

“**Q**ué es la realidad? Percibimos el mundo a nuestro alrededor por medio de nuestros sentidos, pero ¿cómo podemos estar seguros de que éstos no nos engañan? La existencia de una realidad independiente de toda percepción ha sido siempre un problema fundamental de la filosofía y, desde épocas remotas, filósofos idealistas y materialistas se han enfrentado entre sí. Los primeros sostienen que la realidad, tal como la percibimos, es una consecuencia más o menos directa de nuestras ideas, mientras que para los segundos el mundo es absolutamente independiente de nuestro aparato psíquico y existe tal cual independientemente de todo sujeto. Todo esto parecía

restringido al estrecho ámbito de las discusiones académicas, pero ahora, gracias a la física cuántica, estamos en posibilidad de aclarar algunos puntos relacionados con la percepción de la realidad. Por primera vez en la historia, se nos presenta la oportunidad de hacer filosofía en un laboratorio.

#### ¿EXISTE UNA REALIDAD OBJETIVA?

La posición más extrema del idealismo es el llamado solipsismo, que niega toda realidad externa y reduce toda la percepción a la imaginación pura. Si veo una revista en mis manos y leo un artículo de divulgación científica, es porque me

lo estoy imaginando; si una piedra me golpea y siento dolor, todo el proceso también es producto de mi imaginación.

El problema de una realidad externa inquietó bastante a Descartes, quien tuvo que recurrir a su famoso “Pienso, luego existo” para convencerse de su propia existencia. Pero ¿existe lo que está fuera de mí, aquello que llamamos el mundo material? Después de mucho meditar al respecto, Descartes llegó a la conclusión de que podemos estar seguros, por lo menos, de la existencia de Dios, pues seres finitos como nosotros somos incapaces por nuestra propia cuenta de concebir la idea de un Ser Infinito.<sup>1</sup> Por lo tanto, debemos concluir que la idea de

Dios fue colocada por Él en nuestra mente, y si aceptamos este hecho podemos hacer lo propio con otras ideas. Entre esas ideas innatas que nos sirven para percibir el mundo, se encuentran en primer lugar las ideas matemáticas, ya que "física, astronomía, medicina, y todas las otras ciencias que dependen de la consideración de objetos compuestos, son muy dudosas e inciertas; mientras que aritmética, geometría y otras ciencias de esta naturaleza, que tratan sólo de cosas muy simples y generales, sin mucho preocuparse si están en la naturaleza o no, contienen algo cierto e indubitable. Ya que, duerma yo o esté en vigilia, dos y tres siempre serán cinco y un cuadrado tendrá cuatro lados..."<sup>2</sup> Y el inventor de la geo-

realidad más allá de lo que hubiera imaginado el filósofo francés.

Los éxitos de la mecánica newtoniana fueron cuestionados por los filósofos idealistas, entre los cuales destaca el obispo irlandés Georges Berkeley, a quien se considera el principal representante del idealismo puro. Si todo lo que sabemos del mundo exterior es a través de nuestras percepciones ¿para qué necesitamos la materia?, preguntó Berkeley. Podemos prescindir de ella y suponer que no existe más realidad que nuestras ideas. Y en contra de la objeción de que, en tal caso, las cosas deberían desaparecer si nadie las mira, Berkeley argumentó que las ideas son colectivas pues nos están dadas por Dios. La doctrina de Berkeley sería, en cierto sentido,

NACE EL CUANTO

El nacimiento de la mecánica cuántica se puede situar en 1900, cuando Max Planck descubrió 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. Cada paquete tiene una energía proporcional a la frecuencia de vibración de la onda luminosa; la relación entre energía y frecuencia está dada por la llamada constante de Planck, que es una de las constantes fundamentales de la naturaleza. Para Planck, empero, su descubrimiento sólo era un resultado matemático. Fue Einstein quien, en un célebre artículo publicado en 1905, le dio una interpretación física: la luz se compone de partículas y estas partículas son justamente los paquetes de energía imaginados por Planck. La partícula de luz fue bautizada algunos años después con el nombre de *fotón*.

El siguiente paso importante fue el descubrimiento en 1911 de que el átomo se compone de un núcleo atómico rodeado de electrones, partículas con carga eléctrica. Poco después, Niels Bohr mostró que las líneas espectrales de la luz emitida por el hidrógeno se deben al "salto" de los electrones de una órbita atómica a otra. Así como los planetas giran alrededor del Sol, los electrones en un átomo giran alrededor del núcleo atómico, pero con la crucial diferencia de que los electrones no pueden estar en cualquier órbita, sino en algunas bien definidas. El salto de una órbita a otra produce la emisión de un fotón con una energía definida por la fórmula de Planck.

Quedaba pendiente elucidar la naturaleza de la luz. La vieja controversia ¿partícula u onda? parecía definitivamente resuelta en el siglo XIX, pues uno de los grandes éxitos de la teoría de Maxwell había sido justamente explicar el fenómeno de la luz como una onda electromagnética. Y he aquí que a principios del siglo XX se descubrían fenómenos físicos que indicaban claramente que la luz tam-

## LOS MISTERIOS DEL MUNDO CUÁNTICO

Shahen Hacyan

*¿Cómo suena el árbol que cae cuando no hay nadie en el bosque que lo escuche?*  
Koan Zen

metría analítica llega a la conclusión fundamental de que: "Percibimos los cuerpos mismos sólo por la facultad de entender que está en nosotros, y no por la imaginación o los sentidos".<sup>3</sup>

El problema de la realidad del mundo exterior pareció pasar a un segundo plano cuando surgió la física newtoniana. Isaac Newton demostró que el movimiento de los planetas es de la misma naturaleza que el movimiento de los proyectiles en la Tierra, y que se puede describir con toda precisión por medio del álgebra y la geometría, esas ciencias que eran las únicas indubitables, según Descartes. Gracias a Newton y las ideas matemáticas innatas, nuestra mente logró aprehender una

un solipsismo colectivo. En pleno siglo XIX se produjo una violenta reacción contra el idealismo, encabezada por grandes pensadores como Marx y Engels, y poco después Lenin, quienes postularon la existencia de una realidad objetiva, material, absolutamente independiente del sujeto humano, con sus propias leyes, leyes que la ciencia estaba en posición de develar una tras otra.

Sin embargo, el asunto resultó ser más complicado de lo que se imaginaban los filósofos del siglo pasado. Cuando surgió la mecánica cuántica para explicar fenómenos atómicos que escapan de toda explicación intuitiva, el concepto de la realidad volvió a ser cuestionado, pero ahora por físicos y ya no por filósofos.

bién se comporta como partícula. Este problema se resolvería en parte en 1924 cuando Louis de Broglie demostrara la dualidad entre onda y partícula en el nivel atómico.

## LA COMPLEMENTARIEDAD

La coexistencia de dos propiedades contradictorias en un mismo ser es un concepto conocido en muchas doctrinas filosóficas, pero adquiere una característica esencial en el nivel atómico. Una partícula

de interferir unas con otras: cuando dos ondas se cruzan, una cresta se *suma* a otra cresta, pero donde coinciden una cresta y un valle, los dos se *cancelan* mutuamente. Cuando dos ondas luminosas llegan a una pantalla desde fuentes distintas, producen lo que se llama un *patrón de interferencia*: una sucesión alternada de zonas brillantes y oscuras (el tamaño de cada zona es de sólo unas micras para la luz visible, por lo que el efecto no se detecta a simple vista). Por el contrario, las partículas sólo pueden amontonarse unas

cada electrón, uno por uno? Esto se puede lograr poniendo en cada orificio de la primera pantalla algún detector de electrones que haga "clic" al paso de una partícula; después de lo cual, miramos la segunda pantalla y vemos cómo caen los electrones sobre ella. Pero, si se observan los electrones... ¡no se forma ningún patrón de interferencia! Los electrones simplemente se amontonan enfrente de cada orificio, tal como lo harían las partículas comunes y corrientes. De algún modo, si un observador humano diseña un experimento para ver a los electrones como ondas, éstos se comportan como ondas, y si diseña un experimento para verlos como partículas, entonces se comportan como partículas. El experimento mencionado contiene el misterio fundamental de la mecánica cuántica, como bien lo señaló Richard Feynman (recomendamos al lector interesado la discusión original de Feynman).<sup>4</sup>

La necesidad de una descripción dual de la naturaleza fue reconocida por Niels Bohr, quien la llamó *complementariedad*. Dos descripciones distintas, y hasta contradictorias entre sí, se complementan para aprehender la realidad. Pero el punto esencial en el que insistió Bohr es que el acto de observar la realidad influye en cuál de esos aspectos se manifestará, de modo tal que cuando observamos uno de los aspectos, debemos renunciar al otro. Si veo al electrón como onda, excluyo toda posibilidad de percibirlo como partícula y viceversa.

La complementariedad también se manifiesta en otro aspecto: la descripción en términos espaciales y dinámicos. En principio, en la mecánica clásica, se puede especificar simultáneamente la posición de una partícula y su velocidad. Pero posición y velocidad en la mecánica cuántica son descripciones complementarias. De acuerdo con el famoso *principio de incertidumbre* de Werner Heisenberg, determinar la posición de una partícula influye sobre su velocidad y viceversa. En el mundo cuántico, si decido medir con gran precisión la posición en el espacio de un electrón, tendré necesariamente que alterar su velocidad y esto será a costa de

*Una partícula del mundo atómico,  
como un fotón o un electrón, se comporta a veces  
como una onda y a veces como una partícula.  
Así como la luz, que se creía era una onda,  
pero que también se presenta como partícula.*

la del mundo atómico, como un fotón o un electrón, se comporta a veces como una onda y a veces como una partícula. Así como la luz, que se creía era una onda, exhibe naturaleza de partícula en ciertas circunstancias, de Broglie mostró que, de la misma forma, un electrón puede comportarse como onda. Este hecho explica por qué sólo ciertas órbitas de los electrones en los átomos son estables.

Una onda es un objeto extendido en el espacio que puede pasar simultáneamente por varios lugares distintos; una partícula, en cambio, es un objeto compacto que sólo puede estar en un sitio a la vez. Las ondas tienen la importante propiedad

sobre otras sin presentar ninguna interferencia y, por supuesto, una partícula sólo puede pasar por una abertura a la vez (figura 1a).

¿Cómo se manifiesta el hecho de que los electrones se comporten como partículas y ondas? Si son ondas, entonces un haz de electrones que pase por dos agujeros de una pantalla debería presentar un patrón de interferencia al llegar sobre una segunda pantalla, tal como lo hace la luz (figura 1b). Y, en efecto, así sucede en la práctica. Hasta aquí parecería que no hay ningún problema conceptual, pero ¿qué sucede si algún experimentador indiscreto decide observar por cuál abertura pasa

Figura 1a

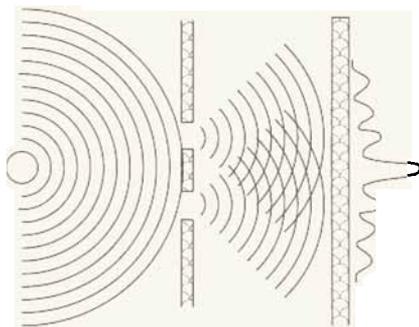
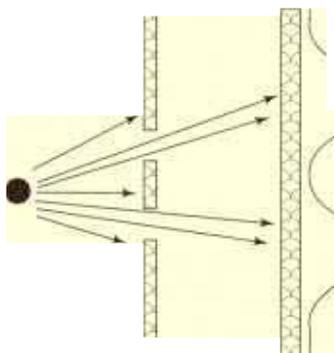


Figura 1b



perder la precisión con la que puedo determinar sus propiedades dinámicas; del mismo modo, un experimento diseñado para determinar con gran precisión la velocidad de un electrón afectará su posición y no me permitirá saber con exactitud dónde se encuentra.

¿Tienen, entonces, la posición y la velocidad existencias objetivas, independientes de un observador?

#### LA FUNCIÓN DE ONDA

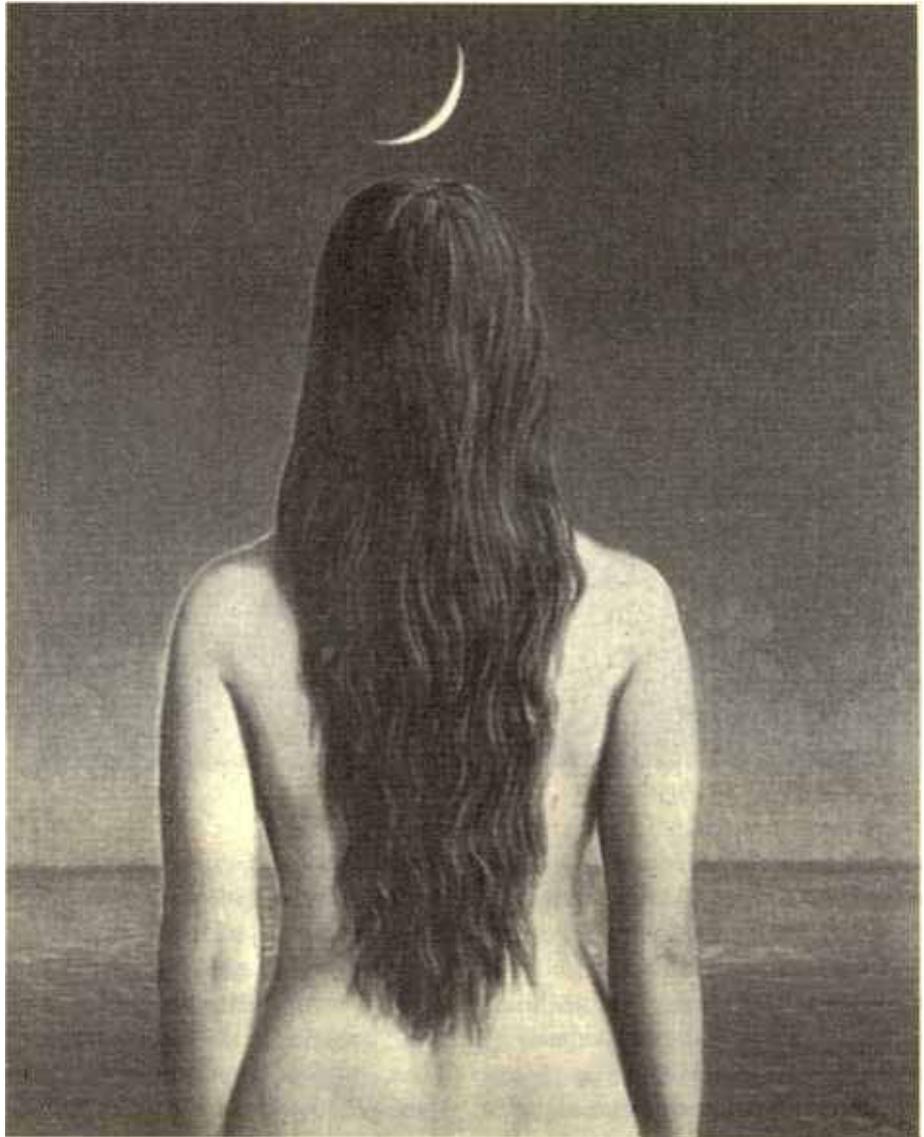
Las bases físicas y conceptuales de la mecánica cuántica empezaban a quedar bien establecidas en los años veinte, pero faltaba un aparato matemático que permitiera resolver problemas específicos en forma sistemática. Ese formalismo teórico finalmente surgió en 1926, cuando Erwin Schrödinger encontró la famosa ecuación que lleva su nombre. Schrödinger demostró que los problemas que surgen en la mecánica cuántica se pueden resolver formalmente encontrando lo que los matemáticos llaman los "valores propios" de una cierta función compleja, la *función de onda*  $\psi$ .

¿Qué describe esta función de onda? Originalmente, el mismo Schrödinger pensaba que una partícula atómica, como el electrón, era literalmente una onda, por lo que había que regresar al concepto de la materia como un continuo, en contra de la hipótesis de los átomos. Sin embargo, Max Born propuso una interpretación alterna que, hasta ahora, es la más aceptada y que Niels Bohr adoptó de inmediato. En la interpretación de Born, la función de onda (o más precisamente su módulo al cuadrado) representa la probabilidad de encontrar una partícula con ciertas propiedades. Por ejemplo, la función de onda de un electrón expresada en términos de coordenadas espaciales proporciona la probabilidad de encontrar a la partícula en cada punto del espacio.

Sin embargo, la interpretación probabilística de Born no estaba exenta de dificultades conceptuales, como él mismo estaba consciente, pues escribió: "A pesar de que los movimientos de las partículas no están determinados más que por

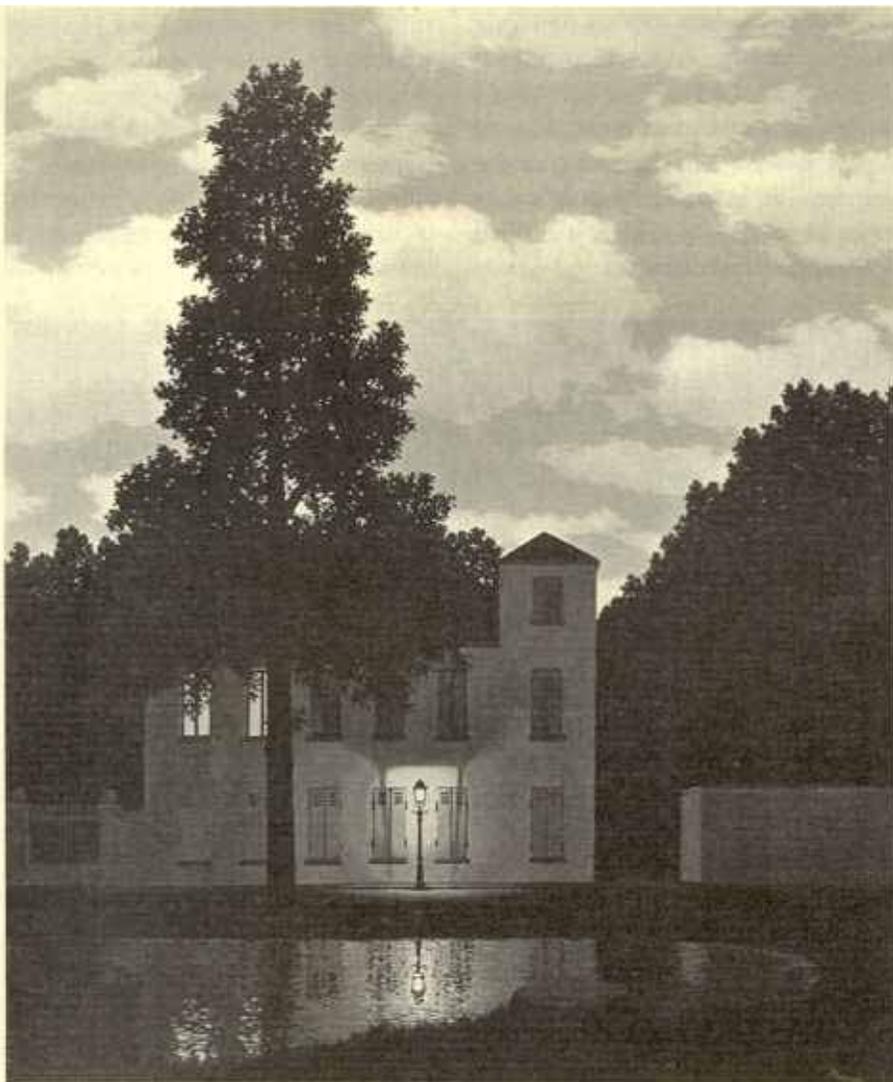
probabilidades, estas mismas probabilidades evolucionan de acuerdo con leyes causales". Para aclarar este problema y muchos otros relacionados surgió lo que llegó a llamarse la *interpretación de Copenhague* de la mecánica cuántica, en honor a la ciudad de residencia de Niels Bohr, su principal defensor.

responde un sólo efecto, y este efecto es susceptible de conocerse. Por supuesto, en la práctica, un problema puede ser tan complicado que encontrar una solución exacta es imposible, pero esto no se debe a limitaciones de principio de la mecánica cuántica, sino a dificultades técnicas y limitaciones de nuestro conocimiento de



En la mecánica clásica, si se conocen la posición y la velocidad iniciales de una partícula, o en general de cualquier sistema físico, entonces las ecuaciones de movimiento permiten calcular, al menos en principio, la posición y velocidad del sistema en cualquier otro momento posterior. En este sentido, la mecánica clásica es una teoría *causal*: a cada causa co-

la situación real. La física clásica es una teoría completa, aunque en la práctica debemos a menudo recurrir a una descripción probabilística. Por ejemplo, calcular el resultado de un volado es tan complicado que, para fines prácticos, es más simple afirmar que la probabilidad de que una moneda caiga de un cierto lado es de 50 por ciento. Donde hay conocimiento in-



completo o demasiado complejo, más vale recurrir a una descripción estadística, por muy completa que sea la teoría.

De acuerdo con la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, 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 un conocimiento total de la función de onda permite calcular la probabilidad de que ese estado sea el resultado de la medición efectuada. Pero, por otra parte, la ecuación de Schrödinger permite calcular exactamente la función de onda para cualquier tiempo si se conoce esa misma función de onda en algún momento inicial, por lo que la mecánica cuántica es

una teoría causal. Cabe entonces cuestionar la interpretación de esta teoría necesariamente en términos de probabilidades, ya que se recurre a la probabilidad cuando una teoría no permite un conocimiento completo y causal de la realidad.

La solución al problema anterior la ofreció Heisenberg, con base en el principio de incertidumbre que lleva su nombre. La indeterminación del estado de un sistema se produce por el acto de observar y medir, porque hay un límite a la certidumbre con la que se puede conocer el estado de un sistema físico, un límite inherente a todo proceso de medición. 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 sen-

tido utilizado por Aristóteles. Cuando un observador toma conciencia del resultado de una observación, se produce una “reducción” del conjunto de posibilidades, 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 resumen, la mecánica cuántica es una teoría causal y completa, y las incertidumbres asociadas a las probabilidades se deben sólo a la intervención de un observador.

Así, de acuerdo con la interpretación de Copenhague, un átomo (o una partícula como el electrón) puede estar en varios estados simultáneamente. El acto de observarlo lo fuerza 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 ingenuo de realidad objetiva pierde su sentido obvio, pues ¿qué es esa realidad antes de hacer una observación?

La interpretación de Copenhague no fue del agrado de todos los físicos. Entre sus críticos más severos destacan nada menos que Einstein y Schrödinger, dos de los fundadores de la mecánica cuántica. El creador de la teoría de la relatividad siempre pensó que la mecánica cuántica, cuyos éxitos son indiscutibles, era una etapa previa a una teoría del mundo más profunda, que habría de surgir en el futuro y que le diera lugar a una concepción de la realidad más acorde con nuestras ideas intuitivas. “¿Acaso la Luna deja de existir cuando nadie la mira?”, preguntó. A lo cual Bohr contestó que la Luna es un objeto macroscópico al que no afecta el hecho de que se le observe; pero, por el contrario, para “ver” un átomo es necesario bombardearlo con luz, lo cual perturba forzosamente su estado.

## EL GATO DE SCHRÖDINGER

A Schrödinger, que estaba del lado de Einstein en contra del bando de Copen-

hague, se debe una famosa paradoja. Imaginó un experimento mental para cuestionar las interpretaciones de la nueva teoría propuesta por sus colegas: supongamos que se encierra un gato en una caja, junto con un detector de radiación (por ejemplo, un contador Geiger), el cual puede accionar un mecanismo para destapar una botella con gas venenoso. Se pone en la caja un átomo de alguna sustancia radiactiva para que, en el momento en que se produzca la emisión radiactiva, se desencadene el mecanismo que mata al gato. Ahora bien, de acuerdo con la interpretación favorita de Bohr y Heisenberg, mientras nadie observa lo que sucede dentro de la caja el átomo está simultáneamente en dos estados —emitió radiación y no la emitió— y, por tanto, el gato está vivo y muerto a la vez. Sólo cuando se observa lo que sucedió en la caja se define el destino del felino.

Durante varias décadas, la paradoja del gato de Schrödinger perteneció al ámbito de los experimentos mentales. Fue sólo recientemente cuando los físicos experimentales lograron crear un estado parecido, aunque restringido al mundo atómico. En un experimento reportado en 1996 por un equipo de la Universidad de Boulder, en Colorado,<sup>5</sup> se utilizó un átomo ionizado de berilio en lugar de un gato. El experimento consistió en aislar ese átomo, colocarlo en una trampa electromagnética y, por medio de láseres acoplados a las frecuencias del átomo, influir sobre sus electrones para ponerlo en dos estados distintos simultáneamente, en analogía con el gato vivo y muerto a la vez. El siguiente paso fue separar esos dos estados y comprobar que se ubican en dos lugares distintos. Los detalles técnicos rebasan las intenciones de este artículo, pero la conclusión a la que llegaron los físicos de Boulder es que el mismo átomo en dos estados distintos se había separado una distancia de 80 millonésima de milímetro. Esta separación es demasiado pequeña en nuestra escala común para invocar el milagro de la ubicuidad, pero es una

distancia considerable en el nivel atómico porque corresponde a unas mil veces el tamaño típico del átomo de berilio. Lo importante, sin embargo, es que el experimento parece confirmar una de las predicciones de la mecánica cuántica que más frontalmente choca con nuestro sentido común.

#### LA PARADOJA EPR

EPR son las iniciales de Einstein y dos colaboradores suyos, Boris Podolsky y Nathan Rosen, quienes en 1935 escribieron un pequeño artículo sobre los fundamentos de la física cuántica que, al igual que el gato de Schrödinger, causó un revuelo que todavía no termina. Y no es para menos, pues el tema central de su trabajo es la realidad objetiva y la existencia de una misteriosa interacción que no tiene equivalente en el mundo macroscópico y a la cual Einstein alguna vez llamó “fantasmagórica acción a distancia”.

La esencia de la paradoja es la siguiente: como ya mencionamos, la mecánica

### *La correlación cuántica es exclusiva del mundo atómico y es del todo ajena a nuestra experiencia cotidiana... lo cual, de todos modos, no le quita su misterio.*

cuántica según la interpretación de Copenhague no trata de “objetos” como el átomo o el electrón, sino del conjunto de todos los posibles “estados” en los que éstos se encuentran. Antes de observarse, un átomo está en un conjunto de estados posibles; al efectuarse una medición se interfiere con ese conjunto, de modo tal que sólo uno de ellos se manifiesta al observador.

Pues bien, argumentaron EPR, si es así, entonces consideremos dos partículas que actúan entre sí durante un cierto tiempo y luego se separan, de tal modo que ya no puedan influir la una en la otra. Según la interpretación de Copenhague, después de la separación, las partículas de todos modos permanecen en un “estado enredado” común a las dos, y por tanto el hecho de observar una de las partículas debe determinar el estado

de la otra, por muy lejos que se encuentre. En principio podríamos tener una de las partículas en la Tierra y transportar la otra a Marte. En el momento de observar la partícula terrestre influimos instantáneamente en la que está en otro planeta.

En particular, sería posible determinar la posición exacta de la partícula lejana midiendo con toda precisión la posición de la partícula que se quedó en la Tierra. De esta forma, la situación espacial de la otra partícula adquiere una realidad objetiva. Del mismo modo, se puede determinar con toda precisión la velocidad de esa partícula lejana, si decidimos medir la velocidad de la que nos quedó cerca, y esta medición le confiere también realidad objetiva a la velocidad de la partícula lejana. Tenemos entonces la extraña situación en la que la realidad objetiva de la velocidad y la posición de una partícula lejana, digamos en Marte, depende de la clase de mediciones que decidamos hacer en la Tierra. La conclusión de EPR es que tanto posición como velocidad tienen realidad objetiva, a pesar del principio de incertidumbre de Heisenberg, y si la mecánica cuántica no les puede conferir esa realidad, la culpa es de la mecánica cuántica por ser una teoría incompleta. La única manera de evitar esta conclusión es suponer que existe una interacción instantánea a distancia, independiente de la distancia de separación... ¡lo cual debe ser absurdo!

En efecto, parece absurdo que las partículas, que pueden en principio influir entre sí innumerables veces, puedan seguir influyendo unas en otras aun cuando se han separado totalmente. Una interacción así implicaría que todo está relacionado entre sí en forma no predecible. No tenemos garantía, por ejemplo, de que los átomos de nuestro cerebro no dependan de lo que ocurra a otros átomos en algún lugar remoto de la Tierra con los que interactuaron hace millones de años. El otro aspecto de la paradoja es que, de acuerdo con la teoría de la relatividad que fundó el

propio Einstein, ningún cuerpo material o señal puede viajar a mayor velocidad que la luz, la cual es un límite natural y absoluto a todo movimiento en el Universo. La acción a distancia que implica la mecánica cuántica en la versión de Copenhague violaría descaradamente esta restricción.

## EL TEOREMA DE BELL

Todo permanecía en el reino de los experimentos mentales hasta que, en 1965, John Bell ideó un método práctico para decidir entre las posiciones de Bohr o Einstein. Ya en los años cincuenta, David Bohm había sugerido una variante del experimento mental de EPR que lo acercaba un poco más a la realidad. En la versión de Bohm, se utiliza el hecho de que las partículas atómicas poseen lo que se llama *espín*, que es algo equivalente a la rotación sobre su eje de un cuerpo macroscópico. Este espín es mensurable y tiene la importante propiedad de estar cuantizado, en el sentido de que sólo puede tener un número pequeño de ciertas orientaciones muy precisas, pero no arbitrarias, a lo largo de un eje determinado.

Sean entonces dos partículas emitidas en direcciones opuestas, de tal modo que su espín total sea cero (esto puede lograrse con el decaimiento radiactivo de un núcleo, por ejemplo). Sin entrar en los detalles técnicos por razones de espacio, mencionemos la esencia del experimento propuesto por Bohm: de acuerdo con la mecánica cuántica, si se mide la dirección del espín de una de las partículas, la dirección del espín de la otra queda determinada, aunque las dos partículas se encuentren tan alejadas que no haya ninguna conexión causal entre ellas. Una vez más, la “fantasmagórica acción a distancia” de la que hablaba Einstein interviene para influir en la orientación del espín de dos partículas alejadas.

El experimento sugerido por Bohm permitió a John Bell proponer una manera de cuantificar la relación entre partículas alejadas. La idea consiste en medir, para cada partícula del par separado, las direcciones de los espines a lo largo de dos

ejes que se rotan arbitrariamente, y luego calcular la *correlación* estadística entre los valores obtenidos. Bell demostró un teorema según el cual la correlación predicha por la interpretación de Copenhague debe violar ciertas desigualdades algebraicas que involucran estas correlaciones, mientras que cualquier otro mecanismo basado en una correlación clásica (que no implique efectos estrictamente cuánticos) sí satisface esas mismas desigualdades.

El experimento sugerido por los trabajos de Bohm y Bell fue realizado finalmente en un laboratorio francés en 1985, y desde entonces se ha repetido en diversas modalidades. Se utilizan dos fotones emitidos por un mismo átomo en direcciones opuestas y se mide su polarización colocando un par de polarímetros a diferentes ángulos. La correlación estadística entre esas mediciones viola claramente las desigualdades de Bell y, por tanto, los experimentos parecen darle la razón a Copenhague.

¿Existe entonces una acción instantánea a distancia? Gracias al trabajo de Bell, se ve que en realidad es imposible influir o transmitir cualquier tipo de información por el mecanismo ideado por EPR. Lo que predice la mecánica cuántica es una cierta correlación estadística que se debe por entero a la existencia de estados enredados, los cuales no tienen ningún equivalente en nuestro mundo macroscópico. Al promediarse sobre un conjunto de mediciones, desaparece la acción a distancia y la mecánica cuántica se reconcilia con la teoría de la relatividad. Así pues, la correlación cuántica es exclusiva del mundo atómico y es del todo ajena a nuestra experiencia cotidiana... lo cual, de todos modos, no le quita su misterio.

Sin embargo, se ha sugerido muy recientemente que el tipo de correlación propuesto por EPR podría servir parcialmente para transmitir información de un lugar a otro.<sup>6</sup> El método consistiría en transportar por medios convencionales una parte de la información (por ejemplo, la mitad de los *bytes* necesarios para reconstruir una imagen o un texto) y el resto por interacción cuántica. De esta forma se podría recuperar toda la informa-

ción ahorrando canales de comunicación. El proceso no contradice el principio de la velocidad de la luz como límite, porque parte de la información tiene que viajar por medios convencionales (ondas de radio, corrientes eléctricas, etc.) y es sólo después de recibirla que se puede reconstruir el material original. Quizás se pueda aplicar esa técnica en el futuro.

## EPÍLOGO

Durante décadas, la mecánica cuántica fue una teoría cuya efectividad nadie negaba, pero cuyos fundamentos estaban envueltos en el misterio. Las paradojas como la del gato de Schrödinger o la interacción EPR fueron propuestas en los años treinta cuando apenas se estaba consolidando la nueva visión del mundo atómico. Estas paradojas que idearon los fundadores de la mecánica cuántica fueron, en sus tiempos, del dominio exclusivo de los experimentos mentales pues no se podían comprobar directamente con átomos o partículas aislados. En la actualidad, atraen de nuevo la atención de los físicos gracias a los avances tecnológicos de las últimas décadas.

Con la invención del láser en los sesenta y, más recientemente, el perfeccionamiento de las trampas de partículas —que permiten aislar y guardar un átomo solitario—, los experimentos mentales de los años treinta se han vuelto reales. Ahora los físicos tienen los medios para estudiar directamente la extraña realidad del mundo atómico... y seguramente surgirán nuevas sorpresas. 

## SHAHEN HACYAN

Investigador titular del Instituto de Física, profesor de la Facultad de Ciencias, UNAM. Premio de la TWNSO.

### Notas y referencias

1. No olvidemos, sin embargo, que “el Dios de los filósofos y los sabios no es el Dios de Abraham, Isaac y Jacobo”, como lo señaló Pascal muy oportunamente.
2. Descartes, *Meditaciones metafísicas* (1641). Primera meditación.
3. *Ibid.* Segunda meditación.
4. R. Feynman, *Lecture notes in physics* (vol. III) (Addison and Wesley, 1968). Véase también *Six Easy Pieces* (Addison and Wesley, 1995).
5. Véase *Science*, vol. 272, p. 1101 (1996).
6. Véase *Science*, vol. 274, p. 504 (1996).