

La *Crítica de la razón pura* de Kant empieza con la frase: "No hay duda de que todo nuestro conocimiento comienza con la experiencia". Pero unos renglones más abajo, su autor precisa: "Si bien todo nuestro conocimiento comienza con la experiencia, de ningún modo se infiere que todo se origine de la experiencia. Por el contrario, es muy posible que nuestro conocimiento empírico sea una combinación de aquello que recibimos a través de nuestros sentidos, y aquello que la capacidad de cognición proporciona por sí misma". Dicho de un modo más cercano a nuestra experiencia moderna, el cerebro tiene que venir con algún programa "de fábrica" que nos permita procesar los estímulos captados por los sentidos; un programa con el cual podamos ordenar la experiencia sensorial y darle coherencia a nuestras percepciones. Si no tuviéramos ese programa, sólo percibiríamos una sucesión interminable y abigarrada de estímulos del mundo exterior.

Kant postuló la existencia de cosas inaccesibles a los sentidos, a las que llamó *cosas-en-sí*, que forman parte de una realidad que existe independientemente de la conciencia. Las cosas-en-sí no son directamente perceptibles, pero producen sensaciones en nuestra mente, con las cuales ésta reconstruye la realidad. La tesis de Kant es que el espacio y el tiempo no se encuentran en el mundo de las cosas-en-sí, sino que forman parte de nuestro aparato de cognición. El espacio y el tiempo son formas de percepción. El espacio nos permite la intuición del mundo exterior, mientras que el tiempo nos permite ordenar el mundo interior de nuestros pensamientos.

Si Kant tenía razón es algo que todavía está sujeto a discusión. Por ahora, sólo podemos decir que su con-

Espacio, tiempo y realidad.



De la física cuántica

Siempre hemos tenido grandes dificultades para entender la visión del mundo que representa la mecánica cuántica... Con cada nueva idea, pasan una o dos generaciones hasta que se vuelve obvio que no hay un problema real. Todavía no es obvio para mí que no hay un problema real...

RICHARD FEYNMAN

a la **SHAHEN HACYAN** metafísica kantiana



cepción del mundo no está en contradicción con la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Estas dos teorías fundamentales de la física moderna, que, desde perspectivas distintas, cambiaron radicalmente nuestras ideas sobre el espacio, el tiempo y la causalidad, parecen confirmar la tesis de Kant hasta cierto punto.

Tiempo

Después de que Newton postulara la existencia de un tiempo absoluto, los físicos no se preocuparon demasiado por el concepto del tiempo. Sin embargo, era evidente que las ecuaciones de Newton, que describen la evolución dinámica de un sistema físico, no cambian su forma si se invierte en ellas el sentido del tiempo. Los pla-

netas del Sistema Solar podrían girar en un sentido o en otro, sin que un observador lejano que filmara el curso de los astros pudiese determinar si está observando la película proyectada al derecho o al revés.

El asunto empezó a preocupar a los físicos en el siglo XIX cuando surgió la termodinámica, inicialmente para describir el funcionamiento de las máquinas de vapor. Un concepto fundamental de la termodinámica es la entropía, que es, en cierta forma, una medida de la energía que ya no se puede aprovechar (por ejemplo, el calentamiento de una máquina por la fricción de sus partes es, en cierta forma, energía desperdiciada). La segunda ley de la termodinámica postula que la entropía debe aumentar, o permanecer al menos constante, a

medida que transcurre el tiempo. Ésta es la única ley de la física clásica en la que aparece una distinción entre pasado y futuro, pero es una ley empírica. Ni las ecuaciones de la mecánica, ni ninguna ley fundamental de la física implican que exista una dirección del tiempo; pasado y futuro son sólo conceptos relativos. Y sin embargo, la experiencia nos enseña todo lo contrario...

Mucho físicos del siglo XIX trataron de demostrar la segunda ley de la termodinámica a partir de principios fundamentales, pero Ludwig Boltzmann es el único a quien se le puede adjudicar un éxito parcial. Boltzmann creía firmemente en la existencia de las moléculas y desarrolló lo que se conoce actualmente como la teoría cinética, rama de la física que estudia

el comportamiento estadístico de sistemas compuestos de un número muy grande de partículas en interacción. Las moléculas se mueven y chocan unas con otras constantemente, intercambiando energía entre ellas. Boltzmann mostró que la segunda ley se puede demostrar a partir de este movimiento azaroso y de principios estadísticos: el tiempo transcurre en un sentido, del pasado al futuro, porque es inmensamente más probable que suceda así. Si no sucede al revés, no es porque sea imposible, sino porque es inmensamente improbable.

Tomemos el ejemplo de un vaso de agua cuyo contenido se derrama en el suelo. Éste es un proceso muy probable y ocurre comúnmente. Pero a nivel microscópico el charco en el suelo está formado de billones de billones de moléculas que se mueven azarosamente. En principio, podría suceder que estas moléculas, por pura coincidencia, coordinaran sus movimientos espontáneamente de tal suerte que brincaran de regreso al vaso. Este proceso es muy improbable, por lo que nunca lo observamos. Es tan improbable como ganar la lotería en un sorteo en el que el número de billetes se escribe con varios trillones de dígitos (en comparación, el número de átomos en el Universo visible no necesita más de ochenta dígitos para escribirse).

En cambio, para una molécula sola, la probabilidad de que "caiga" desde una altura de un kilómetro es casi la misma de que regrese espontáneamente a esa altura, debido al choque con otras moléculas. ¡Gracias a que la segunda ley de la termodinámica *no* se aplica a moléculas, existe la atmósfera que respiramos!

Así estaba la situación cuando, en 1905, Albert Einstein presentó la teoría de la relatividad. En esta teoría no existe un tiempo absoluto, sino lapsos

que dependen de cada observador. Einstein mostró que existe una conexión básica entre espacio y tiempo, y que un intervalo de tiempo o una sección de espacio pueden variar según el observador, de modo tal que la duración de los procesos depende del sistema de referencia desde el cual se observan. Por ejemplo, el tiempo transcurrido en una nave espacial que se mueve (con respecto a la Tierra) a una velocidad muy cercana a la de la luz es sustancialmente menor al tiempo medido por los que se quedan en la Tierra: los viajeros pueden regresar y encontrarse a sus hijos o nietos más viejos que ellos mismos. Este efecto se ha comprobado perfectamente para las partículas subatómicas generadas con velocidades muy grandes (el tiempo del viajero se contrae con respecto al tiempo del observador fijo, por un factor $\sqrt{1-(v/c)^2}$, donde v es la velocidad del viajero).

A pesar de lo espectacular que es la relatividad del tiempo predicha por la relatividad de Einstein, esta teoría no explica el fluir del tiempo, como tampoco lo hace la física newtoniana. Por eso, quizás, en ese aspecto es más fundamental la teoría de Boltzmann, con su énfasis en la manifestación estadística de los procesos microscópicos.

El punto esencial es que para una partícula del mundo atómico no existe distinción entre pasado o futuro. Este hecho se manifiesta en una forma muy espectacular si tomamos en cuenta a las antipartículas. En el mundo de las partículas subatómicas existe una simetría tal que a cada partícula le corresponde una antipartícula, con esencialmente las mismas características, excepto la carga eléctrica, que es de signo contrario; por ejemplo, al electrón le corresponde, como antipartícula, el positrón,

que es idéntico al electrón excepto por su carga positiva. Pero la simetría es completa sólo si se incluye el espacio y el tiempo. Más precisamente, se puede demostrar rigurosamente, en el marco de la teoría cuántica de las partículas elementales, que las leyes de la física permanecen inalteradas si se invierten el espacio y el sentido del tiempo, y se intercambian simultáneamente partículas por antipartículas. Dicho de otro modo, una antipartícula se comporta exactamente como una partícula, vista en un espejo, que viaja hacia atrás en el tiempo.

En resumen, el tiempo surge sólo cuando percibimos sistemas de billones de billones de átomos (como son todas las cosas que observamos directamente).

Nace el cuanto

El nacimiento de la mecánica cuántica se puede situar en diciembre de 1900, cuando Max Planck demostró que la radiación de los llamados *cuerpos negros* (esencialmente un horno cerrado en equilibrio térmico) podía explicarse con la suposición de que la luz se propaga en paquetes de energías. Pero lo que para Planck era sólo un truco matemático resultó tener una profunda implicación. Cinco años después de la publicación de su trabajo, el entonces joven y desconocido Albert Einstein mostró que el efecto fotoeléctrico podía explicarse muy bien suponiendo que la luz está hecha de partículas de energía pura. Por si fuera poco, en 1913, Niels Bohr se basó en el mismo concepto de Planck para formular su teoría del átomo y explicar el espectro de la luz emitida por el hidrógeno; en el modelo de Bohr, los electrones se encuentran sólo en ciertas órbitas alrededor del núcleo atómico, y la emisión de

luz ocurre en paquetes de energía cuando un electrón brinca de una órbita a otra.

Los físicos estaban perplejos: después de un largo debate, que se remonta a los tiempos de Newton y Huygens, y habiéndose finalmente convencido de que la luz era una onda, ésta resultaba ser más bien una partícula. La solución del problema (o

Esta dualidad propia de los objetos atómicos condujo a Bohr a plantear su Principio de Complementariedad. Si diseñamos un experimento para ver un electrón en cuanto partícula, éste no manifestará ningún comportamiento de onda; y viceversa. La intervención del observador —o más específicamente: el diseño del experimento— obliga a los obje-

ma, como pueden ser la posición y la velocidad, la energía y el tiempo... o las propiedades de onda y partícula. Implica que la precisión de una medición es a costa de la precisión de otra medición.

Lo esencial del principio de Heisenberg no es que haya una incertidumbre en una medición —cosa inevitable incluso en la física clásica—,



más bien su disolución, como diría Feynman) llegó en 1924, cuando Louis de Broglie propuso la hipótesis de que todos los objetos del mundo atómico tienen propiedades tanto de onda como de partícula. La luz no es una excepción a esta regla: la partícula de la luz —que ahora llamamos *fotón*— también se comporta como onda.

tos atómicos a manifestarse de una u otra forma, incompatible la una con la otra.

La complementariedad se manifiesta en el famoso Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Se trata de la incertidumbre asociada a la medición simultánea de dos propiedades complementarias de un siste-

sino que la observación de un sistema atómico, hecha por un sujeto humano, tenga consecuencias sobre su realidad objetiva. Por ejemplo, si decido medir con absoluta precisión la velocidad de un electrón, entonces el electrón puede estar en cualquier lugar del Universo: la velocidad adquiere realidad física, a costa de que la pier-

da la posición. Y viceversa si prefiero medir la posición con absoluta precisión. El principio de incertidumbre vuelve indefinida la frontera entre sujeto y objeto.

Realidad y causalidad

En 1930, el formalismo matemático de la mecánica cuántica había sido plenamente establecido, pero las interpretaciones filosóficas eran objeto de acalorados debates. De acuerdo con la interpretación de Copenhague —ciudad natal de Niels Bohr, su principal proponente—, un átomo (o una partícula como el electrón) puede estar en varios estados simultáneamente. Es el acto de observarlo el que lo obliga a pasar a uno de esos estados y manifestarse en él. Esta interpretación pone especial énfasis en la inseparabilidad del sujeto y del objeto, de modo tal que el concepto de realidad objetiva pierde su sentido obvio; pues ¿qué es esa realidad antes de hacer una observación? Es el acto de observar lo que asigna realidad a las cosas.

En la mecánica cuántica, un sistema se describe por su *función de onda*, que es la solución de Schrödinger, la ecuación fundamental de los fenómenos cuánticos (no relativistas). Pero, de acuerdo con la interpretación de Copenhague, la función de onda describe el conjunto de *todos* los posibles estados de un sistema físico en condiciones específicas. El hecho de hacer una medición equivale a forzar al sistema a manifestarse en uno de esos posibles estados, y el conocimiento total de la función de onda permite calcular sólo la probabilidad de que ese estado sea el resultado de la medición efectuada.

La función de onda no permite saber cuándo un sistema pasará de un estado a otro; sólo permite saber

cuál es la probabilidad de que lo haga. En los átomos, los electrones pueden efectuar “saltos cuánticos” de una órbita a otra, sin que se pueda, por cuestiones fundamentales, predecir cuándo lo harán. Éste es el indeterminismo que tanto molestaba a Einstein, quien, años después, afirmaría que él no podía creer en un “Dios que juega a los dados”.

La indeterminación del estado de un sistema se debe al acto de observar y medir, porque hay un límite a la

que equivale a una transición brusca de lo posible a lo real. Por lo tanto, las probabilidades que describe la función de onda son probabilidades que se anticipan a una posible medición. En ese sentido, son “probabilidades en potencia” que no afectan la precisión con la que se puede estudiar el estado de un sistema.

En la mecánica clásica, si se conocen la posición y la velocidad iniciales de cualquier sistema físico, las ecuaciones de movimiento permiten



certidumbre con la que se puede conocer el estado de un sistema físico. Este límite es inherente a todo proceso de medición y está relacionado con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Como lo señaló él mismo, mientras no se interfiera con un sistema por medio de la observación, la función de onda de ese sistema físico contiene todas las posibilidades en “potencia”, en el sentido utilizado por Aristóteles. Cuando un observador toma conciencia del resultado de una observación, se produce una “reducción” del conjunto de posibilidades,

calcular, al menos en principio, sus posiciones y velocidades en cualquier otro momento posterior. En este sentido, la mecánica clásica es una teoría *causal*: a cada causa corresponde un efecto, y este efecto es susceptible de conocerse. La física clásica es una teoría completa, aun si, en la práctica, debemos recurrir a una descripción aproximada cuando se trata de sistemas muy complicados.

La mecánica cuántica, de acuerdo con Bohr y Heisenberg, también es una teoría causal y completa, pero la intervención de un observador intro-

duce una incertidumbre inevitable. Sólo se puede calcular la probabilidad de obtener un cierto resultado en una medición. Una vez más, lo anterior conduce a cuestiones filosóficas fundamentales sobre la existencia de la realidad objetiva y la causalidad.

¿Existe contradicción entre la causalidad física y la libre voluntad? Ésta es una vieja discusión filosófica. Para Kant, la causalidad de la física newtoniana (la que él pudo conocer en su tiempo) no implica una falta de libertad para las acciones humanas. La solución de esta aparente contradicción, según él, radica en el hecho de que "un objeto puede tomarse en dos sentidos; primero, como un fenómeno, segundo, como una cosa

destacado neurofisiólogo que estudió los procesos de sinapsis en el cerebro humano, argumentó que éstos se rigen por las leyes cuánticas, dejando así margen para la voluntad de la mente humana.

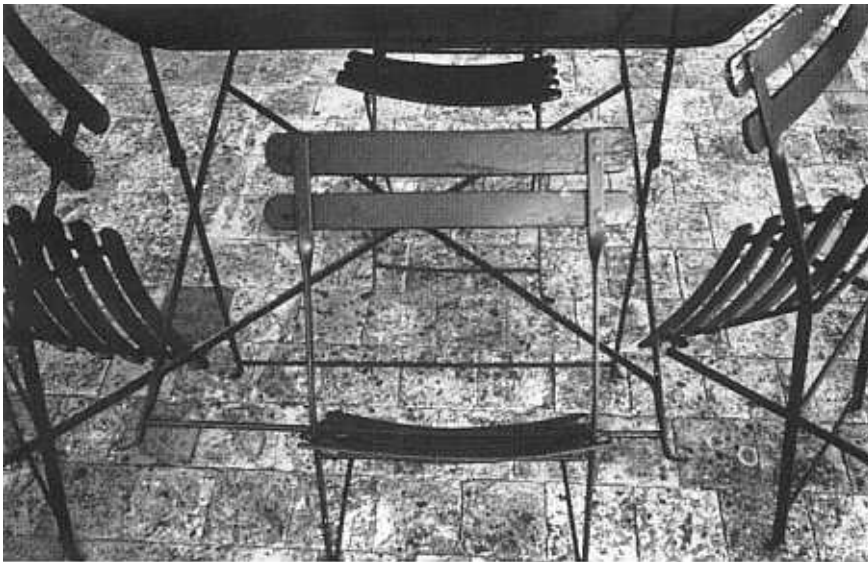
El gato de Schrödinger

Así pues, un sistema atómico estaría en todos sus posibles estados mientras no sea observado. El asunto no está exento de paradojas, como hizo notar el mismo Schrödinger al proponer la siguiente situación. Supongamos que ponemos un núcleo radiactivo en una caja: si nadie lo observa, el núcleo está en dos estados simultáneamente: ha emitido y no ha emitido

sólo en años recientes: la respuesta debe buscarse en un fenómeno conocido como "decoherencia cuántica". Cuando un sistema está en interacción con un aparato macroscópico de medición o, en general, con su entorno, la función de onda pierde la coherencia entre sus diversas partes y se transforma rápidamente en una suma estadística; por ejemplo: tal probabilidad de que el gato esté vivo o de que esté muerto.

En el mundo de los átomos, en cambio, la decoherencia es muy lenta en comparación con los tiempos característicos de los procesos atómicos y, en consecuencia, se puede tener superposiciones simultáneas de diversos estados. En 1997, un equipo de físicos logró construir un estado como el del gato de Schrödinger, pero utilizando un átomo en lugar de un felino; el mismo átomo apareció en dos posiciones simultáneamente, separadas por una distancia de ochenta nanómetros, mucho mayor que el tamaño de un átomo. El experimento se ha repetido también para estados de fotones, siendo posible incluso rastrear la decoherencia, y más recientemente con estados de corrientes en superconductores.

Un concepto básico de la mecánica cuántica, como lo es el principio de superposición, podría conducir a posibles aplicaciones tecnológicas. El tamaño de los circuitos electrónicos de las computadoras ha ido disminuyendo con los años y, de seguir esta tendencia, es posible que en unas cuantas décadas los mismos átomos se puedan utilizar como componentes. Las nuevas computadoras se regirían entonces por las leyes de la mecánica cuántica, con la posibilidad de hacer cálculos en paralelo, en estados superpuestos. Incluso, se conocen ya algunos algoritmos que permitirían efectuar operaciones que quedan fue-



en sí"; pero el principio de causalidad se refiere sólo al fenómeno. Las cosas en sí están fuera del tiempo y no obedecen a leyes causales.

Cabe mencionar que la incertidumbre propia de la mecánica cuántica ha sido retomada por científicos modernos para afirmar la libertad del pensamiento. Así, John Eccles,

do radiación. Si ponemos ahora un detector Geiger que, a su vez, acciona un mecanismo que destapa una botella con gas venenoso, y colocamos un gato en la caja, el felino estará en dos estados: vivo o muerto.

¿Por qué no se manifiesta un gato de Schrödinger en nuestro mundo macroscópico? La situación se aclaró

ra del alcance de las computadoras actuales. Las computadoras cuánticas, si llegaran a concretarse, serían los dignos herederos del gato de Schrödinger, ya que funcionarían con base en el mismo principio. Incluso se puede especular que una computadora cuántica podría reproducir más fielmente el comportamiento del cerebro.

Espacio

La interpretación de Copenhague no fue del agrado de todos los físicos. Entre sus críticos más severos destaca nada menos que Einstein. El creador de la teoría de la relatividad siempre pensó que la mecánica cuántica, cuyos éxitos son innegables, era una etapa previa a una teoría del mundo más profunda, que habría de surgir en el futuro y que le daría lugar a una concepción de la realidad más acorde con nuestras ideas intuitivas.

Einstein, junto con sus colegas Podolsky y Rosen, ideó un experimento mental en el que dos partículas atómicas están inicialmente en interacción y, en algún momento, se separan. De acuerdo con la mecánica cuántica, si uno mide la posición de una de las partículas puede deducir la posición de la otra y asignarle, así, realidad física a las posiciones en el espacio tanto de una como de la otra partícula. Del mismo modo, midiendo la velocidad de una, puede deducirse la velocidad de la otra, y así asignarle realidad física a las velocidades de las dos. Lo paradójico del asunto es que la separación entre las dos partículas es totalmente arbitraria, a pesar de lo cual, la medición de una partícula determina la realidad física también de la otra. La mecánica cuántica implica entonces la existencia de una "acción fantasmal", declaró Einstein algunos años más tarde.



El meollo del asunto consiste en que dos o más partículas atómicas pueden, en general, estar en lo que se llama un "estado enredado", lo cual no tiene equivalente en el mundo macroscópico. En tal estado, la distancia espacial entre dos partículas no juega ningún papel; el hecho de hacer una medición en una influye instantáneamente en la otra, aun si

las dos se encuentran en extremos opuestos de nuestra galaxia. Tal "comunicación" instantánea viola uno de los principios fundamentales de la teoría de la relatividad: nada puede viajar más rápido que la luz. Pero tal parece que el espacio no tiene existencia en el mundo cuántico.

El asunto se habría quedado en el reino de los experimentos mentales



si no fuera porque, en 1965, John Bell encontró una manera cuantitativa de comprobar si efectivamente existe la acción fantasmal. Si dos fotones son emitidos por un átomo en direcciones opuestas, se puede medir la probabilidad de que cada fotón tenga una cierta polarización. La mecánica cuántica predice que, para dos fotones en estado enredado, la probabilidad de medir un cierto ángulo de po-

larización en un fotón depende de lo que un observador lejano decida medir en el otro fotón. Las interacciones cuánticas se producen *como si* hubiera una transmisión instantánea de información. Esto parece contradecir la teoría de la relatividad, pero hay que recordar que las partículas no tienen realidad física antes de ser detectadas; sólo después de realizar las mediciones y comparar los datos

es posible deducir que una partícula "supo" instantáneamente lo que le sucedió a su compañera lejana. Bell mostró que es posible cuantificar la correlación entre los fotones, de tal modo que es posible distinguir tajantemente entre la predicción de la mecánica cuántica y cualquier otra que no implique la existencia de la acción fantasmal.

En 1982 fue realizado por primera vez, en un laboratorio francés, un experimento con parejas de fotones emitidos en direcciones opuestas. Al medir las correlaciones entre los ángulos de polarización de los fotones se encontró un resultado que, de acuerdo con la predicción de Bell, confirmaba la interpretación de Copenhague. La existencia de la acción fantasmal quedó así confirmada. Por si quedaban dudas, el mismo tipo de experimento se repitió en 1997, en Ginebra, enviando los pares de fotones por medio de fibras ópticas, a dos regiones separadas diez kilómetros: una vez más, los resultados confirmaron la predicción de la física cuántica.

Así pues, en el mundo de los átomos donde rigen las leyes de la física cuántica suceden cosas muy extrañas que ponen en entredicho los mismos conceptos de espacio y tiempo. El espacio pierde su sentido habitual y se manifiesta por la intervención del sujeto que observa. Los experimentos en las últimas dos décadas han establecido plenamente la existencia de una interacción que no respeta ninguna separación espacial.

Para que quede claro que la filosofía tiene aplicaciones tecnológicas, señalemos que el tipo de correlación propuesto por Einstein y colaboradores puede utilizarse hasta cierto punto para transmitir información de un lugar a otro. Esta aplicación de la física cuántica ya se ha vuelto realidad. El método consiste

en transportar por medios convencionales una parte de la información (por ejemplo, la mitad de los "bits" necesarios para reconstruir una imagen o un texto) y el resto por interacción cuántica.

Siguiendo con esta idea, el año 2000 empezó con el anuncio espectacular de una aplicación más de la "acción fantasmal": la *criptografía cuántica*. Tres equipos de científicos lograron desarrollar, en forma independiente, las técnicas para crear claves por medio de transmisiones cuánticas. En este esquema se envían, por fibras ópticas, pares de fotones en estados enredados a dos receptores distintos; éstos miden las polarizaciones de los fotones variando el ángulo de sus respectivos polarizadores en forma aleatoria; después, se comunican por medios tradicionales (y públicos) sus ángulos de polarización y una parte de sus mediciones; la otra parte de sus mediciones, la que no revelan, les sirve para generar un número clave.

La idea esencial es que el número clave, generado en dos lugares distintos, sólo puede ser reconstruido por sus receptores y sólo ellos lo conocen. Por lo tanto, lo pueden utilizar para codificar y decodificar los mensajes que quieran intercambiarse. El método tiene la gran ventaja de ser totalmente a prueba de espías, ya que la información enviada por los canales públicos para construir la clave es incompleta y tiene que combinarse forzosamente con los fotones enredados. Si algún intruso intercepta esos fotones, les asigna realidad física antes de que lleguen a sus destinatarios legítimos y revela, de esa forma, su fechoría.

Gödel, Einstein, Kant

Kurt Gödel es bien conocido por un famoso teorema. El teorema de Gödel

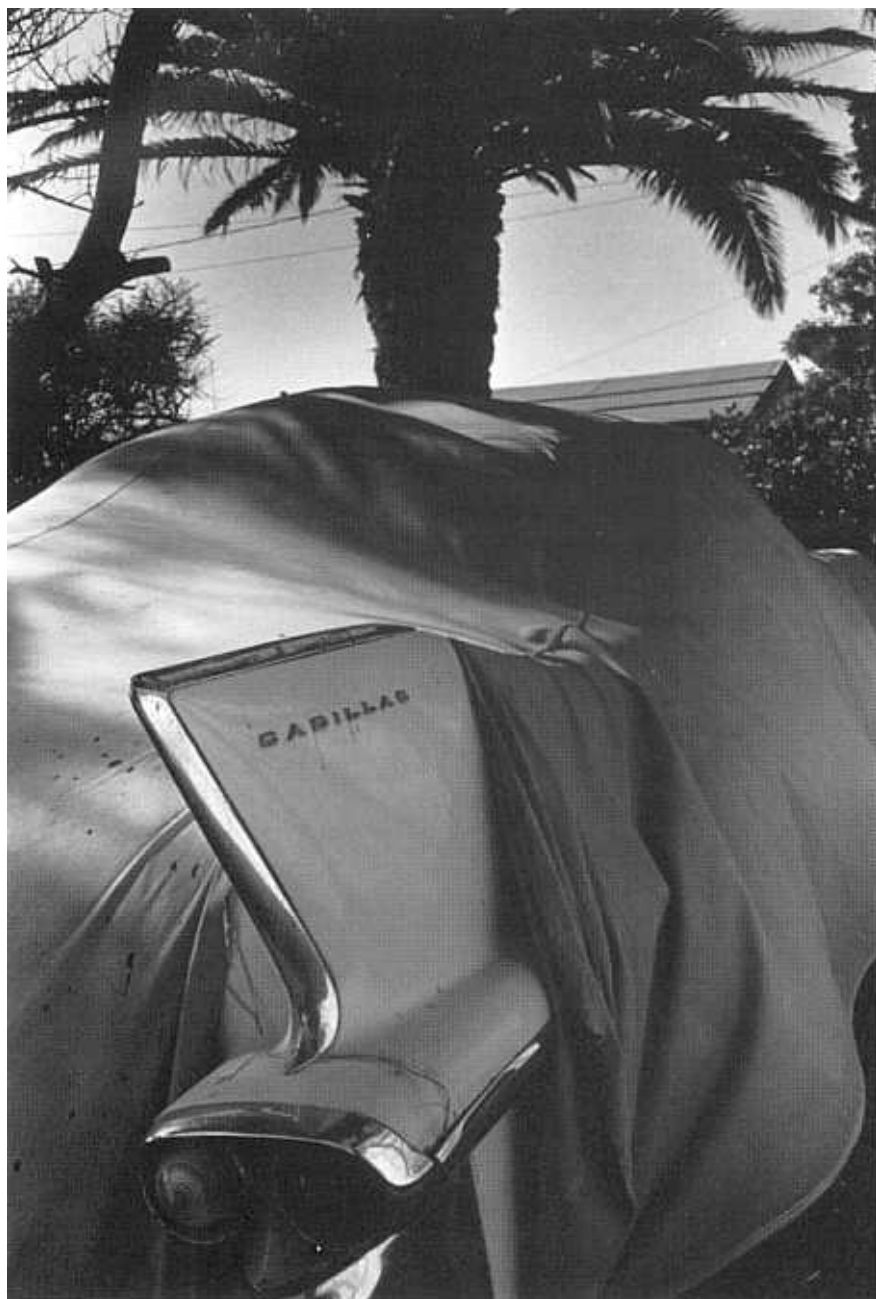
muestra la imposibilidad de construir un sistema lógico libre de contradicciones, en el que cualquier proposición pueda probarse o refutarse.

Los trabajos de Gödel sobre lógica matemática se remontan a los años treinta, cuando él trabajaba en la Universidad de Viena. Al empezar la Segunda Guerra Mundial, Gödel huyó de Austria y llegó a Estados Unidos, donde se estableció en la Universidad de Princeton. Allí conoció a Albert Einstein, otro ilustre refugiado político, y

los dos científicos desarrollaron una estrecha amistad que habría de perdurar hasta la muerte del gran físico en 1955.

Seguramente influenciado por su amigo Einstein, Gödel empezó a interesarse en la teoría de la relatividad general durante su estancia en Princeton. Esta teoría postula que la gravitación se debe a la curvatura del espacio-tiempo, espacio de cuatro dimensiones que posee una geometría no euclidiana; la distribución





de la materia en el Universo determina su geometría. Como una de las primeras aplicaciones de su teoría, Einstein había propuesto, años atrás, un modelo de universo en el que el espacio se cierra sobre sí mismo, al igual que la superficie de una esfera, de tal modo que si una nave espacial viaja siempre en la misma dirección, daría la vuelta al universo y regresaría a su punto de partida.

En 1947, Gödel publicó un trabajo sobre relatividad general que, hasta la fecha, sigue despertando interés por sus extrañas implicaciones. Se trata de una solución de las ecuaciones de Einstein que representa un universo en rotación. Lo curioso es que, en el universo de Gödel, es posible dar la vuelta y regresar no sólo al mismo punto en el espacio —tal como en el universo de Einstein—,

sino también al mismo instante en el tiempo. En otras palabras, en el universo de Gödel existen trayectorias de eterno retorno, sin distinción entre pasado y futuro.

La conclusión principal de Gödel no es tanto que se pueda construir una máquina del tiempo, ya que, para entrar en un ciclo eterno, una nave espacial tendría que moverse a una velocidad cercana a la de la luz y recorrer una distancia comparable al radio del Universo. La implicación esencial es que la distinción entre pasado y futuro no está implícita en la teoría de la relatividad, ya que esta teoría no excluye el eterno retorno. El sentido del tiempo debe buscarse en algún otro principio fundamental.

Con motivo del septuagésimo aniversario de Einstein, Gödel escribió un ensayo filosófico en el que, con base en la teoría de la relatividad, analiza la idea de Kant de que el tiempo no es más que una forma de percepción. Gödel hace notar que la teoría de Einstein elimina la noción de un tiempo absoluto y el concepto de simultaneidad, lo cual, para Gödel, es una evidencia de que el tiempo no tiene una realidad objetiva. Incluso, esta teoría ni siquiera excluye la posibilidad de un tiempo circular, como muestra la existencia de la solución que él encontró. Así, concluye: "Tenemos una prueba inequívoca para el punto de vista de aquellos filósofos como Parménides, Kant, y los idealistas modernos, que niegan la objetividad del cambio y consideran a éste una ilusión o una apariencia producto de nuestro modo especial de percepción".

En su respuesta al planteamiento de su amigo, Einstein reconoce la seriedad del problema. El hecho de que el futuro no pueda influir causalmente sobre el pasado está relacionado con la ley del aumento de la

entropía, pero, dice Einstein, eso sólo se aplica a dos sucesos suficientemente cercanos. Decir que un suceso A antecede un suceso B tiene sentido físico gracias a esta ley, pero no es evidente, reconoce Einstein, que el orden causal siga teniendo sentido si A y B están muy separados entre sí en el espacio, como sucede en el universo de Gödel.

Gödel dejó después de su muerte varios manuscritos entre los cuales se cuentan varias versiones previas del ensayo mencionado. En esos manuscritos presenta una concepción más detallada de su posición con respecto a la filosofía de Kant, que, por alguna razón, no se decidió a hacer pública en su momento. Gödel manifiesta estar de acuerdo parcialmente con Kant: admite su concepción del tiempo como una forma de percepción, pero duda que lo mismo se pueda aplicar al espacio. Sin embargo, hay que recordar que Gödel escribió en una época en la que todavía no se había establecido plenamente la existencia de la acción fantasmal,

que conduce a replantear el concepto de espacio, como mencionamos más arriba.

Empero, Gödel señala claramente su posición personal sobre la existencia de las cosas-en-sí, cuyas similitudes con las cosas del mundo cuántico no se le escapan. Los átomos son inaccesibles directamente a nuestros sentidos, y su existencia es ajena al espacio y al tiempo. Al respecto, Gödel considera que el punto de vista de Kant "debe ser modificado si uno quiere establecer acuerdo entre su doctrina y la física moderna; es decir, debe presuponerse que el conocimiento científico es capaz, al menos parcialmente y paso por paso, de ir más allá de las apariencias y aproximarse al mundo de las cosas".

"Es sólo desde el punto de vista humano que podemos hablar de espacio, objetos extendidos, etc.", escribió Kant. La física cuántica no contradice esta afirmación: los objetos del

mundo atómico no tienen dimensión o extensión, sólo algunos parámetros específicos como la masa, la carga eléctrica o el espín; son objetos que a veces se comportan como partículas y a veces como onda, dependiendo de cómo el sujeto decide observarlos. Electrones o fotones pueden estar simultáneamente en varios puntos del espacio e influir unos en otros como si el espacio y el tiempo no existieran para ellos; como fenómenos, sólo existen para nosotros, que los percibimos con nuestros sentidos, con el intermedio de aparatos de medición que extienden nuestras posibilidades sensitivas en forma extraordinaria.

Kant no podía prever los avances de la ciencia moderna, pero seguramente le habría gustado ver cómo la física cuántica y la teoría de la relatividad lograron penetrar en un mundo cuyos objetos recuerdan tanto a las cosas-en-sí. Un mundo donde tiempo, espacio y causalidad no tienen el carácter que les asignamos comúnmente. ☞

Shahen Hacyan
Instituto de Física,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aspect, A. et al. 1982. "Experimental Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Realization of Bell's Inequalities", en *Physical Review Letters*, 49, 91.

Aspect, A. et al. 1982. "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers", en *Physical Review Letters*, 49, 91. 1804.

Bell, J. 1965. *Physics*, 1, 195.

Bell, J. 1987. *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge.

Blatter, G. 2000. "Schrödinger's Cat is Now Fat", en *Nature*, 406, 25.

Bohm, D. 1951. *Quantum Theory*. Prentice Hall.

Bohr, N. *Philosophical Writings*, vols. I, II y III. Ox Bow Press.

Bouwmeester, D., A. K. Ekert y A. Zeilinger. 2000. *The Physics of Quantum Information*.

Brune, M. et al. *Observing the Progressive Decoherence of the "Meter" in a Quantum*.

Eccles, J. C. 1994. *How the Self Controls its Brain*. Springer-Verlag.

Einstein, A., B. Podolsky y N. Rosen. 1935. "Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete?", en *Physical Review*, 47, 777.

Gödel, K. 1949. "A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy", en P. Schilpp, ed. *Albert Einstein: Philosopher Scientist*.

Gödel, K. 1995. "Some Observations About the Relationship Between Theory of Relativity and Kantian Philosophy", en S. Feferman et al., eds. *Kurt Gödel: Collected Works*, vol. III, p. 202.

Heisenberg, W. 1958. *Physics and Philosophy*. Harper.

Jennewein, T. et al. 2000. "Quantum Cryptography with Entangled Photons", en *Physical Review Letters*, 84, 4729.

Kant, E. 1781 y 1787. *Crítica de la razón pura*.

Kant, E. 1783. *Prolegómenos a toda metafísica del porvenir*.

"Measurement", en *Physical Review Letters*, 77, 4887. 1996.

Monroe, C. et al. 1996. "A Schrödinger Cat Superposition State of an Atom", en *Science*, 272, 1131.

Naik, D. S. et al. 2000. "Entangled-State Quantum Cryptography: Eavesdropping on the Ekert Protocol", en *Physical Review Letters*, 84, 4733.

Tittel, W. et al. 2000. "Quantum Cryptography Using Entangled Photons in Energy-Time Bell States", en *Physical Review Letters*, 84, 4737.

Tittel, W. et al. 1998. "Violation of Bell Inequalities by Photons More than 10 km Apart", en *Physical Review Letters*, 81, 3563.

Yourgrau, P. 1999. *Gödel Meets Einstein: Time Travel in the Gödel Universe*. Open Court.

IMÁGENES

Jill Hartley, p. 15: *Adoquines*, Scanno, Italia, 1999; p. 16: *Ventana a Brooklyn*, Nueva York, 1984; *La taza vacía*, Amsterdam, 1976; p. 18: *La banca*, Ecuador, 1977; p. 19: *Golondrina de pared*, Escocia, 1976; p. 20: *Sillas descansando*, Francia, 1985; p. 21: *Cielosuelo*, Cuba, 2000; p. 22: *Mariposa nocturna*, California, 1987; p. 23: *Árboles fragmentados*, Saint Dijé, Francia, 1985; p. 24: *Aleta*, Malibú, California, 1995.