

Los problemas de Leonard y el gato de Schrödinger

Como el gato de Schrödinger, tu relación potencial con Leonard justo ahora puede pensarse de ambas maneras, buena y mala. Solo cuando abras la caja te encontrarás con la respuesta.

(Temporada 1, episodio 17)

Desde que Penny irrumpe en la vida de los protagonistas de *The Big Bang Theory*, la vida de Leonard se convierte en una duda permanente. Es obvio que él queda automáticamente prendado de ella, del mismo modo que es obvio que ella no lo ve a él como alguien con quien tener una relación que vaya más allá de la amistad. Esta situación trae de cabeza a Leonard, quien alberga esperanzas de que quizás en algún momento Penny va a verle de forma diferente, y mantiene la hipótesis de que es posible que ella se sienta atraído por él. Para Sheldon esta hipótesis es ridícula, porque no hay datos que la sostengan, sino que se basa únicamente en el deseo de Leonard. Así lo dice, una y otra vez, cuando este llega a casa hundido anímicamente y se deja caer en el sofá tras otra situación en la que

parecía que Penny le miraba de manera diferente y luego ha resultado no ser así.

Durante largo tiempo, Leonard no hace más que ver desfilar distintos novios de Penny mientras él sigue siendo su amigo, confirmando la tesis de Sheldon. Sin embargo, cuando finalmente Leonard se decide a declarar su amor a Penny y le pide para salir, Sheldon decidirá utilizar la ciencia a favor de su amigo y hacer que la pareja, llena de dudas, se atreva a darle una oportunidad a su relación. Lo hará a través del experimento del gato de Schrödinger, que explica primero a Penny, quien no sabe si empezar algo con Leonard y arriesgarse a perder a su amistad, y luego a él, que duda sobre si acudir a la cita con Penny por si no funciona y entonces pierde su primera y única oportunidad.

El razonamiento de Sheldon es sencillo: la relación entre ellos funciona y no funciona al mismo tiempo, y solo intentándolo podrán saber cuál de las dos opciones acaba resultando. El experimento del gato de Schrödinger, que explicaremos en las siguientes líneas, forma parte del intento de encontrar una interpretación comprensible del mundo cuántico y de las fórmulas que lo describen, que hemos tratado en el capítulo anterior, así como los principales avances tecnológicos que nos ha aportado, algunos de los cuales están cambiando de manera significativa nuestro modo de vida.

Interpretaciones (físico-filosóficas)

La complejidad de las matemáticas utilizadas en estas teorías, y los paradójicos resultados que de ellas –y de los experimentos– se desprenden, han generado interpretaciones diversas y controversias sobre la relación existente entre las fórmulas y la realidad física. En esta sección veremos algunas de estas interpretaciones y algunos experimentos que las respaldan.

La interpretación de Copenhague

Es la más comúnmente aceptada interpretación de la física cuántica. Consiste en un conjunto de ideas desarrolladas a partir de 1927 por

Bohr¹, con la colaboración de Heisenberg, Born, Pauli y von Neumann. Se la conoce como la interpretación de Copenhague porque en aquellos años el Instituto de Estudios Atómicos Niels Bohr de Copenhague era el principal centro mundial de estudios cuánticos, y a él acudían los mejores físicos mundiales en esta materia. Las ideas centrales de la interpretación de Copenhague son: 1) el principio de incertidumbre, 2) el principio de complementariedad y 3) el colapso de la función de onda.

El principio de incertidumbre

En 1927, Heisenberg vio que la no conmutabilidad del producto de la posición x y el momento p de una partícula implicaba que ambos valores no podían ser conocidos simultáneamente con exactitud, sino que el producto de sus respectivas incertidumbres siempre debía ser igual o superior a cierto valor ($\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$). Este principio de incertidumbre es aplicable a cualquier par de variables relacionadas, y establece una diferencia fundamental entre la mecánica clásica (en la que cualquier magnitud puede ser medida con toda la precisión que permitan los instrumentos) y la cuántica (en la que la precisión

alcanzable tiene un límite intrínseco que no depende de los instrumentos utilizados). Como dijo Heisenberg: «No nos es posible conocer al detalle el presente, ni tan solo en principio. Por esta razón, todo cuanto observamos no es más que una selección entre infinitas posibilidades y una acotación de lo que es posible en el futuro».

El principio de complementariedad

Como una manera de explicar (o más bien compatibilizar) la dualidad onda-partícula, aquel mismo año de 1927 Bohr estableció el principio de complementariedad, que dice que las partículas tienen un conjunto de propiedades que se complementan, y que unas u otras se manifiestan según la naturaleza del experimento realizado, pero no todas a la vez. Dicho de otra forma, la onda-partícula no es una onda ni una partícula, sino algo que se manifestará con el aspecto de onda o de partícula en función de las circunstancias (el resultado de una observación depende del método utilizado para obtenerla).

La interpretación de Copenhague implica una limitación en nuestra capacidad de conocer el mundo. El mismo Bohr dijo: «No existe ningún

mundo cuántico. Existe tan solo una descripción abstracta físico-cuántica. Es erróneo pensar que la misión de la física consiste en descubrir cómo es la naturaleza. La física solo se interesa por lo que podemos decir sobre la naturaleza».

El colapso de la función de onda

La interpretación de Copenhague afirma que la función de onda es la descripción completa de una onda-partícula (una superposición de estados), y que cuando realizamos una medición (observación) de la misma, la función de onda colapsa a un solo estado. Estas «ondas» no son tales, sino los grados de probabilidad de observar cada uno de los estados posibles.

Tal indeterminación probabilística era rechazada por Einstein, que pensaba que cada fenómeno natural debía tener una causa, y no ser un producto del azar. Ello provocó un intenso, aunque amistoso, debate entre él y Bohr, que se refleja en una carta que Einstein envió a Born en 1926, en la que le decía que «la teoría cuántica ha aportado mucho, pero no nos acerca apenas a los secretos del Anciano. Por mi parte, estoy convencido de que Él no juega a los dados»².

¹ Como punto inicial de la interpretación de Copenhague puede considerarse la conferencia que Bohr dio en Como (Italia) en septiembre de 1927.

En mecánica clásica, el estado de un sistema y la medición que de él hacemos coinciden (dentro del margen de error del instrumento de medida). El resultado de la medición nos informa del estado del sistema, y aplicando las oportunas leyes físicas podemos prever su estado posterior. En cambio, en mecánica cuántica, aunque conozcamos el estado del sistema no podemos prever el resultado de la medición, pero sí la evolución de aquel estado y, por tanto, la probabilidad de los resultados de las futuras mediciones.

El gato de Schrödinger

También Schrödinger consideraba inaceptable la idea de que el resultado de la evolución de un sistema dependiera del azar, y aún más que este resultado no tuviera lugar hasta que alguien lo observara, de modo que hasta aquel momento el sistema permaneciera en un estado indefinido. Para mostrar la absurdidad de esta interpretación, en 1935 propuso un experimento mental que desde entonces es conocido como el del «gato de Schrödinger».

Consiste en lo siguiente: en una caja completamente aislada del exterior colocamos un gato y, convenientemente protegidos de él, un átomo de una sustancia radiactiva que tiene una probabilidad de un 50% de desintegrarse en una hora, un contador Geiger, un frasco que contiene un ácido mortal y un mecanismo con un martillo. Si se produce la desintegración, el contador Geiger lo detectará, el mecanismo dejará caer el martillo que romperá el frasco, por lo que se esparcirá el ácido que matará al gato. Según la mecánica cuántica, mientras no abramos la caja el átomo se halla en un estado indefinido que incluye a la vez los sucesos «desintegrado» y «no desintegrado», por lo que el gato debe estar simultáneamente muerto y vivo. Tan solo cuando abramos la caja, el átomo –y por tanto también el gato– adoptará un estado concreto.

En la serie, Sheldon relata el experimento como una manera de explicar el estado de la relación entre Penny y Leonard, que como todavía no ha empezado tiene las mismas posibilidades de salir bien o mal. Según la mecánica cuántica, mientras la relación no empiece se

halla en un estado indefinido que incluye a la vez el suceso de una relación exitosa y una relación fracasada, por lo que la relación está funcionando y no funcionando de forma simultánea.

El experimento del gato de Schrödinger es irrealizable en la práctica, debido al fenómeno de la descoherencia cuántica, que se produce cuando un sistema interactúa con su entorno. Para poder observar los efectos cuánticos, el sistema (en este caso, el átomo radiactivo) debe estar aislado de interferencias externas, como las que producen en este caso el resto de los elementos: el contador, el frasco con el ácido, el martillo, el gato y el aire en el interior de la caja.

Aun así, los siguientes experimentos (estos sí reales) muestran que, efectivamente, el estado de un sistema cuántico mantiene su indefinición hasta que lo observamos, lo que ha producido interpretaciones tal vez más extrañas que el propio fenómeno observado. La más destacada es la de los universos paralelos³, propuesta en 1957 por el físico estadounidense Hugh Everett, que dice que cuando observamos un sistema formado por la superposición de diversos estados, lo que sucede no es que

² Esta es la cita que habitualmente se resume como «Dios no juega a los dados con el universo».

³ Que también se conoce como la de los mundos múltiples, o de los muchos mundos.

colapse en uno solo de ellos, sino que el universo se ramifica en tantas opciones como estados posibles, y todos estos universos prosiguen su camino en paralelo, ramificándose nuevamente. Es decir, todo aquello que es posible sucede en uno u otro universo.

Sheldon es un firme defensor de la existencia de universos paralelos, y durante el recorrido de la serie realiza diversas bromas sobre ello:

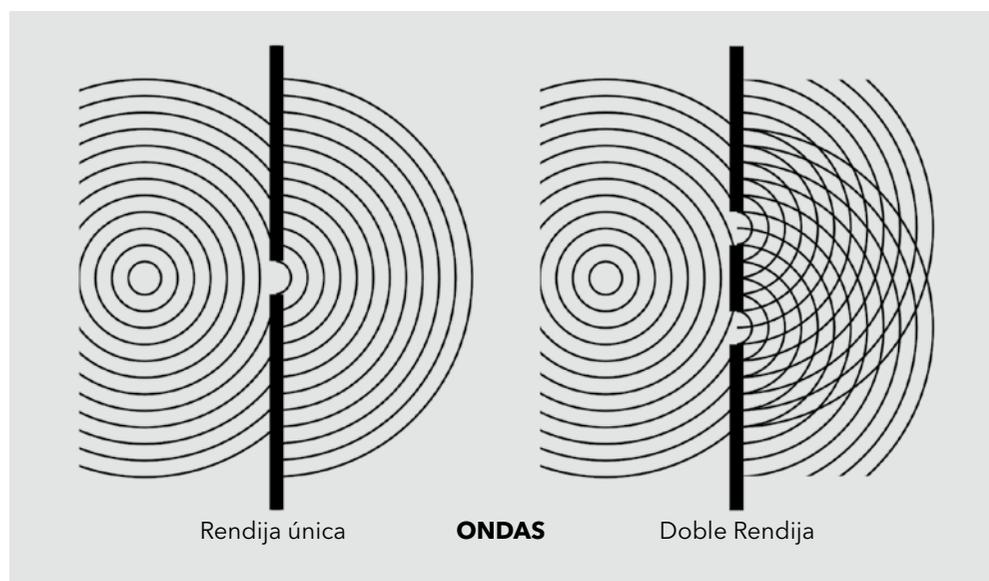
– Sheldon: Se me acaba de ocurrir una cosa: si hay un infinito número de universos paralelos, en alguno de ellos puede que haya un Sheldon que no sepa que existen universos paralelos.

– Leonard: Es probable. ¿Por qué lo dices?

– Sheldon: Por nada, es solo una de esas cosas que hace gracia a uno de mis yos (dice riendo)⁴.

Sin embargo, pone límites a las posibilidades de estos universos alternativos. Así, cuando Penny le pide que baile con él, Sheldon responde: «Aunque suscribo la teoría de los mundos múltiples que presenta un infinito número de Sheldons en un infinito número de

Figura 1. Las ondas se interfieren al atravesar una doble rendija.



universos, te puedo asegurar que en ninguno de ellos bailo»⁵.

El experimento de la doble rendija

Si dejamos caer una piedra en un estanque, desde ese punto se producen ondas que se expanden en círculos concéntricos en todas direcciones. Si a cierta distancia colocamos una plancha vertical que las frene, excepto por una rendija, esta se convierte en el origen de nuevas ondas. En el caso de que

haya más de una rendija, las ondas procedentes de cada una de ellas se suman, produciéndose unas interferencias características (fig. 1).

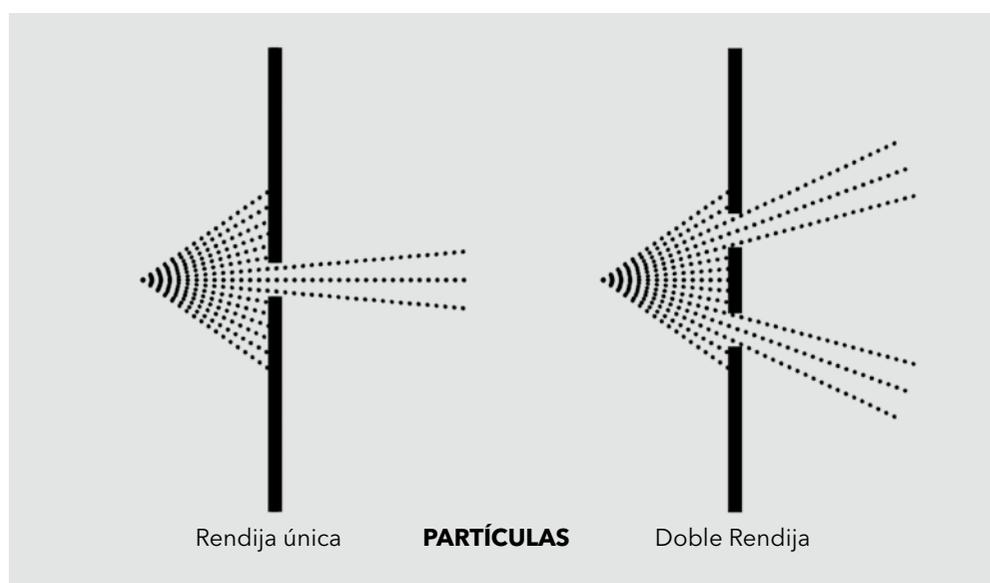
Esta es una propiedad común a todos los tipos de ondas, y por tanto también puede ser observada en las ondas lumínicas. Podemos comprobarlo haciendo pasar un rayo de luz⁶ a través de una delgada lámina opaca en la que hayamos abierto dos minúsculas rendijas. Si lo dirigimos a una pantalla situada a

⁴Temporada 4, episodio 5.

⁵Temporada 3, episodio 3.

⁶Preferentemente monocromática, porque los distintos colores tienen diferentes longitudes de onda, cosa que difumina el patrón de interferencias resultante. Nos puede servir un puntero láser como los usados en las presentaciones orales. Puede conseguirse también este efecto con un cabello en lugar de las dos rendijas.

Figura 2. La interferencia no se produce en el caso de partículas.



una distancia de 1 o 2 metros, veremos unas franjas alternativamente claras y oscuras correspondientes a la interferencia entre las ondas procedentes de las dos rendijas⁷. La principal dificultad radica en que su separación debe ser inferior a 1 milímetro, y su ancho aún menor, ya que ambos valores dependen de la longitud de onda, y la de la luz es sumamente pequeña (en el caso del estanque, la longitud

de onda suele ser del orden de centímetros o decímetros).

Si llevamos a cabo un experimento similar en el que en lugar de provocar ondas en un estanque lo que hacemos es disparar pequeñas bolitas metálicas contra una pared en la que hemos practicado dos aperturas, en lugar de la interferencia a lo largo de una amplia zona veremos que las bolas se acumularán en dos zonas

concretas, una para cada rendija o agujero (fig. 2).

Este comportamiento, distinto del de las ondas, es el que esperamos de las partículas materiales, como los electrones. Sin embargo, ya hemos visto que Davisson y Thomson demostraron que los electrones generan patrones de interferencia propios de las ondas, lo que parece una contradicción. Para intentar resolverla, se decidió investigar qué sucedería si, en lugar de enviar haces de electrones, se enviaran estos de uno en uno⁸. En efecto, podemos imaginar que una multitud de electrones actúen en conjunto de forma parecida a como lo haría una onda, pero parece imposible que un electrón solitario pueda hacerlo.

Para averiguarlo, disponemos el siguiente material: una fuente de electrones capaz de enviar un solo electrón cada vez, una placa con dos rendijas que pueden ser abiertas o cerradas por separado, y una placa detectora destinada a recibir y registrar los electrones. Con este conjunto, llevaremos a cabo dos experimentos.

⁷Tal efecto fue observado por primera vez en 1801 por el erudito (físico, médico, egiptólogo, lingüista y músico) inglés Thomas Young, por cuyo motivo este experimento es conocido como el de las franjas de Young.

⁸Esta idea nació como un experimento mental propuesto por Dirac en sus *Principles of Quantum Mechanics* y comentado por Feynman en el tercer volumen de sus *Lectures on Physics*. La comprobación real ha sido llevada a cabo de diversas formas desde 1974, y probablemente el experimento que refleja con más claridad el fenómeno (pues fue el primero que utilizó rendijas reales en lugar de biprismas) es el realizado en 2012 por Roger Bach, Damian Pope, Sy-Hwang Liou y Herman Batelaan, descrito en su artículo *Controlled double-slit electron diffraction* (publicado en *New Journal of Physics* en marzo de 2013).

Empezamos dejando abiertas ambas rendijas y emitiendo, cada cierto tiempo, un solo electrón. Los electrones que pasen por una de las dos rendijas llegarán a la placa, donde quedará registrada su llegada como un punto. Al principio, los electrones parecen ocupar posiciones aleatorias, pero a medida que pasa el tiempo y el número de electrones que han alcanzado la placa es muy grande (algunos miles), empezamos a ver que la densidad de los puntos genera el mismo patrón de interferencias que observábamos cuando enviábamos todos ellos a la vez.

Como cada electrón ha pasado por una u otra rendija, parece lógico pensar que si repetimos el experimento dos veces, una solo con la primera rendija abierta y otra solo con la segunda, y sumamos ambos resultados (o simplemente no cambiamos la placa detectora entre uno y otro paso), entonces deberíamos obtener el mismo resultado que cuando teníamos ambas rendijas abiertas. Sin embargo, no es así: no se observa ninguna interferencia, sino una distribución más intensa en el centro que va disminuyendo de manera progresiva, pero sin las franjas alternativamente claras y oscuras que veíamos cuando ambas rendijas estaban abiertas a la vez.

¿Qué ha cambiado entre el primer experimento y el segundo? ¿Es

posible que de algún modo los electrones que pasan por una ranura «sepan» que la otra está cerrada? Para comprobarlo podemos hacer lo siguiente: repetimos el experimento con ambas rendijas abiertas, pero añadimos algún tipo de detector que nos permita saber por qué rendija pasa cada electrón. Al hacerlo, sucede algo sorprendente: no se produce ninguna interferencia, los electrones se comportan como cuando cada uno solo podía pasar por una rendija porque la otra estaba cerrada. En otras palabras, y por imposible que pueda parecer, cuando observamos al electrón este deja de comportarse como una onda esparcida por el espacio y se colapsa en una partícula (la probabilidad de que la partícula se encuentre en un determinado punto viene dada por el cuadrado de la función de onda en ese punto).

El experimento de la elección diferida

Una variante del experimento anterior nos aporta resultados aún más contrarios a nuestra visión clásica del mundo. Se trata del experimento de la elección diferida, propuesto en 1978 por el físico teórico estadounidense John Archibald Wheeler, y que desde entonces ha sido llevado a cabo en varias ocasiones.

Para su realización se utiliza un interferómetro de Mach-Zehnder, un dispositivo en el que un rayo de luz es enviado a través de un espejo semitransparente que lo divide en dos haces que, tras reflejarse en sendos espejos, coinciden en un segundo espejo semitransparente que vuelve a unirlos en un solo haz. Si enviamos un solo fotón se produce un efecto parecido al de las dos rendijas: el fotón se comporta como una onda que pasa por ambos caminos y al volverse a juntar genera interferencia. Sin embargo, si quitamos el segundo espejo, cosa que nos permite conocer qué camino ha seguido el fotón, este se comporta como una partícula y no hay interferencia.

La novedad del experimento de la elección diferida se produce cuando sustituimos el segundo espejo por un mecanismo equivalente que puede ser activado o desactivado después de que el fotón ha pasado por el primer espejo (de ahí la denominación de «decisión diferida») y antes de llegar al segundo. Con esta disposición, el fotón se comporta del mismo modo que antes, es decir, como una onda que ha pasado por ambos caminos si estaba activado el segundo espejo, o como una partícula que solo pasa por uno de ellos cuando este se encuentra desactivado. Es decir, el fotón sale del primer espejo comportándose según una decisión

que todavía no se ha tomado en aquel momento.

La paradoja EPR

Einstein nunca creyó que la interpretación de Copenhague fuera la explicación correcta de los fenómenos de la mecánica cuántica. En especial se mostraba contrario a la idea de que un sistema cuántico careciera de unas propiedades objetivas definidas independientemente del acto de la observación. En una conversación con el físico holandés, nacionalizado estadounidense, Abraham Pais, Einstein le preguntó si realmente creía que «la Luna existe solo cuando uno la mira». Einstein se propuso mostrar la contradicción a la que conducía tal interpretación, y junto con los físicos estadounidenses Boris Podolski y Nathan Rosen publicó en 1935 un artículo⁹ en el que mostraban que, a menos que se aceptara la posibilidad de acciones instantáneas a distancia (imposibles según la relatividad especial), las mediciones obtenidas en un sistema se deben a valores (variables ocultas) ya existentes antes de la medición.

El argumento, en esencia, es el siguiente. Supongamos una partícula

estática que se desintegra en otros dos que salen disparadas en direcciones opuestas. Por las leyes de conservación de la energía sabemos que, dado que el momento de la partícula estática era nulo, ambas partículas resultantes deben tener un momento igual, pero de signo opuesto (para que su suma sea cero). Sin embargo, este momento no está definido, sino que cada partícula se mantiene en una superposición de estados. Si al cabo de un tiempo, y cuando la distancia entre ambas partículas ha alcanzado cierto valor, medimos el momento de una de ellas, esta acción inmediatamente provocará que la otra adopte el momento opuesto. Es decir, la medición de una partícula no solo colapsa el estado de esta, sino también el de la otra, y esto sucede sin que haya ninguna posibilidad de comunicación entre ellas (debido a la limitación impuesta por la relatividad especial, que no permite superar la velocidad de la luz). Ello es conocido como la paradoja EPR, por las iniciales de los tres autores del artículo (Einstein, Podolski y Rosen).

Sin embargo, aún cabía otra posible explicación: que en el momento de separarse cada partícula fijara el valor de su momento y conservara

esta información de algún modo al que nosotros no podemos acceder (la teoría de las «variables ocultas»). ¿Había alguna manera de diseñar un experimento que permitiera confirmar cuál de las dos ideas se ajustaba a la realidad? Hubo que esperar hasta 1964 para que el físico irlandés John Bell ideara tal prueba, que se basaba en la distinta distribución estadística que producirían las supuestas variables ocultas, respecto a la que genera la superposición de estados de la mecánica cuántica.

La complejidad de la realización práctica del experimento hizo que no se consiguiera un resultado suficientemente satisfactorio hasta que en 1982 el físico francés Alain Aspect y su equipo lo llevaron a cabo en París. En este caso utilizaron fotones entrelazados que eran dirigidos a un conmutador automático aleatorio extremadamente rápido (10.000.000.000 de veces por segundo), que los dirigía a uno de dos caminos distintos. La rapidez de los cambios hacía imposible que la información de una partícula llegara a la otra, y sin embargo los resultados obtenidos mostraron la inexistencia de variables ocultas.

⁹ *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* (¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?), publicado en *Physical review*.

Conclusión

La conclusión que podemos extraer de las interpretaciones y de los experimentos comentados en esta sección es que el mundo que nos revela la mecánica cuántica no puede ser representado mediante ninguna imagen extraída de la visión que nos proporciona la física clásica. No nos queda más remedio que aceptarlo tal como es: podemos conocerlo, pero no comprenderlo (por lo menos, por ahora).

Aplicaciones prácticas

En apenas unas pocas décadas, el progreso tecnológico en el campo de la electrónica ha modificado nuestros modos de vida y las relaciones sociales de una forma que nadie había sido capaz de imaginar. Y a pesar de la rapidez y la intensidad del cambio, ha penetrado de tal modo en nosotros que se nos hace difícil imaginar un mundo en el que no podamos comunicarnos al instante con cualquier persona, esté donde esté, ni ver lo que está sucediendo ahora mismo en otras partes del mundo, ni consultar cualquier información en Internet, ni disponer de automatismos en nuestros aparatos domésticos,

ni comprar sin movernos de casa, ni disponer de un ordenador doméstico miles de veces más potente que los ordenadores de válvulas que ocupaban salas enteras, ni muchas otras facilidades que ahora nos parecen naturales.

De la válvula al transistor

El elemento que ha hecho posible y ha impulsado tal progreso es el desarrollo de la tecnología de los semiconductores (transistores, circuitos integrados, etc.). El término semiconductor fue usado por primera vez en 1911 para describir un tipo de materiales que presentaban una conductividad eléctrica a medio camino entre los conductores (metales, grafito, agua con sales u otros minerales) y los aislantes (plásticos, madera, vidrio, goma, cerámica, papel, aire, algodón). Un efecto adicional de la semiconducción fue descubierto en 1874 por el físico alemán Karl Ferdinand Braun, Premio Nobel de Física en 1909, quien observó que una punta metálica en contacto con un cristal de galena permitía el paso de corriente eléctrica en una sola dirección (cosa que se mostraría útil para la detección de ondas de radio)¹⁰.

Fue el matemático Alan Wilson quien en 1931 elaboró una teoría que explicaba el comportamiento de los materiales semiconductores según la mecánica cuántica, y que en esencia dice lo siguiente: en un átomo aislado, los electrones se distribuyen en un reducido número de capas según el principio de exclusión de Pauli, pero en cualquier pequeña cantidad de materia existe un elevado número de átomos que actúan parcialmente como uno solo. En este caso, el mismo principio de exclusión hace que los electrones se distribuyan en un número enorme de capas que se agrupan en dos bandas: la de valencia, en la que se encuentran los electrones más cercanos y ligados al núcleo, y la de conducción, más externa. Para que el material sea capaz de conducir la electricidad, los electrones de la banda de valencia deben adquirir la energía suficiente para pasar a la de conducción. Cuando ambas bandas son contiguas, el salto es fácil y el material es conductor. Cuando entre una y otra hay mucha distancia, el salto es muy difícil y el material es aislante. En el caso intermedio tenemos un semiconductor.

¹⁰En los tiempos actuales, tan tecnificados, resulta gratificante (desintoxicante) construir un sencillo receptor de radio «de galena», que solo requiere un cable de 5-10 metros que haga de antena, un circuito resonante formado por una bobina y un condensador variable en paralelo (para sintonizar la emisora), un diodo de germanio y un sencillo auricular. Sin más elementos ni fuente alguna de alimentación, este dispositivo permite recibir emisoras cercanas de onda media (en modulación de amplitud).

El desarrollo decisivo tuvo lugar entre 1945 y 1948, gracias a la investigación llevada a cabo por los físicos estadounidenses William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain. Observaron que las propiedades de los materiales semiconductores podían ser alteradas mediante su dopaje con pequeñas cantidades de impurezas. Los semiconductores más usados (el silicio y el germanio) tienen cuatro electrones en su capa de valencia. Cuando se añaden a uno de ellos átomos de fósforo o arsénico (cada uno de los cuales tiene cinco electrones en su capa exterior), uno de los electrones de cada átomo no encaja en la red cristalina del semiconductor y queda libre para circular por él (dopaje tipo N o negativo). El caso inverso se produce cuando dopamos al semiconductor con boro o galio (con tres electrones exteriores), lo que genera «agujeros» en la red, equivalentes a cargas positivas (dopaje tipo P o positivo).

Al unir un semiconductor tipo N y otro tipo P, la corriente eléctrica solo puede circular en una dirección (los electrones van de N a P), lo que reproduce un efecto similar al diodo de galena. Shockley, Bardeen y Brattain pensaron que, si de algún modo, se pudiera controlar la intensidad de esta circulación, podría obtenerse una amplificación de la

señal entrante, lo que constituye una funcionalidad esencial para la radiocomunicación y otras aplicaciones electrónicas. Lo consiguieron añadiendo una tercera capa, formando así dispositivos tipo NPN o PNP que denominaron transistores (combinación de transconductancia, o transferencia, y varistor¹¹). Una pequeña variación de señal en la capa intermedia genera una gran variación de la corriente circulante de extremo a extremo, consiguiendo así la amplificación de la señal. Por este trabajo les fue concedido conjuntamente a Shockley, Bardeen y Brattain el Premio Nobel de Física en 1956.

El transistor llegó rápidamente al gran público. En 1954, apenas 6 años después de su invención, se puso a la venta el Regency TR-1, el primer receptor de radio comercial con transistores (cuatro NPN y un diodo) equipado con una batería de 22,5 V que le permitía entre 20 y 25 horas de funcionamiento. Aquel primer receptor fue seguido a partir de 1957 por varios modelos de Sony, y en pocos años el aparato de radio dejaría de ser aquel mueble de madera alrededor del cual se reunía la familia y pasaría a ser algo que podía llevarse a todas partes para estar al corriente de las noticias o escuchar música.

Había otro campo en el que los transistores podían generar una mejora aún más significativa, y este era el de los ordenadores. Sus elementos activos hasta entonces eran las válvulas de vacío, y estos componentes presentaban diversos inconvenientes. Una válvula ocupa mucho espacio, y un gran ordenador podía requerir varios miles de ellas, por lo que necesitaba grandes salas. Además, las válvulas tienen un elevado consumo eléctrico, generan gran cantidad de calor y son muy susceptibles al desgaste y las averías (el fallo de una sola de las lámparas podía provocar el mal funcionamiento del ordenador). No es, pues, de extrañar que rápidamente se diseñaran nuevos modelos que utilizaban transistores en lugar de válvulas. El primer prototipo, en la Universidad de Manchester, entró en funcionamiento en 1953, aunque no resultó operativo hasta 1956. Sin embargo, no hubo tiempo para perfeccionar los ordenadores con transistores, pues pronto se verían superados por un nuevo avance tecnológico.

Del transistor al circuito integrado

Los transistores hacían posible construir ordenadores varias decenas de veces más potentes que otros de

¹¹ Un varistor es un componente cuya resistencia eléctrica varía según el voltaje que se le aplica.

válvulas del mismo coste, tamaño y consumo. Sin embargo, el aumento del número de componentes generaba un nuevo problema: tal cantidad de interconexiones requerían un trabajo extremadamente complejo y propenso a errores. En 1958, el ingeniero eléctrico Jack Kilby se trasladó a Dallas para trabajar en la compañía Texas Instruments, donde se le asignó a un proyecto que trataba de reducir el tamaño de los circuitos eléctricos. Kilby creía que la técnica propuesta por la compañía no era la correcta, y durante las vacaciones de sus compañeros aprovechó para trabajar en su propia idea, que consistía en producir todos los componentes sobre un mismo bloque de material semiconductor (un chip). Cuando los demás volvieron al trabajo, Kilby presentó la idea a sus superiores y les demostró que funcionaba perfectamente. Había nacido el circuito integrado¹².

De este modo, un circuito completo, con todos sus transistores, diodos, resistencias, condensadores e interconexiones, podía ser producido automáticamente, y ocupando una mínima parte de lo que requería el conjunto de los distintos componentes individuales. Por este logro fue concedido a Kilby el Premio Nobel de Física en el año

2000. Con los años, el proceso de miniaturización y fabricación ha continuado perfeccionándose hasta el punto de que un minúsculo chip de pocos milímetros cuadrados puede contener un completo procesador con cientos de millones de transistores; y el número crece de manera continua, estando hoy disponibles comercialmente chips con miles de millones de transistores.

Células fotoeléctricas y ledes

Ambos dispositivos son variantes de los diodos semiconductores. Cuando una célula fotoeléctrica como las utilizadas en las placas solares es expuesta a la luz, los fotones de la radiación solar provocan el salto de los electrones en la unión NP, generando así una corriente eléctrica. Por su parte, los ledes (del inglés LED, *Light Emitting Diode* [diodo emisor de luz]) llevan a cabo la operación inversa: al circular la corriente por la unión se desprenden algunos fotones, generando así la luz (el color de la luz obtenida dependerá del compuesto empleado en la construcción del diodo).

Ordenadores cuánticos

Un ordenador convencional trabaja con unidades de información en

forma de dígitos binarios (bits, del inglés *binary digit* [dígito binario]) que solo admiten dos estados, generalmente representados con un 0 o un 1. Mediante combinaciones de gran cantidad de bits puede representarse cualquier dato (numérico, alfabético, imágenes, sonido) o proposición lógica. El continuo progreso de la técnica de miniaturización de los circuitos integrados se manifiesta en lo que se conoce como Ley de Moore, que dice que cada año y medio se dobla el número de transistores por centímetro cuadrado que pueden incluirse en un circuito integrado. Aunque esta ley continúa cumpliéndose desde que Gordon Moore (cofundador de Intel) la observó en 1965, tiene un límite, pues por debajo de cierta dimensión los elementos individuales del circuito tendrán un tamaño de pocos átomos.

Por esta razón, ya en la década de 1970 diversos científicos propusieron la idea de crear un nuevo tipo de ordenadores que aprovecharan las peculiaridades de la física cuántica. Fue Feynman el primero que, en 1982, propuso un modelo abstracto de cómo podía utilizarse un sistema cuántico para la realización de cálculos, y en 1994 el estadounidense

¹² Parece que varias personas tuvieron la misma idea más o menos al mismo tiempo. Uno de ellos fue Robert Noyce, que trabajó en su perfeccionamiento.

Peter Shor desarrolló el algoritmo que lleva su nombre y que permite a un ordenador cuántico obtener los factores primos de un número entero.

La diferencia esencial entre un ordenador convencional y otro cuántico es que el primero, como hemos dicho, trabaja con bits que solo admiten dos estados, 0 o 1, mientras que el ordenador cuántico opera con qubits, que son superposiciones de todos los estados posibles¹³. Ello permite un sistema de resolución de los problemas completamente distinto del habitual. Así, por ejemplo, la compañía D-Wave Systems, pionera en la producción comercial de ordenadores cuánticos, lo explica con el siguiente ejemplo. Imaginemos un caminante situado en un extenso terreno montañoso del que desea encontrar el punto más bajo¹⁴. En un ordenador convencional situaríamos inicialmente al caminante en un punto cualquiera y lo iríamos desplazando sucesivamente en la dirección que desciende más rápido. Como el valor alcanzado de este modo puede corresponder tan solo a un mínimo local, deberemos

repetir el cálculo sucesivamente empezando en cada ocasión desde un lugar distinto. En cambio, el ordenador cuántico parte de que el caminante está simultáneamente en muchas posiciones distintas, y evoluciona al mismo tiempo en todas ellas.

Por el momento, el principal problema que presenta la realización práctica de los ordenadores cuánticos es cómo evitar el fenómeno de la descoherencia, por el que los qubits interactúan con su entorno y se altera su estado, y con ello los cálculos acumulados.

Criptografía cuántica

En los tiempos actuales, la necesidad de asegurar la privacidad de las comunicaciones, tanto personales como de las entidades, adquiere cada día mayor importancia. Los métodos criptográficos más usados en la actualidad se basan en el uso de claves, que pueden ser simétricas o asimétricas. En el primer caso, el emisor y el receptor de un mensaje comparten la misma clave, que sirve tanto para encriptarlo como para desencriptarlo. En cambio, en la

criptografía asimétrica la clave es doble: hay una clave pública que sirve para encriptar el mensaje y puede ser difundida ampliamente, y otra clave privada que solo conoce el propietario y sirve para la desencriptación. La clave pública y la privada están relacionadas matemáticamente mediante un algoritmo que hace sumamente difícil obtener la clave privada a partir de la pública.

Sin embargo, con el aumento continuo de la potencia de cálculo de los ordenadores, lo que ayer era «sumamente difícil» hoy puede ser solo moderadamente costoso, y mañana por completo factible, por lo que hay un gran interés en la investigación de métodos criptográficos que resulten todavía más seguros. Además, con los métodos actuales resulta imposible saber si algún mensaje (o la clave) ha sido interceptado por una tercera persona.

Las propiedades de la física cuántica ofrecen la posibilidad de solucionar este último problema, y a partir de la década de 1980 se empezó a investigar en este terreno,

¹³En mecánica cuántica, el estado de un sistema corresponde a un vector que suele representarse mediante la notación de Dirac, que utiliza un tipo de paréntesis llamado ket; por ejemplo: $|\psi\rangle$. Un qubit no solo está en la superposición de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$, sino en cualquier combinación lineal de ellos, es decir, $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, siendo α y β números complejos. De este modo, un solo qubit puede, en teoría, adoptar infinitos estados.

¹⁴Muchos problemas que dependen de diversas variables y buscan el resultado óptimo pueden ser representados por un paisaje de este tipo, en el que las coordenadas son los parámetros que podemos manipular y la altura es el valor obtenido en tal situación.

habiéndose conseguido hasta ahora algunos logros en este sentido, si bien por el momento están limitados en su realización práctica (principalmente en lo que respecta a la distancia máxima de la transmisión, que es de unos cientos de kilómetros). El proceso esencialmente consiste en el envío de fotones con ciertas polarizaciones y espines. Si en algún punto entre el emisor y el receptor alguien realiza una medición de los fotones, por las leyes de la mecánica cuántica esta acción alterará su estado, y tal alteración podrá ser detectada por el receptor, que sabrá que el mensaje ha sido interceptado.

Superconductividad y levitación magnética

El fenómeno de la superconductividad fue descubierto de manera accidental en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes en el curso de su investigación sobre las propiedades de la materia a temperaturas extremadamente bajas, un trabajo que le valió el Premio

Nobel de Física en 1913. Era conocido que los materiales conductores presentan siempre cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica, y que esta varía en función de ciertas circunstancias, como la temperatura a la que están sometidos. Onnes observó que por debajo de 4,2 K (-268,95 °C) la resistencia eléctrica del mercurio se hacía nula (no muy pequeña, sino 0), por lo que consideró que se trataba de un nuevo estado de la materia. Posteriormente vio que algunos metales tenían un comportamiento similar (p. ej., el plomo por debajo de 7,2 K), mientras que otros (p. ej., el cobre) no muestran tal característica.

Hubo que esperar hasta 1957 para hallar la explicación de este fenómeno, que llegó con el ya citado John Bardeen y los también físicos Leon Cooper y John Schrieffer. Su teoría, conocida como la teoría BCS por las iniciales de los tres científicos, y confirmada por las investigaciones posteriores, explica que la superconductividad se debe al acoplamiento de los electrones con

las vibraciones de la red cristalina del material, lo cual conduce a la formación de pares de electrones de modo que los distintos pares están acoplados fuertemente entre sí formando un estado conjunto superconductor. Para romper este enlace es necesario superar cierto nivel crítico de energía (temperatura). Por este trabajo conjunto, los tres recibieron el Premio Nobel de Física en 1972¹⁵.

Por debajo de su temperatura crítica, los materiales superconductores experimentan el llamado efecto Meissner, consistente en que repelen los campos magnéticos que intentan atravesarlos. Este efecto se utiliza, por ejemplo, en los trenes de levitación magnética que de este modo evitan el contacto con el suelo. El tren comercial de este tipo que alcanza una mayor velocidad operativa (431 km/h) es el Shanghai Maglev, que conecta la ciudad china con el aeropuerto internacional. Seguro que a Sheldon, gran aficionado a los trenes, le gustaría realizar un viaje en esta maravilla tecnológica.

¹⁵Bardeen se convertía de este modo en la única persona que ha recibido el Premio Nobel de Física en dos ocasiones: en 1956 y en 1972.