

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

Dedicamos este libro a la memoria de John Bell,
seguramente el teórico cuántico más eminente
de la segunda mitad del siglo XX.
Sus escritos, lecciones y conversaciones personales
han sido una inspiración para nosotros

¿Acaso no es bueno saber qué se sigue de qué, aunque no sea algo necesario ATEP? [ATEP es la abreviatura de Bell de «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?

John Bell

AGRADECIMIENTOS

Durante la preparación de este libro nos hemos beneficiado sobremanera de las sugerencias, críticas y correcciones que nos ofrecieron todos los que leyeron los capítulos a medida que se escribían y revisaban. Queremos agradecer la ayuda de Leonard Anderson, Phyllis Arozena, Donald Coyne, Reay Dick, Carlos Figueroa, Freda Hedges, Nick Herbert, Alex Moraru, Andrew Neher y Topsy Smalley.

Agradecemos calurosamente al director ejecutivo Michael Penn sus agudos consejos y su apoyo continuado. También agradecemos a la editora de producción Stephanie Attia sus valiosas sugerencias.

Nuestra agente, Faith Hamlim, nos ha ofrecido un asesoramiento crucial y un caluroso aliento. Apreciamos muchísimo su implicación en nuestro libro.

Prefacio

La naturaleza fundamental del enigma cuántico nos ha acompañado desde los comienzos de la mecánica cuántica hace ocho décadas. Pero el creciente interés en los misterios de la mecánica cuántica ha motivado experimentos críticos que confirman el enigma, así como nuevos estudios teóricos que exploran sus implicaciones. En esta edición se ha incluido parte de esta investigación reciente.

Nuestras principales revisiones tienen que ver con aclaraciones basadas en comentarios de estudiantes. Kuttner ha empleado *El enigma cuántico* dos veces como texto principal para un amplio grupo de estudiantes de humanidades, y Rosenblum lo ha usado como guía de discusión en un seminario que incluía estudiantes graduados y no graduados de física, filosofía y psicología. Nuestra corrección también se ha beneficiado de las discusiones en persona y por correo electrónico con los lectores, y ha tenido en cuenta los comentarios y sugerencias publicados en diversas revistas.

No ha sido necesario reconsiderar la naturaleza de nuestro tratamiento de los resultados experimentales, ni la explicación de la teoría cuántica, ni nuestra controvertida propuesta de que el enigma cuántico, «el secreto de familia», es real, tiene relevancia y es mejor discutirlo abiertamente.

Tenemos más información disponible sobre el enigma cuántico y los usos docentes de nuestro libro en www.quantumenigma.com.

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 seudocientíficas 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 contemplemos 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:

Cuando 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.