

Paradojas cuánticas

Antonio Rincón Córcoles

Quien no se sorprende de la física cuántica es porque no la entiende

Niels Bohr

Ningún científico que se precie rebatiría hoy que la mecánica cuántica es el modelo más preciso concebido por el hombre para describir la naturaleza física de lo infinitamente pequeño. De esta teoría, surgida en los albores del siglo XX, dimanaban sin embargo no pocas paradojas en las que se cuestiona la existencia misma de una realidad objetiva. Una de las más conocidas es la propuesta con cierto afán provocador por Erwin Schrödinger en 1937.

Schrödinger ideó un experimento mental tan chocante como cruel. Imaginó a un gato metido dentro de una caja sellada y totalmente opaca a la que se habría provisto de un mecanismo diabólico: una máquina radiactiva que, si emitía una cierta partícula, destapaba un frasco de letal veneno. La máquina tenía una probabilidad del 50% de proyectar la partícula en cuestión en un tiempo de una hora. De esa forma, transcurrido el plazo, el gato tendría un 50% de probabilidades de seguir vivo y otro 50% de haber perecido emponzoñado.

Para conocer el destino del animal no tendríamos otro remedio que abrir la caja, para encontrárnoslo o

vivo o muerto. El sentido común nos dice que, en el segundo de los casos, el gato habría fenecido un cierto tiempo antes, porque el acto de morir es independiente de que nosotros estemos al corriente de los hechos. Pero la física cuántica no siempre lo ha entendido así.

En una de sus exposiciones canónicas, el modelo cuántico describe la situación dentro de la caja cerrada como la superposición de dos estados equiprobables: gato vivo (50% de probabilidades) y gato muerto (otro 50%). Y se atreve a decir que, dentro de la caja, el gato está vivo y muerto a la vez. Es sólo la decisión del experimentador de abrirla, esto es, de “medir” el fenómeno, lo que modifica el indeciso estado del animal y obliga a la realidad a decantarse por uno u otro fin, ya sea el feliz o el luctuoso.

¿Pero cómo puede un gato estar vivo y muerto al mismo tiempo? Existen varias formas de “desmontar” la paradoja. Durante decenios se sostuvo que la mecánica cuántica sólo es capaz de proporcionar recuentos estadísticos para sucesos microscópicos, pero no de describir casos y situaciones concretos en el mundo “corriente”; en esta presunta incompletitud de la teoría estaría el truco. En el extremo opuesto se ha apuntado una interpretación altamente seductora: la realidad sólo existe en la medida en que nosotros la percibimos, y fuera de nuestra percepción no hay más que una masa informe

Paradojas cuánticas

de probabilidades que se van perfilando en hechos conforme se cumplen nuestras vidas. Es decir, el gato vive o muere sólo desde el momento en que nosotros sabemos si ha sobrevivido o no al experimento. Hasta entonces, su estado permanece en el limbo de las incertidumbres cuánticas.

Algunos llegan todavía más lejos. Supongamos que abrimos la caja y que el gato aparece vivo y coleando. Pues bien, ése es sólo uno de los resultados posibles. Pero el otro, el felino muerto, también se ha producido. Lo que sucede es que en ese universo paralelo de gatos envenenados no estaríamos nosotros para descubrirlo.

UNA TEORÍA NADA INTUITIVA

El experimento de Schrödinger no es sino una de las numerosas pseudo-paradojas que abundan en la postulación de la mecánica cuántica. Ciertamente, no todos los científicos se han sumado a interpretaciones tan esotéricas como las enunciadas en esta introducción¹. El análisis simplista del “colapso de la función de onda” que subyace a la indeterminación propuesta en el estado vital del gato hasta que se abre la caja ha sido rebatida, incluso con ardor, por eminentes teóricos. Algunos tan prestigiosos como Wojciech Zurek y Murray Gell-Mann² han profundizado en el concepto complementario de “decoherencia”, un modelo que sirve de puente racional entre el desconcertante mundo cuántico y el cotidiano que observamos... o creemos observar.

Porque a la vez que la mecánica cuántica se ha revelado como un poderosísimo instrumento que permite explicar los fenómenos microscópicos de la naturaleza con precisión y solidez innegables, revela en el universo unas propiedades asombrosas, casi incomprensibles, cuando se estudia en la escala subatómica. Científicos muy serios y reconocidos no se ruborizan al considerar posible, en un remotísimo plano hipotético, que una persona atravesase un muro sólido sin tocarlo; para ello “bastaría” que los estados cuánticos de la infinitud de

átomos que componen el hombre y la pared se acomodaran mutuamente de un modo óptimo (es el llamado “efecto túnel”). Otros hablan abiertamente de “muchos mundos” o “universos paralelos” como una forma de dar cuenta de las rarezas cuánticas. Hasta el célebre teleportador de la serie televisiva *Star Trek* encuentra en este extraño contexto una equivalencia con visos de realidad, aún especulativa pero investigada como un medio factible para la encriptación y transmisión instantánea de informaciones dentro de los modelos de la computación cuántica.

Evidentemente, nadie ha visto a un ser humano atravesar indemne una pared de roca, ni ha vislumbrado ningún universo paralelo a la vuelta de la esquina. Y, desde luego, la teleportación no forma parte todavía de las ofertas de las agencias de viajes, por atrevidas que éstas puedan ser. Tales portentos de la naturaleza parecen reservados a la dimensión subatómica, como demuestran con insistencia los experimentos realizados al efecto. Para mayor perplejidad, estos mismos trabajos niegan incluso que el vacío sea tal: al contrario, lo declaran inundado de fluctuaciones cuánticas que provocan una vertiginosa sucesión de creaciones-aniquilaciones de partículas virtuales de vida ultraefímera. Visto a una escala suficientemente pequeña³, el supuesto “vacío” del espacio perdería así su atonía y lisura proverbiales para convertirse en una espuma cuántica en furiosa agitación.

Ya desde sus inicios, cuando quedó claro que muchos de los resultados de la mecánica cuántica contradecían la intuición humana sobre las cualidades del universo, se suscitaron intensos debates filosóficos que dieron origen a multitud de posturas e interpretaciones. Entre tanto, el edificio en construcción de la teoría de los cuantos siguió levantándose como uno de los más perfectos y robustos de los ideados por la mente del hombre. Transcurrido un siglo desde que Planck y Einstein pusieran su piedra angular, ningún experimento científico ha logrado aún contradecir las predicciones más profundas y sorprendentes de la mecánica cuántica.

¹ Se dice que Stephen Hawking, parafraseando a cierto jefe nazi, declaró una vez: “Cuando oigo hablar del gato de Schrödinger, echo mano a mi pistola”.

² Wojciech Zurek, de origen polaco aunque radicado en los Estados Unidos, es una de las autoridades más reconocidas en el dominio de la mecánica y computación cuánticas. Murray Gell-Mann, Premio Nobel de física en 1969 por sus trabajos sobre partículas elementales, es además un destacado divulgador que acuñó el afortunado término científico de *quark*.

³ Por debajo de la denominada longitud de Planck, del orden de 10^{-33} cm.



Visto a una escala suficientemente pequeña, el vacío no es tal, sino un mar de fluctuaciones, una **espuma cuántica** engendrada por la incesante creación y destrucción de partículas elementales. Este concepto ha adquirido una importancia creciente en los modelos cosmológicos de descripción del universo. (Imagen por cortesía de Sci-Fi Arizona)

REVOLUCIÓN CUÁNTICA

A finales del siglo XIX, los científicos se regocijaban con la elegancia y brillantez de los logros del pensamiento humano. Las matemáticas se antojaban casi perfectas, salvo por algunos detalles que se aspiraba a resolver en corto plazo. La física de la naturaleza parecía del todo guarnecida con las leyes de Newton que explicaban la gravitación y la mecánica de los cuerpos y con las “maravillosas ecuaciones” del electromagnetismo postuladas en 1864 por James Clerk Maxwell. Algunos flecos de índole termodinámica y la esperanza de dar molde definitivo a las hipótesis sobre la luz y el átomo parecían los últimos grandes retos pendientes de superación. Aquel ingenuo optimismo pronto se vería desbordado por los acontecimientos. Y precisamente el fenómeno luminoso iba a servir de llave de entrada a una nueva casa del conocimiento llena de sorpresas que sacudieron hasta la raíz las convicciones científicas más firmes.

En su año milagroso de 1905, Albert Einstein sentó las bases de una nueva física cuyas derivaciones terminarían por superar los límites de su propio intelecto. Con su teoría de la relatividad demostró con nitidez que la luz no necesita ningún soporte material para desplazarse (la anhelada búsqueda del “éter lumínico” quedó así crudamente truncada) y obligó al mundo a modificar de un modo radical sus ideas sobre el espacio, el tiempo, la energía, la masa y la gravedad. Con su análisis del efec-

to fotoeléctrico, que le valdría el Premio Nobel, dejó claro que la luz se intercambia dentro de los átomos en forma de “paquetes discretos”, dando cuerpo de naturaleza a la teoría de los *quanta* que había sugerido el alemán Max Planck cinco años antes para resolver un molesto problema de la termodinámica.

En plena fiebre de la atomística y de la exploración de las partículas elementales fueron muchos los investigadores que adoptaron la hipótesis cuántica como un modelo válido para avanzar en sus trabajos. Tras unas décadas de dudas y titubeos, mediada la década de 1930 se habían asentado ya sólidamente los grandes principios de esta revolucionaria disciplina:

- Determinadas cantidades físicas están *cuantizadas* o discretizadas en la naturaleza. Por ejemplo, la luz está formada por los “cuantos lumínicos” (fotones) que actúan de intermediarios en los trasvases de energía entre los electrones dentro de los átomos.
- Materia y energía son dos manifestaciones externas de un mismo ente físico, de manera que toda partícula comporta una radiación y a toda radiación se le asocia una partícula. Tal es la denominada *dualidad corpúsculo-onda*.
- El comportamiento de las dualidades corpúsculo-onda se estudia mediante funciones de onda, que no asignan valores únicos a los hechos observables, sino *distribuciones de probabilidad*.

Paradojas cuánticas

- A escala cuántica domina el *principio de incertidumbre* o *indeterminación*, postulado por Werner Heisenberg y que sostiene que, por razones inherentes a la propia textura de la naturaleza, es imposible medir con total precisión dos magnitudes físicas conjugadas (por ejemplo, posición y velocidad), pues al aproximar el resultado observable en una se deteriora la exactitud de la otra.

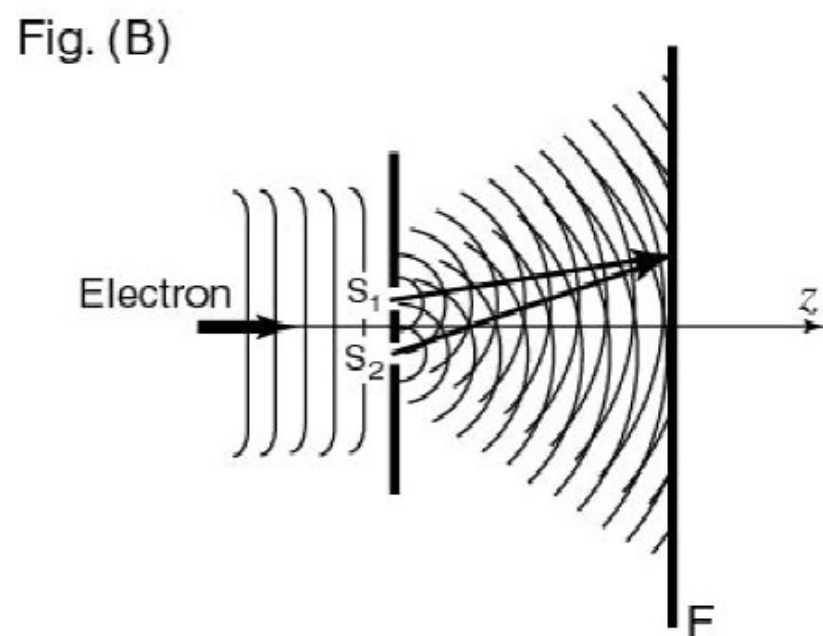
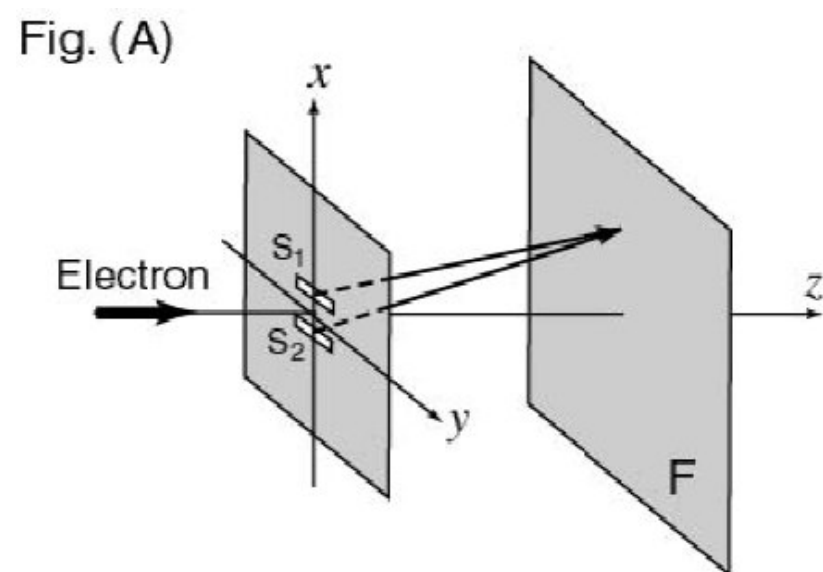
La poderosa formulación matemática de la teoría cuántica, universalmente admirada por su rigor formal, despertó en cambio no pocas dudas acerca de su competencia para describir la realidad. Ciertamente es que la idea de una naturaleza cuantizada casaba bien con los estudios coetáneos sobre el átomo y sus componentes, y que era ya admitido que la luz posee un carácter dual, de onda y corpúsculo, sustentado en unas peculiares partículas sin masa denominadas fotones. Costaba algo más reconocer que también los átomos, electrones, protones y demás partículas subatómicas, provistos de una masa bien determinada, se comportaran además como radiaciones sujetas a fenómenos de interferencia o difracción como cualquier onda "inmaterial". Pero si resultaba doloroso admitir la indeterminación intrínseca de las propiedades físicas, que arruinaba para siempre el sueño secular de aprehender la realidad en sus detalles mínimos, para algunos era casi inadmisibles asumir un modelo probabilístico de descripción del mundo. "Dios no juega a los dados" con el universo, vino a decir Einstein, atribulado ante la perspectiva de reducir las teorías físicas a un complejo e imprevisible juego de azares. La polémica estaba servida.

EL EXPERIMENTO MÁS BELLO

La rareza de los postulados cuánticos queda claramente de manifiesto con la necesaria reinterpretación del clásico experimento de la doble rendija, al que el físico contemporáneo Richard Feynman calificó de "misterio central" de la naturaleza. En los inicios del siglo XIX, el mundo de la física mantenía uno de esos largos debates que han jalonado la historia de la ciencia. El insigne inglés Isaac Newton había dejado escrito que la luz está formada por corpúsculos materiales que viajan por el espacio; el no menos renombrado neerlandés Christiaan Huygens había defendido hasta su muerte la naturaleza ondulatoria de la luz, que asemejaba a la del sonido en el aire. Tras décadas de pugna entre los seguidores de ambos, por una vez el inmenso prestigio póstumo de Newton no pareció suficiente para sostener su postura,

dado que varios experimentos minuciosos apuntaban tozudamente a la validez de la idea de Huygens.

Uno de los más decisivos de aquellos experimentos fue el elaborado por el inglés Thomas Young en 1805. Este hombre inquieto, médico, físico y egiptólogo, tomó una fuente de luz y la dirigió hacia una pantalla opaca con una pequeña rendija de unas décimas de milímetro de anchura practicada en su superficie. Hizo después incidir la luz saliente de la rendija sobre otra pantalla provista de dos pequeñas rendijas paralelas. Finalmente, llevó al flujo luminoso a impactar en una tercera pantalla, situada a varios metros de distancia, que le sirvió de soporte final de medición.



Experimento de la doble rendija con electrones.

En la figura A, el electrón incide en las dos rendijas S_1 y S_2 . En la figura B se muestra el esquema teórico de generación de los patrones de interferencia.

Lo que pudo ver Young en esta última pantalla iba a condicionar el camino seguido por la filosofía de la ciencia durante las décadas siguientes. En ella aparecían varias bandas alternativamente brillantes y oscuras, que se explicaron como resultado de la difracción y la interferencia entre las ondas luminosas emergentes de las

dos rendijas paralelas en el trayecto de la luz⁴. Así pues, si la luz producía interferencias consigo misma debía ser obligadamente una onda⁵.

En la analogía con las ondas mecánicas (sonido, olas de un estanque), la luz dio en imaginarse como un “chorro” inmaterial de radiación que se dispersaba por las dos rendijas y emergía al otro lado de la pantalla con ligeras modificaciones en el camino de cada “rayo secundario”. El encuentro de estos rayos divididos daría lugar en la pantalla final a las interferencias que se observaban. Pero después de que, justo al cabo de un siglo, Einstein demostrara que la luz es también un flujo de corpúsculos discretos (los “cuantos” de su versión del efecto fotoeléctrico), ¿cómo explicar el comportamiento de los rayos luminosos del experimento de Young?

La mecánica cuántica, con su hipótesis de la dualidad corpúsculo-onda para todas las partículas materiales, llegaba todavía más lejos. Si, como propugna, el electrón es un corpúsculo y contiene una onda asociada, al proyectar un haz electrónico sobre una pantalla con doble rendija emulando el experimento de Young deberían observarse también patrones de interferencia. ¿Sucedería así con todas las partículas materiales?, se preguntaban los científicos.

En 1927, Clinton Davisson y Lester Germer se pusieron manos a la obra y diseñaron un modelo experimental para contrastar esta hipótesis. Sus resultados demostraron indubitadamente que un haz de electrones proyectado sobre un cristal de níquel suscita un fenómeno de difracción, es decir, se comporta como onda. En 1961, el alemán Claus Jönsson se propuso construir un experimento con rendijas conceptualmente análogo al de Young que le llevó a comprobar, una vez más, la naturaleza ondulatoria del electrón⁶. Este experimento, elegido por los lectores de la revista *Physical Journal* como el “más bello de la física”, mueve a cierta perplejidad si se enfoca desde los esquemas mentales de la intuición corriente sobre cómo funciona el mundo.

Al pensar en un electrón contenido en un haz de partículas, la mayoría de los estudiantes de bachillerato o de los primeros cursos universitarios se imaginan una especie de bola o perdigón que viaja por el espacio

según una cierta dirección y con una velocidad dada. Al incidir sobre una superficie, dicha bola puede, como cualquier proyectil, atravesarla sin más, rebotar contra ella, desviarse, etc. Cuando un haz electrónico se encuentra con un sistema de doble rendija, parece lógico pensar que ciertos electrones pasarían por la rendija izquierda y otros por la derecha. Sin embargo, analizando los fenómenos de interferencia observados en los experimentos con haces electrónicos en un ámbito mecanocuántico, el comportamiento ondulatorio de estas partículas sugiere una interpretación bien distinta y nada convencional: para que se produzca la interferencia, el electrón tiene que pasar ipor las dos rendijas!

EINSTEIN CONTRA EL IMPERIO DE LA CUÁNTICA: PARADOJA EPR

Ninguna de las turbadoras conclusiones de la física cuántica complacía a Albert Einstein, cuya aportación fue fundamental para el nacimiento de esta disciplina. Cuando los desarrollos teóricos de la misma llevaron a componer un modelo de incertidumbres y probabilidades, Einstein se rebeló e inició, con el danés Niels Bohr como gran oponente, uno de los debates públicos más apasionantes de la historia de la ciencia moderna.

Varias veces derrotado en sus envites dialécticos, Einstein no perdió el ánimo y continuó adelante movido por la convicción de que el mundo descrito por los modelos cuánticos no sólo contradecía la intuición humana, sino que era antinatural. En 1935, con la colaboración de Boris Podolsky y Nathan Rose, publicó un artículo que pretendía demostrar que la mecánica cuántica no es una teoría física completa. Su enunciado, un experimento mental al gusto del sabio judeoalemán, ha pasado a conocerse como paradoja EPR, por las iniciales de sus tres autores.

La paradoja EPR aspiraba a poner en tela de juicio una de las conclusiones más revolucionarias de la mecánica cuántica. El objetivo central de Einstein y sus colegas era demostrar que, en contra de lo predicho por el principio de incertidumbre, las partículas subatómicas sí

⁴ Las figuras de interferencia serían en cierto modo semejantes a las que se aprecian en la superficie del agua cuando confluyen dos perturbaciones circulares surgidas al arrojar dos piedrecitas a un estanque.

⁵ Las interferencias luminosas se observan, por ejemplo, en las irisaciones de las pompas de jabón. Entre las aplicaciones más corrientes de este fenómeno figuran las técnicas de la holografía y la interferometría.

⁶ En posteriores experimentos cada vez más refinados, primero el equipo de Pier Giorgio Merli, de la Universidad de Milán (1974), y después el dirigido por Tonomura y col. en Hitachi, Japón (1989), redujeron el haz a un solo electrón, para demostrar sin sombra de duda el carácter ondulatorio-corpúscular de esta partícula.

Paradojas cuánticas

tienen una posición y una velocidad definidas en cada instante de tiempo, de modo que la creencia clásica en una realidad externa plenamente cognoscible debiera seguir imperando como uno de los paradigmas de la ciencia moderna.

El experimento de Einstein era el siguiente. Imaginemos que disponemos de una partícula inicial que logramos desintegrar en otras dos de igual masa a través de una cierta interacción de las conocidas en la física. Ambas partículas resultantes saldrían entonces proyectadas en direcciones opuestas y con tipos de movimiento especulares, una hacia la derecha y la otra hacia la izquierda. Los postulados cuánticos niegan la posibilidad de conocer con exactitud la posición y la velocidad de cada partícula, y aspiran sólo a desentrañar sus relaciones de probabilidad conforme a una función de onda probabilística (es más, en su interpretación canónica niegan la validez del determinismo científico y entienden la realidad física como intrínsecamente indeterminada). Pero el trío EPR objetó que era posible eludir la versión más estricta del principio de incertidumbre de Heisenberg con su sencillo sistema de partículas especulares.

Por el carácter del experimento, argumentaban, si se determinara con exactitud la posición de la partícula derecha se podría deducir indirectamente la de la partícula de la izquierda sin actuar en ningún momento sobre ella. Análogamente, habría sido posible también, si se hubiera preferido, fijar con total exactitud la velocidad de la partícula derecha, conociendo así exactamente la de la izquierda, de nuevo sin tocarla. De ello se deduciría que la partícula izquierda tiene una posición y una velocidad exactas, determinadas por la medida de posición que se ha hecho en la partícula derecha y por la que podría haberse realizado de la velocidad en esta misma partícula. En consecuencia, Einstein *dixit*, la mecánica cuántica es una descripción incompleta de la realidad: no es que el principio de incertidumbre rija en el mundo microcósmico; lo que sucede es que las mediciones simultáneas que cuestiona desbordan el ámbito de lo que la mecánica cuántica es capaz de manejar.

Debe señalarse que Einstein y sus colaboradores no pretendían demostrar que fuera posible medir a la vez con exactitud la posición y la velocidad de sus hipotéticas partículas en un entorno dominado por la incertidumbre de Heisenberg. Se conformaban con propugnar que dichas partículas *tienen* velocidades y posiciones definidas, y no indeterminadas por funciones de probabilidad, según reza la cuántica.

Transcurrieron bastantes años de arduos enfrentamientos dialécticos sobre la cuestión, entre el pragmatismo de los portavoces cuánticos (“lo que no puede medirse ni observarse no existe para la ciencia”) y el idealismo de los einstenianos (“la realidad existe más allá del hombre y de sus mediciones”). Los defensores mecanocuánticos seguían insistiendo en que en la naturaleza hay propiedades cuyas magnitudes no pueden tomar al mismo tiempo valores definidos; los seguidores del pensamiento de Einstein replicaban, simplemente, que lo que sucedía era que la cuántica es incapaz de determinar dichos valores. Y así se siguió hasta que, en 1964, el físico norirlandés John Bell logró refutar con un brillante desarrollo teórico los argumentos EPR.

En esencia, el esquema mental presentado por Einstein había partido del principio de que las dos partículas especulares de su experimento mental no mantienen entre sí ninguna relación de modo que, al modificar las propiedades de una, las de la otra permanecen inalteradas. Bell rebatió este pensamiento y postuló que era posible que cada una de estas partículas “supiera” de las vicisitudes experimentadas por la otra, con la que habría creado un lazo indisoluble por mor de su origen común. Así, alterar las propiedades de una de las partículas (posición, velocidad) supondría modificar de inmediato las magnitudes de la otra, dejando plenamente vigente el principio de incertidumbre. En el lenguaje elegido por la jerga, dichas partículas mantendrían un “entrelazamiento cuántico” (*quantum entanglement*) en un contexto de universo microscópico “no local”.

Omitiremos aquí los detalles del experimento ideado por Bell que, por restricciones tecnológicas, él mismo no pudo llevar a la práctica. Otros lo hicieron en su lugar con resonante éxito: primero en las décadas de 1970 y 1980 (Stuart Freedman y John Clauser, Alain Aspect) y, ya muerto Bell, con el definitivo desarrollo experimental de Nicolas Gisin en los laboratorios de Ginebra (1997). Usando detectores situados a unos once kilómetros de distancia entre sí e interconectados mediante fibra óptica, Gisin y su equipo constataron la realidad del entrelazamiento cuántico en un experimento con fotones: al estar entrelazados, la medida del espín⁷ de uno de ellos “fuerza” instantáneamente al otro, a kilómetros de distancia, a modificar el valor de su propio espín para adaptarlo a los cambios que induce la medida en su fantasmagórico *partenaire*. La objeción de Einstein quedó así sepultada bajo el criterio de la “no localidad”.

⁷ El espín es el momento intrínseco de rotación de una partícula elemental o de un núcleo atómico.



Las elucubraciones teóricas del físico irlandés **John Bell** sobre la "no localidad" del dominio subatómico delimitaron brillantemente el marco conceptual de la mecánica cuántica, pero han dado pie también a interpretaciones místicas injustificadas acerca de la naturaleza del universo físico.

TELEPORTACIÓN, CRIPTOGRAFÍA E INFORMÁTICA

Las implicaciones de los experimentos sobre el teorema de Bell no pasaron desapercibidas para la industria tecnológica. La chocante panorámica alumbrada por las hipótesis cuánticas permitía hablar de relaciones espaciales no locales e incluso, aunque sin consenso general, de una realidad física cuya íntima naturaleza no sería un conjunto de objetos independientes, como pudiera parecer, sino un todo indiviso inmerso en un flujo dinámico de intercambios permanentes⁸. Lo cierto es que parece posible mantener, de un modo misterioso pero efectivo, un contacto instantáneo mediante "enlaces cuánticos" entre lugares espacialmente distantes.

Lo primero que ha de decirse es que este fenómeno, una forma indirecta de teleportación, no viola el principio central de la relatividad especial de Einstein según el cual nada puede acelerarse hasta velocidades superiores a la de la luz. De lo que se trata es de aprovechar el supuesto entrelazamiento entre determinadas partículas para forzar en sentido aprovechable algunas de sus propiedades.

De acuerdo con los experimentos citados, si se tienen dos fotones entrelazados, cualquier medida realizada en el primero (que llamaremos A) influirá en el segundo (B) de un cierto modo aleatorio. Las observaciones directas en el fotón B mostrarán que ha sido perturbado por algo relacionado con un cambio en el A cuya naturaleza, en principio, se desconoce. Ahora bien, si se supiera por un medio convencional alternativo lo que se ha hecho con el fotón A, sumando los cambios observados en el B sería posible codificar un conjunto de información totalmente blindada frente a los espías e intrusos: el mensaje no sólo estaría dividido en dos mitades independientes, complementarias e inservibles por separado sino que, por los principios fundamentales de la mecánica cuántica, no podría interceptarse sin alterarse. Teniendo en cuenta además que los estados cuánticos son irreproducibles (no pueden copiarse, según el teorema de la no clonación de Zurek y otros) y que las medidas u observaciones cuánticas son irreversibles (la función de onda se "colapsa" en un resultado físico concreto del que no hay marcha atrás posible), esta técnica podría servir de valioso instrumento en manos de la criptografía.

Los conceptos de teleportación y no localidad no se han plasmado aún en hechos definitivamente contrastados, aunque la idea que los sustenta parece funcionar a escala de laboratorio. Las cuantiosas inversiones realizadas por las instituciones y las grandes empresas en este sector apuntan a una esperanza fundada de verosimilitud. Tal es así que los trabajos sobre criptografía centran una parte importante de los proyectos dedicados a la computación y telecomunicación cuántica, un ámbito de estudio interdisciplinar que persigue mejorar el tratamiento y transmisión de las informaciones empleando datos codificados en sistemas físicos regidos por las leyes de la mecánica cuántica.

Los desarrollos en computación cuántica alimentan el propósito de mantener el proceso de miniaturización electrónica e informática que parece estar llegando a sus

⁸ Tal es la interpretación de la mecánica cuántica propuesta por el físico y filósofo estadounidense David Bohm, quien hubo de refugiarse varios años en Brasil huyendo de la persecución anticomunista en su país.

Paradojas cuánticas

límites en el ámbito de los semiconductores convencionales. Dos de las palabras clave de su léxico son qubit y coherencia.

Se llama qubit a la unidad mínima de información cuántica. Es bien sabido que los ordenadores convencionales trabajan con bits, elementos de información que pueden existir en dos estados (cero y uno). El dispositivo informático maneja estos bits transportándolos desde la memoria a puertas lógicas, y a la inversa, mediante ciertos algoritmos normalizados. Por su parte, los qubits en los que se sustenta la informática cuántica en ciernes presentan la ventaja de existir en estados cero y uno, pero también en una superposición de los mismos determinada por una función de onda cuántica. Un ordenador cuántico funciona manipulando estos qubits, que intercambia entre la memoria principal y sus puertas lógicas cuánticas bajo el dictado de nuevos y potentes algoritmos.

La gran ventaja de los futuros ordenadores cuánticos residiría en su capacidad de manejar cantidades muy superiores de información a altísimas velocidades basándose en fenómenos como la superposición y el entrelazamiento cuántico. Ello plantea inmensos retos tecnológicos, de los cuales no es el menor la necesidad de conservar la coherencia cuántica en los componentes del sistema. En un estado cuántico coherente, estos componentes están en fase, de manera que mantienen una relación mutua de superposición e interferencia. Así, en un sencillo sistema coherente de dos partículas existe una consonancia de fase entre los estados de ambas que “enriquece” la distribución probabilística de su función de onda. Pero cuando un sistema cuántico pierde su coherencia (por ejemplo, al efectuar una medida del mismo), desaparece la relación de fase entre sus componentes, con lo que pasa a comportarse enteramente como un sistema clásico sin estados superpuestos en sus qubits de información⁹.

DEL COLAPSO DE LA FUNCIÓN DE ONDA A LOS UNIVERSOS MÚLTIPLES

Niels Bohr, nacido en Dinamarca en 1885 y Premio Nobel de física en 1922 por su teoría de la estructura de los átomos, fue uno de los personajes más influyentes

de la primera historia de la mecánica cuántica. Bajo su magisterio se reunieron algunas de las mentes más preclaras de la física, hasta el punto de que la primera explicación canónica de los fenómenos cuánticos ha pasado a conocerse como interpretación de Copenhague, lugar de residencia del danés.

Sobre los principios básicos de la dualidad corpúsculo-onda, la descripción de los estados cuánticos mediante funciones de onda de carácter probabilístico y la vigencia del principio de indeterminación, el círculo de Bohr ofreció una serie de disquisiciones filosóficas acerca de la naturaleza del dominio microscópico que pueden ilustrarse haciendo referencia al experimento de la doble rendija. En este contexto surgen varias preguntas fundamentales. ¿Cómo se explica la aparición en la pantalla detectora de patrones de interferencia con franjas brillantes y oscuras superpuestas? ¿Cómo puede la partícula (fotón, electrón) interactuar con las dos rendijas, cuando al observarla individualmente aparece como un objeto puntual? ¿Dónde se encuentra la frontera entre el mundo de lo cuántico y la percepción “clásica” característica del ámbito macroscópico que vemos, y medimos, cada día?

La respuesta del círculo de Copenhague a la primera pregunta se basa en la consideración de la función de onda probabilística como base de toda descripción cuántica. Los patrones de interferencia de bandas oscuras y luminosas alternas responden a las diferentes regiones de probabilidad de dicha función de onda. Este concepto difiere, no obstante, del que se aplica en la física clásica. En el dominio convencional, el recurso a la teoría de las probabilidades y la estadística procede del conocimiento incompleto de los fenómenos (por ejemplo, de los secretos del azar cuando se arroja un dado). Bohr, Heisenberg y sus colaboradores sostenían que la distribución estadística de la función de onda no se debe a un conocimiento incompleto de la realidad; al contrario, es ésta la que se comporta de un modo probabilístico, y no determinista como pensaban Einstein y los hombres de ciencia del siglo XIX.

La segunda cuestión suscitada por el experimento de la doble rendija carece de interés físico para la interpretación de Copenhague, pues dentro del enfoque positivista de sus postulados las preguntas de carácter meramente especulativo no competen al modelo. Sin embargo, podría apuntarse al principio de indeterminación

⁹ La coherencia cuántica no se manifiesta únicamente en la escala subatómica. Los fenómenos de la superconductividad y la superfluidez a bajas temperaturas son ejemplos de sistemas cuánticos macroscópicos coherentes, al igual que la luz láser. Análogamente, puede hablarse del condensado de Bose-Einstein, un nuevo estado de la materia formado por átomos en fase de superfluidez cuántica cuyo primer ejemplo práctico fue desarrollado en 1995 por Carl Wieman y Eric Cornell.

ción y a su curiosa consecuencia del “efecto túnel” como asociados al fenómeno observado: tal principio permite a las partículas elementales tomar prestada momentáneamente, y por un azar de probabilidad mínima, la energía necesaria para proezas tales como atravesar una barrera física insuperable y aparecer “mágicamente” al otro lado de la misma.

Al fin, a la tercera cuestión se ofrece como respuesta canónica el concepto conocido como “colapso de la función de onda”. Con esta imagen se pretende explicar por qué el proceso de medida de los hechos observables conduce a valores definidos de las magnitudes físicas (por ejemplo, la posición o la velocidad): en el lenguaje del grupo de Copenhague, al medir (u observar) el fenómeno, la función de onda probabilística que describe su estado cuántico se “colapsa” en un hecho concreto, materializándose aleatoriamente en una sola de las numerosas posibilidades permitidas por dicha función de onda.

Ciertamente, el pragmatismo extremo de la interpretación de Copenhague y las dificultades filosóficas para entender su significado encontraron cierta resistencia en determinados ámbitos científicos. Admitiendo la obstinada fuerza de la validez experimental de la mecánica cuántica, algunos físicos se atrevieron a proponer interpretaciones alternativas, entre las que la formulada desde 1956 por Hugh Everett es una de las más respetadas.

Aún veinteañero, este precoz investigador de la industria militar estadounidense encontró tiempo para ofrecer una visión de los fenómenos cuánticos tan rigurosa formalmente como digna de la mejor literatura de ciencia-ficción. Según Everett, el significado profundo de la función de onda probabilística nos lleva a una situación de “muchos mundos” o “universos paralelos”. En su opinión, las funciones de onda no se colapsan en un único resultado mensurable. Todas ellas se materializan en situaciones “macroscópicas” concretas. Si la función de onda dice que un electrón puede encontrarse en el lugar A, en el B, en el C, etc., con cada opción marcada por una cierta probabilidad no nula, se encontrará efectivamente en A en el universo 1, en B en el universo 2, en C en el universo 3, ... Así, a partir de las medidas de cada estado cuántico coherente se ramifican innumerables “universos paralelos”, o inagotables versiones de nuestro universo, de tal forma que cualquier predicción de la mecánica cuántica, por baja que sea su probabilidad, se corresponde con los acontecimientos producidos en al menos alguna de estas copias.

Volviendo al experimento de la doble rendija, las interferencias medidas para la onda de electrones serían los efectos detectables de la inminencia de estos mun-

dos paralelos. Según Everett, cada electrón atraviesa *realmente* las dos rendijas en su infinita red de universos múltiples (“multiversos”). Cabe decir que, pese a los esfuerzos personales del estadounidense por convencerle, Bohr desestimó estas ideas por fantasiosas y, sobre todo, por innecesarias.

En la estela de la interpretación de Copenhague, algunos científicos han ofrecido una versión diferente que, aún en desarrollo, permite proponer una solución viable al problema de la medida y eludir la espinosa idea del colapso de la función de onda. Es la llamada “decoherencia cuántica”. Analizando la situación de la doble rendija, este enfoque sugiere que las trayectorias alternativas que puede seguir un electrón hasta llegar a la pantalla final no son historias aisladas, sino “consistentes” entre sí. Algunas de estas trayectorias se refuerzan mutuamente, en un modelo de interferencia constructiva (bandas luminosas brillantes); otras se amortiguan, o incluso llegan a cancelarse (interferencia destructiva, bandas oscuras). De este modo, la interferencia cuántica entre las historias posibles de cada electrón es la responsable de la aparición de las franjas luminosas y oscuras en la pantalla detectora.

Por tanto, la diferencia sustancial entre la noción de probabilidad en los mundos clásico y cuántico es que en el segundo existen interferencias entre todas las historias posibles contempladas en la función de onda. Según los defensores del modelo de la decoherencia, fuera del laboratorio, las continuas interacciones que experimentan los objetos complejos (aun en los entornos más “limpios”, con el aire o con los fotones de luz) perturban la función de onda que describe su estado cuántico, destruyendo continuamente su coherencia. Entonces, los sucesos estadísticos de sus historias posibles dejan de interferir entre sí, y la realidad se decide por un resultado o valor concreto de la medida y de la observación. En definitiva, se orienta hacia una percepción “cuasiclásica” de la naturaleza.

Este enfoque tiene el mérito de aportar cierta comprensión racional en el laberinto de las mediciones cuánticas. Según él, el gato de Schrödinger no estará nunca en ese absurdo estado de vida y muerte combinadas. El entorno que le rodea, sus interacciones con el aire, la luz, los átomos y partículas de la caja y todo cuanto quiera imaginarse, son equivalentes a billones y billones de medidas que van eliminando la ambigüedad probabilística de los estados cuánticos. Y es este entorno, por el fenómeno de la decoherencia, el que condena a muerte al animal o le conmuta la pena, no el acto solipsista de un observador humano que pase por ahí con la vaga intención de mirar qué hay dentro de la caja.