

¿QUÉ SABEMOS DE?

Verdades y mentiras de la física cuántica

Carlos Sábín



CSIC



CATARATA

Verdades y mentiras de la física cuántica

Carlos Sabín



Colección ¿Qué sabemos de?

COMITÉ EDITORIAL

PÍLAR TIGERAS SÁNCHEZ, DIRECTORA
CARMEN GUERRERO MARTÍNEZ, SECRETARIA
PURA FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
ENRIQUE BARBA GÓMEZ
ARANTZA CHIVITE VÁZQUEZ
JAVIER SENÉN GARCÍA
CARMEN VIAMONTE TORTAJADA
MANUEL DE LEÓN RODRÍGUEZ
ISABEL VARELA NIETO
ALBERTO CASAS GONZÁLEZ

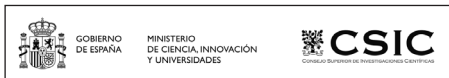
CONSEJO ASESOR

JOSÉ RAMÓN URQUIJO GOITIA
AVELINO CORMA CANÓS
GINÉS MORATA PÉREZ
LUIS CALVO CALVO
MIGUEL FERRER BAENA
EDUARDO PARDO DE GUEVARA Y VALDÉS
VÍCTOR MANUEL ORERA CLEMENTE
PILAR LÓPEZ SANCHO
PILAR GOYA LAZA
ELENA CASTRO MARTÍNEZ

ROSINA LÓPEZ-ALONSO FANDIÑO
MARÍA VÍCTORIA MORENO ARRIBAS
DAVID MARTÍN DE DIEGO
SUSANA MARCOS CELESTINO
CARLOS PEDRÓS ALÍO
MATILDE BARÓN AYALA
PILAR HERRERO FERNÁNDEZ
MIGUEL ÁNGEL PUIG-SAMPER MULERO
JAIME PÉREZ DEL VAL

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES

[HTTP://PUBLICACIONESOFICIALES.BOE.ES](http://publicacionesoficiales.boe.es)



Diseño gráfico de cubierta: Carlos Del Giudice

- © Carlos Sabín, 2020
- © CSIC, 2020
<http://editorial.csic.es>
publ@csic.es
- © Los Libros de la Catarata, 2020
Fuencarral, 70
28004 Madrid
Tel. 91 532 20 77
www.catarata.org

ISBN (CSIC): 978-84-00-10598-3

ISBN ELECTRÓNICO (CSIC): 978-84-00-10599-0

ISBN (CATARATA): 978-84-9097-923-5

ISBN ELECTRÓNICO (CATARATA): 978-84-9097-924-2

NIPO: 833-20-009-4

NIPO ELECTRÓNICO: 833-20-010-7

DEPÓSITO LEGAL: M-5.611-2020

THEMA: PDZ/PHQ

RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS POR LA LEGISLACIÓN EN MATERIA DE PROPIEDAD INTELECTUAL. NI LA TOTALIDAD NI PARTE DE ESTE LIBRO, INCLUIDO EL DISEÑO DE LA CUBIERTA, PUEDE REPRODUCIRSE, ALMACENARSE O TRANSMITIRSE EN MANERA ALGUNA POR MEDIO YA SEA ELECTRÓNICO, QUÍMICO, ÓPTICO, INFORMÁTICO, DE GRABACIÓN O DE FOTOCOPIA, SIN PERMISO PREVIO POR ESCRITO DEL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y LOS LIBROS DE LA CATARATA. LAS NOTICIAS, LOS ASERTOS Y LAS OPINIONES CONTENIDOS EN ESTA OBRA SON DE LA EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL AUTOR O AUTORES. EL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y LOS LIBROS DE LA CATARATA, POR SU PARTE, SOLO SE HACEN RESPONSABLES DEL INTERÉS CIENTÍFICO DE SUS PUBLICACIONES.

Para Mencha

Para Nicolás

Índice

AGRADECIMIENTOS 9

INTRODUCCIÓN 11

CAPÍTULO 1. Lo que la física cuántica no es 17

CAPÍTULO 2. Lo que la física cuántica es 30

CAPÍTULO 3. Tecnologías cuánticas 52

PARA TERMINAR 85

GLOSARIO 89

BIBLIOGRAFÍA 93

Agradecimientos

En el año 2015, Ernesto Lozano, de la revista *Investigación y Ciencia*, me ofreció empezar a escribir un blog, dentro de la plataforma de blogs de divulgación científica Scilogs, y me concedió libertad absoluta de temas y opiniones. Yo estaba entonces en la Universidad de Nottingham, en Reino Unido. La idea me gustó mucho, y acepté de inmediato, pero entonces no sospechaba hasta qué punto este blog iba a ser importante en mi vida, hasta qué punto iba a interesarme y convertirse en una obsesión. Lo llamé “Cuantos completos” (Sabín, 2015) (enésimo chistecito con las palabras “cuantos” y “cuentos”) y comencé a escribir sobre física cuántica, tecnologías cuánticas y, más en general, sobre cuestiones de cultura y divulgación científica.

Gracias a este blog, y a los comentarios y reacciones que ha ido provocando, he aprendido varias cosas que, con el tiempo, se han ido convirtiendo en mis motivos principales para escribir este libro.

Cuando empecé el blog yo ya estaba muy preocupado por los problemas que empezaba a ver claramente en Internet y las redes sociales: la escasísima calidad de la discusión, la argumentación y la transmisión de información, la proliferación de

mentiras y bulos, la enorme dificultad para que la verificación de datos, el contraste de fuentes y, en definitiva, la búsqueda de la verdad se abrieran paso. Muy pronto, esos temas pasaron a ser una preocupación global, y han dado lugar a una serie de nuevos términos que ya forman parte del lenguaje común: posverdad, *fake news*, hechos alternativos, etc. El blog me ha permitido reflexionar en profundidad sobre estos asuntos, a partir de la explicación de los resultados de aquellos investigadores que están intentando entenderlos y enfrenarlos desde una perspectiva científica.

En relación con lo anterior, pero en el caso concreto del tema de este libro, el blog me ha permitido entender la enorme confusión existente sobre la física cuántica, que en la actualidad abarca sectores preocupantemente amplios de la población. Además, he podido conocer el enfoque y la calidad de muchos trabajos de divulgación en esta área, incluidos los que realizan miembros de la comunicación científica (incluso he reseñado algunos de ellos para la revista *Investigación y Ciencia*). Todo ello me ha convencido de la necesidad, casi de la urgencia, de escribir este libro, y también de cuál debía ser el estilo y el contenido.

Por todo ello, mi agradecimiento es para Ernesto, para Purificación Mayoral, para Bruna Espar y todo el equipo de *Investigación y Ciencia*, quienes no solo han mantenido su apoyo todo este tiempo, sino que además han defendido explícitamente mi libertad de expresión y opinión cada vez que ha sido necesario. También es para los lectores que me han venido siguiendo estos cuatro años y han contribuido con sus comentarios, opiniones y preguntas.

Introducción

No tienes más que mencionar la teoría cuántica y la gente tomará
tu voz por la voz de la ciencia y se creará cualquier cosa.

GEORGE BERNARD SHAW, *Ginebra*

La física cuántica tiene un peso creciente en la cultura popular. Entre otros muchos posibles ejemplos, en los últimos meses he visto al menos dos nuevas películas con mi hijo de 9 años (*Un pliegue en el tiempo* y *Ant-man y la avispa*) en las que se mencionan propiedades cuánticas, e incluso la más popular y paradigmática de ellas, el famoso entrelazamiento cuántico, hasta podríamos decir que tiene un papel central en la trama. Desafortunadamente, el tratamiento que se da en esas películas no solo no es científicamente riguroso (lo cual no es necesariamente exigible en una buena película), sino que es completamente descabellado. Al entrelazamiento cuántico se le atribuyen una serie de propiedades taumatúrgicas, que lo convierten en una suerte de *deus ex machina* posmoderno.

Este tratamiento de la física cuántica no es una excepción, sino que encaja perfectamente con el que vemos con demasiada frecuencia en Internet y las redes sociales. La teoría cuántica sería algo así como una especie de cosmovisión, a mitad de camino entre la física y la metafísica, que nos permitiría escapar de la aburrida física convencional para abrir un mundo “alternativo” donde cabe todo y todo vale, donde no se respetan principios físicos bien establecidos ni tampoco la

lógica, y, por tanto, cualquier disparate, por acientífico y descabellado que sea, puede encontrar acomodo. Todo está lleno de cosas “fascinantes”, “misteriosas” y “extraordinarias”; hay montones de mundos, todo es impredecible y todo puede ocurrir, todo está conectado y es complejo, de manera que cualquier ocurrencia, superchería o timo tiene justificación.

Además, según estas corrientes, sería una teoría que nadie entiende muy bien y sobre la que los físicos llevaríamos décadas discutiendo sin ponernos de acuerdo en nada. Esta visión, a la que desafortunadamente contribuyen también muchas veces los investigadores y divulgadores, es una gran tergiversación y exageración de la realidad, que suele apoyarse en frases sacadas de contexto, chascarrillos irrelevantes y debates ya superados por los experimentos.

Por ejemplo, una cita muy popular en redes sociales es una frase que el gran físico estadounidense del siglo XX Richard Feynman dijo en los años sesenta: “Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica” (Feynman, 2015). El atractivo de esta cita es comprensible. Por un lado justifica la pereza intelectual: si hasta Feynman pensaba así, mejor no esforzarse más en entender la física cuántica. Por otro lado, casa bien con esa cosmovisión que he explicado en los párrafos anteriores. Pero, como he escrito en otra ocasión (Sabín, 2019), en realidad, Feynman no quería decir eso en absoluto. Existe un vídeo en YouTube en el que Feynman explica lo difícil que es contestar a la pregunta de ¿por qué los imanes se separan o se acercan?, o a cualquier pregunta sobre física que contenga un ¿por qué? Entender, explicar un fenómeno físico, sería, según el profesor Feynman, relacionarlo con otras cosas más simples que uno cree ya haber entendido.

Eso es precisamente lo que solemos hacer con la física que a los físicos nos gusta llamar “clásica” (es decir, no cuántica) a la física de Newton que aprendimos en el colegio: todo lo relacionamos con planos inclinados, poleas, muelles,

pelotas... ¿Tendría sentido que nos preguntáramos por qué la fuerza es igual a la masa por la aceleración? Tal vez, pero seguramente no debería sorprendernos demasiado que la contestación sea, sencillamente, que eso es lo que dice la segunda ley de Newton, la cual puede comprobarse experimentalmente. De hecho, a nadie le resulta muy extraño que al empujar algo lo movamos, y que se mueva tanto más cuanto más pequeña sea su masa, ya que lo podemos experimentar todos los días. La respuesta nos satisface, puesto que hemos podido relacionar la fuerza, la masa y la aceleración con cosas que entendemos y podemos manipular, así que no necesitamos preguntarnos por el significado de una ecuación: si acaso, nos preocupará exclusivamente si es correcta, es decir, si es capaz de explicar y predecir lo que sucede en el mundo, al menos en el caso concreto de algún fenómeno en el que estemos interesados.

En cambio, la física cuántica no describe objetos con los que estamos familiarizados, sino que es sobre todo la física de las pequeñas partículas (electrones, fotones, átomos...) o, en algunos casos especiales, de objetos más grandes pero sometidos a condiciones exclusivas de laboratorio (por ejemplo, temperaturas “ultrabajas” como $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) que no aparecen nunca en nuestra vida cotidiana. Por eso, al descubrir cosas nuevas mediante el estudio de la física cuántica, nos resulta mucho más complicado (estrictamente, imposible) relacionarlo con cosas que conozcamos bien o que podamos manipular con facilidad y observar con nuestros ojos.

Me gusta mucho contar un ejemplo (Sabín, 2019) que usaba un profesor mío en la universidad, ya jubilado, con el que me inicié en la investigación de la física cuántica (se trata del gran Guillermo García Alcaíne, de la Universidad Complutense de Madrid, con el que hice un trabajo de investigación y un artículo científico precisamente sobre la teoría del entrelazamiento cuántico). El ejemplo es el siguiente: imaginen que han vivido ustedes en el campo y se han acostumbrado a ver cerdos y caballos, pero en su primer viaje a África

ven por primera vez un hipopótamo. ¿Cómo lo describirían? Seguramente, se les ocurra decir que es un animal que a veces se comporta como un cerdo y otras veces como un caballo. Sin embargo, es obvio que no es ni un cerdo ni un caballo: es un hipopótamo. Lo mismo, decía mi querido profesor, sucede con un electrón: a veces se comporta como una onda y a veces como una partícula, pero es, sobre todo, un electrón. Es en este sentido en el que Feynman decía que nadie entiende la mecánica cuántica, y es por eso, quizá, que no nos satisfacen completamente respuestas como: “Así lo dice la ecuación de Schrödinger, la cual se ha comprobado experimentalmente”. Y, sin embargo, mucha gente entiende la mecánica cuántica: muchos físicos teóricos somos capaces de explicar y predecir sin ningún problema el comportamiento de objetos físicos que se rigen por leyes cuánticas (así lo llevamos haciendo desde hace décadas), y también muchos físicos experimentales en el mundo son capaces de manipular esos objetos y medir sus propiedades, hasta el punto de estar creando, en los últimos años, nuevas tecnologías a partir de ellos.

De hecho, en paralelo a esa visión fantasiosa y sensacionalista de la teoría cuántica que denunciábamos arriba, el lector se habrá encontrado, sin duda, con numerosas noticias, también con un grado variable de rigor (como regla general, descarte aquellas en las que se diga que se ha hecho un nuevo experimento para demostrar que Einstein se equivocaba), en las que se da cuenta de los avances de las tecnologías llamadas cuánticas (es decir, aquellas que, para su funcionamiento, usan alguna característica exclusiva de la física cuántica para mejorar su rendimiento en comparación con la tecnología convencional).

Ahora mismo, por ejemplo, en varios lugares del planeta, muchos físicos que entienden la física cuántica, cuyos proyectos están financiados por algunas de las empresas y gobiernos más importantes del mundo (IBM, Microsoft, Google, Intel, entre otras, junto con los gobiernos de la Unión

Europea, Reino Unido, Canadá, China, etc.) compiten por ser los primeros en conseguir un ordenador gobernado por la física cuántica que haga cálculos imposibles para nuestros ordenadores clásicos. Es solo un ejemplo de un campo emergente, las nuevas tecnologías cuánticas, que cada vez recibe más interés e inversión. ¿De verdad alguien cree que todo esto sería posible si fuera cierto que nadie entiende la mecánica cuántica?

A la luz de todo lo anterior, el objetivo de este libro es doble. Por un lado, intentaremos desmentir las creencias erróneas, los malentendidos, los mitos más comunes que rodean a la física cuántica en la cultura popular. Pondremos especial énfasis en demostrar que la mecánica cuántica no es algo misterioso e incomprensible, sino una bien entendida parte de la física con propiedades bien definidas, en la que no cabe cualquier cosa que se nos ocurra. Si alguien tiene la tentación de usar la física cuántica como una vía de escape para aquellas propiedades de la física que le puedan resultar molestas, como, por ejemplo, la descripción de la naturaleza en términos exclusivamente racionales, el sometimiento al imperio de la metodología científica, donde reinan despóticamente los experimentos y las pruebas, etc., este libro trae muy malas noticias: no es así, esta rama de la física que llamamos cuántica es, en ese sentido, tan “física” como la que más.

Por otro lado, mostraremos que la física cuántica está ya dando lugar a una nueva generación de tecnologías que prometen tener un impacto incalculable en grandes áreas de nuestra sociedad. Los ya mencionados ordenadores cuánticos, los simuladores cuánticos, los aparatos de criptografía y de metrología cuántica son ya realidades tecnológicas en diversos estados de desarrollo. Este segundo objetivo, en realidad, refuerza considerablemente el primero: no se me ocurre mejor manera de desmentir todas esas visiones fantasiosas y sensacionalistas sobre la física cuántica que mostrar cómo funcionan experimentos reales y concretos. Pero, además,

este objetivo tiene interés en sí mismo, ya que puede servir para empezar a comprender una nueva rama de la tecnología que podría moldear aspectos importantes de nuestras vidas en un futuro no muy lejano.

Este doble objetivo ha de tenerse en cuenta para entender la estructura, quizá relativamente inusual, de este libro. En esta época que ha sido llamada la de la “posverdad”, somos muy conscientes de que, para explicar y entender algo, ya no es suficiente con describir correctamente sus características reales, sino que es preciso también (o quizá, sobre todo) desmontar en paralelo todos los hechos alternativos, *fake news* y relatos que circulan alrededor del hecho en sí. Por tanto, el primer capítulo llevará por título “Lo que la física cuántica no es” y se dedicará a desmontar los mitos y errores que, en mi experiencia como científico y divulgador, me han parecido más comunes y recurrentes. Solo entonces podremos afrontar adecuadamente el siguiente capítulo: “Lo que la física cuántica es”, donde intentaremos capturar las características esenciales de la teoría y los experimentos cuánticos. Y, finalmente, en el capítulo sobre “Tecnologías cuánticas” veremos que todo lo anterior da lugar a una nueva generación de tecnologías, de la cual describiremos sus características básicas y el estado de desarrollo en que cada una de ellas se encuentra en la actualidad.

Lo que la física cuántica no es

Quien no piensa nunca, acepta con júbilo el pensamiento extraño, mayormente si es un pensamiento grande por lo terrorífico, nuevo por lo absurdo.

BENITO PÉREZ GALDÓS, *Un faccioso más y algunos frailes menos*

En este capítulo intentaremos desmentir los mitos, concepciones erróneas, extrapolaciones injustificadas y excesos más comunes sobre la interpretación y significado de la física cuántica. De pasada, aludiremos a las características reales de la teoría cuántica, que serán explicadas con más detalle en los siguientes capítulos.

La física cuántica no habla de gatos

Sin duda, el lector habrá oído hablar en muchas ocasiones del célebre gato de Schrödinger, el cual estaría “vivo y muerto a la vez”, o no podríamos decir “si está vivo o muerto”, o solo estaría “vivo o muerto cuando lo miramos” y un sinfín de cosas similares. El gran Erwin Schrödinger, uno de los padres de la física cuántica, inventó este famoso ejemplo en la época en que los físicos discutían e intentaban comprender las características de esta nueva teoría que entonces comenzaba a confirmarse como una interesante realidad experimental (tampoco parece que a Schrödinger le importara demasiado, ya que solo le dedicó un par de frases de pasada en un

artículo mucho más largo de 1935). No discutiré este ejemplo en detalle, puesto que creo que el lector lo conoce (o al menos conocerá alguna versión del problema, algún “relato”) y además, y sobre todo, porque creo que no sirve absolutamente para nada, como no sea para confundir a las personas que se inician en esta materia e intentan comprenderla. Los físicos recurrimos en ocasiones a ejemplos irrealizables en la práctica y un poco locos (experimentos mentales o *gedanken*, del alemán), precisamente para llegar a los límites de las teorías o comprobar hasta dónde no pueden llegar. Aquello que tiene sentido en el contexto de una determinada discusión entre científicos puede no tenerlo en absoluto en un texto de divulgación. Así que ha llegado la hora de aclararlo de una vez por todas: la física cuántica no tiene absolutamente nada que decir sobre gatos o cualquier otro felino, y mucho menos sobre su vida o su muerte.

Un gato, como cualquier otro ser vivo u objeto de nuestra vida cotidiana, es muy grande (macroscópico decimos los físicos), y está compuesto por trillones y trillones de átomos, que a su vez están compuestos de electrones, protones y neutrones. La física cuántica no tiene nada que ver con estos sistemas, ya que solo se aplica en sistemas de unas pocas partículas (átomos, electrones, fotones) o en sistemas más grandes (como alguno de los que hablaremos en el capítulo sobre tecnología) pero que están en condiciones muy particulares, pues solo se pueden alcanzar en el laboratorio (por ejemplo, temperaturas extremadamente bajas, solo muy ligeramente por encima del cero absoluto de temperaturas, es decir, algo así como $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por lo tanto, las propiedades de la física cuántica son completamente irrelevantes si quiero describir un gato, para lo cual es suficiente con la física que los físicos llamamos clásica (es decir, no cuántica) y con la química, la biología... Y esto es todo lo que vamos a decir sobre gatos, de Schrödinger o cualquier otro, en este libro.

Las cosas no están en dos sitios a la vez

En la física cuántica muy a menudo no tenemos una información completa y precisa sobre dónde está algo. Esto también sucede en la física clásica, y no es difícil encontrar ejemplos. Imaginemos que he visto pasar un coche por delante de la ventana de mi despacho a toda velocidad. Mi vista tiene un alcance limitado, incluso con las lentillas puestas, y sé que un poco más adelante el coche tendrá que escoger entre seguir recto o torcer hacia la derecha, tirando hacia la Castellana. Así que si se me pregunta ¿dónde está el coche? unos segundos después de haberlo visto pasar, yo respondería que hay una cierta probabilidad de que esté en la misma calle que mi despacho (Serrano) y también una cierta probabilidad de que esté yendo hacia la Castellana por María de Molina. De hecho, a no ser que tenga más información relevante, diré que esas dos probabilidades son iguales: 50% para cada una de esas dos posibilidades. ¿Verdad que usted también diría algo por el estilo? No se le ocurriría decir que el coche está a la vez en las dos calles, ¿verdad? Y sin embargo, ¿no es cierto que usted ha leído y escuchado una y mil veces que en la física cuántica las cosas pueden estar en dos lugares a la vez? Pues bien, en realidad, la física cuántica no dice nada de eso, sino algo muy parecido a la situación que he descrito antes: hay situaciones en que la posición de los objetos no está bien definida y lo máximo que podemos conocer es la probabilidad de estar en tal sitio o en tal otro.

¿Quiero decir con esto que no hay ninguna diferencia entre la física clásica y la cuántica? No. Por ejemplo, en la física clásica tendemos a pensar que las probabilidades aparecen solo cuando hay una limitación técnica que nos impide determinar las cosas con total precisión: en el ejemplo anterior, es el hecho de que el coche va muy rápido, yo estoy quieto y mi vista es limitada. Sin embargo, no hay nada profundo que me lo impida: si fuera detrás del coche en un taxi

o estuviera en comunicación con algún dispositivo instalado en el vehículo, sin duda podría conocer su posición con mucha más precisión. Por supuesto, siempre habrá alguna limitación, pero, como digo, será exclusivamente tecnológica.

En cambio, la física cuántica establece unas limitaciones que no son técnicas, sino de principio. Así, el principio de incertidumbre me dice que, si me empeño, puedo conocer con total exactitud la posición del objeto que quiero medir, pero eso tiene un precio: no tendré ni idea entonces de cuál es su velocidad. Cuanto más pequeña sea la incertidumbre en la determinación de la posición, más grande tendrá que ser la de la velocidad, y viceversa. Hemos de convivir, por tanto, con probabilidades.

Más aún, como veremos con más detalle en el próximo capítulo, estas probabilidades se suman entre sí de una manera muy particular, de la misma manera en que se suman las ondas de luz o las que hace una piedra en un estanque, dando lugar a fenómenos de interferencia, característicos de las ondas. Pero no hay nada, absolutamente nada, que justifique una frase como “la partícula [o el objeto, o el sistema: esas palabras que usamos los físicos para no decir ‘cosa’] está a la vez en A y en B”.

De hecho, una de las características fundamentales de la física cuántica, de la que hablaremos con detalle en el próximo capítulo, es que las cosas no tienen propiedades bien definidas hasta que se hace una medida de esa propiedad. Es una característica que los experimentos han confirmado una y otra vez: no hay una manera razonable de explicar los resultados si insistimos en que las cosas tienen propiedades bien definidas antes de realizar una medida. Por tanto, en física cuántica la frase “las cosas están en dos sitios a la vez” solo podría tener sentido si hubiera dos aparatos en dos sitios distintos encargados de detectar la posición de algo, y los dos detectaran a la vez la posición de la misma partícula. Sin embargo, eso no ocurre nunca: los aparatos de medida solo detectan la posición de una partícula en un sitio cada vez, no en dos.

No es tan impredecible

Es cierto que en la física cuántica aparecen, en ocasiones, probabilidades, como acabamos de ver: las propiedades de los sistemas físicos regidos por las leyes cuánticas no siempre están definidos con toda certeza. Sin embargo, ¿el hecho de que haya que usar probabilidades representa una ruptura del determinismo, como se ha dicho tantas veces? ¿Es un mundo no determinista aquel en el que las monedas caen siempre la mitad de las veces de cara y la otra mitad de cruz? No: es un mundo en el que hay probabilidades, pero se pueden hacer predicciones precisas.

Sin entrar en otro tipo de consideraciones, la noción de determinismo que manejaremos en este libro es aquella según la cual, si conocemos las condiciones iniciales de algo, podemos predecir su evolución. Esto es lo que ocurría en la física newtoniana que estudiamos en el colegio: conocidas las propiedades de todas las partículas en un momento dado, las leyes de Newton me dirán qué valores toman esas propiedades en cualquier instante de tiempo futuro. En ese aspecto, la física cuántica es tan determinista como la clásica: conocidas las propiedades de una partícula en un instante dado, la ecuación de Schrödinger nos dirá las propiedades en cualquier instante futuro. Esas propiedades estarán dadas en muchos casos por meras probabilidades, pero estarán completamente determinadas por las probabilidades iniciales.

Hay una ligera salvedad a esto, que es que tenemos que tener en cuenta un aspecto adicional: cuando realizamos una medida de una propiedad de un sistema cuántico, el objeto cambia de estado y salta a una de las posibilidades que existían antes de la medida (como una moneda que, después de haber sido lanzada una vez, ya solo pudiera sacar cara si la primera vez salió cara, y cruz si la primera vez salió cruz). Así que la ecuación de Schrödinger rige la evolución de la partícula..., pero cada vez que se hace una medida, la partícula se

“reinicia”. Por supuesto, solo puede reiniciarse a alguna de las posibilidades previstas por la ecuación de Schrödinger según su estado inmediatamente anterior a la medida, y a partir del reinicio, evolucionará de nuevo según lo que determine la ecuación de Schrödinger.

Esto no representa una ruptura radical del determinismo ni una entrada en el reino de la impredecibilidad. Hay maneras más seguras de escapar al determinismo sin salir de la física clásica: por ejemplo, el famoso efecto mariposa o alta sensibilidad a las condiciones iniciales. Efectivamente, las ecuaciones que rigen algunos sistemas físicos complicados (algunos de ellos clásicos, algunos cuánticos) incluyen términos extra en las ecuaciones de Newton o de Schrödinger que hacen que cambios mínimos en las condiciones iniciales provoquen cambios dramáticos en la evolución en instantes posteriores, de manera que sea prácticamente imposible realizar predicciones fiables, pues siempre hay pequeños errores en la precisión con la que se puede conocer la condición inicial¹. Entramos en el terreno del caos..., pero eso no tiene nada que ver con la física cuántica en sí misma.

El ‘observador’ no modifica la realidad

El hecho de que en la física cuántica las medidas que se realizan para conocer el valor de alguna magnitud cambien el estado del sistema (como hemos visto en el apartado anterior) no tiene ninguna relación con la “conciencia”, el “estado mental” o la “información” de la que disponga un ser humano concreto, a pesar de lo que se dice en muchas

1. Aunque esto es, claro, una cuestión más práctica que “de principio”. En física clásica, uno es libre de pensar que siempre podría conocer con total precisión las condiciones iniciales de todas y cada una de las partículas del sistema y, por tanto, predecir con exactitud su comportamiento futuro. Lo dicho en este párrafo afecta a una descripción práctica, en la que muy probablemente uno siempre tendrá que lidiar con un cierto nivel de imprecisión y tendrá que realizar una serie de aproximaciones.

ocasiones. Se debe simplemente al hecho de que las medidas son realizadas por aparatos físicos de medida, de manera que un experimento en el que se mide una cosa es un experimento distinto a uno en el que no se mide esa cosa. Que después yo, o quien sea, tenga acceso a los resultados de las medidas es completamente irrelevante: no es eso lo que cambia el estado del sistema. Todo el experimento podría ser programado por ordenadores y conducido por robots, sin que jamás un ser humano supiera nunca el resultado de las medidas y el efecto sería exactamente el mismo.

También conviene recordar que cuando vemos, miramos u observamos algo, no lo hacemos porque emitamos luz o porque la emita el objeto que miramos (la radiación que emitimos por nuestra temperatura no es visible, salvo en casos especiales como el de un hierro al rojo), sino porque el objeto *refleja* la luz emitida por una fuente de luz, como el Sol o una bombilla. Después de eso (como la luz recorre 300.000 kilómetros en un segundo, apenas pasa tiempo) esa luz llega a mis ojos, y a mi cerebro y yo veo, miro, observo. ¿Alguien podría explicar cómo el hecho de que mis ojos reciban la luz podría cambiar algo sobre el objeto iluminado instantes antes?

En la física cuántica, cuando hablamos alegremente de que el observador modifica la realidad, no nos referimos a esto en absoluto, sino a lo siguiente. Como venimos diciendo, los sistemas físicos regidos por las leyes de la física cuántica pueden estar en situaciones en las que sus propiedades tienen unas ciertas probabilidades de tener distintos valores: por ejemplo, el espín de un electrón puede tener una cierta probabilidad de tomar un valor positivo o un valor negativo. Ahora bien, si realizamos una medida del valor del espín, esa medida nos dará o bien un valor positivo o bien uno negativo, pero no los dos a la vez, y a partir de esa medida, el electrón seguirá con el valor de espín que haya dado la medida. Es decir, si ha salido positivo, ya no hay ninguna probabilidad de que salga negativo. Decimos, en la jerga de los físicos, que la

partícula ha “cambiado de estado”. El hecho de hacer una medida, es decir, de introducir un aparato de medida en el sistema y usarlo, es lo que modifica el estado. Puesto que a las magnitudes físicas, como el espín, se las empezó a llamar con la palabra inglesa *observable* en la jerga de la física cuántica, ahí tienen el origen del malentendido: empezamos a hablar de observar, observadores, etc.

En ocasiones, retorcemos lo anterior usando ejemplos con un electrón y un fotón. Como el fotón es luz, de alguna manera nos sentimos más legitimados para empezar a hablar alegremente de “mirar”, “observar”, etc. Sin embargo, estos ejemplos son extremadamente tramposos: en la vida diaria, lo que llamamos mirar implica a trillones y trillones de fotones y a trillones y trillones de átomos a temperatura ambiente: ahí la física cuántica no desempeña ningún papel, la luz no cambia el estado de los objetos, simplemente se refleja y se absorbe. Ni la luz ni los objetos están en una situación en la que sus propiedades están descritas por probabilidades. En cambio, un solo fotón sí que puede modificar significativamente el estado de un solo electrón... ¡pero eso es independiente de que haya alguien mirando!

Debido a todo lo anterior, en este libro no usaremos a partir de ahora palabras como “observar”, “observador”, etc., cuando nos refiramos a mediciones de magnitudes físicas y aparatos de medida.

La información cuántica no viaja más rápido que la luz

También es muy habitual oír o leer que la mecánica cuántica permite alguna suerte de transmisión instantánea de la información, lo cual violaría los principios de la teoría de la relatividad de Einstein, según la cual ninguna cosa con significado físico puede ser acelerada hasta viajar más rápido que la luz. Sin embargo, eso no es correcto y está relacionado con

explicaciones confusas del entrelazamiento cuántico, fenómeno que explicaremos en los próximos capítulos y que, como tal vez ya sabrá el lector, está en la base de las aplicaciones tecnológicas futuras basadas en la física cuántica.

El entrelazamiento cuántico es una propiedad de los sistemas cuánticos que tienen dos o más partes, por ejemplo, un sistema de dos o más electrones o fotones. El ejemplo más usado y sencillo se hace con sistemas de dos niveles (bits cuánticos o cúbits, del inglés *qubits*). Al igual que las monedas tienen cara y cruz, así también los cúbits pueden estar en dos estados distintos. Por ejemplo, igual que antes, la “cara” y la “cruz” pueden ser un valor positivo y negativo del espín, respectivamente. Ahora bien, resulta que si tomo dos de estos bits cuánticos, puedo preparar situaciones en las que:

- En cada una de las dos monedas tengo igual probabilidad de obtener cara y cruz.
- Sin embargo, una vez que he lanzado una de ellas al aire (es decir, he medido el espín) el resultado de la otra queda determinado. Digamos que si en una he medido cara, ya sé que en la otra tengo cara, y si tengo cruz, ya sé que en la otra tengo cruz. Esto es, sencillamente, la extensión del fenómeno que hemos descrito antes para una sola partícula (cambio de estado tras realizar una medida) a un sistema de más de una partícula.

Esta explicación suele estar aderezada con consideraciones más o menos fantásticas como que esto ocurriría exactamente igual si cada uno de los cúbits estuviera en un extremo del universo (a pesar de que solo hemos hecho experimentos con cúbits separados por menos de 1.500 km) y alusiones a la famosa frase de Einstein sobre “*spooky action at a distance*” (acción fantasmal a distancia).

Sin embargo, si lo analizamos bien, vemos que no es posible transmitir información instantánea. Imaginemos que yo

tengo una de las monedas y la otra la tiene usted. Si me limito a hacer medidas sobre mi cúbit, sin tener jamás ninguna comunicación con usted, es imposible que me haga la más mínima idea de lo que le está pasando a su moneda. En la primera medida obtendré o bien cara o bien cruz. En las siguientes, lo mismo que haya obtenido en la primera. ¿Y qué? ¿Qué me dice esto sobre la moneda de usted? Nada. Para poder obtener información sobre su moneda, necesito saber que:

- Usted y yo compartimos un sistema que ha sido preparado en un estado con la propiedad 1, mencionada más arriba.
- Usted ha “lanzado una moneda al aire”, es decir, ha realizado una medida del espín.

Ahora sí, si conozco a y b puedo saber en qué estado está su moneda, esto es, sin necesidad de que usted me lo diga. Pero claro, para que yo conozca a y b , usted se habrá tenido que comunicar conmigo de alguna manera. Y esa comunicación solo se podrá transmitir a velocidades que son, como mucho, tan rápidas como la de la luz, pero no más (le diga lo que le diga su compañía telefónica).

Esto es solo un ejemplo, pero se puede demostrar con todo rigor y matemáticas que no hay manera de escapar a estas restricciones en la física cuántica (decimos entonces que es una teoría *non-signaling*: las señales no van más deprisa que la luz). El entrelazamiento cuántico es muy útil para realizar cosas muy interesantes que no se pueden hacer con sistemas clásicos, como veremos en los próximos capítulos, pero no sirve para violar uno de los principios de la física mejor establecidos: el hecho de que la información se propaga a velocidad no infinita por el espacio, garantizando que los efectos ocurren después de las causas, y no al mismo tiempo o antes.

No hay universos paralelos

La idea de los universos o mundos paralelos es ya casi un tópico en la cultura popular, sobre todo en la ciencia ficción. Además, suele estar justificada con una vaga alusión a la física cuántica, de manera que hay mucha gente convencida de que “física cuántica” y “universos paralelos” son casi conceptos equivalentes.

En realidad, la idea de muchos mundos solo aparece en la física cuántica como una interpretación, ciertamente exótica y completamente minoritaria, de la teoría. Según esta interpretación, cada vez que se realiza una medición de alguna magnitud en un sistema regido por la física cuántica, se obtiene un resultado determinado en “nuestro universo”, pero el resto de resultados posibles se obtienen en “otros universos”. Es decir, en los ejemplos con cúbits que hemos puesto hasta ahora, cada vez que hemos dicho que hemos medido un valor del espín, querríamos decir (si creyéramos en esta interpretación) que hemos obtenido ese resultado en “nuestro universo”, mientras que el otro resultado posible se obtendría en un hipotético “universo alternativo”. Cada vez que sale cara en nuestro universo, sale cruz en otro.

Esta interpretación nace para solucionar la incomodidad que le produce a algunos físicos el hecho de que en la física cuántica aparezcan probabilidades. De alguna manera, las probabilidades desaparecerían, ya que todas las cosas ocurren..., si contamos todos los universos. No entraremos aquí a discutir si esta interpretación es más o menos interesante para nosotros ni tampoco los problemas evidentes que se plantean, como el número de universos posibles, etc. Lo único que queremos señalar es el hecho de que esto no es más que una interpretación, una manera de entender los resultados, pero es evidente que no tiene demostración experimental posible: por definición, nosotros solo podemos hacer experimentos en este universo (en el caso de que existieran otros).

Por tanto, es completamente irrelevante desde el punto de vista de la física. Quizá por ello es una interpretación tan minoritaria, especialmente entre aquellos que nos dedicamos a la investigación en ciencia y tecnología cuántica.

Conclusiones

Se ha ido extendiendo en la cultura popular una visión más o menos fantástica de la física cuántica, la cual se presenta como una especie de “alternativa” a la física más “convencional” que todos estudiamos en la escuela. Esta alternativa permitiría escapar al aburrido determinismo de la física clásica y se abriría un mundo en el que pasan todo tipo de cosas fascinantes y misteriosas que nadie entendería muy bien (los gatos están vivos y muertos a la vez, las cosas están en dos sitios al mismo tiempo, la información se transmite instantáneamente, etc.). Básicamente todo está permitido, ya que el observador modificaría la realidad, y además estas ideas se podrían aplicar a cualquier sistema físico e incluso a cosas que no tengan nada que ver con la física. Todo esto es mentira.

En realidad, la física cuántica es solo otra parte de la física, perfectamente bien entendida por aquellos que se han dedicado a estudiarla, hasta el punto de que es posible desarrollar nueva tecnología gracias a ella. Esta parte de la física no describe planetas ni manzanas ni poleas, como la de Newton, sino que sirve para analizar sistemas de unas pocas partículas elementales como electrones o fotones, o sistemas de más partículas pero en condiciones especiales de laboratorio (como, por ejemplo, temperaturas extremadamente bajas). Cualquier intento de aplicar las ideas de la física cuántica a otras cosas es, por tanto, una trampa, en muchas ocasiones malintencionada.

En realidad, la física cuántica solo nos sirve para aprender que los objetos físicos que pueden describirse con ella

presentan algunas propiedades distintas de las propiedades a las que estamos acostumbrados. Por ejemplo, hemos de aprender a convivir con probabilidades, ya que la teoría cuántica nos dice que es imposible conocer todas las magnitudes relacionadas con un sistema con total precisión: lo más que podemos saber son las probabilidades de que esas magnitudes tengan unos valores determinados. Sin embargo, esto no quiere decir que todo sea impredecible o que cualquier cosa pueda suceder, ya que tenemos ecuaciones que nos predicen cómo cambian esos valores con el tiempo. Tampoco quiere decir que las cosas estén en dos sitios a la vez o que las propiedades de un sistema tomen varios valores al mismo tiempo.

También hemos de admitir que las probabilidades que describen al sistema cambian cuando realizamos una medida de alguna magnitud física. Esa magnitud, que antes de la medida podía estar descrita por una serie de probabilidades de tomar distintos valores, ahora pasaría a tener un valor bien definido: aquel obtenido en la medida. Si aplicamos esta idea a sistemas con varias partes, eso nos lleva al entrelazamiento cuántico, una propiedad muy interesante que permite hacer cosas que no son posibles fuera de la física cuántica, pero que en ningún caso permite transmitir instantáneamente información, lo cual violaría el principio, bien establecido experimentalmente, de que la información no puede transmitirse a velocidades superiores a la de la luz.

Lo que la física cuántica es

¿Tu verdad? No, la Verdad,
y ven conmigo a buscarla.

La tuya, guárdatela.

ANTONIO MACHADO, *Proverbios y cantares*

El comportamiento de los objetos físicos muy pequeños, tan pequeños como las partículas elementales que están en los átomos (electrones, protones y neutrones, estos dos últimos hechos de cosas aún más pequeñas llamadas quarks) y los fotones que constituyen la luz, es distinto al de las cosas grandes (poleas, planos inclinados, muelles, pelotas y todas esas cosas que aparecen en los libros de física del colegio y el instituto). Estas cosas grandes, “de todos los días”, siguen básicamente las leyes de Newton, como la que dice que la fuerza es igual a la masa por aceleración y toda la física que se deriva de ellas.

Sin embargo, hace ya más de cien años que los físicos se empezaron a dar cuenta de que esas ideas no se podían aplicar sin más a los objetos pequeños. Había fenómenos que no se podían explicar completamente con la física clásica. Uno de ellos lo vemos todos los días y se llama “efecto fotoeléctrico”. Los ascensores suelen tener un mecanismo que regula la apertura y el cierre de la puerta, y que solo funciona si recibe luz. Eso es el efecto fotoeléctrico: cuando la luz ilumina una placa de metal puede arrancar electrones que producen una corriente eléctrica que se puede usar para hacer funcionar algo.

Por eso, cuando la puerta del ascensor se está cerrando pero vemos que la vecina del piso de arriba todavía quiere entrar, en lugar de empezar a golpear botones o abalanzarnos sobre la puerta, lo que hacemos es levantar elegantemente la pierna y ponerla a la altura de la célula fotoeléctrica, lo cual hace que no le llegue luz y, por tanto, que se interrumpa la corriente eléctrica y la puerta deje de cerrarse.

Pues bien, algunas características que se observan en el efecto fotoeléctrico no pueden explicarse correctamente sin acudir a una nueva idea que no estaba presente en la física clásica: la energía que transporta la luz no puede tomar cualquier valor, sino que está distribuida en paquetitos (“cuantos” de energía). Cuánto cabe en cada paquete viene determinado por una propiedad llamada “frecuencia”, que es básicamente el ritmo al que vibra la onda. Como es sabido, la frecuencia de la onda es lo que distingue los distintos tipos de ondas electromagnéticas: luz, ondas de radio, las microondas del horno, los rayos X, los rayos UVA y otras muchas cosas más son solo radiación electromagnética, cada una con su rango de frecuencias, que las caracteriza. Pues bien, esa frecuencia determina también la cantidad de energía que cabe en cada paquetito, que no es otra cosa que la energía que lleva cada fotón: cuanta más frecuencia, más energía en cada paquetito. Pero de esto nos dimos cuenta, o más bien se dio cuenta el gran Albert Einstein en 1905, gracias precisamente a que el efecto fotoeléctrico solo aparece si la luz tiene una frecuencia suficientemente grande. Por debajo de un cierto valor de frecuencia, no hay efecto fotoeléctrico. Esto no se puede explicar razonablemente con la física clásica: uno pensaría que si aumenta la intensidad de la luz (que es básicamente el número de fotones), entonces, como la luz lleva más energía, llegará un momento en que tenga energía suficiente como para que los electrones reciban la energía que necesitan para romper las fuerzas que los ligan a la superficie metálica. Esto sería cierto sin que importara en absoluto el valor concreto de la

frecuencia de la luz. Sin embargo, esto no es lo que vemos en la realidad. Como decimos, solo hay efecto fotoeléctrico a partir de un cierto valor de la frecuencia. Esto se debe, y esta fue la explicación pionera de Einstein, a que es cada uno de los fotones el que tiene que llevar un paquetito de energía suficiente como para que el electrón gane la energía que necesita para escapar del metal. Si no es así, ya puedo hartarme a tirar fotones, pero no conseguiré arrancar ningún electrón.

Esta idea del “cuanto” fue después confirmada por todo tipo de experimentos en infinitud de contextos y de sistemas físicos. En física cuántica (y de ahí viene el nombre) no solo la energía, sino muchas otras magnitudes importantes están “cuantizadas”: no pueden tomar cualquier valor, ya que se distribuyen por paquetes llamados “cuantos”. Así que uno puede tener un cuanto, dos cuantos, tres cuantos..., pero ningún valor entre un cuanto y dos cuantos, o entre dos y tres.

A partir de esta explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico y las dadas por los grandes físicos de la primera mitad del siglo XX a otros fenómenos que no encontraban fácil acomodo en la física clásica, se fue comprendiendo que la física de los objetos muy pequeños necesitaba de un conjunto de nuevas ideas, que se fue denominando física cuántica. Como la física se hace con matemáticas, las nuevas ideas necesitaban también de matemáticas distintas. Pero usar matemáticas distintas puede llevar también a hacer nuevas predicciones. Digamos que para explicar esta nueva propiedad (por ejemplo, que la energía esté dividida en cuantos) parece que es más útil usar este nuevo objeto matemático para describir a las partículas. Pero si eso es cierto, las partículas también deberían tener esta otra propiedad que tiene este nuevo objeto matemático, y que todavía no hemos visto en las partículas. Hagamos un nuevo experimento para verlo. Todas estas ideas, así como las predicciones a las que daban lugar, se han ido confirmando experimentalmente durante estos últimos cien años con una precisión asombrosa en una variedad

enorme de sistemas físicos. Veamos algunas de estas características básicas con más detalle.

Incertidumbre

En la física clásica que usamos fundamentalmente en nuestra vida cotidiana, las propiedades de los objetos toman valores definidos con total precisión. No nos produce ningún problema decir, si nos lo pregunta el médico, que medimos un metro y ochenta centímetros y pesamos 65 kilos. En realidad, esto no es del todo cierto, y sería mucho más correcto si dijéramos el margen de error que tiene cada medida. Si he usado un metro o una regla para medirme, es probable que solo sepa que estoy en algún lugar entre un metro y 79 centímetros y un metro y 81 centímetros. Lo mismo ocurre si he usado unas de esas balanzas digitales de las farmacias, que también te dicen tu altura. Si el peso es 65 kg quiere decir que la siguiente lectura posible es 65,1 kg y, por tanto, no hay manera de discernir si mi peso es 65,02 o 65,08 kg. Todos los aparatos de medida tienen un margen de error.

En la física clásica tendemos a pensar que esto es simplemente una cuestión técnica: siempre puedo pensar en mecanismos de medida que sean cada vez más precisos, y esos mecanismos podrán hacerse realidad siempre que alguien tenga interés y dinero suficiente como para llevarlos a cabo. Si existe algún límite a esto, este es completamente irrelevante: ¿a quién le importa si mido 1,80000000 o 1,80000001 metros? En ninguno de los dos casos me ficharán los Lakers.

En la física cuántica, la cuestión es distinta. Por más perfecto, sofisticado y caro que sea el aparato de medida, hay unos límites para la precisión con que se puede conocer el valor de una magnitud física. Por ejemplo, cuanto más precisión tenga en el valor de la posición, menos tendré en el de la velocidad. Puedo conseguir precisión absoluta (ningún error)

en la posición, pero al precio de tener completa imprecisión (error infinito) en la velocidad. Lo mismo pasa con otros pares de magnitudes físicas, como el tiempo y la energía. Esto es conocido como el principio de incertidumbre y fue enunciado por primera vez por Werner Heisenberg.

Al contrario de lo que sucede en la física clásica, el tamaño de esos errores es comparable al de las cosas que quiero medir, y por tanto no puedo ignorarlo. Tengo que asumir que las cosas no tienen, en general, valores bien definidos.

Funciones, no números

Si hay incertidumbre, y esa incertidumbre no se debe a errores en los aparatos de medida, sino que es algo más fundamental, parece que deja de tener sentido usar simplemente números para describir las cosas. En la física clásica suelo usar números para hablar de los sistemas físicos: “Carlos está en la posición 0, son las 14:26, mide un metro y 80 centímetros y pesa 65 kg”. Puedo dar los márgenes de error de todo eso si lo deseo, pero sabiendo que en realidad solo están relacionados con mi incapacidad técnica, debida a los aparatos que manejo, y no con ninguna característica del sistema (Carlos) que trato de describir. En ocasiones, cuando además de querer saber cuánto vale algo, necesitamos saber también hacia dónde apunta (como, por ejemplo, una velocidad y una aceleración), usamos vectores, unas flechitas que contienen dos informaciones relevantes: un número (lo que mide la flecha) y una dirección y sentido (hacia donde apunta la flecha). Esas flechitas quedan perfectamente descritas con tres números, uno por cada dimensión del espacio.

Pero cuando la incertidumbre es tan grande y tan importante como en la física cuántica, parece que los números no me darán una descripción útil de los sistemas físicos. Si hay una probabilidad del 50% de que Carlos esté en la posición 0, del

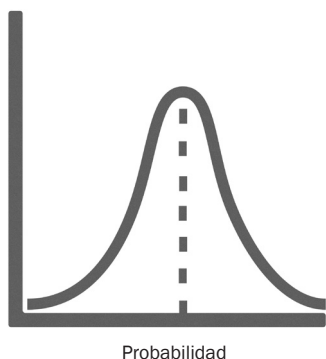
30% de estar en la posición 1 y del 20% de estar en la posición 2, ¿tiene sentido dar un número para la posición de Carlos? ¿Cuál? ¿El 0, el 1, el 2... o cualquier otro? Parece que tendrá más sentido tener alguna otra cosa que sea capaz de dar razón de ese conjunto de probabilidades. Bien, ese objeto es la “función de onda”.

Las funciones no son números, sino que son reglas que transforman números en otros números. Por ejemplo, una de esas reglas puede ser: “coja cada posición x del espacio y súmele 3”. Otras podrían ser “y réstele 100, “y multiplique por 1.000”; o “vale 0 en todas partes, menos justo en el centro donde vale 1”. Parece, por tanto, que para dar cuenta de las probabilidades de la física cuántica puede ser muy útil una función, una regla que a cada punto sea capaz de darme una probabilidad de obtener algún resultado.

Así ocurre también con las ondas: la forma de la onda que hace una piedra en un estanque puede describirse con una función que, en este caso, me dirá: tal punto se ha levantado ligeramente respecto a la superficie, tal otro punto está más abajo y tal otro está como si nada. La función de la onda será una regla que, en cada instante de tiempo, es capaz de decirme el perfil de la onda, es decir, cuánto se ha desplazado cada punto del agua respecto a su posición normal.

Desde antes de la física cuántica es bien conocido que hay muchos fenómenos en la naturaleza que son ondas y que, por tanto, están bien descritos por funciones de onda: la luz, las cuerdas de una guitarra... En cambio, otras muchas cosas (poleas, manzanas, pelotas, planetas, Carlos) de la física clásica no lo son, y de alguna manera se esperaba que el comportamiento de las partículas elementales (electrones, fotones) fuera como el de esa física pero en pequeñito. Pero la física cuántica nos enseña que eso no es así: para poder describir correctamente a las partículas elementales necesitamos las funciones de onda. Un ejemplo bastante

realista de función de onda lo podemos ver en la siguiente figura:



Como vemos, la probabilidad tiene un punto en el que alcanza el valor más alto, y va disminuyendo cuando nos alejamos de ese punto.

Ondas y partículas

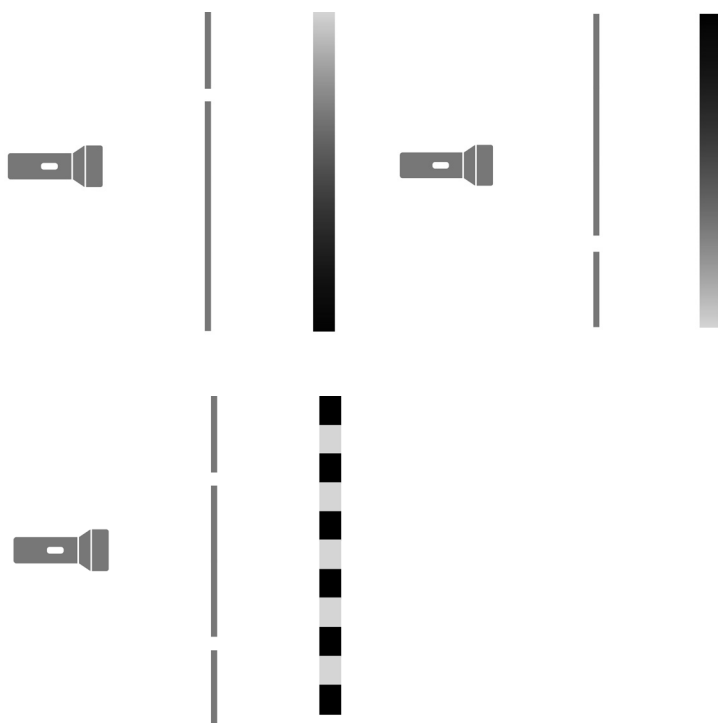
Las ondas tienen propiedades distintas a las que tienen los sistemas que en física clásica se suelen llamar “partículas”. Así, por ejemplo, cuando dos ondas distintas se encuentran en el mismo punto del espacio, no todas las características de la onda que se forma se obtienen sumando simplemente las de las ondas por separado. Por ejemplo, dos ondas luminosas que coincidan en el mismo punto pueden dar lugar tanto a una luz mucho más intensa que la suma de las dos ondas por separado, o incluso a que no se vea luz en absoluto. Esto es así porque la intensidad de la luz, es decir, la “cantidad de luz” que vemos, no viene dada por la función de onda sin más, sino por el cuadrado de la función de onda. La función de onda de la onda total sí que es la suma

de las funciones de onda originales, pero el cuadrado de una suma no es igual a la suma de los cuadrados, sino que hay un término más (dos veces el producto de los dos términos). Al ser el producto de dos cosas que pueden ser negativas o positivas (el valor de la función de onda en un punto concreto puede ser positivo o negativo), ese término extra puede ser positivo o negativo. Por tanto, la intensidad de la onda total puede ser mayor o menor que la suma de las intensidades de las ondas por separado, pudiendo llegar a ser 0. Esto da lugar a los fenómenos de interferencia y difracción, característicos de las ondas.

Así, por ejemplo, cuando la luz pasa por dos pequeñas rendijas que están cerca la una de la otra (una distancia que sea similar a la longitud de la onda), el resultado en una pared que estuviera detrás de las rendijas no es exactamente la suma de la luz que pasaría por cada una de las dos rendijas si solo uno de ellas estuviera abierta y la otra tapada. Debido a la interferencia, aparecerán lugares donde habría luz si solo una rendija estuviera abierta, pero donde no la hay con las dos rendijas, y también lugares en que habría mucha más luz cuando las dos rendijas estuvieran abiertas que la suma de la luz que veríamos cuando cada una de las rendijas estuviera abierta por separado. Hemos ilustrado las diferencias con las figuras de la página siguiente.

En las dos imágenes superiores comprobamos lo que sucede cuando solo una rendija está abierta: en ambos casos vemos muy iluminada una parte (la superior en el primer caso y la inferior en el segundo) y progresivamente menos iluminado el resto, hasta llegar a una región de oscuridad absoluta (la parte inferior en el primer caso, y la superior en el segundo). Si sumáramos sin más estas dos situaciones, veríamos muy iluminados los extremos y más oscuro (aunque no completamente) el centro. Sin embargo, lo que se observa cuando abrimos las dos rendijas es algo parecido a lo que hemos representado en la última

figura: un patrón alternante entre oscuridad total e iluminación total, al que se conoce como patrón de interferencia.



El experimento de la doble rendija con luz ilustra de manera muy bonita los fenómenos característicos de las ondas. Naturalmente, si hacemos el experimento con algo que no sea una onda, no veremos nada parecido. Si una “partícula” consigue pasar por una de las rendijas, es de esperar que cuando estén las dos rendijas abiertas, el resultado sea exactamente la suma de lo que veríamos en los dos experimentos separados con una sola rendija abierta.

Sin embargo, ya hemos visto que una de las enseñanzas fundamentales de la física cuántica es que las partículas

elementales, como por ejemplo los electrones, están descritas necesariamente por una función de onda. Por tanto, en realidad lo que vemos en un experimento de “doble rendija” cuando enviamos electrones uno a uno es exactamente lo mismo que vemos si enviamos luz: después de haber mandado muchos electrones y registrado su posición de llegada tendremos sitios en los que habrá mucho más electrones que los dados por la suma de los dos experimentos de “una rendija”, y también otros lugares a los que no llega un solo electrón, a pesar de que sí llegaban cuando solo había una rendija abierta.

Entonces, efectivamente el electrón no se comporta como esperaríamos de una cosa a la que llamamos “partícula” en nuestra vida diaria, pero ¿por qué habría de hacerlo? Los electrones no tienen que ser como nosotros pero en pequeño. ¿Quiere decir esto que son ondas? ¿Mitad partícula y mitad onda? ¿Ni ondas ni partículas? ¿Y qué más da? Son electrones. Como decíamos en la introducción, no nos preocupa saber si los hipopótamos son cerdos o caballos, porque ¡son hipopótamos! Así que lo mismo pasa con los electrones: no son ni partículas ni ondas, son electrones.

Sumas de ondas

Acabamos de ver que cuando dos ondas se encuentran en el espacio forman una nueva onda que es la suma de las dos ondas originales. Más concretamente, si 0 y 1 representaran las ondas iniciales, la nueva onda vendría dada por

$$a + b$$

donde a y b nos dan una idea de cuál es la onda inicial que contribuye más a la onda total. De alguna manera, si la onda

0 es más intensa que la 1, es de esperar que el número a sea más grande que b y viceversa. Como no todas las propiedades de las ondas dependen directamente de su función de onda, sino de su cuadrado, hemos visto que eso da lugar a fenómenos interesantes, llamados de interferencia.

En física cuántica, puesto que todo está descrito por funciones de onda, las interferencias no se limitan solo al espacio, sino que afectan a todas las propiedades de todos los sistemas cuánticos. Es decir, lo expresado en el párrafo anterior no solo es cierto si 0 y 1 representan dos ondas determinadas en el espacio, sino que 0 y 1 pueden ser las funciones de onda asociadas a cualquier otra cosa. Por ejemplo, 0 y 1 podrían ser las funciones de onda de un sistema cuando tiene energías distintas, asociadas a los estados 0 y 1, respectivamente. Es decir, el sistema (digamos, un electrón) tendría una función de onda 0 cuando tiene una energía 0, y una función de onda 1 cuando tiene una energía 1. El hecho de que las funciones de onda y no los números describan el sistema inmediatamente implica que, además de las funciones de onda 0 y 1, “tienen que existir” todos los estados de tipo

$$a \cdot 0 + b \cdot 1.$$

En otras palabras (más matemáticas): como la ecuación de Schrödinger (al contrario que las leyes de Newton) es una ecuación de ondas, todas las soluciones de tipo $a \cdot 0 + b \cdot 1$ son soluciones de la ecuación de Schrödinger y son, por tanto, posibles situaciones en las que se puede encontrar el electrón. Esto implica, entre otras cosas, que habrá interferencias entre las funciones de onda 0 y 1. ¿Cuál será la energía en ese caso? ¿0? ¿1? ¿0 y 1 a la vez? ¿Ni 0 ni 1? ¡Nada de eso! Es exactamente lo mismo que preguntarse si el electrón es onda o partícula.

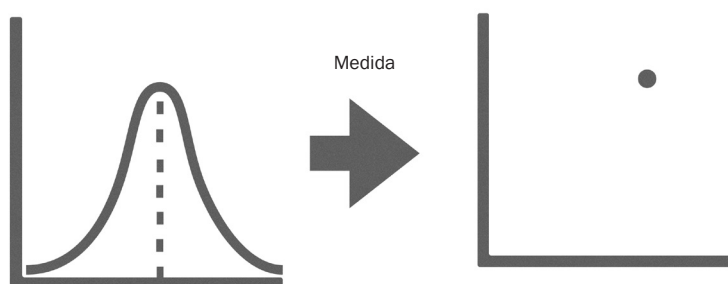
La respuesta es que la energía del electrón no está bien definida. Hay una probabilidad, dada por el cuadrado de a , de

que el electrón tenga energía 0, y una probabilidad, dada por el cuadrado de b , de que un electrón tenga energía 1 (en realidad, hay una sutileza matemática que omitiremos: cuando decimos el cuadrado, en realidad, hay que entender “el módulo al cuadrado”, debido a que a y b , de hecho, pertenecen a un tipo especial de números, llamados “números complejos”. Sin embargo, podemos olvidarnos de esta sutileza a efectos prácticos en este libro).

Si realizamos una medida de la energía del electrón, es decir, si disponemos de un aparato que es capaz de determinar la energía, ¿cuál será el resultado? Pues bien, será a veces 0 y a veces 1: no nos dará un resultado intermedio o híbrido, del estilo de “0 y 1 a la vez”. No, o 0 o 1. Solo que no podremos saber con certeza si va a salir 0 o 1, ya que jugarán su papel los cuadrados de a y b . Por ejemplo, si preparamos 10 sistemas de la misma manera, de tal forma que sabemos que su función de onda es $a + b1$, entonces obtendremos que en unas cuantas copias el resultado es 0 y en otras el resultado es 1, según lo que valgan los cuadrados de a y de b . Por ejemplo, si los cuadrados son exactamente iguales a 0,5 (probabilidad del 50%) obtendremos 5 copias con energía 0 y otras 5 con energía 1. Una vez que hemos hecho la medida, sí tiene sentido preguntarse cuánto vale la energía del sistema, ya que ahora el sistema sí tiene energía bien definida: en aquellas copias en las que el aparato de medida me diga 0, entonces la función de onda del sistema será la correspondiente a energía 0, de manera que si ahora vuelvo a hacer una medida obtendré con toda certeza 0. Y lo mismo, pero cambiando energía 0 por energía 1, para aquellas copias en que el resultado de la medida de la energía fue 1.

Para ilustrar lo que ocurre cuando realizamos una medida podemos fijarnos en la siguiente figura, en la que imaginamos que lo que se mide es la posición. La función de onda pasa de tener el aspecto que tenía en la primera figura de este capítulo, a ser tan solo un punto: la partícula tiene una

probabilidad del 100% de encontrarse en ese punto del espacio tras la medida.



Efecto túnel cuántico

Un ejemplo interesante de las consecuencias del carácter ondulatorio de la física cuántica es el llamado “efecto túnel cuántico”.

En la física clásica sabemos lo que ocurre cuando lanzamos un objeto grande (digamos, una pelota) contra una pared. La pelota tiene una energía que es directamente proporcional a la velocidad que hayamos sido capaces de darle: cuanto más grande sea esa velocidad, más grande será la energía. Por su parte, la pared, aunque nuestros ojos la ven como una cosa continua, está compuesta de montones y montones de moléculas, unidas por fuerzas que las mantienen aproximadamente en sus posiciones fijas. Para atravesar esa estructura tendría que comunicar una energía suficiente para liberar las moléculas de la pared de esas fuerzas. Así que la cuestión es bastante sencilla: si la pelota tiene una velocidad suficientemente alta como para que su energía sea mayor que la energía asociada a las fuerzas que mantienen unidas las moléculas, la pelota podrá cruzar la pared (al precio de romperla, muy probablemente). En caso contrario, la pelota rebotará.

En la física cuántica, una partícula puede tener menos energía que “una pared” (el equivalente a una pared en una escala donde rija la física cuántica) y, sin embargo, tener una cierta probabilidad de atravesarla. Como sabemos, las partículas cuánticas están descritas por una función de onda. La ecuación de Schrödinger nos dice que cuando una función de onda se encuentra una de estas “paredes” (una región del espacio con energía superior a la energía de la partícula), el resultado es que una parte de la función de onda puede rebotar en la pared y otra parte atravesarla. Esta segunda parte se va haciendo más pequeña a medida que entramos en la región del espacio ocupada por la pared. Es decir, que si el “grosor de la pared” es muy grande, la función de onda (y, por tanto, la probabilidad de encontrar la partícula en la región en la que está la pared) se hará 0 “dentro de la pared” (es decir, antes de haber conseguido atravesar toda la región). Pero si el grosor es lo suficientemente pequeño, la función de onda podría no llegar a 0, de manera que la partícula tendría una probabilidad de atravesar completamente la pared. Este efecto túnel cuántico puede experimentarse en muchos sistemas cuánticos en el laboratorio y está relacionado con aplicaciones tecnológicas, como veremos en el siguiente capítulo.

Ondas en sistemas de varias partículas

Hasta ahora hemos visto que las funciones de onda son necesarias para describir partículas elementales, como los electrones, lo que da lugar a propiedades que no tendrían si estuvieran descritas, como en la física de Newton, por números. Ahora veamos qué ocurre si, en lugar de tener una sola partícula, tenemos varias, digamos, por ejemplo, dos electrones. Inmediatamente nos encontramos con que

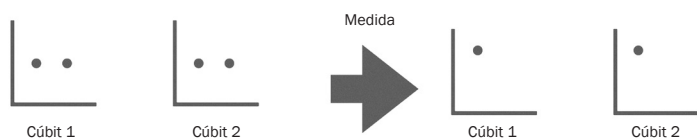
hemos de admitir no solo funciones de onda del estilo 00 o 11, donde los dos electrones tienen la función de onda 0 o 1, respectivamente, o funciones de onda del tipo 01, donde el primero tiene la función de onda 0 y el segundo la función de onda 1, sino también funciones de onda del tipo

$$a\ 00 + b\ 11.$$

Igual que en el caso de una única partícula, esto es consecuencia directa de que la ecuación de Schrödinger es una ecuación cuyas soluciones son ondas y no meros números.

Fijémonos entonces en que la energía (o cualquier otra propiedad física que estuviera asociada a las funciones de onda 0 y 1) no está bien definida para ninguna de las dos partículas. En los dos casos hay una probabilidad de estar en 0 dada por el cuadrado de a , y una probabilidad de estar en 1 dada por el cuadrado de b .

La situación cambia si hacemos cualquier medida: si en cualquiera de los dos electrones medimos y obtenemos 0, entonces la función de onda pasa a ser 00, de manera que, por tanto, la función de onda del electrón que no he medido es la 0, y de esta manera sé con certeza que el electrón que no he medido tiene una energía bien definida y es 0. Y lo mismo ocurre, pero cambiando 0 por 1, si en cualquiera de los dos electrones medimos y obtenemos 1. A estas correlaciones entre los resultados de medidas en sistemas de varias partes se les llama “entrelazamiento cuántico” y están en el origen tanto de interesantes propiedades teóricas de la física cuántica como de las aplicaciones tecnológicas modernas. En la figura vemos un esquema de cómo cambiarían las funciones de onda de los cúbits después de una medida, pasando de tener una misma probabilidad para dos valores distintos a una probabilidad absoluta de tener un solo valor.



El lector despierto no encontrará nada demasiado interesante en la descripción anterior: en realidad, no es difícil imaginar situaciones que no requieren de la física cuántica para exhibir propiedades parecidas. Imaginemos que escribimos una serie de ceros y unos en unos papelitos, y luego los metemos todos en dos bolsas opacas e idénticas en apariencia, de tal manera que en una bolsa están todos los ceros y en otra todos los unos. Si ahora alguien me presenta las dos bolsas y me explica su contenido, pero no me dice cuál es la de los ceros y cuál la de los unos, yo me encontraría en una situación igual a la anterior: si meto una mano en una bolsa tengo una cierta probabilidad de encontrar ceros y una cierta probabilidad de encontrar unos, pero una vez que he sacado uno de los papelitos, ya puedo saber con certeza lo que hay en la bolsa que no he abierto. Si he sacado un cero ya tengo claro que la otra bolsa está llena de unos, sin necesidad de abrirla.

¿Cuál es el verdadero interés entonces del entrelazamiento cuántico? En realidad, lo que realmente distingue al entrelazamiento cuántico es algo mucho más sutil. En mecánica cuántica, yo puedo girar los aparatos de medida, de tal manera que puedo medir no solo una magnitud física, sino la “componente” de esa magnitud en cualquier dirección del espacio (piensen en las componentes x , y , z de un vector). Pues bien, lo que nos dice la física cuántica es que, cuando aparece entrelazamiento cuántico en una dirección determinada, también habrá entrelazamiento cuántico en cualquier dirección del espacio, independientemente de cómo giren los aparatos de medida. Esta característica es

imposible de reproducir sin usar la física cuántica, y es la que realmente distingue a las correlaciones cuánticas de las clásicas. Ya me hago cargo de que esto resulta un poco menos oscuro y “fascinante” que todo lo que se suele decir sobre partículas que están en extremos opuestos del universo y de alguna manera “sienten” lo que le ocurre a su compañera, y otros disparates semejantes y tristemente habituales, pero, en cambio, tiene la ventaja de ser cierto.

Si al lector le parece que esta descripción es demasiado oscura, tal vez encuentre mayor interés en saber que el entrelazamiento cuántico permite que se puedan hacer cosas que serían imposibles en sistemas clásicos, como, por ejemplo, el llamado “teletransporte” cuántico, que explicaré con más detalle en el próximo apartado. Pero antes de eso conviene insistir en que el entrelazamiento cuántico no permite ninguna suerte de transmisión de información instantánea o más rápida que la velocidad de la luz. ¿Cómo es posible que diga esto? ¿No es cierto que cuando hago una medida en uno de los electrones conozco inmediatamente la función de onda del otro? ¿No es eso transmisión de información? Y puesto que el otro electrón puede estar muy lejos (¡en el otro confin del universo!) y yo puedo hacer la medida de manera casi instantánea, ¿no habrá una transmisión de información a una velocidad arbitrariamente alta, no limitada por la velocidad de la luz? La respuesta es no.

En primer lugar, piensen en las bolsas del ejemplo anterior. Cuando saco un papelito de una bolsa y ya sé lo que esconde la otra bolsa, que tal vez esté lejísimos, ¿también hay transmisión de información a velocidad infinita? Es decir, ¿estoy violando la relatividad especial de Einstein con un par de bolsas y unos papelitos? En realidad, no. Tanto en el caso de las bolsas como en el de los electrones, para obtener alguna información del sistema necesito saber cómo ha sido preparado: es decir, los electrones tienen una función de onda de tipo

o las bolsas son tales que una tiene todos los ceros y la otra todos los unos. Además necesito saber que lo único que le ocurre al sistema desde que fue preparado es solo lo que yo hago: sacar un papel de la bolsa o medir una propiedad física del electrón (y en una dirección del espacio determinada). Porque, en realidad, si la otra bolsa o el otro electrón están en Murcia, Melbourne o en el otro extremo de la Vía Láctea, ¿cómo puedo estar seguro de que la situación no ha cambiado (por ejemplo, alguien ha vaciado la bolsa o metido otros papelitos, o ha medido alguna propiedad física de ese electrón)? Sin toda esa información, no tengo nada: simplemente sacaré un numerito de la bolsa u obtendré un valor determinado de una propiedad de mi electrón, pero no podré averiguar nada sobre la otra parte. Pero, evidentemente, para obtener esa información tiene que haber comunicación entre las partes, y esa comunicación, por muy sofisticada que sea la tecnología que utilicemos, tendrá que ocurrir a velocidades más bajas que la de la luz.

Por último, tengo malas noticias para todo aquel lector que se haya sentido incómodo con el hecho de que en la física cuántica las propiedades no estén bien definidas si no se hacen medidas. El entrelazamiento cuántico es la demostración definitiva de que eso no es así: se puede demostrar que cualquier teoría en la que uno insista en que las propiedades físicas están bien definidas antes de realizar una medida y en la que además la información se propague a velocidades nunca superiores a las de la luz (como sabemos que ocurre), da lugar a unas predicciones experimentales distintas a las de la física cuántica cuando se usan estados entrelazados. Son las famosas “desigualdades de Bell”, que cumplirían cualquier teoría con las propiedades anteriores, pero serían violadas por la física cuántica. Pues bien, decenas de experimentos han medido la violación de las

desigualdades de Bell en el laboratorio. Esto no solo quiere decir que la física cuántica es correcta, sino que el hecho de que las propiedades de los sistemas físicos no estén, en general, bien definidas hasta que son medidos es una característica de la naturaleza.

‘Teletransporte’ cuántico

Hemos visto en el apartado anterior que el entrelazamiento cuántico no es tan fascinante o misterioso como a menudo se afirma, y desde luego no sirve para escapar a principios físicos tan bien establecidos como el hecho de que nada físico pueda viajar a velocidades superiores a la de la luz. Sin embargo, lo que sí es cierto es que las propiedades de la física cuántica, como el entrelazamiento, pueden usarse para hacer cosas que no son posibles con un sistema no cuántico. Y es por ello precisamente por lo que pueden dar lugar a nuevas tecnologías. Un ejemplo muy interesante desde el punto de vista teórico es el llamado teletransporte cuántico.

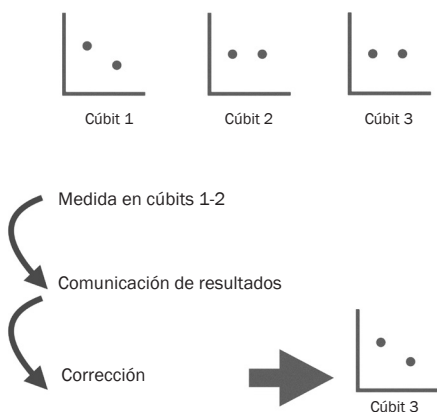
El teletransporte cuántico no tiene absolutamente nada que ver con el concepto habitual que aparece en la ciencia ficción y en la cultura popular, como por ejemplo en la película *La mosca*, de David Cronenberg, donde un hombre crea una máquina que desintegra a las personas y las reconstruye en otro lugar. En realidad, en el teletransporte cuántico se trata de que la función de onda de una partícula se transfiere a otra partícula distinta (ya existente anteriormente) sin necesidad de conocerla previamente.

Para el teletransporte cuántico necesitamos al menos tres partículas, digamos tres electrones. Uno de ellos tiene una función de onda del tipo

$$a|0\rangle + b|1\rangle,$$

pero nosotros no conocemos ni a ni b. Las otras dos han sido preparadas con una función de onda del tipo de la sección anterior, con entrelazamiento máximo. Una parte de este par entrelazado está en el mismo lugar que la primera partícula, pero la otra parte puede estar en cualquier otro lugar. Es a esta última a la que queremos transferir la función de onda de la primera partícula. Para ello, basta con realizar una serie de medidas sobre las otras dos partículas (las dos que se encuentran en el mismo lugar). La física cuántica nos garantiza que, si hemos seguido estos pasos, o bien la función de onda de la tercera partícula ha sido modificada de tal manera que ya es directamente la misma que la de la primera partícula o bien basta con realizar unas correcciones para obtenerla. Esto último depende de los resultados que se hayan obtenido en las medidas de las dos primeras partículas: dependiendo de lo que se haya obtenido, la tercera partícula puede estar ya en la situación deseada, en cuyo caso no hay que hacer corrección, o puede que tenga una función de onda distinta pero fácilmente modificable para que se convierta en la deseada. Fijese el lector o lectora que todo esto se hace sin que en ningún momento nadie sepa los valores de a y b. Sin embargo, esto requiere alguna comunicación entre las partes, ya que es preciso que la segunda parte conozca el resultado de las medidas para saber si tiene que realizar alguna corrección y, en su caso, cuál es la corrección que tiene que realizar. Por tanto, debido a esto último, la transmisión de información a velocidad más rápida que la de la luz está descartada. Pero eso no quiere decir que no estemos ante algo interesante, ya que este tipo de teletransporte es imposible de realizar por un sistema clásico. ¿Cómo si no podríamos transferir las propiedades de un sistema a otro distinto sin conocer nunca dichas propiedades? La única manera es usar el entrelazamiento cuántico.

Resumimos el protocolo de teletransporte cuántico en el siguiente esquema:



Vemos una vez más que la física cuántica no nos permite hacer magia ni violar principios físicos bien establecidos, pero sí nos permite realizar cosas que van más allá de las capacidades de los sistemas convencionales que no usan física cuántica. Esa es la lógica subyacente a todas las tecnologías que explicaremos con detalle en el próximo capítulo: aprovechar las propiedades de la física cuántica para hacer cosas que la tecnología convencional no puede hacer.

Conclusiones

¿Cuáles son las características fundamentales de la física cuántica? A la luz de todo lo anterior, quizá la principal característica sea el hecho de que las propiedades de las cosas no toman valores completamente definidos, hasta que un aparato de medida realiza una medición y las define. Esa propiedad, que como hemos visto es una consecuencia del hecho de que necesitamos usar ondas para describir los sistemas cuánticos, parece ser la auténtica raíz de las propiedades llamativas de la física cuántica y de sus posibles aplicaciones tecnológicas.

Por tanto, digámoslo una vez más: en la física cuántica los objetos (normalmente unas pocas partículas, como electrones, fotones, etc.) no tienen propiedades descritas por números, sino por funciones de onda. Estas nos dan las probabilidades de que esas propiedades tomen distintos valores. Por ello, las propiedades físicas, como, por ejemplo, la posición y la energía, no están, en general, bien definidas. Lejos de ser un problema, esta característica de la física cuántica es la responsable de que aparezcan, por ejemplo, fenómenos como el entrelazamiento cuántico: correlaciones entre distintos objetos que son imposibles de alcanzar fuera de la física cuántica. Vemos, por tanto, que la física cuántica da lugar a fenómenos ausentes en la física clásica: hemos analizado en detalle el caso del teletransporte cuántico. En el próximo capítulo iremos más allá de la curiosidad teórica, para mostrar que estas características genuinamente cuánticas pueden dar lugar a nuevas tecnologías con capacidades superiores a las convencionales.

En un cierto sentido, ya hace mucho tiempo que existen tecnologías cuánticas de uso cotidiano. Anteriormente hemos hablado de las células fotoeléctricas de los ascensores. Otro buen ejemplo sería un láser: un haz de luz con propiedades especiales que se deben al hecho de que son emitidas por átomos. Muchas otras tecnologías del siglo XX se derivaron en mayor o menor medida del conocimiento y control de sistemas de física atómica, molecular o nuclear. Para entender y describir correctamente esos sistemas es necesario recurrir al menos a algunas ideas de la física cuántica. Sin embargo, el carácter cuántico de esas tecnologías del siglo XX está oculto “en las tripas” de la tecnología, bajo varias capas de carácter “no cuántico”, es decir, clásico. El haz de luz láser o la corriente eléctrica generada en el efecto fotoeléctrico están formadas por muchísimas partículas a temperatura ambiente y su comportamiento se puede describir y explicar por la teoría clásica de la electricidad y el electromagnetismo, sin ninguna necesidad de recurrir a la teoría cuántica. En otras palabras, el haz de luz láser o la corriente eléctrica del efecto fotoeléctrico no se encuentran en estados en los que las propiedades no estén bien definidas o en los que aparezca entrelazamiento

cuántico. A estas tecnologías del siglo XX se las ha llamado, en ocasiones, 1.0, en oposición a las 2.0, que serían las modernas tecnologías cuánticas que nos ocupan en este libro.

En la nueva generación de tecnologías cuánticas, el carácter cuántico no está escondido en las “tripas”, sino que es la base de su funcionamiento. No hay manera de describir la manera en que operan sin hablar de propiedades genuinamente cuánticas, como el entrelazamiento o la indefinición de las propiedades físicas. De hecho, son esas características las que hacen que estas tecnologías puedan superar a las correspondientes tecnologías clásicas ya existentes: por ejemplo, un ordenador cuántico respecto a un ordenador clásico.

Las nuevas tecnologías cuánticas surgen de ideas teóricas que aparecieron fundamentalmente en los años ochenta y noventa del siglo XX, cuando se empezaron a estudiar las posibilidades interesantes que las nuevas propiedades (como el entrelazamiento cuántico, que empezaba a dejar de ser considerada como una mera curiosidad o incluso una anomalía, para consolidarse como una característica esencial de la naturaleza) ofrecían para realizar tareas imposibles para los medios convencionales, entonces principalmente en el área de las comunicaciones y la información. Por ejemplo, el teletransporte cuántico se descubre en un artículo teórico del año 1993, y el primer experimento que lo demuestra es del año 1997. Sin embargo, durante muchos años casi toda la comunidad científica, incluyendo a la mayoría de los expertos de este campo, vieron estos resultados como cosas muy interesantes desde el punto de vista teórico, pero que no llevarían a aplicaciones tecnológicas en el corto o medio plazo, con la posible excepción de la criptografía cuántica.

La situación ha cambiado radicalmente en esta segunda década del siglo XXI. De pronto, los gobiernos más importantes y las más grandes empresas del mundo están invirtiendo ingentes cantidades de dinero y talento en acelerar el desarrollo de las tecnologías cuánticas y, en concreto, su transición

al mercado desde las pizarras y los laboratorios donde se encontraban hasta ahora. Como consecuencia, el horizonte del advenimiento de una “segunda revolución cuántica” de tecnologías parece cada vez más cercano. Acompañando el impulso de gobiernos y grandes compañías, un número importante de empresas emergentes (*start-ups*), en su mayoría fundadas y formadas por investigadores de universidades e institutos de investigación (que a menudo compatibilizan ambos trabajos, pero en ocasiones abandonan sus antiguas instituciones académicas), han surgido de la nada para animar aún más el desarrollo de nuevas ideas en esta área.

En este capítulo describiremos las ideas básicas que están detrás del funcionamiento de las tecnologías cuánticas más relevantes, y al mismo tiempo intentaremos dar una idea realista de su grado de desarrollo actual y sus perspectivas para el futuro próximo. Para ello, tendremos que distinguir los distintos tipos de tecnologías cuánticas más relevantes en la actualidad:

- *Computación cuántica*: describiremos las distintas propuestas teóricas de ordenadores cuánticos y las realizaciones tecnológicas, ya existentes, de esas propuestas. Tendremos que distinguir entre computación cuántica universal y no universal, lo cual nos llevará al concepto de simulación cuántica, donde a su vez habrá que señalar la diferencia entre simulación cuántica analógica y digital. También será preciso diferenciar entre los distintos modelos de computación cuántica (por ejemplo, computación cuántica adiabática).
- *Criptografía cuántica*: veremos que es posible usar la física cuántica para incrementar la seguridad en nuestras comunicaciones, que podrían estar en riesgo en el futuro, precisamente por el desarrollo de la computación cuántica, entre otros motivos.
- *Comunicaciones cuánticas e información cuántica*: analizaremos las perspectivas y la situación actual de una

posible red de comunicaciones basada completamente en la física cuántica, lo que permitiría usar a escala global las ventajas de las tecnologías analizadas en los dos puntos anteriores: ordenadores cuánticos y criptografía cuántica.

- *Sensores y aparatos de medida cuánticos*: finalmente describiremos la posibilidad de usar la física cuántica para realizar medidas y detectar fenómenos de manera más precisa que con las tecnologías convencionales actuales.

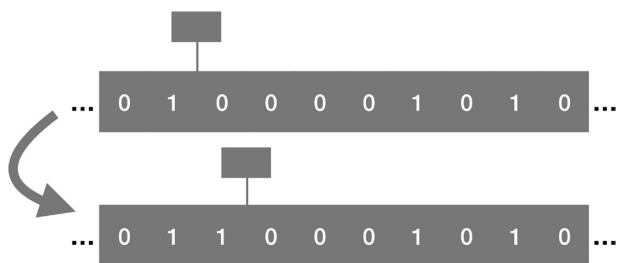
Ordenadores cuánticos

Empezaremos este apartado con el concepto de máquina de Turing, descubierto por el gran científico británico Alan Turing, que nos permite relacionar de manera sencilla nuestros ordenadores clásicos actuales con los nuevos ordenadores cuánticos.

Máquinas de Turing cuánticas

El concepto de máquina de Turing es un modelo que nos permite entender el funcionamiento de cualquier ordenador desde un punto de vista abstracto, es decir, independiente de las características físicas o tecnológicas de un ordenador en concreto. Adoptando ese punto de vista abstracto, un ordenador no es más que una cinta muy larga de cosas que pueden adoptar un valor 0 o 1, sobre las cuales un objeto lector móvil tiene la capacidad de cambiar, o no, ese valor. Dicho de otra manera, es un conjunto grande de bits (los objetos que pueden tomar un valor 0 o 1) sobre los cuales se pueden realizar “puertas lógicas” (las transformaciones sobre los valores de los bits). En las realizaciones tecnológicas concretas de la actualidad, es decir, en nuestros ordenadores, estos bits serán

circuitos electrónicos por los que circulen distintos valores de la corriente eléctrica, y las puertas lógicas consistirán en transformaciones de esos campos eléctricos. Pero esa es solamente la forma concreta en que nuestra tecnología ha llevado a la realidad el concepto abstracto de máquina de Turing, diferente a otras formas del pasado y posiblemente diferente a otras del futuro. El siguiente esquema ilustra el concepto de máquina de Turing:



Lo importante de los resultados teóricos de Turing es que muestran que cualquier tarea que se proponga a un ordenador puede ser “codificada” en una serie de puertas sobre una cinta suficientemente larga de bits. Más aún, es posible demostrar que, a su vez, esas puertas, que en principio podrían involucrar un número enorme de bits, pueden siempre descomponerse en puertas sencillas que impliquen solo a 1 o 2 bits y son siempre del mismo tipo (es decir, hacen siempre la misma transformación cuando se encuentran un 0 o un 1 en un bit, o un 00, 01, etc., en el caso de 2 bits). Un conjunto de puertas con esa propiedad (cualquier tarea pueda expresarse como una combinación de puertas tomadas de ese conjunto) es universal, porque permite a una máquina de Turing realizar, en principio, cualquier tarea. A su vez, una máquina de Turing en la que podemos realizar un conjunto de puertas universal es una máquina de Turing universal. Así, nuestros ordenadores son, en

principio, máquinas de Turing universales: pueden realizar cualquier tarea, como se ve en el hecho de que no solo ejecutan un programa determinado, sino que se pueden instalar distintos programas. Por supuesto, puede haber tareas que sean tan complicadas que requieran de un número tan grande de puertas que hagan que la tarea tarde un tiempo excesivo para nuestros propósitos, de manera que el ordenador no sea realmente universal desde el punto de vista práctico.

Con todo lo que hemos aprendido en los capítulos anteriores, parece bastante sencillo extender el concepto de máquina de Turing a la física cuántica: ya sabemos que existen sistemas cuánticos “de dos niveles”, es decir, en los que alguna magnitud física (energía, espín, posición...) puede tomar dos valores distintos, y también sabemos que se pueden realizar transformaciones (como vimos en el caso del teletransporte) que transforman esos valores. Es fácil, por tanto, imaginar bits cuánticos, también llamados cúbits, y puertas lógicas cuánticas. La cosa no merecería ni comentario si no fuera por el hecho de que, como ya sabemos, esos bits cuánticos van a tener una característica esencial que los va a distinguir de los clásicos: en ellos, en general, el valor 0 o el valor 1 no estarán bien definidos, sino que habrá una cierta probabilidad de tomar el valor 0 y una cierta probabilidad de tomar el valor 1. Ya hemos visto que, especialmente cuando consideramos sistemas con más de un cúbit, esta propiedad tiene consecuencias fundamentales, pues permite realizar tareas imposibles de otra manera, como el teletransporte cuántico. Es natural, por tanto, preguntarse lo mismo en el contexto de la computación: ¿podrá un ordenador cuántico, es decir, aquel formado por bits cuánticos y puertas lógicas cuánticas, hacer cosas que no pueden hacer los ordenadores convencionales?

Dentro del enfoque abstracto de las máquinas de Turing, la respuesta a la pregunta anterior es afirmativa: una máquina de Turing cuántica “es mejor” que una máquina de Turing

clásica en determinadas tareas. Para ver en qué sentido es mejor, explicaremos dos ejemplos clásicos. El primero es el algoritmo de búsqueda de Grover, descubierto por Lov Grover en 1996². Imagine que tiene usted un número de teléfono y quiere usar la guía telefónica para encontrar a quién pertenece. En cuanto lo piense un segundo se dará cuenta de que esto es mucho más difícil que la búsqueda inversa (encontrar el teléfono cuando se tiene el nombre de la persona a quien pertenece), ya que en la guía telefónica los nombres están ordenados alfabéticamente, pero los números están completamente desordenados. Poca cosa puede usted hacer más que ir número por número hasta que encuentre el suyo. Se puede tener muchísima suerte y que esté de los primeros, pero también puede ocurrir que esté de los últimos. En general, habrá que probar un número de veces que crecerá linealmente con la cantidad de números de teléfono que haya en la guía: es decir, una guía con el doble de números obligará a hacer el doble de comprobaciones, en general. Sin embargo, Grover descubrió que usando bits cuánticos y puertas cuánticas de una determinada manera (es decir, siguiendo un determinado algoritmo), solo necesitamos hacer un número de comprobaciones que ya no crece linealmente, sino con la raíz cuadrada del número total de entradas de la guía telefónica: en una guía con el doble de números usted no tendrá que hacer el doble de búsquedas, sino que el número de búsquedas se multiplicará por la raíz cuadrada de 2, que es aproximadamente 1,41. La diferencia puede parecer no muy impresionante, y efectivamente no lo es si pensamos en un número pequeño de entradas: no hay mucha diferencia entre 4 y su raíz cuadrada, que es 2. Pero si pensamos en una guía telefónica con un millón de entradas, la raíz cuadrada de un millón es mil, y la diferencia empieza a ser importante: si cada búsqueda me llevara un segundo, estaríamos hablando de la diferencia entre más de 11 días ininterrumpidos de búsqueda y algo

2. Véase una explicación más pedagógica en Grover (2002).

menos de 20 minutos. Naturalmente, la guía telefónica es solo un ejemplo: el algoritmo de Grover se puede usar, en principio, para encontrar la entrada (en nuestro caso, el nombre del usuario) que corresponde dentro de una base de datos desordenada (la guía), a un determinado dato de salida (en nuestro ejemplo, el número de teléfono).

El truco está precisamente en la idea de la indefinición de las propiedades en física cuántica: en el algoritmo de Grover, el primer paso de la receta (algoritmo) es preparar a un conjunto de cúbits de tal manera que haya una probabilidad igual para cada entrada de la lista. Veamos: imaginemos una lista con cuatro números. En un ordenador normal, puedo asociar el nombre del usuario de cada número de teléfono al valor de unos bits clásicos. Como tengo cuatro números, necesito dos bits para cada número: así el primer número de teléfono puede significar para mi ordenador “primer bit en 0 y segundo bit en 0”, el segundo “primer bit en 0 y segundo bit en 1”, etc. Así que cuando introduzca el número que busco, el ordenador mirará el valor de los dos bits y me devolverá el nombre que corresponde. Si tengo mala suerte, el ordenador tendrá que hacer cuatro búsquedas: comparará primero el valor del primer bit y después el valor del segundo, hasta que los dos coincidan. Cuando los dos valores coincidan con mi entrada, el ordenador me devolverá el nombre que corresponde a mi número, pero en un ordenador cuántico puedo usar solo dos cúbits, que pueden prepararse de tal manera que exista una probabilidad de un 25% de tener “primer bit en 0 y segundo bit en 0”, una probabilidad de un 25% de tener “primer bit en 0 y segundo bit en 1”, etc. Así, de entrada, si mido el estado de los cúbits, tengo una probabilidad de un 25% de obtener el número que busco, sea cual sea.

El siguiente paso de la receta es realizar una transformación, que depende del número que esté buscando, que incrementa la probabilidad de que obtenga el número que busco, y disminuye la de todos los demás, sea cual sea el número.

Este aumento de la probabilidad que me interesa es solo posible gracias a los fenómenos de interferencia que hemos descrito en el capítulo anterior: la transformación está diseñada para generar una interferencia constructiva que refuerza la probabilidad del número que busco, y una interferencia destructiva en el resto de números. Naturalmente, esta interferencia funciona tan bien gracias a que la transformación genera entrelazamiento entre los cúbits. Las reglas de la física cuántica muestran que tras aplicar un número de transformaciones que es aproximadamente del orden de la raíz cuadrada del total de números, la probabilidad de que los dos cúbits estén en el estado que corresponde al número que busco es prácticamente 1. En concreto, para este caso sencillo de 4 números y 2 cúbits, se da el caso especial de que me basta con aplicar una sola transformación para tener exactamente el estado que corresponde del número que busco.

Por supuesto, aunque es interesante desde el punto de vista teórico, esta ganancia (1 sola transformación frente a 4 búsquedas) no es muy interesante desde el punto de vista práctico, ya que el problema de encontrar algo en una lista de cuatro elementos es completamente trivial. El interés práctico, naturalmente, requerirá de tener una lista mucho más grande y, por tanto, un número mucho más grande de cúbits.

Tras este primer ejemplo del algoritmo de Grover, el otro ejemplo clásico es el del algoritmo de Shor, descubierto por el matemático estadounidense Peter Shor en 1994. En este caso, el objetivo es descomponer un determinado número en dos números primos, cuyo producto es igual al número dado. Por ejemplo, dado el número 15, se puede descomponer en dos números, el 3 y el 5, que son primos y tales que $3 \times 5 = 15$. De nuevo, esto no parece muy impresionante, ya que está al alcance de cualquier estudiante de Primaria. Sin embargo, cuando hablamos de números muy grandes, con unos cuantos cientos de cifras, el problema se convierte en intratable para un ordenador convencional. Tanto es así, que

la seguridad del sistema de criptografía más usado (RSA, por las iniciales de Ronald Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, los tres matemáticos e informáticos que descubrieron para el público este sistema en 1978, aunque al parecer un sistema similar ya lo utilizaban los servicios de inteligencia británicos) se basa en el hecho de que, mientras que multiplicar dos números primos grandes puede realizarlo cualquier ordenador, deshacer esa operación es prácticamente imposible para los ordenadores convencionales. En cambio, Shor mostró que usando su algoritmo en un sistema cuántico, el problema se podría resolver en un tiempo razonable. Los detalles técnicos de su receta son relativamente complicados, pero la idea fundamental es la misma que en el algoritmo de Grover: la solución está escondida en una de las distintas posibilidades de un sistema de muchos cúbits, y una serie de operaciones usan la interferencia para reforzar la probabilidad de la solución y cancelar las otras. Estas ideas, que usan características esenciales de la física cuántica, son las ideas subyacentes en todos los algoritmos de computación cuántica.

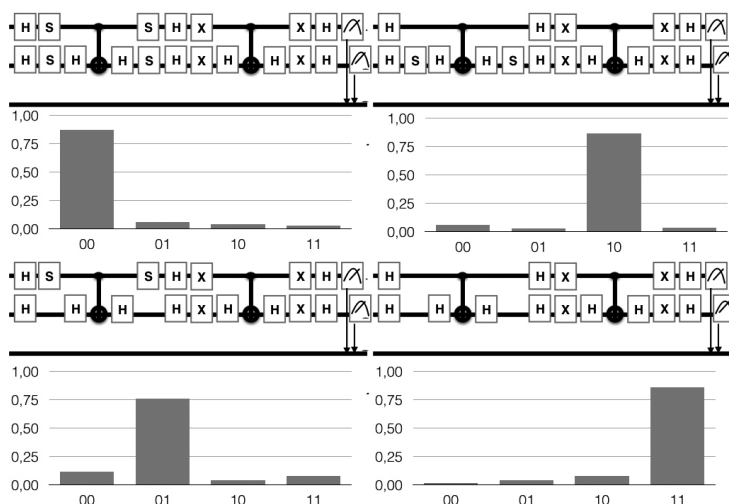
Naturalmente, como en el caso de Grover, este algoritmo de Shor solo tendrá interés práctico real si se puede correr en un sistema de muchos cúbits, que son los que permitirán descomponer números suficientemente grandes como para quedar fuera de las capacidades de los ordenadores convencionales. Por tanto, llegamos a la conclusión de que un ordenador cuántico deberá tener una gran cantidad de cúbits, no ya para ser universal, sino incluso para poder resolver problemas de auténtico interés. Sobre todos esos cúbits, además, debemos tener el control suficiente para poder prepararlos y realizar operaciones controladas en la manera que requieren los algoritmos. Esto es un auténtico reto. Normalmente los sistemas con propiedades genuinamente cuánticas como las que necesitamos constan de unas pocas partículas, y se encuentran en condiciones muy especiales de laboratorio, como temperaturas increíblemente bajas. Cualquier aumento en la

temperatura, por pequeño que sea, cualquier contacto con el ambiente, cambiaría los estados que necesitamos preparar, perjudicando las propiedades que necesitamos para el buen funcionamiento de los algoritmos.

Durante los años (alrededor de dos décadas) en los que la computación cuántica ha estado restringida a los laboratorios de las instituciones académicas y los centros de investigación, los experimentos solo han podido realizarse con unos pocos cúbits, normalmente menos de 10. Con esos números, por ejemplo, se pudo usar el algoritmo de Shor para descomponer el 15 en 3 y 5, y el 21 en 3 y 7. Esto es interesante como prueba de concepto, pero la posibilidad de hacer los sistemas más grandes quedaba fuera de las posibilidades de los grupos de investigación, y solía ser comentada con un gran escepticismo.

De pronto, la entrada de gobiernos poderosos y grandes empresas ha acelerado este panorama en muy poco tiempo, y así, por ejemplo, la división de computación cuántica de la compañía IBM tiene ya un ordenador con 50 cúbits. El escepticismo, por tanto, ha disminuido, y ya no es descabellado pensar que pronto podríamos tener unos cientos o unos pocos miles de cúbits. Sin embargo, este no es el único problema. Estos modelos de ordenador cuántico no son perfectos: hay pequeños defectos de fabricación que los alejan del modelo ideal de sistema cuántico de solo dos niveles, las operaciones físicas nunca se realizan de forma perfecta, siempre hay una temperatura, por pequeña que sea. Esto hace que las tareas tengan errores. Por ejemplo, en la siguiente figura mostramos resultados reales de experimentos que cualquiera puede realizar en uno de los ordenadores cuánticos con cinco cúbits de IBM, al que se puede acceder por Internet. En concreto, vemos las cuatro búsquedas posibles del algoritmo de Grover con dos cúbits descrito anteriormente. En cada caso (00, 01, 10, 11) la teoría predice que realizando los circuitos indicados, que corresponden a implementar un solo paso del

algoritmo de Grover (con las correspondientes puertas lógicas de 1 o 2 cúbits), deberíamos obtener con probabilidad 100% el estado deseado, es decir, en cada caso deberíamos ver en el histograma una sola barra que llegara hasta el 1. Como se ve, esto no es así, sino que hay una probabilidad entre el 75 y el 90% de obtener el resultado correcto. Vemos, por tanto, que incluso en un caso tan sencillo como este hay una probabilidad significativa de error.



Ante esto solo hay dos opciones: o se implementan mecanismos de corrección cuántica de errores o los ordenadores se construyen de tal manera que sean resistentes a errores (siempre que esos errores ocurran con muy poca probabilidad, todavía lejos del alcance de los modelos actuales). Ambas estrategias, corrección de errores y tolerancia al error, implica aumentar aún más el número de cúbits y sofisticar todavía más los diseños. Por tanto, el sueño de un ordenador cuántico universal de gran fiabilidad está todavía muy lejos de ser una realidad, y es muy difícil prever cuánto tiempo falta para que

se alcance (si es que finalmente lo hace), ya que no podemos saber con seguridad si se mantendrá el nivel de inversión e interés actuales.

Ante esta situación, en la comunidad de la computación cuántica se ha empezado a hablar del tiempo presente como la era de los dispositivos NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), es decir, aparatos cuánticos de tamaño mediano y “ruidosos” (*noisy*, en el sentido de que todavía cometen muchos errores). La pregunta entonces es: ¿qué podemos hacer con este tipo de tecnología cuántica, que será la única disponible en el corto y medio plazo? Intentaremos responder en lo que sigue.

Computación cuántica no universal. Simulación cuántica.
Supremacía cuántica

Si renunciamos, por el momento, a la universalidad, entramos lógicamente en el terreno de la computación cuántica no universal, es decir, en la solución de problemas concretos. Podemos hablar entonces de “simulación cuántica”, ya que precisamente eso es lo que hace una simulación: resolver un problema determinado, por medio de la reproducción de ese problema en un sistema físico distinto. Por ejemplo, uno puede usar un ordenador convencional o un videojuego para simular una partida de ajedrez, lo cual nos puede servir para analizar una determinada estrategia de juego, sin necesidad de tener a mano un jugador real humano. O podemos introducirnos directamente en una máquina para simular un viaje en coche, en avión o en una nave espacial. El concepto de simulación cuántica nace probablemente de una intuición del gran físico estadounidense Richard Feynman, uno de los científicos modernos más carismáticos e influyentes, quien se dio cuenta en los años ochenta de que la naturaleza cuántica de algunos sistemas físicos podría hacer que fueran demasiado difíciles de simular, a

no ser que empleáramos un simulador que fuera también cuántico (Feynman, 2003).

Como vemos, por tanto, el concepto de simulación de alguna manera trasciende los límites de las ideas presentadas en el apartado anterior sobre máquinas de Turing. Es preciso distinguir, por tanto, entre simulación cuántica analógica y simulación cuántica digital, donde los conceptos de “analógico” y “digital” tienen significados similares a los que tienen en los campos de la información, la computación y las comunicaciones convencionales: un simulador cuántico analógico simplemente imitará o reproducirá el sistema que queremos simular, o al menos en alguna de sus características, de la misma forma que un reloj de agujas parece imitar el paso del tiempo. Por su parte, en un simulador cuántico digital, el sistema que queremos simular será codificado en un código binario (ceros y unos), como en cualquier sistema digital de nuestra vida diaria (salvo que ahora estaremos hablando de los ceros y unos cuánticos que hemos descrito anteriormente).

Por tanto, cualquier ordenador cuántico digital (máquina de Turing cuántica) que realice una tarea sería, desde este punto de vista, un simulador cuántico digital. Por ejemplo, los sistemas que hemos descrito, capaces de descomponer el 21 en los números 3 y 7 o de encontrar en un solo paso un número en una lista de cuatro números, son simuladores cuánticos digitales. Naturalmente, desde este punto de vista, el interés del simulador cuántico será exclusivamente el interés de la tarea que consiga simular, ya que solo está concebido para realizar una tarea, no como paso previo a algo más complicado. Así que no tendría mucho sentido construir un simulador cuántico para factorizar el 21, a no ser que vaya acompañado de la receta para convertir ese simulador en algo capaz de factorizar un número mucho más grande. Como ya hemos visto, eso no parece factible para las capacidades de esta época NISQ. Ahora bien, ¿hay problemas de gran interés que puedan ser resueltos por un simulador cuántico digital NISQ?

Es en este contexto donde gana interés el concepto de “supremacía cuántica”, acuñado por primera vez por el físico John Preskill (Preskill, 2012). La supremacía cuántica se alcanzará cuando un ordenador o simulador cuántico realice una simulación que vaya más allá de las capacidades de un aparato clásico. Por supuesto, definir con precisión qué es lo que está fuera del alcance de un aparato clásico no siempre es sencillo, pero parece haber consenso en que hay algunos cálculos que podrían realizarlos máquinas NISQ de 50-100 cúbits (como las que ya tienen, por ejemplo, IBM y Google) y que son intratables para cualquier sistema clásico (en general, esto suele querer decir que la solución de estos problemas le requeriría a un ordenador clásico un tiempo excesivamente largo). De hecho, en octubre de 2019 se publicó en *Nature* un artículo (Arute, 2019) en el que el equipo de Google liderado por John Martinis afirmaba haber alcanzado la supremacía cuántica con su ordenador de 53 cúbits, llamado Sicomoro (Sycamore). En concreto, Sicomoro ha realizado un cálculo en poco más de tres minutos que, según las estimaciones del grupo de Martinis, le llevaría 10.000 años a los mejores supercomputadores clásicos de la actualidad. Sin embargo, inmediatamente IBM contestó informando de que, de acuerdo con sus estimaciones, ellos podrían realizar el mismo cálculo en apenas un par de días con su supercomputador Cumbre (Summit). De ser cierto esto último³, la magnitud del hallazgo de Google se rebajaría y quizá, desde el punto de vista técnico, podría haber discusión sobre si es realmente adecuado hablar ya de supremacía cuántica. Sin embargo, en términos prácticos, tres minutos parece ya significativamente mejor que tres días, y además estamos hablando de un prototipo con mucho margen de mejora. La puerta de la supremacía cuántica parece definitivamente abierta.

3. El artículo técnico en el que se apoyan las afirmaciones de IBM todavía no ha sido publicado, aunque se puede encontrar en Internet.

El interés del concepto de supremacía cuántica es evidente, ya que sería una demostración del enorme potencial de la computación cuántica. Sin embargo, es cierto que el tipo de problemas del que estamos hablando no tiene otra aplicación fuera de la supremacía cuántica en sí misma. El cálculo de Sicomoro consiste en medir el estado de los cúbits tras una gran cantidad de puertas cuánticas con parámetros aleatorios. El experimento está diseñado especialmente para conseguir que el cálculo sea muy difícil para un ordenador clásico, pero no sirve para nada más.

Lo mismo sucede con otras propuestas para alcanzar la supremacía cuántica en simuladores cuánticos analógicos. Un ejemplo es el llamado “muestreo de bosones” (intento de traducción del término original en inglés, *boson sampling*). Resumiendo mucho, podemos pensar en un aparato de muestreo de bosones como un circuito con entradas y salidas, unidas por una serie de carriles. En algunas de las entradas colocamos un fotón, pero en otras no. En el circuito hay algunas operaciones que pueden hacer que los fotones no salgan por la salida que está conectada directamente con su entrada, es decir, pueden cambiar de carril. Por tanto, a la salida nos encontraremos con una distribución distinta de fotones en los carriles. Pues bien, por inofensivo que parezca este cálculo, se puede demostrar que conocer esa distribución de fotones a la salida es, en general, un problema intratable para los ordenadores convencionales, si consideramos un número suficientemente alto de fotones y de carriles. En cambio, parece fácil concebir un sistema cuántico que haga exactamente la operación descrita, ya que esos cambios de carril de los que hablamos son una tecnología completamente estándar en los laboratorios actuales. De hecho, tras la demostración de la intratabilidad clásica de este problema, en el año 2012 (Aaronson, 2012) rápidamente se hicieron experimentos con pequeños sistemas de muestreo de bosones. De nuevo, el problema es alcanzar un tamaño del sistema suficiente para demostrar la supremacía

cuántica: las primeras estimaciones teóricas sugerían que podrían hacer falta solo 20 fotones y unos 400 carriles. Los experimentos alcanzaron rápidamente unos 4 o 5 fotones y alrededor de 10 carriles, por lo que parecía que demostrar la supremacía cuántica en este tipo de problemas estaría muy pronto al alcance de la mano. Sin embargo, análisis más realistas de los errores y las dificultades de este tipo de experimentos nos han llevado a pensar en los últimos dos o tres años que, en realidad, sería necesario alcanzar un número significativamente más alto de fotones y carriles. Así las cosas, y a la luz del anuncio de Google, el interés en el muestreo de bosones ha cambiado muy rápidamente.

Pero además de demostrar de una vez por todas la supremacía cuántica y por tanto abrir definitivamente la puerta a los ordenadores cuánticos del futuro, ¿hay algo de utilidad directa que puedan hacer los ordenadores en esta época NISQ? Muy probablemente, sí. Los esfuerzos se centran ahora mismo en dos áreas que podrían tener un impacto inmediato importante: el aprendizaje automático (*machine learning*) y la simulación de moléculas.

En el caso del aprendizaje automático, las tareas relevantes suelen estar relacionadas con la clasificación de un conjunto grande de datos (por ejemplo, muchas fotos, que son clasificadas en distintos conjuntos: gatos, personas, etc.). De esta manera, cuando los algoritmos de aprendizaje automático reciben un nuevo dato, lo comparan con los que están en conjuntos ya clasificados y lo asignan al conjunto que más se le parece. Existen ya resultados muy prometedores que muestran que, si los datos se codifican en estados de cúbits, es posible mejorar la eficiencia de este tipo de tareas, incluso con un número no muy alto de los cúbits, como en los de un ordenador NISQ. Respecto a las moléculas, los ordenadores clásicos se encuentran con grandes problemas para simular de manera realista las propiedades de moléculas con un número moderadamente alto

de átomos. Ordenadores cuánticos con muy pocos cúbits han demostrado ya que son capaces de hacer simulaciones realistas de moléculas muy pequeñas, y se cree que los ordenadores NISQ podrían realizar cálculos fuera del alcance de los ordenadores convencionales para algunas moléculas concretas de tamaño medio.

Dadas las aplicaciones en medicina y biología que tendrían la posibilidad de estudiar con todo detalle el comportamiento de más moléculas, y al interés creciente en las aplicaciones de la inteligencia artificial, cualquier avance que muestre definitivamente que los ordenadores cuánticos reales son capaces de mejorar los ordenadores convencionales en estas áreas impulsaría aún más el interés (y las inversiones) en el futuro de la computación cuántica.

Computación cuántica adiabática

Hay un tipo distinto de ordenador cuántico que merece un comentario aparte. Se trata, en principio, de computación no universal, ya que está diseñada para resolver problemas concretos, y analógica, ya que no es digital. Además, se basa en una característica distinta de la física cuántica, llamada “teorema adiabático”. ¿Qué significa esto? En la naturaleza las cosas tienen tendencia a estar en las situaciones que le requieren menor gasto de energía. Por tanto, en muchas situaciones, es muy importante conocer el estado de mínima energía, al que los físicos solemos llamar “estado fundamental”. Calcular ese estado es en ocasiones muy fácil y muy difícil en otras. El teorema adiabático de la física cuántica se aplica en situaciones en las que la energía depende de un determinado parámetro. Por ejemplo, mi energía en el campo gravitatorio de la Tierra depende de mi distancia al centro de la Tierra. El teorema adiabático nos dice que si, en un momento dado, un sistema físico está en el estado fundamental para un determinado valor de un cierto parámetro, y

posteriormente ese parámetro se puede variar lentamente (a esto se le llama adiabáticamente), entonces el sistema estará siempre en el estado fundamental correspondiente al valor que vaya tomando el parámetro.

De esta manera, un ordenador cuántico adiabático es un sistema de muchos cúbits en el que se varía adiabáticamente un parámetro que hace que el sistema pase de un estado fundamental sencillo a un estado fundamental difícil de calcular. Esto es muy importante no solo por sí mismo, sino por el hecho de que hay muchos problemas de interés que se pueden reescribir para que la solución consista en encontrar el estado fundamental del sistema. Por ejemplo, la descomposición en números primos, de la que hemos hablado anteriormente, puede transformarse de tal manera que encontrar la solución equivalga a encontrar el estado fundamental de un ordenador cuántico adiabático.

Sin duda, puede pensarse en una estrategia parecida pero aplicada a una simulación clásica, bien sea en una simulación por ordenador o en un sistema físico que no sea cuántico. Es decir, podemos reescribir el problema para que se traduzca en encontrar el estado fundamental de un sistema, y hacer que el sistema encuentre “por sí mismo” el estado de mínima energía. El problema es que si el sistema es clásico, en determinadas ocasiones no encuentra la solución verdadera, sino que el sistema puede quedar “atrapado” en una situación en la que parece estar en un mínimo de energía (porque salir de ese estado le costaría una cantidad significativa de esta), pero en realidad no lo está, ya que si consiguiera salir de ese estado podría llegar a otra situación en la que finalmente tendría aún menos energía. De alguna manera, es como si nos hubiésemos quedado encerrados en una habitación: atravesar las paredes nos cuesta mucha energía, pero si lo conseguimos podremos llegar a otra habitación en la que a lo mejor podremos estar más a gusto. Mientras estamos encerrados en la primera habitación estamos en el estado

fundamental si lo comparamos solo con los estados que tengo más accesibles, pero no si lo comparamos con todos los estados posibles, a los que podré tener acceso solamente si logro salir de la habitación. En el lenguaje técnico, esto quiere decir que el sistema está en un “mínimo local” pero no en un “mínimo global”.

Es posible que esta discusión sobre atravesar paredes le haya traído a la memoria lo que decíamos en el capítulo anterior sobre el efecto túnel cuántico. Y, efectivamente, esa es precisamente la razón por la que un ordenador cuántico adiabático podría ser superior a su correspondiente sistema clásico. Allí donde este se ha quedado atrapado para siempre en un mínimo local, el ordenador cuántico podría escapar por efecto túnel.

El desarrollo de la computación cuántica adiabática ha seguido un camino muy distinto a los de los otros modelos de computación cuántica, explicados anteriormente. Mientras que estos fueron desarrollados teóricamente y a pequeña escala experimental en el mundo académico, y solo recientemente han recibido un impulso desde fuera de ese mundo que ha provocado un monumental cambio de escala, la computación cuántica adiabática ha sido, en cambio, desarrollada casi en solitario por la empresa canadiense D-Wave, desde principios de siglo, entre ciertas resistencias y escepticismo de la comunidad académica, que solo recientemente parecen estar consiguiendo superar.

Tras ir aumentando progresivamente el tamaño, el último modelo de D-Wave tiene nada menos que 5.640 cúbits, pero es muy importante que no mezclamos este número con los dados en el apartado anterior, en los que hablábamos de unos 50-100 cúbits. El motivo es que, al ser dos modelos completamente distintos, esos números no son comparables, y no queremos sugerir, en absoluto, que la computación cuántica adiabática se encuentre en un estado de desarrollo más avanzado que la computación cuántica digital

convencional. Esta última requiere un control mucho más grande sobre el comportamiento de cada cúbit, por eso tener 50 cúbits es una hazaña de proporciones similares a la de los modelos de D-Wave.

De nuevo, el concepto que sí nos puede permitir establecer una comparación justa es la supremacía cuántica. ¿Han conseguido los ordenadores cuánticos adiabáticos realizar algo que ya esté más allá de las capacidades de un ordenador o simulador clásico de cualquier tipo? En ese contexto, la situación es muy parecida: los ordenadores cuánticos adiabáticos están ya muy cerca de la frontera de la supremacía.

Conclusiones

Los ordenadores cuánticos usan sistemas cuánticos, normalmente bits cuánticos, para realizar tareas, cálculos o simulaciones. Ya no son una mera posibilidad teórica ni están restringidos a experimentos de escala académica, sino que en los últimos años han experimentado un gran salto tecnológico, fundamentalmente por el gran empuje de la inversión pública y privada. Este empuje se debe al enorme potencial de la tecnología, que puede realizar tareas imposibles para los ordenadores convencionales, lo cual podría tener aplicaciones en muchos campos de interés para la sociedad, desde la medicina (debido a la caracterización de nuevas moléculas, por ejemplo) hasta la inteligencia artificial. Sin embargo, esas aplicaciones no están todavía al alcance de la mano. A pesar de los importantes progresos de los últimos años, se dice que los ordenadores cuánticos digitales estarán en el corto y medio plazo en la era llamada NISQ, en que el número de cúbits y su fiabilidad no serán todavía suficientes para explorar todas las posibilidades de la computación cuántica. Ahora los esfuerzos se concentran fundamentalmente en realizar alguna tarea que vaya más allá de las capacidades de los ordenadores convencionales, lo cual recibe el

nombre de “supremacía cuántica” y podría suceder en un plazo muy breve o incluso haber sucedido ya.

Criptografía cuántica

Quizá no somos del todo conscientes de la enorme importancia de la criptografía en nuestra vida, en una era en que una infinidad de datos encriptados circulan a cada momento y a gran velocidad por la red. En los sistemas más utilizados para encriptar y descifrar datos se combinan claves privadas en posesión del usuario interesado con claves públicas que cualquiera puede conocer. Cualquiera que tenga la clave pública puede usarla para encriptar información, pero no puede descifrar la información a no ser que tenga la clave privada. El sistema es completamente seguro mientras la clave privada no sea robada... o no pueda ser deducida a partir de la clave pública.

Por ejemplo, en el sistema de criptografía RSA, las claves privada y pública se generan a partir de un número que se obtiene como producto de dos números primos. Por tanto, si uno tiene la clave pública podría, en principio, deducir los dos números primos de partida y generar también la clave privada, de manera que un mensaje encriptado podría descifrarse. Sin embargo, mientras que multiplicar dos números primos cualesquiera es algo muy sencillo para un ordenador, la operación inversa, es decir, descomponer un número en los dos números primos que lo componen, no lo es tanto; de hecho, como ya hemos comentado, es prácticamente imposible si el número es lo suficientemente grande. Por tanto, toda la seguridad del sistema se basa en este hecho: la práctica imposibilidad de encontrar los dos números primos cuyo producto es igual a un número dado. Sin embargo, ya hemos visto que un ordenador cuántico podría, en principio, ser capaz de hacer precisamente eso, incluso en el caso de números muy grandes.

Naturalmente, no será suficiente un ordenador NISQ, sino que habrá que esperar a ver la evolución de la computación cuántica, pero es evidente que estos métodos de criptografía están en riesgo en el largo plazo si los ordenadores cuánticos siguen progresando al ritmo actual.

Por supuesto, ya hay líneas de investigación abiertas en las que se trabaja en sistemas de criptografía clásica post-cuánticos, es decir, aquellos que serían resistentes a los ataques de un potente ordenador cuántico, pero también podría ser que la solución a este problema creado por la física cuántica viniera también de la propia física cuántica.

Efectivamente, ya desde los años ochenta del siglo XX, incluso antes del inicio del desarrollo teórico de la computación cuántica, se empezó a considerar el uso de claves cuánticas para realizar comunicaciones seguras. Las claves de las que hemos hablado más arriba no son otra cosa que largas rstras de ceros y unos, es decir, largas cadenas de bits. Es natural, por tanto, pensar en las consecuencias de usar bits cuánticos como clave. Varias propuestas teóricas mostraron en los ochenta y los noventa que las propiedades de la física cuántica pueden ayudar a incrementar la seguridad en la distribución de claves. En general, esto se debe a que en la física cuántica es imposible obtener información sobre algo sin perturbarlo. Por ejemplo, como hemos visto en los capítulos anteriores, si uno realiza una medición para conocer el valor de alguna propiedad física (por ejemplo, para saber si un cúbit es 0 o es 1), el objeto medido cambia irremediabilmente de estado: si antes de la medición tenía unas determinadas probabilidades de ser 0 y 1, tras la medición tendrá una probabilidad del 100% de ser 1 si se ha medido 1 (y lo mismo con 0). De esta manera, se pueden diseñar protocolos astutos para que la presencia de un ente malicioso que intente robar la clave u obtener cualquier información sobre ella sea necesariamente detectada por los usuarios. Algunos de estos protocolos usan estados que contienen entrelazamiento cuántico, pero otros no.

La generación de claves cuánticas y su distribución para uso en encriptación y desciframiento de información a pequeña escala llegaron hace años al mercado: por ejemplo, una pequeña empresa fundada por físicos de la universidad de Ginebra, Id Quantique, lleva vendiendo aparatos de criptografía cuántica desde aproximadamente el año 2010. Sin embargo, si pensamos en cómo funcionan las tecnologías de la información y las comunicaciones en la sociedad actual, nos damos cuenta de la necesidad de transmitir ingentes cantidades de datos a toda velocidad y a largas distancias, incluyendo comunicaciones entre satélites, Tierra-satélite etc. Por tanto, si quisiéramos sustituir todos nuestros sistemas de telecomunicaciones actuales por un sistema en el que nuestros datos estuvieran totalmente protegidos por las leyes de la física cuántica, sería necesario tener la capacidad de transmitir bits cuánticos, o la información contenida en ellos, a través de enormes distancias, con toda fiabilidad, usando cables y a través del espacio abierto. Sin embargo, como ya hemos visto, las propiedades cuánticas son frágiles: cualquier cosa (el ruido, la temperatura) puede perturbarlas. Por ello, es fácil entender que los retos tecnológicos para avanzar en esa dirección no son pequeños. Lo veremos con más detalle a continuación.

Comunicaciones cuánticas. Información cuántica

Por más que leamos descripciones más o menos fantásticas sobre dos partículas que comparten entrelazamiento cuántico y se encuentran en distintos confines del universo, y su entrelazamiento es exactamente igual que cuando estas dos partículas están en la misma habitación, en realidad, como ya se pueden imaginar, la cuestión es bastante más complicada. Podemos entenderlo si pensamos en que para poder estar entrelazadas, estas partículas habrán tenido que estar cerca en alguna ocasión, por lo que, si ahora

están muy separadas, alguna de ellas habrá tenido que atravesar grandes distancias. ¿Y cómo podría atravesar grandes distancias en unas condiciones tan estupendas que nada perturbara en absoluto el entrelazamiento cuántico?

En realidad, los experimentos solo han conseguido, hasta el momento, entrelazar partículas separadas, a lo sumo, por unos cuantos centenares de kilómetros. En concreto en 2017, un equipo de científicos chinos fue capaz de enviar fotones entrelazados a dos laboratorios separados por 1.200 kilómetros (Yin, 2018), usando para ello un satélite con equipamiento especialmente preparado para este tipo de experimentos cuánticos, que había sido puesto en órbita el año anterior. Este es el principal resultado de un ambicioso proyecto internacional, con mucha implicación del gobierno chino, dedicado a demostrar la viabilidad de una futura red global de comunicaciones basada en la física cuántica. Como se puede ver, este es un resultado muy preliminar: solo se ha demostrado que, efectivamente, podemos tener sistemas con entrelazamiento cuántico separados por distancias significativamente grandes, gracias al funcionamiento de conexiones satélite-Tierra.

Como en el caso de los ordenadores cuánticos, estas tecnologías no están exentas, de momento, de errores significativos. Por ejemplo, en el experimento mencionado en el párrafo anterior, el estado de los fotones separados por 1.200 kilómetros se parece en un 87% al estado ideal que tendrían si no hubiera ninguna pérdida. De manera que, en la transmisión, se introduce un error del 13%.

Este resultado es importante desde el punto de vista académico y científico, ya que va más allá de los resultados que se habían publicado previamente; por ejemplo, si los fotones fueran transmitidos por cables de fibra de esa longitud, las pérdidas serían mucho mayores. Sin embargo, desde un punto de vista más aplicado o tecnológico, ese nivel de errores podría no ser demasiado satisfactorio. Por ejemplo, estos fotones entrelazados podrían usarse para realizar una distribución cuántica de

claves a partir de la cual se pudieran establecer comunicaciones seguras, o podrían también usarse para el teletransporte cuántico de estados de bits cuánticos (que podrían, por ejemplo, ser el estado de un ordenador cuántico). Pero al tener un entrelazamiento de menor calidad que el entrelazamiento ideal previsto por la teoría, los resultados prácticos serían también de menor calidad.

Por ejemplo, cuando en un teletransporte cuántico se usan unos fotones con un entrelazamiento que no es perfecto, el resultado es que el teletransporte tampoco es perfecto, de manera que el fotón al que se quería teletransportar un determinado estado de otro fotón o bit cuántico, en realidad se encontrará al final del proceso en una situación que se parecerá mucho a la deseada, pero no será idéntica. De nuevo, esto puede ser muy interesante desde el punto de vista científico, pero tal vez decepcionante si queremos realizar una aplicación tecnológica concreta: una comunicación completamente segura, en el caso de la distribución cuántica de claves para criptografía, o una tarea de ordenador cuántico, en el caso del teletransporte. El uso de entrelazamiento imperfecto podría conducir a brechas en la seguridad o fiabilidad de estas tecnologías, hasta el punto de comprometer su utilidad.

En resumen, vemos, por tanto, que la interesante posibilidad de tener en el futuro redes de comunicaciones e información completamente basadas en tecnología cuántica está todavía muy lejos de ser una realidad tecnológica. Sin embargo, también vemos que hay pasos ya muy prometedores en esa dirección. El tiempo dirá si los gobiernos y las empresas privadas mantienen el nivel de interés e inversión necesario para continuar el camino.

Metrología cuántica. Sensores cuánticos

Uno de los mayores éxitos de la física reciente ha sido, sin duda, la observación de las ondas gravitacionales por el

experimento LIGO (siglas en inglés de observatorio de ondas gravitacionales con interferómetro láser). Este experimento es capaz de detectar el efecto en un láser de un minúsculo cambio, provocado por la onda, en la separación de dos espejos. Cuando decimos minúsculo, es probable que el lector no se imagine de qué estamos hablando exactamente: en LIGO los dos espejos están separados por varios kilómetros y la onda gravitacional los desplaza unos 0,0000000000000001 milímetros. La detección de ondas gravitacionales es, por tanto, además de otras muchas cosas, una hazaña espectacular en el campo de la metrología, ya que es una medición increíblemente precisa de una longitud. También se puede interpretar LIGO como un excelente sensor, capaz de detectar un fenómeno tan sutil como las pequeñas distorsiones del espacio-tiempo que provocan en la Tierra las fusiones de agujeros negros situados a miles de millones de años luz.

Tampoco es pequeña la hazaña que realizan nuestros teléfonos móviles cada vez que nos dicen nuestra ubicación, gracias al sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés). Este sistema funciona gracias a que relojes atómicos enormemente precisos son capaces de medir el tiempo que tardan las ondas electromagnéticas en recorrer la distancia entre satélites y entre el receptor en la Tierra y un satélite, incluyendo efectos muy sutiles debidos a la velocidad de movimiento del satélite y a la fuerza de gravedad de la Tierra, descubiertos por Albert Einstein en su teoría de la relatividad.

A pesar de la enorme sofisticación y precisión de estos sistemas de metrología, todavía es posible mejorarlos. La ubicación de nuestros teléfonos móviles sigue teniendo errores de unos cuantos metros, como comprobé el otro día: una aplicación de taxis me ubicó en la calle contigua a la que estaba, a la vuelta de la esquina, de manera que el taxi que había pedido me estaba esperando en un sitio equivocado. Tal vez sería interesante dotar a los satélites de relojes aún más

precisos, capaces de incrementar la precisión de los dispositivos de ubicación basados en el sistema GPS hasta que cometieran errores de solo unos cuantos centímetros.

En cuanto a las ondas gravitacionales, aumentar la precisión permitiría detectar más ondas gravitacionales, que ahora mismo pasan inadvertidas por nuestros detectores, y caracterizar con mayor certeza los distintos fenómenos (no solo las fusiones de agujeros negros) en los que se producen.

La metrología cuántica estudia cómo el uso de sistemas físicos con propiedades cuánticas puede incrementar la precisión de los aparatos de medida más convencionales. En general, cualquier aparato de medida que se nos ocurra puede ser descrito como un objeto en el que un cierto sistema físico tiene alguna propiedad que depende del valor concreto de la magnitud que queremos medir: pensemos, por ejemplo, en el clásico termómetro de nuestra infancia, en el que la columna de mercurio alcanza una altura distinta según la temperatura. La bondad de este tipo de medidas dependerá entonces de la “sensibilidad” de mi sistema a la magnitud que quiero medir: en otras palabras, dependerá de cómo de pequeña tenga que ser una variación en la magnitud que quiero medir (temperatura, tiempo, etc.) para que se produzca una modificación apreciable en el sistema de medida. Cuanto más pequeña sea la variación necesaria para producir una modificación en mi aparato, más sensible será este, ya que, por un lado, podrá medir valores muy pequeños de la magnitud de interés y, por otro, cometerá errores más pequeños, pues pequeñas diferencias en el valor de lo que se quiere medir se traducirán en cambios notables en mi aparato, de manera que el riesgo de asignar el mismo valor a dos valores que son en realidad diferentes se produce solo para diferencias aún más pequeñas que nuestro “umbral de sensibilidad”.

Existen resultados teóricos bien conocidos, obtenidos ya en este siglo, que muestran que los sistemas físicos regidos por la física cuántica, cuando se preparan de manera en la

que aparezcan propiedades genuinamente cuánticas, son más sensibles a los parámetros externos que sus equivalentes clásicos. Los resultados teóricos más espectaculares se obtienen cuando usamos el entrelazamiento cuántico: un sistema físico que tuviera a muchas partes entrelazadas con un entrelazamiento muy alto sería un sistema que podría ir más allá de cualquier precisión que pudiera alcanzar un sistema con el mismo número de partículas pero que no usara entrelazamiento. Mientras que en este último los errores se reducirían, en el mejor de los casos, en un factor que aumenta con la raíz cuadrada del número de partículas, en los sistemas entrelazados ese error se podría reducir en un factor que aumenta linealmente con el número de partículas (recuerden que hemos explicado un comportamiento similar en el caso del algoritmo de Grover de computación cuántica). Esto no es tan sorprendente si pensamos en que un estado entrelazado es algo enormemente sensible, tanto como para que una partícula cambie su estado cuando se han producido cambios en el estado de otra parte del sistema, como ya sabemos.

En otras palabras, como hemos visto en este libro, un sistema entrelazado contiene unas correlaciones entre sus distintas partes que son inalcanzables para un sistema clásico. La metrología cuántica aspira a usar esas correlaciones para detectar cualquier pequeño cambio en un parámetro externo del sistema (sea el tiempo, la temperatura, un campo magnético, etc.), con una precisión cuyo único límite sería ya el que conocimos en la primera parte de este libro: el principio de incertidumbre, que me obliga a pagar un precio en el desconocimiento de otra magnitud (por ejemplo, la velocidad) cada vez que intento determinar con precisión otra (por ejemplo, la posición). Ese límite último es, sin embargo, perfectamente compatible con el hecho de que los sistemas cuánticos puedan mejorar la precisión en la medida respecto a sus equivalentes clásicos.

El lector o lectora que haya seguido las partes referidas a otras tecnologías cuánticas, como los ordenadores cuánticos, ya se estará imaginando las dificultades que pueden surgir cuando se intentan llevar a la práctica los resultados teóricos del párrafo anterior. Por un lado, sabemos ya que es muy difícil tener sistemas con muchas partes entrelazadas, como hemos visto en el caso de los bits cuánticos. Y, al igual que vimos con el algoritmo de Grover, sería necesario llegar a un número grande para que las ventajas obtenidas con estos sistemas fueran significativas. Por otro lado, la propia sensibilidad extrema del entrelazamiento cuántico puede convertirse en un problema, ya que no solo se manifiesta respecto a la magnitud que queremos determinar, sino ante cualquier cosa que afecte al sistema. De esta manera, la cara oscura de la sensibilidad del entrelazamiento es su fragilidad: casi cualquier cosa lo puede destruir e impedir su uso para efectos prácticos. De hecho, en los últimos años, muchos trabajos han mostrado la gran dificultad de usar el entrelazamiento cuántico para tareas de metrología, ya que la ventaja de su uso parece desaparecer en cuanto se considera cualquier fuente realista de errores en un experimento. Por tanto, los esfuerzos prácticos se vienen concentrando últimamente en cómo poder contrarrestar esos errores para recuperar los beneficios del entrelazamiento cuántico.

Sin embargo, la metrología cuántica ya está experimentando grandes éxitos sin necesidad de usar el entrelazamiento cuántico. Sin ir más lejos, en la nueva fase de actividad de LIGO, que arrancó en 2019, se usan ya estados que no son los habituales en un láser, sino que son estados genuinamente cuánticos (llamados estados “comprimidos”, del inglés *squeezed*) del campo electromagnético, que aumentan significativamente la sensibilidad del experimento. Esta mejora promete permitir que se detecten más ondas gravitacionales y provenientes de fuentes más diversas.

Los estados comprimidos del campo electromagnético son también aplicados en otros contextos de metrología cuántica. Consisten en la manipulación de las propiedades del estado de mínima energía del campo electromagnético (estado de vacío) para conseguir reducir la incertidumbre de alguna magnitud física (siempre pagando el precio de aumentarla en otra, como dicta el principio de incertidumbre) hasta el mínimo posible.

Todos estos enfoques de metrología cuántica pueden aplicarse a muchas magnitudes físicas, desde la medida del tiempo y la posición hasta la temperatura, el valor del campo magnético o el campo gravitatorio, todo lo cual tiene aplicaciones que trascienden el campo científico y académico y podrían traducirse en importantes avances tecnológicos para la sociedad. Por ejemplo, pequeños cambios de temperatura en determinadas regiones del cuerpo humano suelen estar asociados a enfermedades y trastornos, algunas de las cuales (como el alzhéimer o el párkinson) no son fáciles de detectar en una etapa temprana. En la actualidad, es ya muy activa la experimentación con sistemas físicos cada vez más pequeños (normalmente llamados “nanopartículas”) para la detección, prevención y tratamiento de enfermedades. La posibilidad de mejorar esos mecanismos con propiedades cuánticas como el entrelazamiento podría plantearse en un futuro no muy lejano. Es solo un ejemplo del enorme potencial de este tipo de tecnologías.

Los aparatos de metrología cuántica y los sensores cuánticos se llevan una parte muy importante de la gran y creciente inversión en tecnología cuántica, y es muy probable que puedan producir muy pronto aplicaciones a nivel tecnológico y comercial. Por ejemplo, gracias a las grandes inversiones del gobierno de Reino Unido en esta década, académicos de diversas instituciones británicas parecen haber desarrollado acelerómetros extraordinariamente precisos basados en tecnología cuántica, con un tamaño y fiabilidad que los sitúan

cerca del mercado. Un acelerómetro ultrapreciso y compacto podría servir como alternativa al GPS, ya que permitiría dar cuenta de manera casi exacta de una determinada trayectoria, a partir de una posición inicial conocida.

Conclusiones

Como hemos visto en este capítulo, hay toda una nueva generación de tecnologías caracterizada por una nueva manera de usar las propiedades de la física cuántica para mejorar el funcionamiento de tecnologías convencionales equivalentes, desde ordenadores hasta aparatos de criptografía o metrología. En la actualidad, podríamos decir que todas ellas se encuentran en un estado intermedio. Por un lado, ya han superado la fase en la que eran meras elucubraciones teóricas u objeto de experimentos a escala científica o académica. Por otro lado, todavía no han desarrollado, ni mucho menos, todo su potencial, y se encuentran, en general (con las excepciones que hemos mencionado), lejos del mercado y de la sociedad. Sin embargo, dada la gran cantidad de aplicaciones posibles y su importancia, en los últimos años el interés de los gobiernos y las empresas ha aumentado considerablemente, y se ha producido un incremento espectacular de la inversión pública y privada. Este nuevo escenario ha provocado una gran aceleración en el desarrollo de la tecnología y le ha dado a la investigación en este campo un enfoque mucho más aplicado, que hace que la transición desde los laboratorios hasta la sociedad parezca ahora mucho más cercana.

Teniendo en cuenta estos rasgos comunes, en este capítulo hemos intentado dar, además de una breve explicación de la física implicada (en conexión con las ideas de capítulos anteriores), una perspectiva realista de en qué situación se encuentran ahora mismo cada una de estas tecnologías, así como hacía dónde podrían dirigirse en el futuro.

Naturalmente, el campo de las tecnologías cuánticas es muy amplio y no nos es posible comentar todas las aplicaciones presentes y futuras ni detenernos en demasiado detalle en muchas de ellas. Sin embargo, esperamos que esta breve introducción pueda haber sido útil para el lector interesado en tener una panorámica realista de este campo de conocimiento, y tal vez le pueda proporcionar herramientas útiles para ir más allá.

La nueva generación de tecnologías cuánticas no es ya, ni mucho menos, una mera ensoñación teórica, pero tampoco parece que vaya a revolucionar nuestra sociedad de manera inminente. Sin embargo, si se mantiene el nivel de esfuerzo e inversión actual, tiene la capacidad de hacerlo en el futuro.

Para terminar

Hay mucha gente a la que no le gusta mucho la física. De hecho, la física hace que se sientan incómodos con su insistencia en que hay cosas cuyo comportamiento escapa a su voluntad, sus deseos o su imaginación. Sin ir más lejos, esta mañana le insistía mucho a mi hijo en que no es cierto eso de que “todo es posible”: si uno deja caer un objeto, y no actúa otra fuerza que la fuerza de la gravedad, no “es posible” que el objeto se mueva hacia arriba en lugar de hacia abajo. Esta incomodidad, lógica en los niños, se mantiene en estos tiempos en muchas personas que ya han alcanzado la edad adulta: siguen creyendo en eslóganes publicitarios como que “nada es imposible” y, por tanto, todo podría alcanzarse con voluntad y actitud positiva (lo cual algunos extienden hasta la curación del cáncer). En ese sentido, no es extraño que las opiniones de los científicos resulten en ocasiones muy incómodas, al subrayar que hay hechos y leyes físicas incontrovertibles, que no pueden adaptarse a cualquier voluntad, interés o agenda. De ahí el creciente desprestigio de la autoridad científica en la sociedad, y de la figura del experto, en general.

Sin embargo, muchas de estas personas encuentran una especie de refugio en la física cuántica o en lo que creen que

es la física cuántica. Efectivamente, otro signo de estos tiempos es la destrucción de la intermediación de calidad en la transmisión de información, de manera que es posible encontrar, especialmente en las redes sociales (que cada vez son más utilizadas como fuente principal y, en ocasiones, única, de información) todo tipo de pseudoinformación, también en asuntos científicos. Así, se ha extendido una visión, presuntamente “alternativa” (en la medida en que la mentira pueda ser una alternativa a la verdad), según la cual la física cuántica sería una suerte de “antifísica”: una manera de escapar a sus leyes y entrar en una especie de mundo nuevo donde todo está permitido, todo es impredecible y, en caso de necesidad, la realidad puede modificarse a voluntad.

De alguna manera, este libro tiene muy malas noticias para todas esas personas: la física cuántica no es eso en absoluto. Todas esas cosas son, sencillamente, mentira, como hemos explicado en el capítulo 1.

La física cuántica es algo mucho más interesante: es una parte de la física que explica partes de la naturaleza que no pueden ser explicadas por otras áreas de la física, a cuyas ideas estamos más acostumbrados. Esas partes de la naturaleza no son las que solemos ver en nuestra vida cotidiana, como coches, pelotas o gatos, sino que se dan en sistemas que, o bien son extremadamente pequeños, o bien solo pueden existir en condiciones muy determinadas de laboratorio. Por ello, no se debe cometer el error de esperar que los sistemas de la física cuántica se comporten como los de la física clásica (aunque esto nos pueda sorprender), pero tampoco el error contrario: extrapolar conclusiones obtenidas en la física cuántica a sistemas donde rige la física clásica.

Intentando entender sus propiedades, en el capítulo 2 hemos llegado a la conclusión de que la característica principal de la física cuántica es el hecho de que las propiedades de las cosas están, en general, indefinidas, es decir, definidas solo por probabilidades. Este hecho tiene consecuencias, como la

existencia del entrelazamiento cuántico, que explican por qué en la física cuántica son posibles algunos fenómenos que no lo son en la física clásica, como, por ejemplo, el teletransporte cuántico.

Las características y fenómenos “especiales” de la física cuántica pueden ser más o menos llamativas a primera vista, pero han sido comprobadas en los laboratorios durante décadas y están ya perfectamente bien entendidas en la actualidad, hasta el punto de que se usan para generar nueva tecnología. En el capítulo 3 hemos intentado comprender el funcionamiento de una nueva generación de tecnologías basada en la física cuántica y ofrecer una perspectiva realista de su estado de desarrollo actual y sus inmensas posibilidades futuras. Desde los ordenadores cuánticos hasta la metrología cuántica, hemos concluido que un rasgo común a todas ellas es que se encuentran en un interesante estado intermedio de desarrollo: por un lado, ya han conseguido salir de los recintos teóricos o académicos, pero, por otro, todavía están lejos de poder desarrollar todo su potencial. Sin embargo, es previsible que las tecnologías cuánticas tengan un impacto importante en áreas cruciales de la sociedad del futuro, desde las redes de información y comunicaciones hasta tal vez el diseño de nuevas moléculas y materiales con aplicaciones médicas. Por tanto, la física cuántica tendrá un papel de importancia creciente en nuestras vidas. En ese contexto, comprenderla adecuadamente y no contribuir a la propagación de bulos, mitos y mentiras sobre ella será cada vez más necesario. La consolidación de una visión oscurantista y mística sobre la física cuántica solo serviría para incrementar la confusión y la incultura, y podría tener efectos muy peligrosos si continúa favoreciendo la proliferación de estafas y supercherías pseudocientíficas. Ojalá este libro sea una herramienta útil para todos aquellos que no quieran caer, ni hacer caer a otros, en esos abismos: una herramienta en contra de la ignorancia y la desinformación, a favor de la cultura.

Glosario

Cuanto. Unidad mínima de energía y otras magnitudes físicas. En la física cuántica, la energía (por ejemplo) no puede tomar cualquier valor, sino solo valores que sean múltiplos del cuanto de energía.

Cúbit o bit cuántico (traducción del término inglés *qubit*). Sistema cuántico con dos niveles, es decir, dos posibilidades distintas para una determinada magnitud física (energía, espín, etc.). Estos dos niveles se suelen denotar como 0 y 1, en analogía a los bits clásicos de los ordenadores convencionales. La principal diferencia es que los bits cuánticos pueden estar en estados en los que la magnitud física relevante no está bien definida, sino que está definida por probabilidades: hay una cierta probabilidad de estar en 0 y una cierta probabilidad de estar en 1.

Clásico. No cuántico, es decir, referido a todas las áreas de la física que no son física cuántica.

Entrelazamiento cuántico. Tipo especial de correlaciones entre las distintas partes de un sistema cuántico (por ejemplo,

entre distintas partículas, como electrones o fotones), que son imposibles de alcanzar con sistemas clásicos. No aparecen en todos los estados posibles, sino en algunos estados especiales. No implican ningún tipo de transmisión instantánea (o a velocidades superiores a la de la luz) de información, pero sí permiten realizar fenómenos imposibles en sistemas clásicos, como el teletransporte cuántico.

Estado. Descripción de la situación de un sistema físico. En física clásica suele bastar con números (o a lo sumo también direcciones para formar vectores) para describir las principales características de un sistema (posición, velocidad, energía, etc.), salvo que estemos tratando con ondas. En física clásica, incluso los sistemas que solemos llamar “partículas”, como los electrones o fotones, necesitan una función de onda para describir su estado, que nos dice las distintas probabilidades de tomar distintos valores que tiene el sistema.

Medida/medición. Proceso por el cual se determina el valor de una magnitud física (energía, posición, tiempo, espín...). Consiste en la interacción entre el sistema físico que queremos medir y algún aparato de medida. Naturalmente, el aparato será también otro sistema físico. Sin embargo, no tiene que estar regido por la física cuántica; será, en general, un sistema clásico. En la física clásica, normalmente consideramos que este proceso de medida no incide de ninguna manera en el sistema que queremos medir; en la física cuántica, en cambio, sabemos que esto no es así, ya que el proceso de medida puede cambiar el estado del sistema. (A este proceso de medida se le llama en ocasiones, de manera confusa y arbitraria, “observación”. No hemos usado ese término ni las correspondientes “observar”, “observable”, etc., en este libro, y recomendamos no usarlas en contextos de divulgación científica).

NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum). Descripción del estado actual de los ordenadores cuánticos, caracterizado por el hecho de que todavía tienen una probabilidad alta de cometer errores y por su tamaño medio.

Sistema/objeto físico. Términos que los físicos usamos para no decir “cosa”.

Teletransporte cuántico (traducción del inglés *quantum teleportation*). Proceso por el que se transfiere el estado de un sistema cuántico a otro, sin necesidad de conocerlo, gracias al entrelazamiento. Es completamente inaplicable en sistemas clásicos, y no tiene nada que ver con el concepto de teletransporte de la ciencia ficción.

Supremacía cuántica. Superioridad de un ordenador cuántico con respecto a un ordenador convencional. Es una posibilidad prevista por la teoría, que está muy cerca de alcanzarse en los experimentos.

Bibliografía

- AARONSON, S. y ARKHIPOV, A. (2011): “The computational complexity of linear optics”, *Proceedings of the 43rd annual ACM symposium on Theory of Computing-STOC11*, 333.
- ACZEL, A. D. (2004): *Entrelazamiento*, Crítica, Barcelona.
- ARUTE, F. *et al.* (2019): “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature*, 574, 505.
- ARROYO, E. (2017): *Tecnologías cuánticas*, RBA, Barcelona.
- BENNETT, C. H. *et al.* (1993): “Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels”, *Physical Review Letters*, 70, 1895.
- FEYNMAN, R. (2000): *Física. Volumen III. Mecánica cuántica*, Addison Wesley Longman, México.
- (2003): *Conferencias sobre computación*, Crítica, Barcelona.
- (2015): *El carácter de la ley física*, Tusquets, Barcelona.
- GROVER, L. K. (2001): “From Schrödinger’s equation to quantum search algorithm”, *American Journal of Physics*, 69, 769.
- HAWKING, S. W. (ed.) (2014): *Los sueños de los que está hecha la materia*, Crítica, Barcelona.

- NIELSEN, M. A. y CHUANG, I. L. (2000): *Quantum Computation and Information*, Cambridge University Press.
- PRESKILL, J. (2012): “Quantum computing and the entanglement frontier”, *The theory of the quantum world. Proceedings of the 25th Solvay Conference on Physics*, World Scientific.
- (2018): “Quantum computing in the NISQ era and beyond”, *Quantum*, 2, 79.
- SABÍN, C. (2019): “Mucha gente entiende la mecánica cuántica”, en O. Sobrido (ed.), *Cañones de wolframio y otros textos científicos*, Jot Down Books, Sevilla.
- (2015-2019): *Cuantos completos*, blog dentro de la plataforma Scilogs.
- SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coord.) (2002): *Física cuántica*, Pirámide, Madrid.
- TIPLER, P. A. y MOSCA, G. (2010): *Física para la ciencia y la tecnología*, vol. 2C: *Física moderna*, Reverté, Barcelona.
- SHOR, P. W. (1994): “Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring”, *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*.
- WARNER, M. y CHEUNG, A. C. H. (2013): *A Cavendish Quantum Mechanics Primer*, Peryphyseos Press, Cambridge, 2ª ed.
- YIN, J. *et al.* (2017): “Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers”, *Science*, 356, 1140.

¿QUÉ SABEMOS DE?

Verdades y mentiras de la física cuántica

¿Partículas que están en dos sitios a la vez? ¿Observadores que modifican la realidad? La física cuántica tiene un peso creciente en la cultura popular y está llena de mitos y malentendidos. No describe objetos con los que estamos familiarizados, sino que es sobre todo la física de las pequeñas partículas (electrones, fotones, átomos...) o de objetos sometidos a condiciones exclusivas de laboratorio. En esta obra, Carlos Sabín intenta desmentir las creencias erróneas más comunes y los mitos que rodean a la física cuántica, poniendo especial énfasis en demostrar que no es algo misterioso e incomprensible, sino una parte de la física que da lugar a nuevas tecnologías que sin duda mejorarán nuestra vida: ordenadores y simuladores cuánticos o aparatos de criptografía son ya una realidad.



Carlos Sabín es doctor en Física por la Universidad Complutense de Madrid e investigador en el Instituto de Física Fundamental del CSIC. Su interés científico se centra en el campo de las tecnologías cuánticas. Es un activo divulgador, especialmente a través de su blog *Cuantos completos*.

ISBN: 978-84-00-10598-3



9 788400 105983



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS