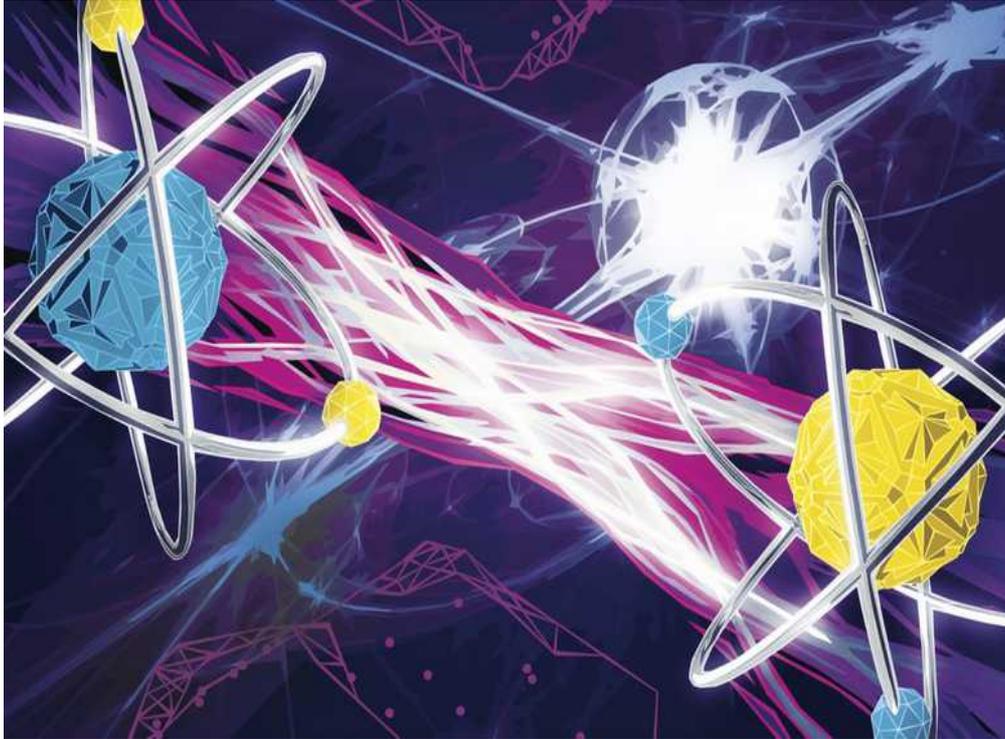


La física cuántica, para entenderla por fin

Sidney Perkowitz *



No podemos observarlos directamente, pero el comportamiento de átomos, quarks, fotones y todo aquello que compone la realidad a una escala nanométrica o menor confirma que aún no sabemos gran cosa del universo. La teoría cuántica—que describe estas diminutas partículas—dejó de ser una rareza antes confinada al laboratorio; ahora invade nuestras vidas y se encuentra en el teléfono inteligente que llevamos en nuestro bolsillo, y hasta en el número de la tarjeta de crédito que usamos para comprar por internet. La “cuántica” aparece cada vez más en términos como “sanación cuántica” y “políticas cuánticas”. Cuántico se ha convertido en una palabra de moda. Cualquier relevancia científica en estos usos es puramente accidental; sin embargo, esto ilustra que lo “cuántico” posee una mística más allá de lo científico.

A pesar de que la mecánica cuántica surgió para resolver un problema científico, más de un siglo después aún guarda algo de misterio. La física cuántica predice comportamientos paradójicos o increíbles. Por ejemplo, una partícula cuántica no posee solo un valor de una cantidad física, sino todos los valores al mismo tiempo, algo que se llama superposición; dos partículas cuánticas pueden permanecer ligadas o “entrelazadas”, aun a distancias ilimitadas y sin ninguna conexión física de por medio; y se pueden teletransportar a través del espacio vacío.

> Los saltos cuánticos pueden encontrarse en tu bar favorito y en el supermercado local

En 2011, el físico austríaco Anton Zeilinger aplicó un cuestionario con 16 preguntas de opción múltiple a más de 30 especialistas en teoría cuántica, acerca de sus conceptos básicos y su interpretación. Ninguna de las posibles respuestas recibió apoyo unánime, pues muchas de las preguntas provocaron un amplio rango de opiniones. Según el investigador Charles Clark, codirector del Joint Quantum Institut en la Universidad de Maryland, sería “un gran tema ubicar dónde está el problema” que hace que la teoría cuántica sea tan difícil de interpretar. En parte, esto se debe a que es muy abstracta, por mor de la pequeñez de lo que describe. Cuando pateamos un balón, obtenemos conocimiento empírico de cómo funciona el mundo a una escala humana. Pero no podemos patear un quark o aventar un fotón; solo podemos describir estas partículas con ayuda de la teoría cuántica.

Una idea desesperada

Cuando Max Planck inventó la teoría cuántica en 1900, pensó que solo era un truco matemático. Pero su “truco” explicaba por qué los físicos de la época no podían responder a esta pregunta: “¿Cuál es la naturaleza de la luz emitida por una llama o cualquier otro cuerpo caliente?” Sabían que la luz era una onda electromagnética generada por partículas cargadas eléctricamente, como los electrones, pero el problema era que los cálculos que usaban para aplicar esta teoría contradecían los resultados del laboratorio del espectro de luz generado por objetos calientes.

Planck probó varias soluciones para resolver el problema antes de dar con la idea de que la luz es emitida por medio de energías “cuánticas”, múltiplos exactos de cierta cantidad mínima, o “cuanto”. A esto lo llamó “un acto de desesperación”, pero produjo el espectro correcto de luz de un cuerpo caliente y eso le valió el Premio Nobel en 1918. Después, Albert Einstein y Niels Bohr obtuvieron sus propios premios Nobel al extender el trabajo de Planck. Einstein mostró que la luz viene en discretos paquetes de energía, luego llamados fotones, y Bohr planteó que los electrones en un átomo absorben o emiten fotones al tiempo que brincan entre niveles de energía cuántica.

Fue asombroso encontrar que el mundo operaba de esta extraña manera. Ahora se sabe que los saltos cuánticos y todo lo demás son reales. Pero, ¿por qué la humanidad no notó los “cuantos” hasta 1900? Porque hablamos de una cantidad de energía muy pequeña. Incluso el febril brillo de una vela representa un torrente de fotones (trillones por segundo). La luz que irradia una fuente es como arena derramándose de un cubo; parece ser una corriente continua, pero en realidad es una multitud de diminutos granos perdidos dentro del flujo mayor. De forma similar, los saltos cuánticos en los átomos son cambios extremadamente pequeños en la energía, aunque el uso popular de “saltos cuánticos” con frecuencia hace referencia, incorrectamente, a grandes cambios.

Saltos cuánticos reales

Pueden encontrarse en tu bar favorito o en el supermercado local. Siempre que veas brillar el anuncio luminoso de alguna cerveza o el escáner de un código de barras, mira detenidamente: estás observando saltos cuánticos eléctricos en acción a través de sus huellas dactilares, la emisión de la luz, como Niels Bohr determinó.

Un anuncio de neón es un tubo de cristal relleno con el gas noble neón o con otro gas que brilla cuando se le aplica un voltaje. La “descarga luminosa”, vista por primera vez a finales del siglo XIX, funciona porque el voltaje eleva a los electrones de los átomos del gas a un nivel más alto de energía; después, los electrones descienden a niveles más bajos y sueltan fotones. Los gases poseen diferentes niveles de energía atómica, y estos niveles definen las longitudes de onda del fotón. El neón produce luz roja, el argón genera luz azul... y así.

La descarga luminosa está también en la iluminación fluorescente y en el láser. En un tubo fluorescente, los saltos cuánticos en el vapor de mercurio crean fotones ultravioleta, que activan un revestimiento dentro del tubo, el cual produce luz blanca. El láser, inventado en 1960, es como un tubo de descarga entre dos espejos. Al tiempo que los fotones de un salto cuántico atómico rebotan de un lado a otro, estimulan más fotones de los átomos que lo atraviesan. Eso produce un rayo mejorado de luz pura en una sola longitud de onda. Un rayo cuya infinita gama de usos hace evidente que la energía cuántica es real.

Los saltos cuánticos aparecen también en los diodos emisores de luz (led) . Los leds están hechos de semiconductores en los cuales los electrones deben saltar a través de una brecha hacia una energía mayor, antes de moverse como corriente eléctrica. Al aplicarle voltaje al led, los electrones saltan la brecha, y después regresan produciendo fotones.

Además de para el led, el comportamiento cuántico es crucial para los aparatos digitales. Sus circuitos integrados están hechos de silicio semiconductor, cuya brecha de energía cuántica permite un buen control de los electrones para manipular los bits digitales.

Jugar a los dados

Aunque los saltos cuánticos se consideraron radicales, no contradicen las visiones existentes del mundo. La superposición, el entrelazamiento y la teletransportación, sin embargo, producen más extrañeza porque se

oponen a nuestro entendimiento del universo. Estos problemas surgen porque la teoría cuántica no predice valores definitivos para las propiedades físicas, sino solo probabilidades.

Einstein no creía que la naturaleza fuera azarosa, como lo expresó en su famoso comentario “Dios no juega a los dados con el universo”, pero en teoría cuántica este no parece ser el caso. Una bola de béisbol tiene cierto impulso, pero en el mundo cuántico, cualquier partícula lleva en sí todos sus posibles valores físicos al mismo tiempo o en “superposición” hasta que es medido o interactúa con el ambiente.

Por ejemplo, la propiedad llamada “giro” hace que los electrones se comporten como pequeñas barras magnéticas con su polo norte apuntando hacia arriba (U) o abajo (D). En teoría cuántica, el electrón está en estos estados al mismo tiempo, pues existe una probabilidad del 50% de que una medición muestre U o D.

El experimento del “Gato de Schrödinger” –como lo imaginó en 1935 el pionero de la teoría cuántica Erwin Schrödinger– ilustra esta naturaleza estadística. El gato está muerto o vivo dependiendo de un evento aleatorio y, por tanto, puede describirse en ambos estados a la vez.

Extraño, pero útil

Necesitamos comprender estos raros efectos si deseamos entender la física cuántica; pero, incluso sin eso, la cuántica está entrando en la tecnología digital. Los circuitos integrados en los aparatos digitales representan bits binarios en pequeños interruptores electrónicos que se prenden o apagan para representar el 0 y el 1. Pero cualquier sistema con dos posibilidades también puede representar el 0 y el 1, incluyendo los estados U y D de los electrones y los estados H y V de los fotones; solo por medio de la superposición, estos representan 0 y 1 simultáneamente.

Esta es la idea innovadora detrás del bit cuántico, o qubit, una especie de superbit (el nombre se inventó como un chiste en 1995). Por ejemplo, dos bits ordinarios representan solo uno de los números decimales 0, 1, 2, 3... pero dos qubits representan los cuatro números al mismo tiempo. La ventaja crece rápidamente, de tal forma que 20 qubits cargan 20 millones más de veces la información que 20 [bits](#). Se ha estimado que una computadora “cuántica” que usase 150 o 300 qubits tendría el poder de todas las supercomputadoras convencionales del mundo juntas.

El Joint Quantum Institute de la Universidad de Maryland y una docena de laboratorios más alrededor del mundo trabajan para usar qubits en la informática y también en las telecomunicaciones, ya que los fotones que atraviesan una amplia red de fibra óptica cargan gran parte de la información que viaja por el mundo, desde las llamadas telefónicas hasta las descargas de internet. Sin embargo, la tecnología de los qubit es difícil de implementar, porque las partículas deben ser aisladas del ambiente y mantenerse a temperaturas ultrabajas para que permanezcan en superposición. Pasarán años antes de que tengamos la computadora de 150 qubits, pero ya se han construido y programado las versiones de prueba que usan unos cuantos qubits de fotones para resolver el problema. Los qubits de fotones también se están utilizando para realizar transmisiones de información más seguras por medio de las aplicaciones del entrelazado.

Teletransportación

El primer paso para entrelazar fotones es crear un par correlacionado con uno de ellos en estado H y el otro en estado V (lo cual se puede obtener enviando luz a través de ciertos cristales), aunque aún no sabemos cuál es cual. Si después se separa ampliamente a los fotones, estos mostrarán una propiedad sorprendente. Si se mide al fotón 1 como H, la medición del fotón 2 dará V; pero si el fotón 1 se mide como V, el segundo fotón da H. De alguna manera, el fotón 2 “sabe” el resultado de la medición del fotón 1 y se ajusta de acuerdo con ese resultado; las dos partículas están entrelazadas.

Para observar lo excepcional que es esto, pongámoslo en un contexto más familiar. Un cajón en la Ciudad de México contiene un número idéntico de calcetines negros y blancos, al igual que un cajón en Toronto, Canadá. Si se elige en forma aleatoria un calcetín en la Ciudad de México y un amigo escoge otro en Toronto, la mitad de las veces las elecciones coincidirán. Pero si los calcetines están entrelazados, como los fotones, no importa qué color elijas, tu amigo escogerá el otro color en todas las ocasiones, a pesar de la distancia entre los dos calcetines y la ausencia de cualquier conexión física.

El entrelazado de los fotones se demostró en el laboratorio en 1982; las últimas mediciones muestran que puede operar en distancias de hasta 144 kilómetros de espacio vacío. También señalan que cualquier

información transmitida entre los fotones viaja 10.000 veces más deprisa que la [luz](#) y quizá de manera instantánea. Esto contraviene los resultados de la relatividad de Einstein, donde se asegura que nada puede viajar más rápido que la luz. Peor aún, la transmisión instantánea nos hará volver a considerar por completo nuestras nociones de tiempo y espacio.

Mucho antes de que se dieran estos inquietantes resultados, a Einstein le costaba trabajo aceptar el entrelazamiento y lo llamó “una espeluznante acción a distancia”. Pero existe, con partículas conectadas de algún modo por un desconocido canal cuántico que no logramos comprender. Aún más: los investigadores han llevado este misterioso vínculo más allá, al campo de la teletransportación. En ese medio de transporte tan común en la ciencia ficción, una persona o un objeto es replicado en otra parte mientras desaparece de su ubicación original, como podía verse en las historias de Star Trek. En 1993, Charles Bennett de IBM y sus colegas mostraron en teoría cómo teletransportar un fotón. Imaginando un par de fotones entrelazados en distintas ubicaciones, A y B, demostraron que el estado polarizado de un tercer fotón podía enviarse de la posición A al fotón en B, por medio del canal de entrelazamiento, recreando de tal manera al tercer fotón en el sitio lejano. Anton Zeilinger (el del cuestionario cuántico) y sus colegas demostraron la teletransportación de un fotón en el laboratorio en 1997, y en 2012 reportaron haber teletransportado fotones en distancias mayores a 143 kilómetros.

> Un ordenador cuántico tendría el poder de todas las supercomputadoras convencionales del mundo

El secreto cuántico

Estos efectos van más allá de la ciencia ficción cuando los fotones polarizados se controlan como qubits en la criptografía cuántica, método diseñado para transmitir información de modo seguro por medio de una red de fibra óptica. En 1984, Charles Bennett y Gilles Brassard inventaron la distribución de la llave cuántica. Como la combinación de un candado, la “llave” es un largo hilo de bits que conforman la contraseña secreta para acceder a un complejo de algoritmos que codifican y decodifican información. El código es indescifrable sin la llave, pero esta, a su vez, debe ser difundida del transmisor al receptor cuando corre el riesgo de ser leída por un tercero.

Bennett y Brassard mostraron cómo podía evitarse esa vulnerabilidad en la seguridad usando la aleatoriedad cuántica de los qubits de fotones, para crear un único y azaroso hilo de bits que funcionara como una codificada llave secreta basada en el entrelazamiento de fotones. Las llaves cuánticas se han usado para asegurar transferencias bancarias y resultados electorales en Suiza. Aún no son comunes.

Rareza cuántica de tamaño completo

Es posible que jamás seamos capaces de teletransportar gente o grandes objetos, pero en 2011, Ian Walmsley, de la Universidad de Oxford, y sus colegas entrelazaron objetos macroscópicos visibles para el ojo humano: dos diamantes, cada uno de tres milímetros de largo.

Los átomos en sólidos cristalinos, como los diamantes, vibran a energías cuánticas, las cuales se encuentran en cantidades inusuales en los átomos de carbono de los diamantes. En el experimento, estos efectos exteriores se mantuvieron al margen lo suficiente como para preservar los estados cuánticos y permitirles a los investigadores enlazar los diamantes a distancias de hasta 15 centímetros. Este es un paso en la creciente extrañeza cuántica para llegar a un punto en el cual sea más fácil examinarla y comprenderla.

La idea de Max Planck en 1900 comenzó un viaje desde el mundo ordinario hacia el mundo submicroscópico. Aunque aún no comprendemos por completo la teoría cuántica, ilumina este mundo y hace que la tecnología avance. Con resultados como los del experimento de los diamantes, continuamos el viaje trayendo el universo submicroscópico al mundo que ocupamos. Planck, Einstein y Bohr estarían hoy completamente fascinados.

*** El autor de este artículo, es profesor emérito de Física en la Universidad Emory. Algunos de sus libros son “*Slow Light*” y “*Hollywood Chemistry*”.**