

Jim Al-Khalili

Cuántica

Guía de perplejos



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *Quantum. A Guide for the Perplexed*
Traducción de Dulcinea Otero-Piñeiro
Revisión científico-técnica de David Galadí-Enríquez,
doctor en Física

Publicado por primera vez en inglés en 2003 por Weidenfeld & Nicolson, un sello de Orion Publishing Group, London

The Road Not Taken from *The Poetry of Robert Frost*, edited by Edward Connery Lathem. Published in the United Kingdom by Jonathan Cape. Reprinted by permission of the Random House Group Ltd.

The Road Not Taken from *The Poetry of Robert Frost*, edited by Edward Connery Lathem. Copyright 1916. Published in the US in 1969 by Henry Holt and Co., copyright 1994 by Robert Frost. Reprinted by permission of Henry Holt and Company, LLC

Primera edición: 2016
Quinta reimpresión: 2022

Diseño de colección: Estrada Design
Diseño de cubierta: Manuel Estrada
Fotografía de Amador Toril

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

Copyright © Jim Al-Khalili 2003
© de la traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro, 2016
© de la revisión científico-técnica de la traducción: David Galadí-Enríquez, 2016
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2016, 2022
Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15
28027 Madrid
www.alianzaeditorial.es



ISBN: 978-84-9104-314-0
Depósito legal: M. 414-2016
Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: alianzaeditorial@anaya.es

Índice

9	Agradecimientos
13	Introducción
21	1. Truco de magia con la naturaleza
40	Esferas de fullereno y el experimento de la doble rendija, por <i>Markus Arndt y Anton Zeilinger</i>
44	2. Orígenes
77	3. La probabilidad y el azar
107	Desintegración radiactiva, por <i>Ron Johnson</i>
110	4. Conexiones misteriosas
148	Caología cuántica, por <i>Michael Berry</i>
151	5. Mirar y ser mirado
181	6. El gran debate
211	La realidad cuántica según De Broglie y Bohm, por <i>Chris Dewdney</i>
216	7. El mundo subatómico
258	Componentes esenciales, por <i>Frank Close</i>
262	8. En busca de la teoría definitiva
289	Pongamos el acento en lo negativo, por <i>Paul Davies</i>
294	9. La cuántica en acción
331	Condensados de Bose-Einstein, por <i>Ed Hinds</i>
334	Mecánica cuántica y biología, por <i>Johnjoe McFadden</i>
337	10. Hacia el nuevo milenio
358	Computación cuántica, por <i>Andrew Steane</i>
376	Bibliografía adicional
381	Créditos de ilustraciones
383	Índice analítico

Agradecimientos

Diversos amigos y compañeros me han ayudado enormemente para la redacción de este libro. En primer lugar y ante todo debo dar las gracias a mi esposa, Julie, y mis hijos, David y Kate, por su apoyo y comprensión durante las numerosas tardes y fines de semana de los dos últimos años que tuve que encerrarme a solas con mi ordenador. También me siento muy en deuda con las siguientes personas por suministrarme ensayos, o por leer y comentar parte o la totalidad del manuscrito, por brindarme su consejo y sugerencias, así como por la corrección de numerosos errores. Son, por orden alfabético: Jeremy Alam, Julie Al-Khalili, Nazar Al-Khalili, Reya Al-Khalili, David Angel, Marcus Arndt, Michael Berry, Frank Close, Paul Davies, Jason Deacon, Chris Dewdney, Gregers Hansen, Deen Harman, Ed Hinds, Ron Johnson, Greg Knowles, Johnjoe MacFadden, Ray Macintosh, Abdel-Aziz Matani, Gareth Mitchell, Andrew

Steane, Paul Stevenson, Ian Thompson, Patrick Walsh, Richard Wilson y Anton Zeilinger. Como es natural, los errores que puedan haber quedado son únicamente responsabilidad mía. Por último, quisiera manifestar un agradecimiento especial a mi editor de Weidenfeld & Nicolson, Nic Cheetham, por toda su ayuda.

Dedico este libro a mi padre, a quien, entre otras muchas cosas, le debo que me hablara por primera vez de una extraña teoría llamada mecánica cuántica.

Introducción

Durante la adolescencia fui un ávido lector de una revista llamada The Unexplained [«Lo inexplicado»] que estaba repleta de supuestos avistamientos de ovnis, historias del Triángulo de las Bermudas, y otros fenómenos paranormales semejantes. Recuerdo el estremecimiento de entusiasmo que me recorría cuando abría cada número para corroborar que el mundo estaba lleno de sucesos extraños y fabulosos que nadie entendía. Lo mejor de todo eran las fascinantes fotografías que parecían tomadas con cámara barata y mano temblorosa en plena noche y en medio de una densa niebla. En teoría probaban la existencia de platillos volantes, apariciones espectrales y monstruos del lago Ness. Recuerdo sobre todo la mórbida imagen de los restos carbonizados de un pie separado del cuerpo de una anciana, aún dentro de su cálida pantufla y próximo a un cúmulo de cenizas en una sala de estar; fue lo único que quedó de un episodio de «combustión humana espontánea».

No tengo ni idea de si aquella revista sigue publicándose hoy en día (lo cierto es que hace mucho que no la veo), pero no ha cesado la fascinación del público por toda clase de fenómenos paranormales que la ciencia no parece haber logrado etiquetar, clasificar y empaquetar. Da la impresión de que mucha gente se siente cómoda sabiendo que aún quedan rincones de nuestro universo que resisten el avance inexorable de la ciencia, donde lo mágico, lo misterioso y lo ajeno a este mundo aún perduran y prosperan.

Es una pena; me parece frustrante que todos los logros de la ciencia para explicar y racionalizar la multitud de fenómenos que acaecen en el universo se consideren a veces como algo de lo más cotidiano o carente de prodigio. Un físico que hizo hincapié en esto mismo fue Richard Feynman, quien recibió el premio Nobel en 1965 por sus aportaciones para desentrañar la naturaleza de la luz. Feynman escribió:

Los poetas dicen que la ciencia resta belleza a las estrellas, simples globos de átomos de gas. Nada es «simple». También yo contemplo las estrellas una noche desierta y las siento. Pero ¿veo menos o veo más? [...] ¿Cuál es el patrón estructural, o el significado, o el porqué? No se estropea el misterio por saber algo más sobre él. Porque la verdad es mucho más fabulosa de lo que cualquier artista del pasado la imaginó. ¿Por qué no hablan de ella los poetas actuales?

En estos días en que la ciencia se ha popularizado tanto que el público puede acceder a ella mediante libros, revistas, documentales de televisión e internet, creo que

se está produciendo un cambio de actitud. Pero aún queda una región de la ciencia que no se puede racionalizar en su totalidad usando el lenguaje cotidiano, o explicar recurriendo a conceptos simples, fáciles de asimilar, o a cortes de entrevistas. No me refiero a ninguna idea especulativa a medio hacer basada en argumentos pseudocientíficos, como la percepción extrasensorial o, peor aún, la astrología. Al contrario, el tema en cuestión cae dentro de la corriente principal de la ciencia. De hecho, es una materia de estudio tan omnipresente, tan esencial para comprender la naturaleza, que sirve de base a gran parte de todas las ciencias físicas. Se describe mediante una teoría cuyo descubrimiento supuso, sin lugar a dudas, el avance científico individual más importante del siglo XX. Por alguna curiosa coincidencia, también es el tema de este libro.

La mecánica cuántica es extraordinaria por dos razones que parecen contradictorias. Por un lado, es tan esencial para comprender el funcionamiento del mundo, que ocupa el mismísimo núcleo de la mayoría de los avances tecnológicos logrados durante el último medio siglo. Por otro lado, ¡nadie parece saber exactamente qué significa!

Cuando tratamos con el mundo cuántico realmente nos adentramos en un territorio extraordinario. Un ámbito donde parece haber libertad para elegir cualquiera de entre cierto número de explicaciones para lo observado, cada una de ellas tan asombrosamente rara a su modo, que hasta las historias de abducciones alienígenas suenan perfectamente razonables.

Si la gente supiera lo frustrante pero asombrosa que es la extraordinaria naturaleza del mundo cuántico, si su-

piera que la sólida realidad que conocemos descansa sobre la frágil base de una realidad insondable y fantasmagórica subyacente, entonces ya no necesitaría las historias sobre el Triángulo de las Bermudas o sobre manifestaciones *poltergeist*; los fenómenos cuánticos son mucho más extraños. Y mientras casi todos los incidentes paranormales registrados se explican nada más que con una pizca de sentido común, la teoría cuántica se ha probado, espoleado y demostrado de todas las formas imaginables durante casi cien años. Es una pena que ninguna de las predicciones de la mecánica cuántica haya figurado, hasta donde yo sé, en algún número de *The Unexplained*.

Debo aclarar desde el principio que la teoría de la mecánica cuántica no es lo raro o ilógico. Al contrario, la teoría es una construcción matemática con una precisión y una lógica preciosas que brinda una descripción magnífica de la naturaleza. De hecho, sin la mecánica cuántica no entenderíamos los fundamentos de la química moderna, ni de la electrónica, ni de la ciencia de materiales. Sin la mecánica cuántica no habríamos inventado el chip de silicio ni el láser; no habría televisores, computadoras, hornos de microondas, reproductores de CD y DVD, teléfonos móviles, y muchas otras cosas que damos por hechas en nuestra era tecnológica.

La mecánica cuántica predice y explica con exactitud asombrosa el comportamiento de los verdaderos elementos esenciales de la materia (no ya los átomos, sino las partículas que forman los átomos). Nos ha brindado un conocimiento muy preciso y casi completo de cómo interactúan entre sí las partículas subatómicas, y de qué manera se enlazan para conformar el mundo que observamos

a nuestro alrededor, y del cual, por supuesto, formamos parte.

Por tanto, parece que estamos ante una pequeña contradicción. ¿Cómo puede una teoría científica ser tan buena explicando tantos «cómos» y «porqués», y sin embargo ser tan oscura?

La mayoría de los físicos que usan las reglas y las fórmulas matemáticas de la mecánica cuántica de manera cotidiana dirán que no tienen ningún problema con ella. Después de todo, saben que funciona. Nos ha ayudado a entender la inmensa variedad de fenómenos de la naturaleza, su estructura y formulación matemática es precisa y bien conocida y, a pesar de los numerosos intentos de muchos que han dudado de ella, ha superado con brillantez todas las pruebas experimentales imaginables a las que la han sometido. De hecho, no es nada infrecuente que los físicos se irriten con los colegas que aún se sienten incapaces de asimilar la naturaleza extraña y contraria a la intuición del mundo subatómico que nos impone la teoría. Al fin y al cabo, ¿qué derecho tenemos a esperar que la naturaleza se comporte a la escala increíblemente diminuta de los átomos de una manera que nos resulte familiar a partir de nuestras experiencias cotidianas a la escala de humanos, coches, árboles y edificios? No es que la teoría de la mecánica cuántica sea una descripción rara de la naturaleza, sino que la naturaleza de por sí se comporta de un modo sorprendente y al margen de lo intuitivo. Y si la mecánica cuántica nos brinda las herramientas teóricas para comprender todo lo que observamos, entonces no tenemos derecho a culpar a la naturaleza (o a la teoría) de nuestra estrechez de miras intelectual.

Muchos físicos, en una actitud que yo considero más bien acientífica, se impacientan con quienes persiguen una interpretación más intuitiva de la mecánica cuántica. Dirán: «¿Por qué no te limitas a callarte y usar las herramientas cuánticas para emitir predicciones sobre resultados de experimentos? Es una pérdida de tiempo inútil empeñarse en esclarecer por completo algo que no se puede verificar de forma experimental».

De hecho, la interpretación estándar de la mecánica cuántica (la que se suele enseñar a todos los estudiantes de física) lleva incorporada una serie de reglas y condiciones estrictas de acatamiento obligado respecto al tipo de información que es posible extraer de la naturaleza, dada una configuración experimental concreta. Sé que esto sonará innecesariamente enrevesado para aparecer tan pronto en el libro, pero debe entender usted desde el principio que la mecánica cuántica no se parece a ningún otro empeño intelectual humano, ni anterior ni posterior a ella.

Como la mayoría de los físicos, he dedicado muchos años a reflexionar sobre la mecánica cuántica, tanto desde el punto de vista del profesional investigador en activo, como desde la perspectiva de quien tiene interés por su significado más profundo, el campo que se conoce como los fundamentos de la mecánica cuántica. Tal vez los aproximadamente veinte años que llevo bregando con la mecánica cuántica no hayan bastado aún para que la «asimile». Pero creo que he oído a bastantes participantes del debate (y créame que aún continúa a pesar de las optimistas y, en ciertos aspectos, falsas afirmaciones en contra por parte de quienes defienden una interpretación

determinada) como para, cuando menos, apartarme de la polémica. La mayoría de lo que trato en este libro no es, espero, controvertido, y cuando abordo cuestiones de plena actualidad, procuro adoptar una postura neutral y objetiva. Yo no defiendo ninguna interpretación en particular de la mecánica cuántica, pero sí que tengo ideas muy claras sobre la materia. Usted, por supuesto, es libre de discrepar de ellas, pero estoy seguro de que lo convenceré, a menos que pertenezca usted a la brigada «calcula y calla», en cuyo caso no debería estar leyendo este libro ;sino haciendo algo más útil en su lugar!

Lo único que diré por ahora es que mi variante preferida se llama interpretación «calla mientras calculas». De esta manera tengo entera libertad para preocuparme por la mecánica cuántica cuando no estoy ocupado usándola.

Pero este libro no trata tan solo sobre el significado de la mecánica cuántica. También ahonda en sus logros, tanto a la hora de explicar numerosos fenómenos, como en lo referido a sus muchas aplicaciones prácticas pasadas, presentes y futuras en la vida cotidiana. De ahí que el viaje nos lleve desde la filosofía, la física subatómica y las teorías de muchas dimensiones hasta el mundo de alta tecnología de los láseres y microchips y el extraordinario horizonte de la magia cuántica del mañana.

Aunque espero que todo esto suene fascinante, es natural que los novatos absolutos en la materia se pregunten en primer lugar de qué va todo este embrollo. Hay muchas maneras de poner de relieve la extraña naturaleza de la mecánica cuántica, algunas de ellas proceden de ejemplos cotidianos con los que estamos familiarizados y

que damos por hecho, mientras que otras recurren a «experimentos mentales»: situaciones ideales que pueden tenerse en cuenta sin necesidad de reproducirlas realmente en un laboratorio. De hecho, nada explica el misterio de la mecánica cuántica con tanta firmeza y belleza como el experimento de la doble rendija. Así que empezaré por ahí.

1. Truco de magia con la naturaleza

Antes de introducir demasiada ciencia desde ya en el libro, describiré un experimento sencillo. Sospecho que le sonará un poco a magia, y es posible de hecho, que no llegue a creerse una sola palabra; eso depende de usted. Como cualquier mago que se precie, en esta fase no desvelaré exactamente cómo y por qué funciona. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con los trucos de magia, poco a poco, a medida que se desarrolle la historia, usted empezará a notar por su cuenta que aquí no hay juegos de manos, ni espejos ocultos, ni compartimentos secretos. De hecho, debería llegar a la conclusión de que no existe ninguna explicación racional para que las cosas puedan ser tal como yo las describo.

Dado que solo puedo usar adjetivos como «raro», «extraño» y «misterioso» en contadas ocasiones, no perderé más tiempo con esta fanfarria y entraré en materia. Lo

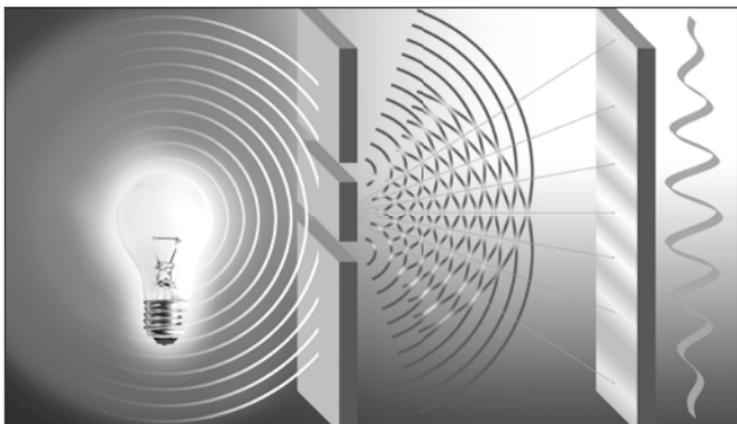
que describiré es un experimento real y usted deberá creer que lo que se ve no es mera especulación teórica. El experimento es fácil de hacer con el dispositivo adecuado y se ha efectuado muchas veces de muchas formas distintas. También es importante señalar que deberé describir el experimento, no desde la ventaja de quien entiende la física cuántica, sino desde el punto de vista del lector que aún no sabe qué esperar o cómo asimilar los insólitos resultados. Daré por supuesto que usted intentará racionalizar los resultados de manera lógica a medida que avancemos de acuerdo con lo que tal vez usted considere de sentido común, lo cual difiere bastante del modo en que explicaría las cosas un experto en física cuántica. Eso vendrá después.

En primer lugar debo decir que el truco, si es que puedo llamarlo truco a estas alturas, podría realizarse simplemente arrojando luz sobre una pantalla especial; y, de hecho, así es como se describe en numerosos textos. Sin embargo, resulta que la naturaleza de la luz es muy extraña de por sí, lo que resta teatralidad al resultado. En el colegio aprendimos que la luz se comporta como una onda; puede estar formada por distintas longitudes de onda (que arrojan los distintos colores del espectro visibles en un arco iris). Exhibe todas las propiedades propias de las ondas, como la interferencia (cuando dos ondas se mezclan), la difracción (las ondas se abren y se desparraman cuando se las obliga a pasar por un hueco estrecho), y la refracción (la desviación que experimenta una onda al atravesar distintos medios transparentes). Estos fenómenos guardan relación con la manera en que se comportan las ondas cuando se topan con una barrera

o cuando se cruzan entre sí. Si digo que la luz es extraña es porque no todo se reduce a ese comportamiento de onda. De hecho, Einstein fue galardonado con el Premio Nobel por demostrar que la luz exhibe en ocasiones un comportamiento muy distinto al de las ondas, pero ahondaremos más en ello en el próximo capítulo. Para el truco de las dos rendijas podemos admitir que la luz es una onda, lo cual no arruinará lo realmente bueno de él.

Primero se lanza un haz de luz sobre una pantalla provista de dos rendijas estrechas que permitan que parte de luz pase hasta una segunda pantalla donde se verá un patrón de interferencia. Este patrón consiste en una serie de bandas claras y oscuras debidas a la manera en que cada onda individual de luz se propaga desde las dos rendijas, se superpone y se funde con otras antes de alcanzar la pantalla del fondo. Allí donde confluyen dos crestas (o valles) de onda, se unen y dan lugar a una cresta (o valle) mayor que se corresponde con luz más intensa y, por tanto, con una banda clara en la pantalla. Pero allí donde la cresta de una onda coincide con el valle de otra, ambas ondas se anulan y dan como resultado una zona oscura. En medio de estos dos extremos queda algo de luz que genera una mezcla gradual de ambos patrones en la pantalla. Por tanto, el hecho de que aparezca el patrón de interferencia se debe tan solo a que la luz se comporta como una onda que atraviesa simultáneamente ambas rendijas. Hasta aquí, ningún problema, espero.

Ahora efectuaremos un experimento similar con arena. Esta vez, la segunda pantalla se colocará debajo de la que porta las rendijas, y la gravedad hará el resto. A medida que la arena se precipita sobre la primera pantalla,



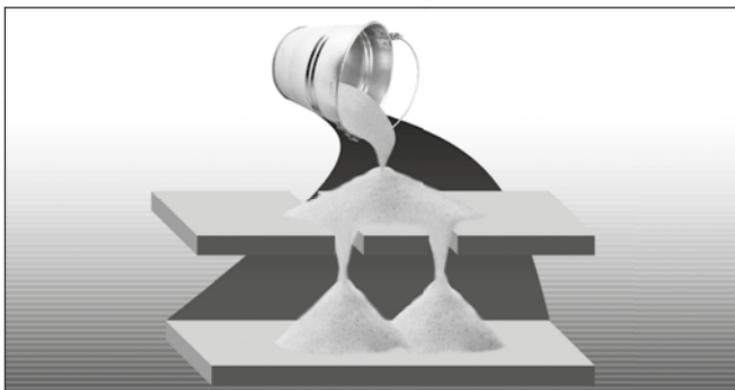
La luz que ilumina a través de dos rendijas estrechas formará un patrón de franjas sobre la pantalla debido a la interferencia entre las ondas de luz que salen de las rendijas. Esto solo ocurrirá, por supuesto, si la fuente de luz es «monocromática» (produce luz de una sola longitud de onda).

se van formando dos montículos diferenciados sobre la otra pantalla justo debajo de cada rendija. No hay nada raro aquí, puesto que cada grano de arena tiene que pasar a través de una u otra rendija; como en este caso no se trata de ondas, no se produce ninguna interferencia. Ambos montículos de arena tendrán la misma altura, si ambas rendijas son del mismo tamaño y la arena se vierte desde una posición elevada y centrada sobre ellas.

Ahora llega la parte interesante: repetir el truco con átomos. Un instrumento especial (que llamaremos pistola atómica, a falta de un nombre mejor) lanza un haz de átomos contra una pantalla provista de dos rendijas adecuadas¹. Y, por otro lado, la segunda pantalla está trata-

1. En realidad las rendijas tienen que ser estrechas y estar muy próximas entre sí. Estos experimentos se efectuaron en la década de 1990

1. Truco de magia con la naturaleza



Como es natural, los granos de arena no se comportan como ondas, y forman dos montículos debajo de las rendijas.

da con un revestimiento que crea una manchita clara cada vez que un átomo choca contra ella.

Desde luego no es necesario decir que los átomos son entidades increíblemente minúsculas y que, por tanto, está claro que deberían comportarse de forma similar a la arena, y no como ondas en propagación, capaces de abarcar ambas rendijas al mismo tiempo.

En primer lugar practicamos el experimento con una sola rendija abierta. No es de extrañar que obtengamos sobre la pantalla del fondo un estarcido de manchas claras situadas justo detrás de la rendija abierta. La ligera dispersión de este estarcido de manchas podría extrañarnos si ya sabemos algo sobre el comportamiento de las ondas, puesto que eso es lo que le ocurre a una onda cuando atraviesa una rendija estrecha (difracción). Sin

con una lámina de oro a modo de pantalla y con rendijas del orden de un solo micrómetro (una milésima de milímetro) de ancho.