronas cerebrales. La técnica consiste en inyectar átomos radiactivos —de oxígeno, por ejemplo— en el torrente sanguíneo. Mediante detectores de radiación y análisis informático se pueden determinar las regiones donde hay un incremento de la actividad metabólica que demanda más oxígeno y correlacionar dicha actividad con estímulos e informes de percepciones conscientes.

La técnica de imaginería cerebral más espectacular es la resonancia magnética funcional. Es aún mejor que la tomografía cuando se trata de localizar la actividad neuronal y no emplea elementos radiactivos (aunque el examinado debe mantener la cabeza derecha en medio de un gran imán, por lo general ruidoso). La imagen por resonancia magnética es la técnica médica que hemos descrito en el capítulo 8 como una de las aplicaciones prácticas de la mecánica cuántica. Las imágenes por resonancia magnética funcional casi pueden localizar la región del cerebro que está consumiendo más oxígeno durante una función cerebral particular.

La resonancia magnética funcional permite correlacionar regiones cerebrales concretas con los procesos neuronales implicados en la memoria, el habla, la visión y la conciencia, entre otros. Las imágenes en falsos colores, generadas por ordenador, pueden mostrar una mancha roja en regiones particulares del cerebro cuando uno piensa, digamos, en comida o siente dolor. Su inconveniente es que, como cualquier otra técnica basada en la actividad metabólica, no es rápida.

Los datos disponibles que relacionan la actividad electroquímica cerebral con la conciencia son fragmentarios. Pero supongamos, y esto es lo que queremos significar aquí, que una resonancia magnética funcional mejorada —u otra técnica futura— pudiera identificar *completamente* las activaciones cerebrales particulares ligadas a ciertas experiencias conscientes. Esto permitiría correlacionar todas las sensaciones conscientes (reportadas) con la actividad metabólica cerebral, y quizás incluso con los fenómenos electroquímicos subyacentes. Semejante catálogo de los correlatos cerebrales de la conciencia es la meta de buena parte de la investigación actual del cerebro consciente.

Si se cumple este objetivo, dicen algunos, habríamos conseguido todo lo que *se puede* conseguir. La conciencia, afirman, quedaría explicada, porque en ella no hay nada más allá de la actividad cerebral que correlacionamos con las *sensaciones* de conciencia experimentadas y reportadas. Si desmontamos un viejo reloj de péndulo y vemos el mecanismo de muelles y engranajes que convierte la oscilación del peso en el giro de las manecillas, podemos saber todo lo que hay que saber acerca del funcionamiento del reloj. Hay quienes afirman que la conciencia quedará igualmente explicada por nuestro conocimiento de lo que hacen las neuronas que componen el cerebro.

Francis Crick, físico y codescubridor de la doble hélice del ADN, luego reconvertido en estudioso del cerebro, buscaba la «neurona de la conciencia». Para él, nuestra experiencia subjetiva —nuestra conciencia— no es más que la actividad de tales neuronas. Su libro sobre el tema, *La búsqueda científica del alma*, defiende esta hipótesis:

«Tú», tus alegrías y tus tristezas, tus recuerdos y tus ambiciones, tu sentido de la identidad personal y del libre albedrío, no son en realidad sino el comportamiento de un vasto entramado de células nerviosas y sus moléculas asociadas.

Si es así, nuestra sensación de que la conciencia y el libre albedrío están más allá del mero funcionamiento de electrones y moléculas es una ilusión. En consecuencia, la conciencia debería tener una explicación en

última instancia reduccionista, esto es, debería ser completamente describible en términos de entidades más simples, los correlatos cerebrales de la conciencia. Las sensaciones subjetivas «emergen» así supuestamente de la electroquímica de las neuronas. Esto es parecido a la idea más fácil de aceptar de que la humedad del agua emerge de la interacción entre los átomos de hidrógeno y oxígeno que forman las moléculas de H_2O .

Esta emergencia constituye la «hipótesis asombrosa» de Crick. ¿Es realmente tan asombrosa? Sospechamos que al menos a la mayoría de físicos le parecería la conjetura más natural.

Christof Koch, durante largo tiempo colaborador de Crick, adopta una postura más matizada:

Dada la centralidad de las sensaciones subjetivas en la vida diaria, haría falta una extraordinaria prueba fáctica antes de concluir que los qualia y las sensaciones son ilusorios. El enfoque provisional que adopto consiste en considerar las experiencias en primera persona como hechos primarios de la vida que requieren explicación.

En un contexto algo diferente, Koch sopesa visiones distintas:

Aunque no puedo descartar que la explicación de la conciencia pueda requerir leyes fundamentalmente nuevas, ahora mismo no veo una necesidad apremiante de dar tal paso.

[...] doy por sentado que la base física de la conciencia es una propiedad emergente de interacciones específicas entre neuronas y sus elementos [...]. [Pero] los caracteres de los estados cerebrales y de los estados fenoménicos [de las neuronas] parecen demasiado diferentes para que los unos sean completamente reducibles a los otros. Sospecho que su relación es más compleja de lo que se ha imaginado tradicionalmente.

David Chalmers, principal portavoz de un punto de vista diametralmente opuesto al de Crick, ve imposible explicar la conciencia sólo a partir de sus correlatos neuronales. A lo sumo, sostiene Chalmers, esas teorías nos dicen algo acerca del papel *físico* que puede desempeñar la conciencia, pero no nos dicen cómo surge:

Para cualquier proceso físico que especifiquemos habrá una pregunta sin respuesta: ¿por qué este proceso debería dar lugar a la experiencia [consciente]? Dado uno cualquiera de tales procesos, es conceptualmente coherente que pudiera... [existir] en ausencia de experiencia. De lo que se sigue

que ninguna mera descripción de procesos físicos nos dirá por qué surge la experiencia. La emergencia de la experiencia va más allá de lo que puede derivarse de la teoría física.

Si bien la teoría atómica puede explicar de forma reduccionista la humedad del agua y por qué se pega a nuestros dedos, esto está muy lejos de explicar nuestra *sensación* de humedad. Chalmers niega la posibilidad de cualquier explicación reduccionista de la conciencia y sugiere que una teoría de la conciencia debería tomar la experiencia como entidad primaria, junto con la masa, la carga y el espaciotiempo. Además, esta nueva propiedad fundamental conllevaría nuevas leyes fundamentales, que él llama «principios psicofísicos».

Chalmers no se detiene aquí. Un principio que considera básico, y el más interesante para nosotros, es una «hipótesis natural: que la información (al menos cierta información) tiene dos aspectos básicos, uno físico y otro fenoménico». Esto recuerda la situación de la mecánica cuántica, donde la función de onda también tiene dos aspectos: por un lado es la realidad física total de un objeto, y por otro, conjeturan algunos, esa realidad es pura información (¡signifique eso lo que signifique!).

Para discutir que la experiencia consciente va más allá del conocimiento ordinario, se nos cuenta la historia de Mary, una científica del futuro que sabe todo lo que hay que saber acerca de la percepción del color. Pero ella nunca ha estado fuera de una sala donde todo es blanco o negro. Un día se le muestra algo de color rojo. Mary *experimenta* el rojo por primera vez. Su experiencia del rojo es algo que está *más allá* de su completo conocimiento del rojo. ¿O no? Sin duda el lector puede generar por sí mismo los pros y contras que suscita la historia de Mary.

El filósofo Daniel Dennett, en su ampliamente citado libro *La conciencia explicada*, describe el tratamiento de la información por el cerebro como un proceso donde «múltiples borradores» son corregidos constantemente, conglomerándose de vez en cuando para producir la experiencia. Dennett niega la existencia de un «problema difícil», que ve como una forma de dualismo mente-cerebro, algo que él afirma refutar con el siguiente argumento:

Ninguna energía ni masa física se asocia con ellas [las señales de la mente al cerebro]. ¿Cómo, entonces, tienen algún efecto sobre lo que pasa en las células cerebrales que deben afectar, si es que la mente debe tener alguna influencia sobre el cuerpo? [...] Esta confrontación entre la física más convencional y el dualismo [...] es contemplada por todo el mundo como el ineludible y fatal fallo del dualismo.

Puesto que Chalmers argumenta que la conciencia obedece principios que están *fuera* de la física convencional, no está claro que un argumento *basado* en la física estándar pueda ser una refutación válida de Chalmers. Es más, en el argumento de Dennett hay un vacío cuántico: no necesariamente se requiere masa o energía para determinar en *cuál* de sus estados posibles colapsará una función de onda como consecuencia de una observación.

Por supuesto, nuestro propio interés en el problema difícil viene de que la física se ha encontrado con la conciencia en el enigma cuántico, que los físicos conocen como el «problema de la medida», donde hay aspectos de la observación física que se acercan a los de la experiencia consciente. En ambos casos, la solución parece requerir algo más allá del tratamiento normal de la física o la psicología.

La naturaleza esencial del problema de la medida en mecánica cuántica ha estado en disputa desde la implantación de la teoría. Similarmente, desde que la conciencia se ha convertido en tema de discusión científica en psicología y filosofía, su naturaleza esencial ha estado en disputa. Un ejemplo extremo de esta discrepancia lo tuvimos en 2005 en un artículo del *New York Times* donde algunos científicos eminentes expresaban su opinión sobre el tema. Según el investigador cognitivo Donald Hoffman:

Creo que la conciencia y sus contenidos son todo lo que existe. El espacio-tiempo, la materia y los campos nunca fueron los residentes fundamentales del universo, sino que siempre han estado, desde el principio, entre los contenidos más humildes de la conciencia, dependientes de ella para su propio ser.

El psicólogo Nicholas Humphrey lo ve de otra manera:

Creo que la conciencia humana es un truco de magia, cuyo designio es hacernos pensar que estamos en presencia de un misterio inexplicable.

Una manera de explorar la naturaleza de la conciencia —y su existencia— es preguntarnos quién o qué puede poseerla.

¿Un ordenador consciente?

Cada uno de nosotros *sabe* que es consciente. La única prueba para creer que los otros también lo son quizá sea que se parecen a uno y se

comportan como uno. ¿Hay alguna otra? La presunción de que nuestros congéneres son conscientes está tan hondamente implantada que es difícil expresar las razones de nuestra convicción.

¿Hasta dónde llega la conciencia en la escala descendente de los seres vivos? ¿Qué podemos decir de los gatos y los perros? ¿Y de las lombrices de tierra o las bacterias? Algunos filósofos ven un continuo, y llegan a atribuir un ápice de conciencia a un termostato. Por otro lado, puede que la conciencia aparezca de pronto en algún punto de la escala. Después de todo, la Naturaleza puede ser discontinua (por debajo de 0 °C, por ejemplo, el agua líquida se convierte abruptamente en hielo sólido).

Demos un paso atrás y hablemos sólo de «pensamiento» o inteligencia. Hoy día, los programas informáticos de inteligencia artificial asisten a los médicos en el diagnóstico de enfermedades, a los generales en la táctica militar, y a los ingenieros en el diseño de ordenadores aún mejores. En 1997, la máquina *Deep Blue*, de IBM, derrotó al campeón mundial de ajedrez, Garry Kasparov.

¿Piensa *Deep Blue*? Depende de lo que se entienda por pensar. El padre de la teoría de la información, Claude Shannon, al preguntarle si los ordenadores llegarán a pensar, parece ser que dijo: «Desde luego. Yo soy un ordenador, y pienso». Pero los ingenieros de IBM que diseñaron *Deep Blue* insisten en que su máquina no es más que una calculadora rápida que evalúa cien millones de posiciones en un parpadeo. Piense o no, con toda seguridad *Deep Blue* no es consciente.

Pero si un ordenador *pareciera* consciente en todos los aspectos, ¿no deberíamos aceptar que es consciente? Aquí deberíamos regirnos por el venerable principio de que si algo parece un pato, anda como un pato y dice «cuac» como un pato, entonces será un pato.

La cuestión interesante es si se puede *construir* un ordenador consciente y, por ende, un robot consciente. Este programa de investigación se conoce a veces como «inteligencia artificial *fuerte*». (¿Sería asesinato desenchufar a un robot genuinamente consciente?) Se han adelantado «demostraciones» lógicas de que la inteligencia artificial fuerte es posible en principio, y también hay «demostraciones» de lo contrario. ¿Cómo podríamos saber si un ordenador es consciente?

En 1950, Alan Turing propuso un test para evaluar la conciencia de un ordenador. (En realidad, Turing declaró que era un test para ver si un ordenador podía pensar, ya que en aquellos tiempos un científico que se preciara no podía hablar de «conciencia»). Turing también diseñó el primer ordenador programado y demostró un teorema sobre lo que los ordenadores podían hacer y lo que no. Dicho sea de paso, Turing fue encarcelado por homosexual, y en 1954 se suicidó. Muchos años después

de su muerte, las autoridades revelaron que fue Alan Turing quien había descifrado el código alemán, lo que permitió a los aliados leer los mensajes más secretos del enemigo y probablemente contribuyó a adelantar muchos meses el final de la segunda guerra mundial.)

El test de Turing aplica esencialmente el mismo criterio que aplicamos para atribuir conciencia a otro individuo: ¿se parece a mí y se comporta más o menos como yo? No nos preocupemos por el «parecido»: sin duda se puede conseguir un robot de aspecto humano. La cuestión es si su cerebro electrónico lo hace consciente.

De acuerdo con Turing, para comprobar si un ordenador es consciente debería bastar con comunicarse con él mediante un teclado y entablar una conversación todo lo larga que uno quiera. Si uno es incapaz de discernir si se está comunicando con un ordenador o con otra persona, la máquina habrá superado el test. Algunos dirían que, en tal caso, no podría negarse que es consciente.

Un día en clase, uno de nosotros (Bruce) comentó de pasada que cualquier ser humano pasaría el test de Turing con facilidad. Una joven replicó: «¡Me he citado con tíos que no lo pasarían!».

La conciencia es un misterio que exploramos porque el encuentro de la física con ella nos pone ante el enigma cuántico. En el capítulo siguiente, el misterio se encuentra con el enigma.

Cuando el dominio de la teoría física se amplió para abarcar los fenómenos microscópicos a través de la creación de la mecánica cuántica, el concepto de conciencia volvió a saltar a la palestra: no era posible formular las leyes de la mecánica cuántica de manera plenamente consistente sin ninguna referencia a la conciencia.

Eugene Wigner

Cuando hay dos misterios, es tentador suponer que tienen una misma fuente. Esta tentación se magnifica por el hecho de que los problemas de la mecánica cuántica parecen estar profundamente ligados a la noción de observación, que implica de manera crucial la relación entre la experiencia de un sujeto y el resto del mundo.

David Chalmers

La conciencia y el enigma cuántico no son sólo dos misterios: son *los* dos misterios. El primero, la demostración física del enigma cuántico, nos pone ante un misterio fundamental del mundo objetivo «ahí fuera». El segundo, la percepción consciente, nos pone ante el misterio fundamental de lo subjetivo, el mundo mental «interior». La mecánica cuántica parece conectar ambos mundos.

La proclamación «oficial» del encuentro

En su tratamiento riguroso de 1932, *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, John von Neumann dejó claro que la teoría cuántica

hace inevitable el encuentro de la física con la conciencia. Consideremos, como hizo Von Neumann, un aparato de medida tal como un contador Geiger. Está aislado del resto del mundo, pero entra en contacto con un sistema cuántico, digamos un átomo simultáneamente presente en un par de cajas. El contador Geiger se dispara si el átomo está en la caja de arriba y no se dispara si el átomo está en la caja de abajo. Von Neumann mostró que si el contador Geiger es un sistema físico gobernado por la mecánica cuántica, entraría en un estado de superposición con el átomo tal que estaría simultáneamente disparado y no disparado. (Ya hemos visto esta situación a propósito del gato de Schrödinger.)

Si un segundo aparato de medida aislado entra en contacto con el contador Geiger (por ejemplo, un dispositivo electrónico que registre si el contador Geiger se ha disparado) se unirá al estado de superposición y registrará ambas situaciones simultáneamente. Esta «cadena de Von Neumann» puede alargarse indefinidamente. Von Neumann demostró que *ningún* sistema físico que obedezca las leyes de la física (es decir, la teoría cuántica) podría inducir el colapso de una función de onda en estado de superposición para dar un resultado particular.

Ahora bien, cuando miramos el contador Geiger siempre vemos un resultado particular, no una superposición. Von Neumann concluyó que sólo un observador consciente, haciendo algo no contemplado por la física actual, puede inducir el colapso de una función de onda. Aunque, a todos los efectos prácticos, uno puede *considerar* colapsada la función de onda en cualquier eslabón macroscópico de la cadena de Von Neumann, sólo un observador consciente puede llevar a cabo una auténtica observación.

Un par de años después, Schrödinger ideó su metáfora del gato para ilustrar lo «absurdo» de la teoría que él mismo había construido. El cuento del gato se basaba esencialmente en la conclusión de Von Neumann de que se requería un observador consciente para colapsar un estado de superposición. Así pues, la física, la ciencia más empírica, parece basarse en última instancia en la conciencia.

Conciencia y reducción

Con la perspectiva reduccionista, uno persigue reducir un sistema complejo a la ciencia subyacente. Por ejemplo, uno puede buscar explicaciones de los fenómenos psicológicos en términos biológicos. Luego los fenómenos biológicos pueden verse en última instancia como procesos químicos. Y ningún químico duda de que los fenómenos químicos

son fundamentalmente interacciones de átomos que obedecen la mecánica cuántica. La física misma, se supone, descansa firmemente sobre cimientos empíricos primarios.

En el capítulo 4 representábamos esta postura mediante la pirámide reduccionista. Ahora vemos que la visión clásica del fundamento empírico primario sobre el que descansa la física es puesta en tela de juicio por la mecánica cuántica. En cierto extraño sentido, la física se asienta sobre el fenómeno del colapso de la función de onda por la observación. Por eso hemos añadido una conciencia algo nebulosa en la base de nuestra pirámide reduccionista. Aunque, a todos los efectos prácticos, la ciencia siempre será jerárquica, si cada nivel jerárquico requiere su propio conjunto de conceptos, la nueva concepción de la reducción puede cambiar nuestra percepción de la empresa científica.

Percatación consciente frente a entrelazamiento

Volvamos una vez más a nuestro átomo en un par de cajas. Vamos a plantear una extraña pregunta sobre la conciencia. Como hemos dicho en el capítulo 14, se puede demostrar que un fotón que atraviesa una de las cajas no observa si el átomo está o no en esa caja. En vez de eso, se suma a un estado de superposición con el átomo. Si el fotón colisiona con un contador Geiger *aislado*, ese contador simplemente se suma al estado de superposición átomo-fotón, como en el análisis de Von Neumann. El contador Geiger no observado está simultáneamente disparado y no disparado, y el átomo sigue estando a la vez en ambas cajas.

Ahora consideremos una situación diferente. Supongamos que nuestro contador Geiger golpeado por un fotón estaba sobre una mesa que descansa sobre el suelo. Este contador *no* aislado interactúa con la mesa (al rebotar sus átomos contra los de la mesa). Por lo tanto está *entrelazado* con la mesa y, por ende, con el resto de mundo, lo que incluye a las personas. El átomo, entrelazado con el fotón, entrelazado con el contador, está ahora entrelazado con las conciencias individuales. Pero, si nadie mira, nadie *sabe* en qué caja está el átomo.

He aquí la extraña pregunta prometida: ¿es este entrelazamiento indirecto del átomo con el resto del mundo y las conciencias individuales lo que lo colapsa en una sola caja, o el colapso requiere la constatación consciente de la presencia del átomo en una caja mediante una observación efectiva del átomo o del contador Geiger? ¿Cómo podríamos discernir si el átomo ha colapsado en una caja o todavía está presente simultáneamente en ambas? En rigor, sin *mirar* el átomo o el contador

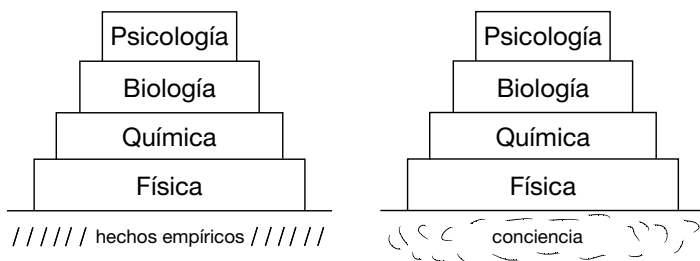


Figura 16.1. Reconsideración de la jerarquía de la explicación científica.

Geiger no hay manera de saberlo. En rigor, a menos que invoquemos algo más allá de la mecánica cuántica, el átomo quizá siga estando en ambas cajas.

Aún podemos decir algo más sobre conciencia y entrelazamiento. Todo en el mundo se entrelaza instantáneamente con nuestro fotón tan pronto como éste incide en el contador Geiger *no* aislado. El entrelazamiento viaja a velocidad infinita. Pero para que una persona en la distancia *se percate* de la condición del contador o del átomo, tiene que comunicarse por algún medio físico que no podría superar la velocidad de la luz. Así pues, la percatación no puede ser más rápida que la luz.

Hemos visto que en los experimentos inspirados por el teorema de Bell el entrelazamiento era más rápido que la luz (infinitamente rápido, cabe presumir). La observación de la polarización de un fotón gemelo establece *de forma inmediata* la polarización del otro gemelo: eso es entrelazamiento. Pero sólo cuando cada observador se percata de los resultados del otro puede saber si hay o no concordancia. Un fotón «conoce» el comportamiento de su gemelo instantáneamente, pero Alice y Bob (dos observadores conscientes) sólo pueden percatarse de los resultados del otro con una rapidez limitada por la velocidad de la luz.

La figura 16.2 —una viñeta del número de mayo de 2000 de *Physics Today*— es relevante para nuestra discusión. (Cuando el enigma cuántico aparece en las revistas de física, si no es para darlo presuntamente por resuelto es para hacer humor con él.) Chris, entrelazada con Eric y el resto del mundo, obviamente no entraría en una «superposición de todos los estados posibles» cuando Eric no mira. Después de todo, un átomo ya observado en una caja concreta no vuelve a superponerse en ambas cajas cuando apartamos la vista. Además, si suponemos que Chris es una observadora consciente, y no un robot aislado, ella tendría conciencia permanente de la posición de su propio cuerpo, por lo que colapsaría constantemente su función de onda corporal.



Figura 16.2. Viñeta de Nick Kim, 2000. © American Institute of Physics.

¿Necesitamos un observador consciente?

El argumento del robot se esgrime a menudo para negar cualquier implicación de la conciencia en el colapso de la función de onda. Si un robot *no* consciente puede hacer lo mismo que un observador consciente, entonces este último es prescindible. Por ejemplo, podríamos presentar conjuntos de nuestras cajas pareadas a un robot, el cual podría decidir al azar si hacer un experimento de mirar en una caja o un experimento de interferencia y luego imprimir un informe de sus resultados. Puesto que este informe impreso sería indistinguible del presentado por un observador consciente, el robot no consciente puede considerarse un observador. No se requiere ninguna intervención de la conciencia.

Este argumento no es válido. Veamos lo que ocurre si en este experimento efectuado por un robot se evita el encuentro con la conciencia desde la perspectiva *humana* (que, después de todo, es la única que tiene *sentido*).

Supongamos que nos entregan el listado del robot, en el que se indica, por ejemplo, que el robot hizo el experimento de mirar dentro de una caja con los conjuntos de cajas pareadas 2, 5, 7, 8, 11 y 13, y demostró que *éstos* contenían objetos que estaban dentro de una sola caja; luego el robot hizo un experimento de interferencia con los conjuntos de cajas pareadas 1, 3, 4, 6, 9, 10 y 12, y demostró que *éstos* contenían objetos distribuidos en un par de cajas. En sí mismo, el listado del robot no plantea ningún problema, no evidencia enigma alguno.

Con el listado del robot en las manos, podríamos dar por sentado que los pares de cajas en efecto contenían lo que se indica en cada caso. Podríamos suponer que en el proceso de preparación necesariamente inobservado, cada conjunto de cajas pareadas de algún modo se *creó* con sus objetos correspondientemente distribuidos o concentrados tal como indica el listado del robot.

Supongamos, sin embargo, que los conjuntos de cajas pareadas ya diferían en eso (unos contenían objetos concentrados y otros contenían objetos distribuidos) antes de que el robot los «observara». ¿Cómo «decidió» el robot hacer el experimento *apropiado* para cada conjunto de cajas pareadas? De haber hecho un experimento de interferencia con objetos que estaban en una sola caja, no hubiera obtenido ningún patrón de bandas, sino sólo una distribución uniforme de objetos. ¿Y si hubiera hecho un experimento de inspección de cajas con objetos físicamente distribuidos en ambas cajas de su par? Nunca se informa de la presencia parcial de un objeto. Extrañamente, la elección presuntamente aleatoria del experimento siempre ha sido la «correcta».

Esto nos mueve a investigar cómo eligió el robot el experimento adecuado a cada conjunto de cajas pareadas. Supongamos que averiguamos que lanzaba una moneda: si salía cara, inspección; si salía cruz, interferencia. Aquí hay algo intrigante: el lanzamiento de la moneda parece inexplicablemente ligado al presumible contenido de un conjunto de cajas pareadas particular. A menos que el nuestro sea un mundo extrañamente determinista que conspira para hacer coincidir el resultado del lanzamiento de la moneda con el contenido de cada conjunto de cajas pareadas, no hay explicación para dicha correlación.

En consecuencia, reemplazamos el lanzamiento de la moneda por el único mecanismo de decisión del que *sabemos* que no está conectado con lo que pudiera haber existido antes en un conjunto de cajas pareadas particular: *nuestra propia libre elección*. Pulsamos un botón para indicarle al robot qué experimento queremos que haga con cada conjunto de cajas pareadas. Ahora encontramos que en virtud de nuestra elección libre y consciente del experimento podemos demostrar *o* que los objetos estaban concentrados *o* que estaban distribuidos. Podemos escoger probar cualquiera de dos situaciones contradictorias. Podemos elegir establecer cualquiera de dos historias contradictorias. Estamos ante el enigma cuántico, y volvemos a encontrar la conciencia. Por supuesto, ilustrar el fallo del argumento del robot *contra* la implicación de la conciencia no *establece* dicha implicación.

Nótese que la discusión anterior no involucra la teoría cuántica. Hemos querido ser neutrales, como lo era nuestra descripción del propio experimento de las cajas pareadas. Si consideramos el argumento del robot desde el punto de vista cuántico, un robot aislado es un sistema cuántico al que se le puede aplicar la conclusión de Von Neumann: el robot se entrelazaría con el objeto en las cajas pareadas, y la función de onda del objeto no podría colapsar en una sola caja hasta que un observador consciente leyera el listado del robot.

La única prueba objetiva de la conciencia

Por «prueba objetiva» entendemos una prueba en tercera persona esencialmente apreciable por cualquiera. En este sentido, la prueba objetiva es el requerimiento normal para establecer la fiabilidad de una teoría científica. Cada uno de nosotros sabe que es consciente; eso es prueba en primera persona. Los otros nos dicen que son conscientes; eso es prueba en segunda persona. Sin prueba en tercera persona, la prueba objetiva de que la conciencia misma puede «implicar directamente» algo físicamente observable, su misma existencia es cuestionable. Como hemos visto en el capítulo 15, hay quienes afirman que la «conciencia» no es más que un nombre para el comportamiento electroquímico de un vasto entramado de neuronas y sus moléculas asociadas en nuestro cerebro. Por «implicación directa» sólo queremos decir algún papel para la conciencia más allá del aspecto electroquímico confinado en nuestros cuerpos. Y recuérdese que sólo estamos hablando de *prueba*, no de demostración.

¿Qué podría valer como prueba objetiva de la implicación directa de la conciencia en lo físico? ¿Vale el experimento del par de cajas? Vamos a argumentar que sí vale. Pero la prueba ofrecida por el experimento cuántico es *circunstancial*. Esto es, nos valemos de un hecho (la interferencia) para establecer un segundo hecho (que el objeto estaba distribuido entre ambas cajas). La prueba circunstancial puede ser convincente más allá de toda duda razonable. (Por ejemplo, puede asegurar legalmente una culpabilidad.) Pero la lógica de la prueba circunstancial puede ser tortuosa. Por eso antes presentaremos una alegoría que, de ser válida, proporcionaría una prueba *directa* de la conciencia.

Nuestra alegoría habla de algo imposible, muy parecido a lo que vio nuestro visitante en Eug Ahne Poc. Es un relato imposible, algo que no puede hacerse. Pero su prueba *directa* es fácil de analizar, y su *analogía* con nuestro experimento cuántico hace que la prueba *circunstancial* de éste salte más a la vista. (La versión original de este argumento la incluimos en un artículo titulado «The only objective evidence for consciousness», publicado en *Journal of Mind and Behavior*.)

Nuestra imaginaria doctora Elbe afirma hacer demostraciones de psicoquinesia. (La psicoquinesia es un fenómeno físico extracorpóreo inducido únicamente por el esfuerzo mental consciente, esto es, sin ninguna interacción física normal.) La doctora Elbe despliega un montón de cajas pareadas. En su primer experimento, nos dice que, para determinar la

caja que contiene una canica, abramos las dos cajas de cada par una detrás de otra. Al abrir las cajas *secuencialmente*, más o menos la mitad de las veces encontramos una canica en la primera caja que abrimos y la otra mitad de las veces la encontramos en la segunda caja. Concluimos que, justo antes de nuestra observación, una caja de cada par contenía una canica.

Tras indicarnos que cada canica puede desmontarse en un hemisferio blanco y otro negro, la doctora Elbe saca un segundo conjunto de cajas pareadas. Ahora nos dice que, para determinar en cuál de las dos cajas de un par está el hemisferio blanco y en cuál el negro, abramos las dos cajas de cada par al mismo tiempo. Al abrir las cajas *simultáneamente*, siempre encontramos un hemisferio blanco en una caja y un hemisferio negro en la otra. Concluimos que, para este conjunto de cajas pareadas, justo antes de nuestra observación, se había distribuido una canica entre ambas cajas de cada par.

La doctora Elbe saca más conjuntos de cajas pareadas y ahora sugiere que *nosotros* escojamos cuál de los dos experimentos anteriores queremos hacer con cada conjunto. Esto es, elegimos entre abrir las cajas de manera secuencial o simultánea. Tras repetir el experimento *de nuestra elección* tantas veces como queramos, *siempre* observamos un resultado físico correlacionado con el experimento que hemos elegido. Siempre que decidimos abrir las cajas secuencialmente, encontramos una canica entera en una caja; siempre que decidimos abrir las cajas simultáneamente, encontramos media canica en cada caja del par.

Intrigados, inquirimos a la doctora Elbe: «Obviamente, algunos de sus conjuntos de cajas pareadas tenían una canica entera dentro de una caja de cada par, mientras que otros conjuntos de cajas pareadas tenían la canica repartida entre ambas cajas. Ahora bien, ¿cómo es que siempre hemos obtenido un resultado correspondiente al método de apertura elegido? ¿Y si hubiéramos elegido la *otra* alternativa con uno de los conjuntos de cajas pareadas? Cuando nos dio un conjunto de cajas pareadas, ¿cómo sabía cuál iba a ser nuestra elección de experimento?».

La doctora Elbe responde: «Yo *no* sabía qué experimento se elegiría en cada caso. Su elección consciente *creó* la situación particular de la canica en su par de cajas. La condición de la canica habría sido otra si su elección hubiera sido otra. Lo que hemos visto es la conciencia mostrándose como una entidad físicamente eficiente más allá de sus correlatos cerebrales».

Estamos seguros de que hay truco. Después de todo, la demostración de la doctora Elbe implicaba más que una expresión de intención consciente. Requería que usáramos las manos y abriéramos cajas. Puede que la apertura mecánica, secuencial o simultánea, de las cajas pareadas co-

locara físicamente de algún modo la canica entera en una caja o media canica en cada caja.

Así pues, con nuestros recursos ilimitados, nos traemos un equipo de científicos de amplio espectro, junto con magos (ilusionistas), para que investiguen la demostración de la doctora Elbe (sobre todo la técnica de apertura de las cajas). Sin embargo, tras un estudio que damos por exhaustivo, el equipo concluye que no hay truco, y que tampoco se ha podido encontrar una *explicación física* del fenómeno.

Por supuesto, la demostración de la doctora Elbe no es factible. Pero si lo fuera, tendríamos que aceptarla como una prueba objetiva, o al menos una *prueba*, de que la elección consciente en sí misma puede influir en una situación física, una prueba de que la conciencia existe como una entidad más allá de sus correlatos cerebrales.

El experimento cuántico arquetípico, el de las dos rendijas, o nuestro experimento de las cajas pareadas, se acercan a la demostración de la doctora Elbe. Nuestra elección consciente del tipo de experimento (inspección de cajas o interferencia) creaba *cualquiera* de dos situaciones físicas contradictorias en las cajas pareadas. Así pues, el experimento cuántico es una prueba objetiva de la conciencia, más allá de sus correlatos cerebrales. Por supuesto, prueba no equivale a demostración. Pero, aunque el experimento cuántico, al requerir la interferencia, no pasa de ser una prueba *circunstancial*, es la *única* prueba objetiva de la conciencia. Hemos aportado una huella en la escena del crimen sin señalar un culpable.

¿Puede afirmarse que el experimento cuántico es una manifestación de la conciencia proyectándose y haciendo algo físico? Si queremos ponernos serios como físicos, ni siquiera podemos creer a medias algo así. Pero Eugene Wigner, uno de los fundadores de la física cuántica y premio Nobel, se atrevió a especular:

El respaldo de la existencia de una influencia de la conciencia en el mundo físico se basa en la observación de que no sabemos de ningún fenómeno en el que un sujeto recibe la influencia de otro sin ejercer una consiguiente influencia. Esto le parece convincente a quien escribe. Es verdad que, en las condiciones usuales de la física o la biología experimentales, la influencia de cualquier conciencia es ciertamente pequeña. «No necesitamos suponer que tal efecto existe.» Es bueno recordar, sin embargo, que lo mismo puede decirse de la relación de la luz con los objetos mecánicos [...]. Es improbable que el [pequeño] efecto se hubiera detectado si consideraciones teóricas no hubieran sugerido su existencia...

Ésta es la clase de especulación que enfurece a algunos físicos. Pero al menos conocemos los hechos experimentales indiscutibles en los que se basa la desbocada especulación de Wigner.

La posición es especial

¿Por qué no podemos *ver* un objeto simultáneamente en dos cajas? La teoría cuántica no nos da la respuesta. En rigor, la presencia de un objeto en la caja A *también* puede considerarse un «estado de superposición». Es una superposición (o suma) del estado {en caja A + en caja B} más el estado {en caja A – en caja B}. Nótese que la suma es {en caja A}. Similarmente, el estado de gato vivo es una superposición del estado {vivo + muerto} más el estado {vivo – muerto}. (El factor 2 ausente se tiene en cuenta en la matemática auténtica de la teoría cuántica.)

Todos estos estados son equivalentes en lo que concierne a la teoría cuántica. ¿Por qué, entonces, siempre vemos las cosas en ciertos estados, característicos de una posición particular? Nunca vemos los extraños estados correspondientes a cosas que están simultáneamente en varias posiciones. (La extrañeza del estado simultáneamente vivo y muerto del gato de Schrödinger radica en que, para que ambos estados se distingan, las posiciones de ciertos átomos deben ser diferentes en un gato vivo y en un gato muerto.)

Para nuestro objeto en un par de cajas, inferíamos que había estado simultáneamente en ambas cajas a partir de un experimento de interferencia. Pero nuestras *experiencias* reales eran las posiciones de los objetos en máximos particulares de un patrón de interferencia.

Posiblemente, la razón por la que sólo observamos estados caracterizados por posiciones únicas es que somos seres que *sólo* podemos experimentar la posición (y el tiempo). La velocidad, por ejemplo, es posición en dos momentos diferentes. Cuando vemos cosas con nuestros ojos, es por la incidencia de luz en posiciones particulares de nuestra retina. Sentimos por el tacto de la posición de algo en nuestra piel; oímos por la posición cambiante de nuestros tímpanos; olemos por los efectos de las posiciones de ciertos receptores en nuestra nariz. Por consiguiente, construimos nuestros instrumentos de medida para que expresen sus resultados en términos de posición (típicamente, la de una aguja en una escala o un patrón de luz en una pantalla). Nada en la teoría cuántica obliga a que las cosas sean de esta manera. Parece que los seres humanos estamos contruidos así.

¿Es concebible que otros seres puedan experimentar la realidad de otra manera? ¿Podría ser que experimentaran directamente los estados de superposición cuya existencia nosotros sólo podemos inferir? Para ellos, un átomo presente a la vez en dos cajas, o el gato de Schrödinger simultáneamente vivo y muerto, serían fenómenos «naturales». Después de todo, éste es el modo de ser cuántico, presumiblemente el modo de ser de la naturaleza. Para ellos no habría problema de la medida, ni enigma cuántico.

Dos enigmas

En realidad hay dos problemas de la medida, dos enigmas. Nos hemos centrado en la realidad creada por el observador, o la observación como causante, digamos, de la presencia de un átomo en una sola caja, o de un gato de Schrödinger vivo o muerto. (Einstein dijo, en referencia a este enigma, que él creía que la Luna estaba realmente allí incluso cuando él no miraba.) Un enigma menos trascendental es la aleatoriedad de la Naturaleza. ¿Cómo es que el átomo aparece *aleatoriamente* en la caja A en vez de la B (o al revés)? ¿Cómo es que el gato, *aleatoriamente*, resulta estar vivo en vez de muerto (o al revés)? (Einstein dijo, en referencia a este enigma, que Dios no juega a los dados.)

Con la interpretación de los mundos múltiples de Everett, hacemos todos los experimentos cuánticos posibles y vemos todos los resultados posibles. De acuerdo con esta interpretación, en un mundo particular nos preocupamos por dos enigmas sólo porque *no nos damos cuenta* de que en cada observación nos dividimos y existimos simultáneamente en una multiplicidad de mundos diferentes. Desde un punto de vista everettiano, el «nosotros» *completo* no debería ver ninguno de los dos enigmas.

Contrastemos los dos enigmas con algo de fantasía (inspirándonos en una alegoría de Roland Omnès). En el plano superior donde residen, los everettianos experimentan sin problemas la multitud de realidades simultáneas dada por la teoría cuántica. Ningún enigma les preocupa. Un joven everettiano, enviado para explorar el planeta Tierra, quedó impactado al ver que sus realidades múltiples simultáneas colapsaban en una sola. Su curiosidad le empujó a repetir los descensos. Cada vez veía colapsar aleatoriamente las muchas realidades a cuya percepción simultánea estaba acostumbrado en una sola. Perplejo por este colapso, inexplicable en el marco de la teoría cuántica que entiende tan bien, reportó un enigma: allá abajo en la Tierra, la Naturaleza selecciona aleatoriamente una realidad única.

Nuestro everettiano tenía un modo favorito de ver las realidades múltiples que podía experimentar (algo muy parecido a nuestra elección del experimento que queríamos hacer con las cajas pareadas). Pero entendía que su elección personal, o lo que los físicos llaman una «base», era mecanocuánticamente equivalente a cualquier otra. Pero en uno de sus descensos a la Tierra nuestro everettiano decidió hacer algo bastante inusual: adoptó una base distinta para sus múltiples realidades. Entonces experimentó una segunda perplejidad: el colapso no era sólo en una realidad concreta, algo a lo que por entonces ya se había acostumbrado, sino en una que era lógicamente inconsistente con cualquiera de las presentadas por su anterior modo de ver. Tenía que dar cuenta de un segundo, y aún más desconcertante, enigma: allá abajo en la Tierra, su elección consciente del modo de ver el mundo creaba realidades mutuamente *inconsistentes*.

Analogías

Tanto si la conciencia puede tener algún impacto directo sobre el mundo físico más allá del cerebro como si no, entre la mecánica cuántica y la conciencia hay analogías fascinantes. Por supuesto, las analogías no prueban nada, pero pueden estimular y guiar la reflexión. Recordemos que las analogías con la mecánica de Newton inspiraron la Ilustración. He aquí una muy general de Niels Bohr:

[E]l contraste aparente entre el flujo continuo del pensamiento asociativo y la preservación de la unidad de la personalidad exhibe una sugestiva analogía con la relación entre la descripción ondulatoria de los movimientos de las partículas materiales, gobernados por el principio de superposición, y su indestructible individualidad.

Ahí van unas cuantas más:

Dualidad: A menudo se argumenta que la existencia de la conciencia no puede deducirse de las propiedades del cerebro material. Parece haber dos procesos cualitativamente diferentes involucrados. Similarmente, en la teoría cuántica, un suceso real acaece no por la evolución de la función de onda, sino por el colapso de ésta ocasionado por la observación. Parece haber dos procesos cualitativamente diferentes involucrados.

Influencias «no físicas»: Si hay una «mente» aparte del cerebro físico, ¿cómo se comunica con el cerebro? Este misterio recuerda la cone-

xión entre dos objetos cuánticamente entrelazados (a lo que Einstein aludió como «acciones fantasmales» y Bohr como «influencias»).
Realidad creada por el observador: El «ser es ser percibido» de Berkeley es la visión ridículamente solipsista del efecto de la conciencia. Pero tiene reminiscencias de lo que ocurre con nuestro objeto en un par de cajas, o con el gato de Schrödinger.

Observación de pensamientos: Si uno medita sobre el contenido de un pensamiento (su posición), inevitablemente cambia su curso (su movimiento). Por otro lado, si uno medita sobre su curso, pierde la precisión de su contenido. Análogamente, el principio de incertidumbre dice que si uno observa la posición de un objeto, modifica su movimiento. Por otro lado, si uno observa su movimiento, pierde la precisión de su posición.

Procesamiento en paralelo: Las velocidades de acción de las neuronas son miles de millones de veces más lentas que las de los ordenadores. Aun así, cuando se trata de problemas complejos los cerebros humanos todavía pueden competir con los mejores ordenadores. Presumiblemente, el cerebro consigue su potencia trabajando en multitud de líneas simultáneamente. Es este procesamiento en paralelo a gran escala lo que los informáticos intentan conseguir con los ordenadores cuánticos, cuyos elementos están simultáneamente en multitud de estados superpuestos.

Las analogías entre la conciencia y la mecánica cuántica invitan a esperar que los avances en los fundamentos de un campo estimularán los avances en el otro. Incluso podrían sugerir conexiones comprobables entre ambos.

Dos teorías cuánticas de la conciencia

Las teorías abarcadoras de la mente y la materia que vayan más allá de la analogía deben ser grandiosas y audaces, e invariablemente controvertidas. La aproximación de Penrose-Hameroff se basa en la gravedad cuántica, que es la teoría requerida para describir los agujeros negros y el *Big Bang*, y uno de cuyos forjadores principales es el propio Penrose. La aproximación de Penrose-Hameroff a la conciencia también incorpora ideas de la lógica matemática y la biología neuronal.

El matemático Kurt Gödel demostró que todo sistema lógico contiene proposiciones cuya verdad no puede probarse. Pero esto no impide que podamos conocer la respuesta de manera intuitiva. Penrose deduce

de ello la controvertida tesis de que los procesos conscientes son no computables. Esto quiere decir que un ordenador no puede replicarlos. En consecuencia, Penrose niega la posibilidad de una inteligencia artificial fuerte. Si es así, la conciencia, como el enigma cuántico, va más allá del dominio de la ciencia tal como la entendemos hoy.

Penrose propone un proceso físico más allá de la presente teoría cuántica que provoca el colapso de las superposiciones macroscópicas en realidades. Este proceso hace que el objeto simultáneamente presente en las cajas A y B pase rápidamente a estar en la caja A o en la caja B; o que el gato de Schrödinger simultáneamente vivo y muerto pase rápidamente a estar vivo o muerto. En general, hace que «y» se convierta en «o». Este proceso colapsa, o «reduce», la función de onda objetivamente, esto es, para todo el mundo, incluso sin observador. Penrose llama a este proceso «reducción objetiva», apropiadamente abreviado como OR (acrónimo de «objective reduction», y que significa «o» en inglés).

Penrose supone que el proceso OR tiene lugar espontáneamente allí donde dos geometrías espacio-temporales —con sus respectivos efectos gravitacionales— difieren significativamente. Stuart Hameroff, un anestesiólogo que señala que él «apaga» y «enciende» la conciencia regularmente, ha sugerido cómo podría tener lugar este proceso en el cerebro. Dos estados de ciertas tubulinas (proteínas celulares) presentes en las neuronas podrían manifestar el OR de Penrose a una escala temporal adecuada para las funciones cerebrales. Penrose y Hameroff afirman que los estados de superposición y la coherencia de largo alcance podrían darse dentro del cerebro, aunque éste se encuentre en contacto físico con el entorno, y estos procesos OR espontáneos podrían regular las funciones cerebrales.

Estos procesos OR constituirían «ocasiones de experiencia». Si hubiera entrelazamiento con objetos externos al observador, el OR en el cerebro colapsaría la función de onda de los objetos observados y todo lo entrelazado con ellos.

Los tres pilares de la teoría de Penrose-Hameroff (la no computabilidad, la implicación de la gravedad cuántica y el papel de la tubulina) son controvertidos por separado. Y de la teoría entera se ha dicho que tiene el poder explicativo de unos «polvos mágicos en las sinapsis». No obstante, a diferencia de la mayoría de teorías de la conciencia, cuánticas o no, propone un mecanismo físico específico, algunos de cuyos aspectos fundamentales son comprobables con la tecnología actual. En 2007 ya se habían puesto en marcha tales comprobaciones.

Otra teoría es la de Henry Stapp, quien argumenta que la física clásica nunca podrá explicar cómo puede la conciencia ejercer algún efecto, mientras que la mecánica cuántica proporciona una explicación de manera natural. Hemos visto que la física clásica determinista sólo permitiría el libre albedrío a costa de excluir la mente del ámbito de la física. Stapp señala que la extensión de la física clásica al binomio cerebro/mente nos impondría unos pensamientos controlados «de abajo arriba» por el movimiento determinista de partículas y campos. No habría ningún mecanismo para una influencia consciente «de arriba abajo».

Stapp parte de la formulación vonneumanniana de la interpretación de Copenhague. Recordemos que Von Neumann demostró que, al contemplar un objeto microscópico en un estado de superposición, la cadena de medición entera (del átomo al contador Geiger, y de éste al ojo que lo mira, y de éste a las sinapsis en el cerebro del observador) debe considerarse parte de un gran estado de superposición. Se supone que sólo la conciencia, algo que está más allá de la ecuación de Schrödinger, más allá de la física que conocemos, puede colapsar una función de onda.

Stapp postula dos realidades, una física y una mental. La realidad física incluye el cerebro, quizás en un estado de superposición cuántico particular. La realidad mental incluye la conciencia y, en particular, las intenciones. Lo mental puede actuar de manera intencionada sobre el cerebro físico para escoger un estado de superposición particular que luego colapsa en una situación concreta. En esta teoría la conciencia no se «proyecta» al mundo exterior directamente, pero esta elección mental determina en parte el carácter del mundo físico externo al cuerpo (si un objeto está en una caja de su par o simultáneamente en ambas, por ejemplo). El aspecto aleatorio final de la opción (que el objeto esté en la caja A y no en la B, por ejemplo) es obra de la Naturaleza.

¿Cómo puede un cerebro grande y tibio permanecer en un estado cuántico particular el tiempo suficiente para que las intenciones de una persona influyan en él? Stapp responde a esto con el «efecto Zenón cuántico» (así llamado por una sentencia de estilo zenoniano: un cazo no hierve si no dejamos de mirarlo). Cuando un sistema cuántico cae de un estado a otro inferior, la caída comienza muy lentamente. Si se observa muy poco después de que la caída haya comenzado, es casi seguro que se encontrará en el estado original. Luego la caída vuelve a comenzar desde el principio. Si el sistema es observado de manera casi continuada, casi nunca se degrada. Stapp aplica esto a las intenciones mentales que «observan» el cerebro y lo mantienen en un estado cuántico dado por un tiempo suficiente.

Stapp cita diversos hallazgos psicológicos como prueba de su teoría. Por supuesto, es una teoría que suscita controversia.

La interpretación psicológica de la mecánica cuántica

Aunque la mecánica cuántica es atrozmente contraintuitiva, funciona a la perfección. Puesto que la Naturaleza no tiene por qué conformarse a nuestra intuición, puede que el problema de la medida, el enigma cuántico, sólo resida en nuestras cabezas. Pero, si es así, ¿por qué encontramos la mecánica cuántica tan difícil de aceptar? ¿Por qué los hechos observados generan tamaña disonancia cognitiva, enfrentando nuestra insistencia en el libre albedrío contra nuestra creencia en un mundo físicamente real?

Decir simplemente que hemos evolucionado en un mundo donde la física clásica es una buena aproximación no basta. Hemos evolucionado en un mundo donde parecía que el Sol se movía por el cielo y la Tierra estaba quieta, a pesar de lo cual hoy aceptamos sin reparos el otrora contraintuitivo cuadro copernicano. También hemos evolucionado en un mundo donde las cosas se movían muy lentamente en comparación con la velocidad de la luz. La relatividad de Einstein puede ser altamente contraintuitiva. Aunque a los estudiantes de física les cuesta de entrada aceptar que el tiempo pasa más despacio en una nave supersónica, no tardan en asumirlo. No encontramos «interpretaciones» de la relatividad. Cuanto más ahondamos en la relatividad, *menos* extraña parece. Cuanto más ahondamos en la mecánica cuántica, *más* extraña parece.

¿Qué hay en la organización de nuestros cerebros para que la mecánica cuántica nos resulte tan extraña? Ante esta pregunta, la mayoría de físicos asignaría el enigma cuántico a la psicología. Su resolución retrataría nuestra incomodidad con la realidad física creada por su observación como un mero bloqueo psicológico. Ésta sería la interpretación psicológica de la mecánica cuántica. Si nos la tomamos en serio, quizá sea un asunto que debería ser abordado por los psicólogos.

Fenómenos paranormales

Los fenómenos paranormales son *presuntos* sucesos inexplicables en el marco de la ciencia normal. He aquí tres ejemplos que tienen que ver con la mente: (1) la percepción extrasensorial, la adquisición de información por algún medio distinto de los sentidos normales, como la telepatía o la videncia; (2) la precognición, la capacidad de discernir lo que ocurrirá en el futuro; (3) la psicoquinesia, la causa de un efecto físico sólo por la acción mental (como, por ejemplo, el supuesto «doblamiento

de cucharas» de Uri Geller o la pretendida influencia mental en sistemas mecánicos o en la desintegración radiactiva).

Según las encuestas, bastante más de la mitad de los norteamericanos (e ingleses) cree más o menos en la realidad de tales fenómenos. Cuando se hace la pregunta con un giro positivo, «¿Quién cree que es probable que al menos exista *algo* de percepción extrasensorial?», más de la mitad de los estudiantes en una clase de física general levanta la mano. (Nosotros responderíamos «probablemente no».)

Esta aceptación tan amplia de los fenómenos paranormales es razón suficiente para incluir algún comentario sobre el tema en nuestro libro, aunque sólo sea porque a menudo se vinculan con los misterios de la mecánica cuántica. Una razón más importante es que cuando investigadores competentes afirman haber puesto de manifiesto tales fenómenos, no se les debería despachar con cajas destempladas. Esta actitud puede verse como arrogante y no parece que sea efectiva.

Pero las cosas difíciles de creer requieren una evidencia poderosa. Si nos dicen que fuera hay un perro, probablemente lo aceptaremos sin más. Si nos dicen que hay una jirafa, tendremos nuestras dudas, aunque muy bien podría ser cierto. Iremos a mirar nosotros mismos para tener una evidencia más sólida. Hasta ahora, los fenómenos paranormales no cuentan con una evidencia lo bastante robusta para convencer a los escépticos.

Pero si —*¡si!*— alguno de estos fenómenos se demostrara de manera fehaciente, sabríamos dónde comenzar a buscar una explicación: en las «acciones fantasmales» de Einstein. Yendo un poco más lejos, la existencia de fenómenos cuánticos expande el abanico de lo concebible y, con ello, incrementa la probabilidad *subjetiva* de fenómenos paranormales. (Empleamos el término «subjetivo» en el sentido de la probabilidad bayesiana.) La elevada improbabilidad de los fenómenos paranormales en el marco de la teoría física vigente significa que su confirmación, no importa lo débil que sea el efecto, obligaría a un cambio radical en nuestra visión del mundo.

En el capítulo siguiente consideraremos las implicaciones del enigma cuántico a la mayor escala de todas, el universo entero.

En el principio sólo había probabilidades. El universo sólo podía acceder a la existencia si alguien lo observaba. No importa que los observadores aparecieran varios miles de millones de años más tarde. El universo existe porque tenemos conciencia de él.

Martin Rees

Nos preguntamos cuán literalmente se expresó Martin Rees, catedrático de la Universidad de Cambridge y astrónomo real de Inglaterra, en el comentario arriba citado. Habiendo llegado hasta aquí, el lector al menos conoce lo que motivó esas palabras. Aunque se supone que la mecánica cuántica se aplica a todo, hay un gran trecho desde las cosas para las que se ha demostrado una realidad creada por el observador hasta el universo entero.

La teoría de la gravitación de Einstein, la «relatividad general», parece funcionar perfectamente para el universo a gran escala. Nos habla de agujeros negros y la necesitamos para tratar con el *Big Bang*. Entender los agujeros negros y el *Big Bang* también requiere entender las cosas a pequeña escala y, por lo tanto, requiere la mecánica cuántica. Este doble requerimiento plantea un problema, porque la relatividad general se resiste a conectarse con la mecánica cuántica. Los proponentes de las teorías de supercuerdas y otros se han devanado los sesos durante décadas para acoplar estas dos descripciones fundamentales de la Naturaleza en una teoría de la gravitación cuántica.

Cuando, hace algunos años, uno de nosotros le habló a un teórico de las supercuerdas de su interés en el enigma cuántico, su respuesta fue: «Bruce, no estamos preparados para eso». Su argumento era que el progreso en lo que él llamaba el problema de la medida cuántico probablemente requería avances aún por llegar en la teoría de la gravitación cuántica. Puede ser. Pero, si bien la cosmología actual vuelve a poner el enigma

cuántico sobre la mesa, presenta el mismo enigma a una escala cada vez más grandiosa. En este capítulo contemplaremos este gran cuadro para ver cómo afecta la creación de la realidad por la observación consciente a nuestra visión del universo entero.

Agujeros negros, energía oscura y el Big Bang

Agujeros negros

Cuando una estrella agota el combustible nuclear que la mantiene caliente y expandida, colapsa por su propia atracción gravitatoria. Si su masa excede cierto valor crítico, ninguna fuerza puede parar el colapso. La relatividad general predice que la estrella se contraerá en un punto infinitesimal masivo, una «singularidad». Los físicos odian las singularidades, pero la teoría cuántica reemplazaría la singularidad por una masa extremadamente compacta, aunque finita, de alguna manera aún no bien comprendida.

A cierta distancia (que podría ser de muchos kilómetros) de esta masa compacta, dentro del llamado «horizonte», la atracción gravitatoria es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar. Esto significa que la estrella colapsada no emite luz y, por consiguiente, es negra. Cualquier cosa que se adentre más allá del horizonte quedará atrapada y nunca podrá escapar: tenemos un agujero negro.

Stephen Hawking demostró que la mecánica cuántica interviene en la descripción del agujero negro no sólo al nivel de la singularidad, sino también en el horizonte. Los efectos cuánticos deberían hacer que el horizonte del agujero negro emita lo que ahora se conoce como «radiación de Hawking». Al emitir energía, cualquier agujero negro que no succione masa de sus alrededores acabará «evaporándose».

Aunque el tiempo que tardaría en evaporarse un gran agujero negro podría superar la edad del universo, esta evaporación plantea una paradoja: la teoría cuántica insiste en que la «información» siempre se preserva, pero si la radiación de Hawking no fuera más que ruido aleatorio, como se pensó inicialmente, la información contenida en un objeto que cayese en un agujero negro se perdería al evaporarse éste.

El concepto de información que estamos empleando aquí es ideal. Por ejemplo, si arrojamos nuestro diario al fuego, *en principio* alguien podría recuperar la información que contenía analizando el humo y las cenizas. Pero la aparente pérdida de información en la evaporación de un agujero negro llevó a Hawking a suponer que la información perdida podría canalizarse hacia un universo paralelo. (Esta idea nos recuerda la in-

interpretación de mundos múltiples, y da pábulo a los escritores de ciencia ficción.)

Hawking decidió después que la radiación de un agujero negro *no* es aleatoria, sino que porta la información que contenía el agujero (algo parecido al humo que se lleva información de nuestro diario en llamas). No hay necesidad de universos paralelos que recojan la información del agujero negro. Aun así, otros cosmólogos, basándose en otros argumentos cuánticos, sugieren que nuestro universo probablemente no es el único.

Energía oscura

La cosmología moderna se basa en la teoría de la relatividad general de Einstein. Es «general» en el sentido de que amplía su anterior teoría de la relatividad especial para incluir el movimiento acelerado y la gravedad, con la constatación de la equivalencia de ambos. Por ejemplo, cuando se rompe el cable del ascensor, la aceleración de la caída cancela nuestra experiencia de la gravedad.

Aunque matemáticamente compleja, la relatividad general es una teoría conceptualmente simple y bella. Pero en su primera versión de 1916 parecía tener un serio problema: decía que el universo no podía ser estable. La atracción gravitatoria mutua de las galaxias haría que el universo acabara colapsando. Para remediarlo, Einstein le puso a su teoría un parche que llamó «constante cosmológica», una fuerza repulsiva para contrarrestar la atracción gravitatoria intergaláctica.

En 1929, el astrónomo Edwin Hubble anunció que el universo no era estable, sino que, de hecho, se estaba expandiendo. Cuanto más distante era una galaxia, más deprisa se alejaba de nosotros. Si esto era así, entonces en algún momento del pasado toda la materia del universo estuvo compactada, lo que inspiró la idea de que el universo nació de una gran explosión, el *Big Bang*. Presumiblemente, ello explicaría por qué las galaxias no caían las unas hacia las otras: no hacía falta ninguna fuerza repulsiva en forma de constante cosmológica.

Una explosión no es una imagen del todo correcta. La relatividad general dice que es el espacio mismo el que se expande, no las galaxias las que se separan en un espacio fijo. Una buena analogía sería confeti pegado sobre un globo que se infla, lo que nos permitiría ver que los círculos de papel se separan tanto más deprisa cuanto más alejados están unos de otros.

Cuando Einstein se enteró de que, en efecto, el universo no era estable, desechó su constante cosmológica, de la que dijo que fue «la mayor metedura de pata de mi carrera». Si se hubiera creído la versión original y más elegante de su teoría, podría haber predicho un universo

en expansión (o contracción) más de una década antes de su descubrimiento.

La atracción gravitatoria mutua de las galaxias debería frenar la expansión, igual que la gravedad frena el ascenso de una piedra lanzada hacia arriba. La piedra alcanza cierta altura y luego vuelve a caer. Similarmente, podría esperarse que las galaxias se fueran frenando, alcanzaran cierta separación máxima y luego comenzaran a atraerse mutuamente hasta acabar en una gran contracción, o *Big Crunch*.

Si lanzamos una piedra hacia arriba con la velocidad suficiente, vencerá la atracción gravitatoria y se perderá en el espacio para siempre, aunque la gravedad siempre la frenará algo. Por lo mismo, si el *Big Bang* hubiera sido lo bastante violento, el universo se expandiría para siempre, aunque a velocidad decreciente. Si determinamos la desaceleración de la piedra lanzada hacia arriba, sabremos si volverá a caer o se perderá en el espacio. Similarmente, si determinamos la deceleración de la expansión del universo, sabremos si podemos o no esperar un *Big Crunch*.

En realidad, desde hace un par de décadas se sabe que las galaxias no constituyen toda la masa del universo, ni siquiera la mayor parte. Los movimientos de las estrellas dentro de las galaxias y otros indicios nos dicen que, además de la materia que constituye las estrellas, los planetas y nosotros mismos, ahí fuera hay otra clase de materia que ejerce atracción gravitatoria, pero no emite, ni absorbe, ni refleja luz, así que no podemos verla: es la «materia oscura». Nadie sabe qué es, pero se han construido detectores para buscar a los sospechosos más probables. Es la suma de la materia normal y la materia oscura lo que cabe esperar que retarde la expansión y determine el destino último del universo.

(En un documental de la serie *Nova*, un astrónomo dijo que no se le ocurría una pregunta más fundamental para la humanidad que «¿Cuál es el final del universo?». Puede que ésta sea una cuestión apremiante, pero nos recuerda la siguiente anécdota. En una conferencia, un astrónomo concluyó que, dentro de unos cinco mil millones de años, el Sol se expandirá convirtiéndose en una gigante roja que incinerará los planetas interiores, la Tierra incluida. «¡Oh, no!», gimió un hombre en la última fila. El astrónomo lo tranquilizó: «Pero, señor, aún tienen que pasar *cinco mil millones de años* hasta que eso ocurra». Aliviado, el hombre replicó: «¡Gracias a Dios! Creía que había dicho *cinco millones* de años».)

Durante la pasada década, los astrónomos se propusieron determinar el destino del universo midiendo la desaceleración de ciertas estrellas en explosión —supernovas— distantes. Estas estrellas explosivas tienen un brillo intrínseco característico, lo que permite estimar la distancia a la que se encuentran por su brillo aparente. Además, cuanto más lejos es-

tán, más tiempo hace que se emitió la luz que nos llega ahora. Juntándolo todo, los astrónomos han podido determinar la velocidad a la que se expandía el universo en diferentes momentos del pasado y, por ende, el retardo de la expansión.

Pues bien, ¡oh sorpresa!, resulta que la expansión del universo no sólo *no* se está retardando, sino que se está acelerando. Esto quiere decir que existe una fuerza repulsiva que no sólo cancela la atracción gravitatoria mutua de las galaxias, sino que es *mayor* que ésta. Y esa fuerza debe venir dada por alguna energía.

Puesto que la masa y la energía son equivalentes ($E = mc^2$), esta misteriosa energía repulsiva tiene una masa distribuida en el espacio. De hecho, la «energía oscura» constituye la *mayor parte* del universo. Se estima que el universo estaría compuesto por un 70% de energía oscura y un 25% de materia oscura. La materia de la que están hechas las estrellas, los planetas y nosotros mismos apenas representaría el 5% del universo.

Aunque nadie sabe en qué consiste la energía oscura, en el aspecto formal vuelve a introducir la constante cosmológica de Einstein, su «mayor metedura de pata», en las ecuaciones de la relatividad. Las especulaciones teóricas tienen una inquietante manera de enderezar las cosas.

¿Es concebible que la misteriosa energía oscura tenga algo que ver con la conexión entre el universo a gran escala y la conciencia que parece implicar el comentario de Rees citado en el epígrafe de este capítulo? Aquí vale la pena citar otro comentario del físico teórico Freeman Dyson, escrito incluso antes de que surgiera la idea de la energía oscura:

No sería sorprendente que el origen y el destino de la energía en el universo no pueden entenderse del todo si se aíslan de los fenómenos de la vida y la conciencia [...]. Es concebible [...] que la vida tenga un papel mayor de lo que hemos imaginado. La vida puede haber tenido éxito contra pronóstico en moldear el universo a sus propósitos. Y el diseño del universo inanimado quizá no esté tan desconectado de las potencialidades de la vida y la inteligencia como los científicos del siglo XX habían tendido a suponer.

El Big Bang

Los astrónomos determinan la velocidad con la que una galaxia se aleja de nosotros por el corrimiento al rojo de su luz. (Este descenso de la frecuencia se parece a un «efecto Doppler», el tono rebajado de la sirena de una ambulancia que acaba de pasar a nuestro lado. En realidad es la expansión del espacio la que estira la longitud de onda de la luz.) Los astrónomos correlacionan el corrimiento al rojo con la distancia me-

dante el estudio de los corrimientos al rojo de objetos cuyo brillo absoluto y, por ende, su distancia de nosotros se conocen. Y han comprobado que los objetos más distantes que alcanzamos a ver, galaxias que se alejan de nosotros casi a la velocidad de la luz, emitieron la luz que ahora nos llega hace unos catorce mil millones de años. Esas galaxias probablemente tenían alrededor de mil millones de años de edad cuando emitieron esa luz, lo que sugiere que el *Big Bang* (la expansión del espacio que se inició violentamente en una región pequeña) tuvo lugar hace unos quince mil millones de años.

Hacia los 400.000 años de edad, el universo ya se había enfriado lo suficiente para permitir que los electrones y protones que dispersaban la luz se combinaran en átomos neutros, y por primera vez el universo se hizo transparente a la radiación creada en la bola de fuego inicial. La radiación y la materia en el universo joven se independizaron una de otra. En este punto, la radiación, en un inicio a muy alta frecuencia, estaba mayormente en la región visible del espectro. Pero desde entonces el espacio se ha expandido varios miles de veces, así que la longitud de onda de esa luz primordial se ha estirado hasta convertirse en el «fondo cósmico de microondas» que hoy nos baña desde todas direcciones. Esta radiación de microondas, accidentalmente descubierta en 1965 por físicos que estudiaban satélites de comunicaciones en los laboratorios Bell de la AT&T, es la prueba más poderosa a favor del *Big Bang*. Sus detalles finos confirman llamativamente algunos cálculos teóricos.

Las teorías «inflacionarias» especulan sobre lo ocurrido justo después del *Big Bang* para explicar la notable uniformidad del universo a gran escala. Según estas teorías, el espacio se expandió, o «infló», casi instantáneamente, a una velocidad mucho mayor que la de la luz. A partir de un volumen inicial muchísimo menor que el de un átomo, el universo entero presumiblemente se infló de golpe hasta alcanzar el tamaño de un pomelo grande.

La física que conocemos hoy parece capaz de dar cuenta de lo ocurrido a partir de entonces. Al cabo de un segundo de existencia del universo, los quarks se combinaron en protones y neutrones. Minutos después, los protones y neutrones se combinaron para formar los núcleos de los átomos más ligeros: hidrógeno, deuterio (hidrógeno pesado, un protón y un neutrón), helio y algo de litio. La abundancia relativa de hidrógeno y helio en las estrellas y nubes de gas más viejas concuerda con lo que se esperaría de este proceso de creación.

Pero durante ese segundo antes de que quarks y electrones se materializaran, el *Big Bang* tuvo que ajustarse con precisión para producir un universo en el que pudiéramos evolucionar nosotros. ¡Un ajuste asom-

brosamente preciso! Las teorías varían. De acuerdo con una de ellas, si las condiciones iniciales del universo se fijaran aleatoriamente, sólo habría una posibilidad en 10^{120} (un uno seguido de 120 ceros) de que el universo permitiera la evolución de la vida. El cosmólogo Roger Penrose va aún más lejos y propone una posibilidad en 10^{123} . Según esta estimación, la probabilidad de que se cree un universo apto para la vida como el nuestro es mucho menor que la probabilidad de dar con un átomo *particular* entre todos los átomos del universo.

¿Podemos aceptar tales cifras como una pura coincidencia? Uno diría que es más probable que algún factor en una física aún por conocer determine que el universo *tenía* que nacer como lo hizo. Esa nueva física probablemente incluiría una teoría cuántica de la gravitación. Muy bien podría ser la anhelada «teoría de todo» —TDT— unificadora de las cuatro fuerzas fundamentales en un solo cuerpo teórico. Todos los fenómenos serían entonces explicables (en principio).

De hecho, sabemos cómo será una TDT. Será un sistema de ecuaciones. Después de todo, eso es lo que buscan los que la buscan. ¿Puede dejarnos satisfechos un sistema de ecuaciones sin más? ¿Puede resolver el enigma cuántico un sistema de ecuaciones que no involucre de algún modo al observador consciente? Recordemos que el encuentro de la física con la conciencia surge directamente del experimento cuántico teóricamente *neutral*. Antecede conceptualmente a la *teoría* cuántica. Ninguna interpretación de la teoría cuántica, ni siquiera su deducción a partir de una presentación matemática más general, puede resolver lo que experimentamos en el enigma cuántico sin involucrar también nuestro proceso de decisión consciente.

Con una perspectiva similar en cuanto a si una TDT explicaría todo lo que vemos, Stephen Hawking plantea una pregunta relevante:

Aunque sólo hubiera una teoría unificada posible, no sería más que un conjunto de leyes y ecuaciones. ¿Qué es lo que infunde fuego en las ecuaciones y crea un universo describible por ellas? El enfoque científico usual de construcción de un modelo matemático no puede responder la cuestión de por qué debería haber un universo describible por el modelo. ¿Por qué el universo se toma la molestia de existir?

Demos un paso atrás para echar una mirada a una hueste de «coincidencias», aparte de las relacionadas con el *Big Bang*, que conducen a mundos aptos para la vida. Se ha sugerido que una eventual TDT predecirá todo lo que vemos (aunque no lo «explique»). Así pues, deberíamos buscarla y darnos por satisfechos con ella cuando la encontremos.

Pero los críticos de esta actitud hablan de un principio antrópico. Comenzaremos con la versión más fácil de aceptar.

El principio antrópico

En el *Big Bang* sólo se crearon los núcleos atómicos más ligeros. Los elementos más pesados —carbono, oxígeno, hierro y todos los demás— se crearon en el interior de las estrellas, las cuales se formaron mucho después. Estos elementos se liberan al espacio cuando una estrella masiva agota su combustible nuclear, colapsa violentamente y explota convirtiéndose en una supernova. Las estrellas de las generaciones posteriores y sus planetas, incluido nuestro sistema solar, incorporan estos escombros estelares. Estamos hechos de los residuos de estrellas explosionadas: somos polvo de estrellas.

Además del ajuste extremadamente preciso del *Big Bang* que acabamos de comentar, la suerte parece haber tenido algo más que ver en nuestra creación estelar. Algunos cálculos iniciales habían mostrado que la producción de elementos pesados en las estrellas no podría haber llegado ni siquiera a los núcleos de carbono (seis protones y seis neutrones). El cosmólogo Fred Hoyle razonó que, si el carbono estaba ahí, *tenía* que haber una manera de producirlo. Hoyle advirtió que determinado estado cuántico, entonces inesperado, del núcleo de carbono a cierta energía muy precisa podía permitir que la producción estelar de elementos continuara para dar carbono, nitrógeno, oxígeno y demás. Hoyle sugirió que se buscara el estado nuclear inesperado. Y se encontró.

Hay otras coincidencias: si las intensidades de las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias fueran *apenas* diferentes de las que son, o si la intensidad de la fuerza nuclear débil fuera *apenas* mayor o menor, el universo no sería apto para la vida. Ninguna física conocida obliga a que estas cosas sean precisamente así.

Se han señalado muchas otras coincidencias que no vamos a mencionar aquí. El que las cosas encajen tan bien, pero tan improbablemente, ¿es algo que requiere explicación? No necesariamente. Si las cosas no fueran como son, no estaríamos aquí para hacernos la pregunta. ¿Es suficiente esta respuesta? Este estilo de razonamiento retrospectivo, basado en el hecho de nuestra existencia y la de nuestro mundo, se conoce como «principio antrópico».

El principio antrópico puede implicar que nuestro universo acoge la vida sólo por puro azar. Por otro lado, hay quienes conjeturan el nacimiento de gran número de universos, incluso infinitos, cada uno con su

propio conjunto de condiciones iniciales aleatorias, incluso con sus propias leyes físicas. Algunas teorías postulan un gran «multiverso» del que nacen constantemente nuevos universos. La gran mayoría de estos universos tendría una física no apta para la vida. De ser así, ¿requeriría explicación nuestra improbable existencia en un universo inusualmente hospitalario?

A modo de analogía, consideremos cuán improbable es cada uno de nosotros, en lo que respecta a las posibilidades de que nazca alguien con su secuencia única de ADN. (Millones de posibles hermanos nuestros *no* fueron concebidos. Y ahora remontémonos unas cuantas generaciones atrás.) Con estas cifras en mente, cada uno de nosotros es un suceso esencialmente imposible. ¿Requiere explicación nuestra existencia?

Recurriendo a analogías como ésta, algunos demandan el veto científico a «la palabra que empieza por A». El principio antrópico, dicen, no sólo no explica nada, sino que tiene una influencia negativa, por lo que debería rechazarse como «jerigonza innecesaria en el repertorio conceptual de la ciencia». Entendemos que el razonamiento antrópico puede empantanar el camino hacia investigaciones más profundas; pero a veces puede ser útil. Considérese la predicción de Hoyle del nivel energético para el carbono.

Los objetores a la versión del principio antrópico que hemos expuesto, y que a partir de ahora podemos llamar «principio antrópico débil», seguramente sentirán aún más aversión hacia el «principio antrópico fuerte». De acuerdo con esta idea, el universo está hecho a nuestra medida. «Hecho a medida» implica un sastre, presumiblemente Dios. Ésta es una posibilidad digna de contemplarse. Pero no debería ser un argumento a favor del diseño inteligente, como se ha sugerido en ocasiones. Quienquiera que «infundiera fuego en las ecuaciones» presumiblemente sería lo bastante omnipotente para hacer lo idóneo desde el principio, sin necesidad de chapucear con cada paso evolutivo.

Introducimos una versión diferente del principio antrópico fuerte al citar a Rees en el epígrafe de este capítulo: *nosotros* hemos creado el universo. La teoría cuántica establece que la observación crea las propiedades de los objetos microscópicos. Y los físicos en general aceptan que la teoría cuántica tiene una aplicación universal. Si esto es así, la realidad a mayor escala también es creada por nuestra observación. Llegando hasta las últimas consecuencias, *este* principio antrópico fuerte afirma que el universo es apto para nosotros porque no podíamos crear un universo en el que no pudiéramos existir. Mientras que el principio antrópico débil implica un razonamiento retrospectivo, nuestro principio antrópico fuerte implica una suerte de *acción* retrospectiva.

En los años setenta, el cosmólogo cuántico John Wheeler dibujó un ojo contemplando la prueba del *Big Bang* y preguntándose: «Mirar atrás “ahora”, ¿da realidad a lo que ocurrió “entonces”?». Su estimulante esquema no ha perdido impacto. En una conferencia reciente de homenaje a Wheeler en su noventa cumpleaños, un distinguido ponente comenzó su conferencia con el dibujo de Wheeler.

Las implicaciones antrópicas del esquema de Wheeler deben de haber resultado demasiado caras incluso para su autor. Tras plantear la pregunta anterior, enseguida añadió el siguiente comentario: «El ojo también podría haber sido un trozo de mica. No tiene por qué formar parte de un ser inteligente». Por supuesto, ese trozo de mica que supuestamente confiere realidad al *Big Bang* se creó *después* de la gran explosión. (Da la impresión de que, para un físico, la creación del *Big Bang* por un trozo de mica es menos problemática que su creación por la observación consciente.)

En realidad, este principio antrópico fuerte está más allá de nuestra comprensión. Aunque la mecánica cuántica parece negar la existencia de una realidad física independiente de su observación consciente, si nuestra observación lo crea *todo*, nosotros incluidos, estamos tratando con un concepto que es lógicamente autorreferencial (y mentalmente desconcertante).

Admitiendo nuestro desconcierto, podríamos atrevernos a preguntar: aunque sólo podíamos haber creado un universo en el que podíamos existir, ¿el que hemos creado es el *único* que podíamos haber creado? Con una observación diferente, o un postulado diferente, ¿sería diferente el universo? Dando rienda suelta a la especulación, se ha sugerido que postular una teoría que no entre en conflicto con ninguna observación previa *crearía* una nueva realidad.

Por ejemplo, Hendrick Casimir, tras el descubrimiento del positrón después de su aparentemente improbable predicción, hizo esta reflexión: «A veces casi parece que las teorías no son una descripción de una realidad casi inaccesible, sino que lo que llamamos realidad es un resultado de la teoría». Puede que la reflexión de Casimir también estuviera motivada por su propia predicción, luego confirmada, de que la energía del vacío mecánico cuántico en el espacio haría que dos placas metálicas macroscópicas se atrajeran mutuamente.

Si hay algo de cierto en la hipótesis de Casimir, ¿podría ser que la sugerencia original de Einstein de una constante cosmológica haya *causado* la aceleración del universo? (La falsedad de esta suposición no puede *demostrarse*, por lo que no es una suposición *científica*.) Aunque tomar al pie de la letra una idea como ésta seguramente es ridículo, nos

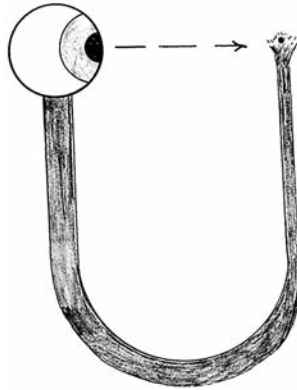


Figura 17.1. Mirar atrás «ahora», ¿da realidad a lo que ocurrió «entonces»?

permite apreciar cuán desbocadamente el enigma cuántico le permite a uno especular.

John Bell nos dijo que la nueva manera de ver las cosas probablemente nos asombrará. Es difícil imaginar algo realmente asombroso que inicialmente no hayamos rechazado como absurdo. La especulación audaz está permitida, pero también la modestia y la cautela. Una especulación no es más que una conjetura hasta que conduce a predicciones comprobables y confirmadas.

Reflexiones finales

Hemos presentado el enigma cuántico que emana de los hechos puros y duros evidenciados por experimentos cuánticos indiscutibles. No hemos pretendido resolverlo. Las cuestiones que plantea el enigma son más profundas que cualquier respuesta que nosotros pudiéramos proponer en serio.

La teoría cuántica funciona perfectamente; ninguna de sus predicciones se ha demostrado nunca errónea. Es la teoría que está en la base de toda la física y, por ende, de toda la ciencia. Un tercio de nuestra economía depende de productos derivados de ella. A todos los efectos *prácticos*, podemos sentirnos plenamente satisfechos con ella. Pero si la examinamos seriamente *más allá* de los propósitos prácticos, tiene implicaciones turbadoras.

La teoría cuántica nos dice que el encuentro de la física con la conciencia, tal como queda *demostrado* en el dominio de lo muy pequeño, se aplica, en principio, a todo. Y ese «todo» puede abarcar el universo

entero. Copérnico despojó a la humanidad de su trono en el centro cósmico. ¿Sugiere la teoría cuántica que, en algún misterioso sentido, *somos* un centro cósmico?

El encuentro de la física con la conciencia ha importunado a los físicos desde los inicios de la teoría hace ocho décadas. Muchos físicos, sin duda la mayoría, desestiman la creación de la realidad por la observación como algo que tiene poca significación fuera del dominio limitado de la física de las entidades microscópicas. Otros argumentan que la Naturaleza nos está diciendo algo que deberíamos escuchar. Nuestro propio sentir es afín al de Schrödinger:

El imperativo de encontrar una salida de este atolladero no debería verse amortiguado por el miedo de suscitar las burlas de los sabios racionalistas.

Cuando los expertos discrepan, uno tiene permiso para elegir su experto. Puesto que el enigma cuántico surge desde el experimento cuántico más simple, su esencia puede comprenderse del todo con una formación técnica limitada. Así pues, los no expertos pueden sacar sus *propias* conclusiones. Esperamos que las del lector, como las nuestras, sean provisionales.

Hay más cosas en el cielo y en la tierra, Horacio, de lo que puede soñar tu filosofía. (Shakespeare, *Hamlet*.)

Apéndices

Lecturas recomendadas

Blackmore, S., *Consciousness, An Introduction*, Oxford University Press, Nueva York, 2004.

Un repaso general de la literatura moderna sobre el tema de la conciencia, desde los correlatos cerebrales de la conciencia hasta la psicología experimental y teórica, e incluso los fenómenos paranormales. Se incluyen algunas menciones de la mecánica cuántica.

Cline, B. L., *Men Who Made a New Physics*, University of Chicago Press, Chicago, 1987.

Esta ágil y bien escrita historia de los inicios de la mecánica cuántica pone el énfasis en el aspecto biográfico e incluye numerosas anécdotas divertidas. Puesto que se escribió en los años sesenta, omite cualquier discusión de la conexión cuántica con la conciencia. (Uno de los «hombres» es Marie Curie.)

Davies, P.C.W. y J.R. Brown, *The Ghost in the Atom*, Cambridge University Press, Cambridge, (1986) 1993 [trad. esp.: *El espíritu en el átomo. Una discusión sobre la materia de la física cuántica*, Alianza Editorial, Madrid, 1986].

Las primeras cuarenta páginas ofrecen una descripción compacta y entendible del «Extraño mundo del cuanto». Luego vienen las transcripciones de una serie de entrevistas a eminencias de la física cuántica, emitidas en su día por BBC Radio 3. Sus comentarios extemporáneos no siempre se entienden a la primera, pero dan una idea clara del misterio que les confunde.

Elitzur, A., S. Dolev y N. Kolenda (eds.), *Quo Vadis Quantum Mechanics?*, Springer, Berlín, 2005.

Una colección de artículos y transcripciones de discusiones informales a cargo de investigadores eminentes, con un énfasis en los aspectos paradójicos de la mecánica cuántica. Algunos artículos son altamente técnicos, pero unos cuantos incluyen aspectos bastante accesibles que indican que los físicos parecen haber llegado a los límites de su disciplina.

Griffiths, D.J., *Introduction to Quantum Mechanics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (N. J.), 1995.

Un libro de texto para un curso avanzado de física cuántica. Aun así, las primeras páginas presentan interpretaciones opcionales sin matemáticas. La paradoja EPR, el teorema de Bell y el gato de Schrödinger se tratan en un «Epílogo». (La portada presenta la imagen de un gato vivo, y la contraportada presenta el mismo gato muerto.)

Hawking, S. y L. Mlodinow, *A Briefer History of Time*, Random House, Nueva York, 2005 [trad. esp.: *Brevísima historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 2006].

Una obra breve y fácil de leer, pero de referencia. Presentación de la cosmología, en buena parte desde el punto de vista mecanocuántico. Hay menciones sustanciales a Dios y la metafísica.

Holbrow, C.H., J.N. Lloyd y J.C. Amato, *Modern Introductory Physics*, Springer-Verlag, Nueva York, 1999.

Un excelente texto introductorio de física con una perspectiva auténticamente moderna, que incluye los temas de la relatividad y la mecánica cuántica.

Miller, K. R., *Finding Darwin's God*, HarperCollins, Nueva York, 1999.

Una convincente refutación de la tesis del diseño inteligente que también aduce que la arrogante pretensión de algunos científicos de que la ciencia ha rebatido la existencia de Dios ha promovido la antipatía hacia la evolución, darwiniana y cosmológica. La mecánica cuántica tiene un papel destacado en la argumentación de Miller.

Park, R. L., *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud*, Oxford University Press, Nueva York, 2000 [trad. esp.: *Ciencia o vudú*, Grijalbo, Barcelona, 2001].

Una breve y aguda exposición de un amplio abanico de vendedores de seudociencia que explotan el respeto de la gente por la ciencia afirmando que ésta da credibilidad a su disparate particular.

Schlosshauer, M., «Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics», *Reviews of Modern Physics*, vol. 76, octubre de 2004.

Un extenso y autorizado tratamiento de la tesis de que la mecánica cuántica da cuenta de la «definición observacional subjetiva en concordancia con nuestra experiencia». La experiencia subjetiva es lo que muchos llamarían «conciencia».

Schrödinger, E., *What is Life? & Mind and Matter*, Cambridge University Press, Londres, 1967 [trad. esp.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets Editores, col. Metatemas 1, 7.^a ed., Barcelona, 2008; *Mente y Materia*, Tusquets Editores, col. Metatemas 2, 6.^a ed., Barcelona, 2007].

Una clásica pero muy influyente colección de ensayos a cargo de uno de los fundadores de la teoría cuántica, entre ellos, el titulado «La base física de la conciencia».

Índice onomástico

- Alfonso X de Castilla, 39
Alighieri, Dante, 38
Allen, Woody, 50
Aristóteles, 38, 41, 110
Aspect, Alain, 186
- Barrow, Issac, 45
Bell, John, 22, 25, 109, 169-175, 179-183, 185, 186, 192, 197, 199, 204, 211, 224, 244, 249
Berkeley, George, 211, 212, 233
Bohm, David, 23, 171, 199, 200, 204
Bohr, Ange, 193
Bohr, Harald, 79
Bohr, Margrethe, 81
Bohr, Niels, 27, 36, 79, 81, 82, 84, 85, 87, 88, 90, 92, 100, 121, 123-125, 129, 131, 134, 136, 137, 153-156, 165-169, 171, 173, 175, 183, 185, 186, 189, 193, 194, 202, 208, 232, 233
Born, Max, 95
Bose, Satyendra Nath, 150
Bruno, Giordano, 40
Buchwald, Jed, 123
- Carroll, Lewis, 64
Casimir, Hendrick, 248
Chalmers, David, 207, 213, 214, 216-218, 221
Châtelet (Madame de), 47
Clauser, John, 181-183, 185, 186
- Compton, Arthur, 83, 91
Comte, Auguste, 53
Copérnico, Nicolás, 20, 27, 39, 40, 47, 250
Coulomb, Charles Augustin, 59
Cramer, John, 198
Crick, Francis, 215, 216
- Darwin, Charles, 27, 47
Davisson, Clinton, 85
Davy, Humphrey, 60
De Broglie, Louis, 82-85, 87, 88
Dennett, Daniel, 217, 218
Dylan, Bob, 189
Dyson, Freeman, 243
- Einstein, Albert, 20-25, 27, 55, 65, 66, 74-79, 82, 83, 88, 89, 100, 127, 150, 153-158, 160, 164-168, 171, 173, 175, 189, 200, 209, 231, 233, 236, 237, 241, 243, 248
Everett, Hugh, 196, 198, 231
- Faraday, Michael, 60, 61
Feynman, Richard, 28, 101
Franklin, Benjamin, 58, 59
Freud, Sigmund, 53, 207
- Galilei, Galileo, 20, 37, 40-44, 46, 121
Geller, Uri, 237

Gell-Mann, Murray, 137, 192, 196
 Ghirardi, G.C., 203
 Gödel, Kurt, 233
 Gurjeff, G.I., 29

Haldane, J.B.S., 18
 Halley, Edmund, 46, 47
 Hameroff, Stuart, 233, 234
 Hartle, James, 196
 Hawking, Stephen, 141, 147, 240, 241, 245
 Heisenberg, Werner, 90, 91, 124, 125, 128, 130, 131, 141, 154
 Herbert, Nick, 173
 Hiley, Basil, 200
 Hitler, Adolf, 87, 88
 Hobson, J.A., 211
 Hoffman, Donald, 218
 Hoyle, Fred, 246, 247
 Hubble, Edwin, 241
 Humphrey, Nicholas, 218

Jauch, J.M., 28, 109
 Jeans, James, 67
 Johnson, Samuel, 212
 Jordan, Pacual, 97, 127

Kasparov, Garry, 219
 Kelvin (Lord), 55, 70
 Kepler, Johannes, 40, 44
 Koch, Christof, 216

Langevin, Paul, 84, 85
 Libet, Benjamin, 210
 Loesser, Franck, 123

Marx, Karl, 53
 Maxwell, James Clerk, 61, 88
 Mermin, David, 200, 201

Michelson, Albert, 65
 Millikan, Robert, 77
 Morley, Edward, 65

Neumann, John von, 124, 125, 221-223, 226, 235
 Newton, Isaac, 20, 37, 42-46, 48, 49, 51, 55, 56, 67, 88, 91, 92, 124, 135, 232
 Omnès, Roland, 231

Penrose, Roger, 203, 233, 234, 245
 Planck, Max, 21, 48, 69-77, 81, 87, 89
 Platón, 129, 164
 Podolsky, Boris, 156, 164, 165, 166, 168
 Pope, Alexander, 37, 47
 Preskill, John, 103
 Ptolomeo de Alejandría, 39

Rees, Martin, 239, 243, 247
 Rimini, A., 203
 Roos, Mary, 170
 Rosen, Nathan, 156, 165, 166, 168
 Rutherford, Ernst, 80, 81

Schrödinger, Erwin, 21, 27, 87-95, 100, 124, 129, 131, 141-147, 149-151, 153, 196-199, 203, 205, 209, 222, 230, 231, 233-235, 250
 Shakespeare, William, 250
 Shaw, Rob, 24
 Singer, Isaac Bashevis, 48
 Skinner, B.F., 53, 213
 Smith, Adam, 53
 Stapp, Henry, 180, 203, 235

Thompson, Francis, 169
Thomson, J.J., 79
Tomás de Aquino, 38
Townes, Charles, 181
Turing, Alan, 219, 220

Ulfbeck, Ole, 193, 194

Voltaire, 47

Weber, T., 203

Weinberg, Steven, 109
Wheeler, John, 128, 151, 190, 204,
248
Wigner, Eugene, 19, 146, 147, 221, 229,
230
Wittgenstein, Ludwig, 208

Young, Thomas, 56, 57, 58

Zeilinger, Arthur, 150
Zenón de Elea, 235
Zureck, W.H., 195



Colección Metatemas

116. Cómo vivimos, por qué morimos
La vida secreta de las células
Lewis Wolpert
117. La edad de la empatía
Lecciones de la naturaleza
para una sociedad más justa y solidaria
Frans de Waal
118. La entropía desvelada
El mito de la segunda ley de la termodinámica
y el sentido común
Arieh Ben-Naim
119. Biomímesis
Innovaciones inspiradas por la naturaleza
Janine M. Benyus
120. Vidas sintéticas
Una aproximación revolucionaria
a la ciencia, la historia y la mente
Ricard Solé
121. Más árboles que ramas
1.116 aforismos para navegar por la realidad
Jorge Wagensberg
122. Últimas noticias de la prehistoria
Del ADN de los dinosaurios
a las pinturas de Lascaux
Yves Coppens
123. Por ti no pasan los años
La sorprendente naturaleza del envejecimiento
Lewis Wolpert

124. Demostrando a Darwin
La biología en clave matemática
Gregory Chaitin
125. Un viaje a la Antártida
Un científico en el continente olvidado
Sergio Rossi
126. El azar creador
La evolución de la vida compleja y de la inteligencia
Ambrosio García Leal
127. Naturaleza incompleta
Cómo la mente emergió de la materia
Terrence W. Deacon
128. El bonobo y los diez mandamientos
En busca de la ética entre los primates
Frans de Waal
129. El pensador intruso
El espíritu interdisciplinario en el mapa del conocimiento
Jorge Wagensberg
130. El fractalista
Memorias de un científico inconformista
Benoît Mandelbrot
131. Lynn Margulis
Vida y legado de una científica rebelde
Dorion Sagan (ed.)
132. El número Omega
Límites y enigmas de las matemáticas
Gregory Chaitin
133. El relojero ciego
Richard Dawkins
134. La vida es matemática
Las ecuaciones que explican los avatares de nuestra biografía
John Allen Paulos
135. La realidad no es lo que parece
La estructura elemental de las cosas
Carlo Rovelli

