TEMAS METAMÁGICOS

Falacias del principio de incertidumbre y paradojas de la mecánica cuántica

Douglas R. Hofstadter

¿Cuántas veces se nos habrá escurrido una moneda u otro objeto pequeño por la hendidura del respaldo de una butaca? Queriendo recobrarla, introducimos con tiento los dedos por la rendija, tratando de localizarla. Pero el mismo acto de meter la mano ensancha la grieta, y la moneda se nos cuela más adentro. Nos apercibimos de que, al seguir empujando, corremos e! riesgo de perderla para siempre en las entrañas de la butaca. ¿Qué hacer? Ese vulgar drama cotidiano es ejemplo de un sentimiento que todos conocemos, a saber, cómo al esforzarnos por lograr alguna cosa lo que conseguimos es dificultarla.

Una buena amiga ha venido a visitarnos desde muy lejos. Nada nos gustaría tanto como captar en una fotografía su risa encantadora. Pero ella es terriblemente tímida; en el instante de verse ante la cámara se envara, pierde su naturalidad y, nosotros, la oportunidad de conservar un recuerdo de su risa. El acto mismo de querer capturar el fenómeno lo destruye por completo.

No es raro que casos como éste se atribuyan al principio de incertidumbre. Este notable principio de mecánica cuántica fue enunciado en 1927 por Werner Heisenberg. En la mente popular, sin embargo, el verdadero sentido del principio ha quedado oscurecido y erosionado a causa de paráfrasis imprecisas y descuidadas. Me gustaría echar un vistazo al principio en su puridad y aclarar un poco la cuestión, comparándolo con algunos de los impostores.

Enunciaré primero explícitamente una versión espúrea del principio, para que los lectores sepan claramente lo que me propongo atacar.

El pseudo-principio de incertidumbre declara que el observador interfiere siempre con el fenómeno bajo observación. En ciertos campos hay tendencia a mencionar este principio hasta el abuso, sobre todo cuando los fenómenos comportan la posibilidad de observación recíproca, esto es, cuando lo observado puede a su vez observarnos a nosotros. Pero incluso en casos así, el pseudoprincipio es demasiado simplista, pues se inspira en una falsa idea de cómo procede la ciencia al experimentar o explicar. Lo esencial es tener presente que la ciencia trata de clases de acontecimientos, y no de casos particulares. Para explicar algo. la ciencia se sirve de nociones abstractas, subyacentes, al menos en potencia, a un número ilimitado de fenómenos concretos.

Veamos un ejemplo. Hace poco me contaron de una señora que, refiriéndose a una de sus amigas, dijo: "Por aquel entonces, ella salía siempre con comecacas". Quería en realidad decir que "salía con comecocos", con psicólogos y psiquiatras. Por alguna razón se produjo la metátesis de las letras "a" y "o" de una y otra palabras; sin duda sería interesante -y tal vez gracioso- saber con precisión qué sucedió en el cerebro de la mujer al tiempo de tan escatológico metaplasmo. Nos gustaría saber exactamente la causa del descarrilamiento. ¿Qué sucedió, cómo, dónde y por qué?

Ahora bien, este fenómeno es único; seguramente nunca vuelva a repetirse. Por ello, es muy improbable que alguna vez se expliquen científicamente los detalles del acontecimiento. Lo que debemos hacer, en cambio, es abstraer cierto fenómeno general que nos parezca componente esencial de este caso concreto. Tenemos que poder imaginar otros sucesos de! mismo tipo general. Tenemos que ser capaces de idear algún procedimiento para provocarlos, o detectarlos cuando sucedan, a fin de estudiar las pautas que puedan presentar. Tal vez el nivel de abstracción idóneo sea "dislalia de la mujer *M*". De acuerdo con el proceso de abstracción que se realice, habrá que diseñar los experimentos necesarios.

La risa de nuestra tímida amiga es, presumiblemente, un fenómeno repetible; haberlo echado a perder en una ocasión no significa haberlo perdido para siempre. Con un poco de paciencia y algo más de ingenio podríamos captar la expresión que buscamos, tal vez con

ayuda de un teleobjetivo y un obturador de control remoto, tomándole así la fotografía sin que ella se percatara.

En el caso de la moneda perdida entre el tapizado de la butaca, podríamos fabricar sin mucho esfuerzo un instrumento especial para recogerla. La verdad es que en *cualquiera* de estos casos de la vida cotidiana -incluso en fenómenos donde hay observación recíproca- invirtiendo suficiente esfuerzo e ingenio *si* podemos aislar una cierta versión del fenómeno, y hacerlo de esta forma insensible a nuestra observación. Nunca obtendremos una reproducción perfecta de un acontecimiento específico, pero en tanto estemos interesados en fenómenos generales y no en sucesos irrepetibles, podemos siempre reducir la influencia del observador (nosotros mismos) a valores tan cercanos a cero como sea necesario. Quizá se requiera para ello un presupuesto de un trillón de pesetas, pero aquí estamos analizando los principios, y no la pragmática, del problema.

Es necesario insistir en esto, porque mucha gente tiene la creencia de que e! principio de indeterminación es realmente válido para los fenómenos ordinarios. Nada más lejos de la realidad. ¿A qué se refiere, por tanto, el principio de incertidumbre postulado por Heisenberg?

Para explicarlo tendremos que remontarnos a uno de los tres fundamentales artículos que Albert Einstein publicó en 1905, concretamente, al llamado artículo fotoeléctrico, donde postulaba que la luz estaba compuesta por entidades discretas, individuales, llamadas fotones. Con este artículo se abrió por vez primera una ventana que daba al misterioso mundo de la mecánica cuántica. Dos siglos de cuidadosos experimentos y observaciones habian demostrado inequívocamente que la luz visible se comportaba igual que un movimiento ondulatorio cuya longitud de onda fuese extremadamente pequeña (del orden de 10^{-4} cm). Se había observado cómo las ondas lumínicas interferían consigo mismas, anulándose y reforzándose entre sí. Tal comportamiento es homólogo del observable en fenómenos sobre la superficie de lagos y otras masas de agua, como, por ejemplo, la momentánea anulación de la estela de una motora al interferir con su reflejo en la pared del muelle, o los trémulos reflejos que se forman en las aguas de un lago tranquilo al entrecruzarse los distintos anillos de ondas producidos por los sucesivos rebotes de una piedra plana convenientemente lanzada.

En ciertos aspectos, las ondas luminosas son más sencillas que las ondas acuáticas. En efecto, mientras que las ondas superficiales de distintas longitudes de onda viajan a distinta velocidad, todas las ondas luminosas se propagan en el vacío a una misma velocidad, llamada c aproximadamente igual a 3×10^{10} cm $\cdot$ s^{-1}. En el agua, las ondas de gran longitud se propagan más velozmente que las ondas cortas. Por este motivo, al expandirse una perturbación local la vemos disgregarse en anillos concéntricos, producidos por sus diversas componentes. El frente exterior, que se propaga más rápidamente, corresponde a las longitudes de onda máximas; el borde interior de los anillos está formado por las ondas de mínima longitud. Por este motivo, al propagarse, el frente de ondas se va alisando, o, como se dice también, se dispersa. El agua es un medio dispersivo. El medio donde se propagan mejor las ondas luminosas, en cambio, no es dispersivo. ¿Que medio es ése? Resulta sumamente llamativo que, para propagarse, la luz no requiera medio ninguno, o si se prefiere, el medio idóneo para la propagación de la luz es el vacío. El vacío es no-dispersivo. ¡Aunque bien chocante resulta hablar de ondas capaces de continuar ondulando incluso cuando no hay nada que ondular!

Semejante paradoja tuvo persistentemente intrigado a Einstein, hasta que, en 1905, su fértil imaginación dio con dos elementos fundamentales para resolverla. Uno de ellos fue la teoría de la relatividad; el otro, la noción -nada intuitiva- de que las ondas lumínicas están constituidas por "cuantos" semejantes a partículas. ¿De dónde pudo provenir, sin embargo, la chispa que encendió tan curiosa intuición?

En la teoría clásica, que considera la luz como una onda electromagnética, quedaba el enigma de cómo emitía un "cuerpo negro" luz de diversos colores, es decir, diferentes longitudes de onda. El término "cuerpo negro" induce a confusión; se emplea para 'describir un cuerpo que absorbe la luz de todas las frecuencias, y no refleja luz de ninguna. Conforme se va elevando su temperatura, el cuerpo negro empieza a emitir luz y calor. Primero lo vemos de color rojo cereza, luego rojo vivo, luego anaranjado, y, al final, azulado y deslumbrantemente blanco. Basta recordar la resistencia de un infiernillo eléctrico para comprenderlo. El problema no resuelto consistía en determinar cuánta luz de cada longitud de onda es emitida por un

cuerpo negro a cada temperatura. En la analogía acuática, el problema consistiría, *grosso modo*, en predecir la amplitud (diferencia entre cresta y seno) de las partes frontal, central y posterior de la cresta creada por la caída de una piedra en el lago, en función, pongamos por caso, del momento de la piedra al alcanzar la superficie del agua.

El espectro real de emisión del cuerpo negro había sido cuidadosamente medido a muchas temperaturas por los físicos experimentales; la característica forma de la curva de intensidades-longitudes de onda era bien conocida. Para las longitudes de onda muy largas o muy cortas, la intensidad tendía rápidamente a cero; para una cierta longitud de onda, dependiente de la temperatura, la intensidad emitida era máxima. Estos resultados chocaban frontalmente con las predicciones de la física clásica acerca de las intensidades con que habrían de emitirse los diversos colores. En efecto, la teoría clásica predecía que, conforme disminuyera la longitud de onda, la intensidad de emisión debería tender a infinito, y ello, a todas las temperaturas. Con terminología moderna diríamos que todos los objetos, incluso un cubo de hielo, irradian continuamente los letales rayos gamma, y que lo hacen con intensidades arbitrariamente grandes. Evidentemente, esto es ridículo. Empero, antes de 1900 nadie tenía idea clara de cómo remendar la teoría clásica.

Ese mismo año, Max Planck descubrió una formula híbrida, una especie de injerto matemático con dos componentes bien diferenciadas, una correspondiente a longitudes de onda grandes, y otra, a longitudes pequeñas. En las longitudes grandes, esta formula estaba acorde tanto con los datos medidos como con las predicciones de la teoría clásica. Para las longitudes de onda más pequeñas, la formula de Planck se apartaba de las predicciones de la teoría clásica, pero seguía ajustada a los datos experimentales. En pocas palabras, la fórmula de Planck valía lo que costaba, a todas las temperaturas y todas las longitudes de onda, pero no había sido deducida de principios ortodoxos. Más bien podía considerarse como una conjetura afortunada, aunque en ella había mucho más que pura suerte, pues la intuición de Planck le había conducido a ella como el rastro guía al sabueso.

El propio Planck estaba especialmente desconcertado por haber tenido que introducir en la fórmula una extraña cantidad que él llamó "cuanto de acción elemental, $\hbar$", El significado de $\hbar$ no saltaba a la vista; se trataba sencillamente de una constante, que, con un valor idóneo, lograría que la fórmula reprodujese exactamente el espectro observado. Tal constante parecía ser, por tanto, una constante universal de la naturaleza.

Mas, ¿qué papel desempeñaba exactamente la constante en la ecuación? ¿Qué significado físico tenía? Fue Einstein el primero en postular la causa de que la constante de Planck, $\hbar$, hubiese de figurar en la ecuación. Einstein partió de la idea de que el contenido energético de las ondas lumínicas estaba concentrado en pequeños gránulos -los fotones- cuyo tamaño guardaba relación con $\hbar$ y con su longitud de onda. Por ejemplo, si la luz es roja, los fotones portan energías del orden de 3×10^{-12} erg. Cada fotón "verde" contiene alrededor de 4×10^{-12} erg. Los fotones de las ondas de radio de onda media tienen energías comprendidas entre 3×10^{-21} y 9×10^{-21} erg, según la emisora que sintonicemos. También se postuló entonces que la cantidad de energía condensada en cada fotón era invariante para cada color (cada longitud de onda).

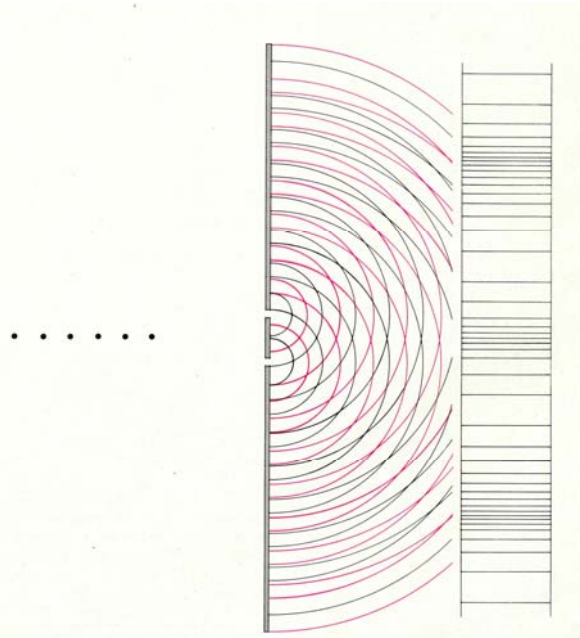
En la analogía lacustre podríamos imaginar que las ondas creadas en el agua, al alcanzar la orilla, mueren allí, siendo reemplazadas por ranas que saltarían del agua al ribazo, allí donde vinieran a estrellarse las ondas. Cuanto mayor fuese la longitud de onda de los anillos que rizan la superficie, tanto menor sería la rana y la fuerza de su salto. Recíprocamente, cuando los rizos fueran muy finos y apretados, de muy pequeña longitud de onda, al batir contra la orilla se transformarían en ranas monstruosamente grandes, cuyo croar asustaría al mismo trueno, y que, al saltar, derribarían los árboles ribereños y proyectarían cascotes en el agua (en analogía con el efecto fotoeléctrico: el impacto de fotones de energía suficiente consigue arrancar electrones de la superficie de los metales). La interpretación que Einstein dio a la fórmula de Planck implicaba que la energía de las ranas -o mejor, de los fotones- habría de ser inversamente proporcional a su longitud de onda. La ecuación que relaciona estos términos es $E=\hbar c/\lambda$, siendo E la energía del fotón, $\hbar$ la recién descubierta constante de Planck, c la velocidad de la luz, y λ la longitud de onda del fotón. Tan sólo E y λ son variables en esta ecuación. Esta confusión de papeles, esta dualidad de comportamiento onda-partícula fue uno

de los más desconcertantes aspectos de la mecánica cuántica, y continúa martirizando desde entonces la intuición de los físicos, si bien desde el punto de vista matemático el florecimiento de la teoría en los años 1920 y 1930 condujo a una considerable clarificación.

El siguiente paso de la ruta que lleva al principio de incertidumbre se dio en 1924, cuando el príncipe Louis Víctor de Broglie dedicaba sus reflexiones a la naturaleza -misteriosa naturaleza- corpuscular de las ondas de luz. Se preguntó entonces por qué sólo las ondas lumínicas habrían de asemejarse a partículas. ¿Por qué habría este fenómeno de manifestarse sólo en un sentido? ¿Por qué no a la inversa? ¿No podría suceder también que todas las partículas materiales tuvieran asociadas propiedades ondulatorias? Poco más o menos, la intuición de De Broglie debió de ser así: sí queremos generalizar la ecuación de Einstein, y lograr que no sólo sea válida para fotones, sino para otras partículas, tendremos que librarnos de la única alusión directa que en ella se hace a la luz, a saber, su velocidad, *c*. Después de todo, la enorme mayoría de partículas materiales se mueven a velocidades muy inferiores. Así pues, De Broglie pensó en refundir la ecuación de forma que no dependiera directamente de *c*.

No resultó tarea demasiado difícil, porque para entonces se sabía ya que los fotones no sólo tenían energía, *E*, sino también cantidad de movimiento (o momento), *p*, estando ambas magnitudes relacionadas por la fórmula $E = pc$. Sustituyendo este valor en la otra ecuación podemos simplificar las *c*, resultando así $p = \hbar/\lambda$. Esta ecuación sigue siendo idéntica a la de Einstein; no contiene elementos físicos nuevos. La osadía intelectual de De Broglie consistió en declarar que tal ecuación tiene que ser universalmente válida -y ello, sin prueba experimental ninguna en su respaldo-. La fórmula debería ser aplicable no sólo a fotones, sino también a electrones, protones, átomos, bolas de billar, personas... ¡incluso perros! Por tanto, nuestro buen Fido tendría asociada una onda, cuya longitud dependería de lo rápido que corriera.

¿Qué significado físico puede tener todo esto? ¿Qué sentido atribuir a la frase "longitud de onda de un perro a la carrera"? Al calcularla, se descubre que la onda asociada a Fido tiene longitud muy inferior al radio de un protón, y, por su parte, Fido se ve considerablemente mayor que un protón. Si Fido fuese muy, muy pequeño, tanto que su tamaño y su longitud de onda fuesen comparables, sus propiedades ondulatorias lo harían difractarse al rebasar objetos filosos, como les ocurre a las olas de la superficie del lago. Pero al ser Fido macroscópico, carece de importancia que tenga una longitud de onda de tamaño subatómico.



Un electrón puede atravesar dos rendijas y crear una figura de interferencia **(derecha)**

Para electrones, la cuestión es totalmente distinta, pues su tamaño es *inferior* al de la longitud de onda asociada. (En efecto, por lo que hasta ahora sabemos, los electrones se comportan como partículas puntuales perfectas, de radio cero.) Poco después de presentar De Broglie su sugerencia, su hipótesis quedó perfectamente demostrada, tanto desde el enfoque teórico como desde el experimental. Pronto se consiguió en muchos laboratorios de todo el mundo poner de manifiesto la difracción de ondas de electrones, como antes se hizo con las ondas luminosas.

Se suscita así una enigmática cuestión. ¿Se encuentran los electrones difundidos por todo el espacio, como lo estarían las ondas, o se encontrarán localizados en puntos? Si verdaderamente son de dimensiones puntuales, ¿cómo es posible que experimenten difracción? Y, si son auténticas ondas, ¿de qué forma transportan su carga eléctrica?

Se ha podido demostrar mediante experimentos que incluso los electrones *individuales* pueden sufrir difracción. En su libro *The Character of Physical Law* (The MIT Press, 1967), Richard P. Feynman da una preciosa descripción del fenómeno. En un experimento ideal, el electrón se dispara hacia una barrera, donde se han practicado dos finas rendijas. Del otro lado

de la barrera, y a distancia comparativamente grande de ella, hay una pantalla detectora. El electrón sigue cierta trayectoria y choca contra la pantalla. Semejante acontecimiento, ejecutado una sola vez, produce en la pantalla un punto. Imaginemos el experimento repetido muchas veces, disparando cada vez un solo electrón. Obtendremos sobre la pantalla una formación de puntos. La intuición nos dice claramente que debemos esperar que los impactos se agrupen directamente detrás de las rendijas, enrareciéndose rápidamente al separarnos de la zona de impactos. Con otras palabras, esperaríamos encontrar dos cúmulos de puntos, y no distribuciones de ninguna otra especie.

Pero cuando la longitud de onda asignada por De Broglie a los electrones del experimento sea del mismo orden que la separación entre rendijas tras varios miles de impactos en la pantalla, la con figuración producida será muy diferente de la explicada: será una estructura regular, compleja, típica de las interferencias de ondas emitidas por focos cercanos entre sí. En realidad, reproducirá la distribución de intensidades creadas por una onda escindida en dos partes, partes que luego interfieren sobre la pantalla, del otro lado de la barrera. Es forzoso concluir que cada electrón, conforme volaba desde la fuente que lo emitió hacia la pantalla, tuvo que "percibir" *ambas* rendijas, e *interfirió consigo mismo*, tal como haría una onda, depositándose empero como una rana, es decir, señalando en la pantalla su presencia mediante un punto, sin dejar rastro de su reciente desdoblamiento de personalidad.

El dilema es, por tanto, que los electrones se comportan como si a un tiempo estuvieran difundidos por el espacio y localizados en un punto, esto es, como si fueran simultáneamente ondas y partículas. A nivel macroscópico, semejante volubilidad y falta de carácter es inconcebible. No tenemos dificultad en distinguir, pongamos por caso, una naranja de una ondulación en una laguna. (En caso de que el lector tema encontrarse un día en situación apurada, que le obligue a decidir rápidamente si algo es una ondulación o una naranja, recorte y guarde en la cartera el siguiente discriminador de naranjas/ ondulaciones. Una naranja es sólida, tangible y, sobre todo, se encuentra siempre en algún *lugar* determinado. Una ondulación carece de masa, es intangible y se difunde por doquiera.)

Si tenemos hambre y queremos saber dónde se encuentra nuestra naranja, basta echar un vistazo alrededor, y en cuanto nuestros ojos perciban algunos fotones con aroma de toronja sabremos dónde encontrarla. Esos fotones han rebotado en la naranja y penetrado en nuestros ojos. Supongamos, sin embargo, que, por alguna razón, nuestra naranja fuera achicándose más y más. De contraerse hasta el tamaño de las mitocondrias, su diámetro sería sensiblemente igual a la longitud de onda de la luz anaranjada. Sería entonces capaz de difractar la luz, y ya no podríamos encontrarla tan fácilmente. Si continuara reduciéndose, sucedería algo terrible.

Los fotones individuales que incidieran en ella, estando provistos de energía y cantidad de movimiento, empezarían a zarandearla de acá para allá. Empezarían, pues, a cobrar importancia las propiedades corpusculares de los fotones. La verdad es que una naranja del tamaño de un electrón sería muy difícil de localizar. Si estuviéramos ansiosos de comer naranjas valdría más que empezásemos a buscar una mayor.

Desdichadamente, no es posible hacer lo mismo con los electrones, pues no los hay más grandes. Para dar con un electrón, lo único factible es bombardearlo con otras partículas o con fotones. Dado que tanto fotones como partículas exhiben rasgos corpusculares y rasgos ondulatorios, los efectos del bombardeo tendrán en uno y otro caso consecuencias semejantes. Cuando se desea localizar con precisión una partícula es necesario usar ondas cuya longitud sea del orden de magnitud de la partícula (o menor). Podemos comprenderlo intuitivamente pensando en cómo quedarían afectadas ondas acuáticas por un pedazo de madera flotante. Cuando las ondas sean de longitud muy grande, ni siquiera se apercibirán del pecio; sólo cuando su longitud vaya acercándose al tamaño del cuerpo empezarán a verse afectadas por él.

Por consiguiente, para encontrar nuestro electrón harán falta fotones·de muy pequeña longitud de onda. Tal longitud es, por otra parte, inversamente proporcional a la cantidad de movimiento con que estén dotados, y de ahí las dañinas consecuencias de la ecuación de De Broglie. Para comprar longitudes de onda reducidas tenemos que pagar caro en cantidad de movimiento. Y por ello, aunque nuestro interés sería que las ondas, al difractarse en la partícula, lo hicieran con la mayor suavidad, para no modificar la posición de aquélla, resulta en

realidad imposible lograrlo sin transmitir a la partícula cierta cantidad de movimiento. De aquí el dilema: o bien somos con ella sumamente delicadas (grandes longitudes de onda), y no vemos bien el electrón, o bien somos bruscos (fotones de cortas longitudes de onda) y desviamos por completo al electrón de su trayectoria inicial.

Heisenberg llevó a cabo un penetrante, estudio de esta perversa consecuencia de la teoría de De Broglie, descubriendo, para completa perplejidad de los amantes de la epistemología de todo el mundo, que conocer exactamente la posición de una partícula conlleva renunciar a toda esperanza de conocer con precisión su cantidad de movimiento, y que conocer su cantidad de movimiento exige renunciar a conocer su localización. Y que conocer imperfectamente cualquiera de estas magnitudes impone automáticamente límites a la precisión con que podemos llegar a conocer la otra. Una reciente pintada expresa la idea: "Heisenberg pudo haber estado aquí." El principio puede plasmarse en una desigualdad, que el propio Heisenberg dedujo. Al tratar de establecer la situación de una partícula existirá una indeterminación, una incertidumbre, que convendremos en llamar Δx. Habrá asimismo una indeterminación en el valor de la cantidad de movimiento, denotada Δp. El principio de incertidumbre, o de indeterminación, de Heisenberg está expresado en la desigualdad $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2\pi$.

Es necesario hacer notar en esta fórmula un par de cosas. Ante todo, la presencia de la misteriosa constante de acción de Planck, $\hbar$, claro índice de que el efecto es consecuencia de la dualidad ondulatorio-corpuscular de la materia, y que nada tiene que ver con la idea de que un posible *observador* perturbe el fenómeno en observación. Segundo, hacer ver que, incluso con esta restricción epistemológica, sí es posible medir con tanta precisión como se desee bien la posición, bien la cantidad de movimiento de la partícula; lo que no es posible es lograr precisión arbitraria en *ambas* medidas.

En pocas palabras, suponer que el principio de incertidumbre es válido para observadores macroscópicos que efectúan mediciones macroscópicas es perder. Completamente el significado del principio de indeterminación. Por ejemplo, no es consecuencia del principio de indeterminación que los psicólogos, al estudiar los fenómenos de cognición humana, estén en principio limitados por el hecho de estar observando seres humanos, capaces a su vez de efectuar observaciones de igual carácter. No; los límites con que aquí se tropieza son más bien deficiencias en el conocimiento del cerebro humano, o la falta de ingenio para diseñar experimentos, y en nuestros días, probablemente, las dificultades de financiación.

Si deseáramos conocer más sobre las anomalías gramaticales del habla de la sujeto *M* habría en principio muchas formas de examinarla sin que se pusiera alerta o se sintiera en ridículo. Por citar sólo unas cuantas ideas estrafalarias: con un presupuesto de algunos cientos de miles de pesetas podríamos instalar micrófonos ocultos en su domicilio y registrar sus conversaciones. Invirtiendo unos cuantos millones podríamos hacernos construir diminutos transmisores de radio y, secretamente, coserlos en las solapas de todas sus prendas. Quizá, con presupuestos de decenas o centenares de millones lográsemos convencerla de que se sometiera a una pequeña operación quirúrgica, y, ya bajo los efectos de la anestesia, implantar en el cerebro electrodos con los que supervisar las zonas del habla sin que ella lo supiera. Si se considera que el contacto material con el tejido cerebral puede perturbar sus hábitos lingüísticos, puede que sea necesario esperar hasta que se nos ocurra cómo examinar los procesos neuronales a distancia. Es evidente que todas estas posibilidades son absurdas, pero la tesis es que *en principio* podemos estudiar fenómenos macroscópicos con grado de precisión arbitrario.

En resumen, el principio de incertidumbre no afirma que el observador siempre interfiera con lo observado; lo que sí afirma es que, a tamaños sumamente pequeños, la dualidad ondulatorio-corpuscular de la materia y, en particular, del objeto empleado para la observación, cobra importancia. El principio de incertidumbre no es una ley epistemológica concerniente al acto de observar, sino consecuencia de que la constan te de Planck no sea nula.

El principio de incertidumbre no es tampoco un axioma de la física cuántica; se trata de un principio deducido, al igual que la muy famosa ecuación $E = mc^2$, de Einstein, que fue deducida de ecuaciones más fundamentales de la teoría de relatividad. Ambas fórmulas son útiles por su concisión, por ir derechas al meollo. Es frecuente que los físicos se sirvan del

principio de incertidumbre como si se tratara de una regla empírica. Cuando se quiere estimar el valor aproximado de la cantidad de movimiento que tendrá un neutrón emitido por un núcleo que se desintegra a partir de un estado excitado, el valor $p = \hbar/x$ viene como traído por el rabo, siendo *x* el orden de magnitud del núcleo que confina al neutrón. Se podría concebir que, al estar confinado en el núcleo, la incertidumbre de *posición* del neutrón es muy pequeña. y que el neutrón está chocando y rebotando contra las paredes de su "jaula" con una incertidumbre de *cantidad de movimiento* que compensa la exactitud del otro dato. Cuando el neutrón escape, una estimación grosera de la cantidad de movimiento que posea estará dada por esta cota de incertidumbre.

Al examinar los fundamentos de la mecánica cuántica, resulta evidente que el principio de incertidumbre es más que una limitación epistemológica impuesta a los observadores humanos; se trata en realidad de un reflejo de la incertidumbre de la naturaleza misma. En mecánica cuántica, la realidad no se corresponde con la realidad macroscópica. No es simplemente que nosotros *no podamos* conocer simultáneamente la cantidad de movimiento y la posición de una partícula; ¡es que la partícula ni siquiera tiene posición y cantidad de movimiento definidas unívocamente a un mismo tiempo!

En mecánica cuántica, las partículas se representan mediante "funciones de onda". La función de onda de una partícula expresa las probabilidades de que la partícula se encuentre acá, allá o en algún otro lugar; de que la partícula se dirija al norte o al sur, etcétera. La función de onda asocia así a cada punto del espacio, una “amplitud de probabilidad” que varía con el tiempo, de que la partícula se encuentre en él. Alternativamente, calándonos unas "gafas matemáticas" adecuadas podemos obtener una amplitud de probabilidad para cada valor instantáneo de la cantidad de movimiento. Todos los hechos relativos a la partícula se encuentran implícitos en su función de onda. En la terminología más reciente, en lugar de funciones de onda suele hablarse de "estados".

En física clásica, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la partícula hacen intervenir directamente magnitudes tales como *x* y *p* -posición y cantidad de movimiento-, y los valores de *x* y *p* están bien definidos en todo momento; sus cambios obedecen a las fuerzas que actúan sobre la partícula. Provistos de tales ecuaciones dinámicas, los físicos pueden determinar por adelantado las posiciones y cantidades de movimiento de sistemas físicos sencillos y estables con increíble precisión. Así ocurre, por ejemplo, con los movimientos planetarios, que incluso los antiguos aprendieron a predecir con gran exactitud. Tenemos ejemplos más recientes en los juegos electrónicos "espaciales", donde las naves siderales y los planetas quedan sometidos a la atracción gravitatoria de alguna estrella y entran en órbita ante nuestros ojos, describiendo elipses perfectas sobre la pantalla. Las ecuaciones subyacentes a este tipo de movimiento son ecuaciones diferenciales. y una de sus propiedades evidentes (tanto así. que la damos por segura) es que los movimientos por ellas descritos son suaves. Ni los planetas ni las naves espaciales saltan repentinamente de sus órbitas. Los movimientos no presentan discontinuidades súbitas.

En mecánica cuántica, ni *x* ni *p* intervienen en las ecuaciones del movimiento en la misma forma que en mecánica clásica. En lugar de estas magnitudes, es la función de onda lo que evoluciona con el tiempo, obedeciendo a una ecuación diferencial: la ecuación de Schrödinger (en mecánica cuántica no relativista). Conforme transcurre el tiempo. los valores de la función de onda van "rizándose" a través del espacio, Io mismo que la onda acuática riza la superficie de un lago. Tal descripción parece sugerir que los fenómenos cuánticos, lo mismo que los no cuánticos, evolucionan suavemente, sin saltos. En cierto sentido, así sucede. La suave precesión de una partícula eléctricamente cargada que gira sobre sí misma inmersa en un campo magnético, puede servirnos de ejemplo. Es el equivalente electromagnético de la precesión de un giróscopo en el seno de un campo gravitatorio. Y, en efecto, los parámetros que caracterizan el estado de la partícula en rotación van cambiando suavemente, sin saltos bruscos.

Sin embargo, y la objeción cobra ahora gran tamaño, existen excepciones a este suave comportamiento, y estas excepciones parecen formar parte tan esencial de la mecánica cuántica como puedan serlo los estados de evolución suave. Tales excepciones se presentan en el acto de efectuar mediciones, o en la interacción de un sistema cuántico con otro macroscópico. En la forma más común de presentar la mecánica cuántica, a ciertos sistemas

conocidos como "observadores" se les confiere un *status* causal privilegiado (sin especificar más qué son los "observadores" y, en particular, sin aclarar si la cualidad de "tener consciencia" es o no requisito para ser "observador"). Para elucidar esta cuestión echaremos una ojeada a la llamada "parábola del grifo".

Imaginemos un grifo de agua, con dos llaves de control, marcadas respectivamente *F* y *C*. que podemos hacer girar indefinidamente. Del grifo está manando agua continuamente, pero el sistema tiene una extraña propiedad: el agua sale totalmente caliente, o fría del todo; no hay posibilidad de graduar estados intermedios. Los dos estados del agua serán llamados "estados característicos", y también, estados propios y auto-estados. La única forma de saber en cuál de sus dos estados se encuentra el agua es metiendo la mano bajo el chorro. En realidad, en mecánica cuántica ortodoxa, la cuestión es más delicada, pues es el propio acto de meter la mano lo que *provoca* en el agua la adopción de uno de sus dos auto-estados. Hasta ese momento se dice que el agua está en *superposición* de estados.

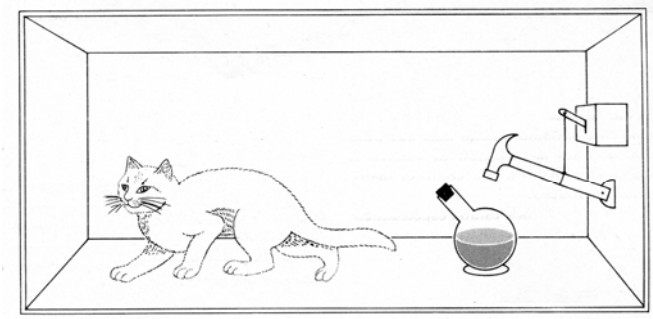
La probabilidad de que el agua salga fría depende de las posiciones de las llaves. Evidentemente, si sólo abrimos la válvula *C* siempre obtendremos agua caliente, y si únicamente abrimos la *F* es seguro que sacaremos agua fría. Sin embargo, abriendo en mayor o menor medida ambas válvulas se creará una superposición de estados. Ajustando las llaves a una determinada posición y ensayando reiteradamente el resultado se puede medir la probabilidad de que se obtenga agua fría con este ajuste. Podemos entonces modificar la apertura de las válvulas, y repetir la serie de experimentos. Es de esperar que exista una posición intermedia donde sea equiprobable sacar agua caliente y sacar agua fría, es decir, donde sacar una u otra equivalga a lanzar una moneda a cara o cruz. (Este grifo "cuántico" nos recuerda, tristemente, más de una ducha.) Finalmente, podríamos llegar a reunir suficiente número de datos y construir una gráfica de la probabilidad de sacar agua fría en función de las posiciones de las llaves.

Los fenómenos cuánticos son análogos al descrito. Los físicos pueden trastear mandos y controles y situar los sistemas a estudiar en superposición de estados, similares a las del sistema agua fría-caliente. Mientras no se realicen *mediciones* en el sistema, el físico no puede saber en qué auto-estado se encuentra el sistema. De hecho, puede demostrarse que, en un sentido fundamental, ni el propio sistema "sabe" en qué estado se encuentra, y que sólo se decide (al azar) por uno de ellos en el instante en que el observador "mete la mano" para probar el agua, por así decirlo. Hasta el momento de la observación, el sistema actúa como si *no* estuviera en un estado característico. A todos los efectos prácticos, para todos los fines teóricos, y en realidad, para *todo* propósito, el sistema no se encuentra en un estado característico.

Es posible idear gran cantidad de experimentos con el agua que mana de nuestro grifo cuántico, al objeto de determinar si el agua está caliente o fría, sin necesidad de meter directamente la mano bajo el chorro. (Suponemos, claro, que no hay indicios que revelen la temperatura del agua, como podría ser el desprendimiento de vapor.) Podríamos, por ejemplo, llenar nuestra máquina de lavar con agua de este grifo cuántico; pero, de todas formas, seguiríamos sin saber si nuestro jersey de lana ha encogido o no hasta abrir la lavadora (lo que significa realizar una medición a cargo de un observador dotado de consciencia). Podríamos preparar una infusión de té, pero no sabríamos si el té está caliente o frío hasta degustarlo (nueva medición, y observador consciente). La cuestión crítica estriba en que el jersey y el té, que no poseen por sí mismos *status* de observador consciente, han de seguir el juego y, lo mismo que el agua, admitir superposiciones de estados: encogimiento o no del jersey, té caliente o té frío.

Pudiera parecer que todo esto poco tiene que ver con la física *per se*; más bien recuerda las discusiones bizantinas del tipo: "¿Hace ruido un árbol al caer en el bosque, si no hay nadie presente para oírlo?" La mecánica cuántica le da a tales acertijos un nuevo giro; en efecto, hay consecuencias de la realidad de las superposiciones que tienen trascendencia a nivel de observación, consecuencias que son diametralmente opuestas a las que se producirían si un estado, en apariencia mixto, siempre fuese en realidad un verdadero estado característico, que estuviese meramente ocultando su identidad a los observadores hasta el instante de la medición. Expresado burdamente, un chorro de agua quizá caliente/quizá fría se comportaría de distinta forma que un chorro verdaderamente caliente o verdaderamente frío, pues las

alternativas "interfieren" entre si. Tal hecho sólo quedará de manifiesto tras enorme número de lavados de jersey y de infusiones de té, al igual que en el experimento de las dos rendijas son necesarias gran número de arribadas de electrones para revelar las pautas de interferencia de las trayectorias alternativas. Los lectores interesados deberían consultar la exposición que sobre estas diferencias se da, bien en *The Character of Physical Law*, de Feynrnan, o bien, si se desea mayor detalle, en *The Feynman Lectures on Physics*, de Richard P. Feynman. Robert B. Leighton y Matthew Sands (Addison-Wesley Publishing Co, 1973-75).



El gato de Schrödinger ayuda a desvelar una paradoja de la mecánica cuántica

El apurado trance a que es sometido el gato de Schrödinger (Erwin Schrödinger fue, con su colega Werner Heisenberg, uno de los pioneros de la mecánica cuántica) aún lleva más allá esta idea: incluso un gato pudiera encontrarse en superposición de estados mecánico-cuánticos hasta la intervención de un observador humano. La parábola del desdichado gato es como sigue. Hay una caja preparada para alojar al gato. Dentro de la caja hay una minúscula muestra de radio. También hay dentro de la caja un detector de radiación que percibirá cualesquiera desintegraciones de átomos de radio de la muestra. La muestra ha sido elegida de tal manera que haya iguales probabilidades de que se produzca al menos una desintegración en el lapso de una hora como de que no se produzca ninguna. De presentarse alguna desintegración, se cerraría un circuito, que a su vez determinaría la ruptura de una vasija con un líquido letal que, al derramarse en el piso de la caja, mataría al gato.

Se coloca al gato en la caja, se asegura la tapa, y se deja transcurrir una hora. Al cabo, un observador humano se acerca a la caja, la abre y comprueba lo sucedido. Según ciertos enfoques extremosos (que el lector debe tener presente no son los habituales en mecánica cuántica) tan *sólo en ese instante* se vería obligado el sistema a asumir uno de sus dos posibles estados característicos -gato vivo o gato muerto- que están conjuntamente representados como superposición de estados en la función de onda del sistema. (Observemos que es necesario que la incertidumbre y la aleatoriedad de comportamiento del sistema sea de origen cuántico; aquí se trata de la desintegración de núcleos de radio. Este experimento conceptual carecería de todo interés si en lugar de la muestra de radio se usara una ruleta como generador de azar.)

Se podría objetar: "¿Un momento! ¿Acaso un gato vivo no haría en este caso el papel de observador consciente tan bien como pudiera hacerlo un humano?" Probablemente sea así, pero notemos que este gato es, posiblemente, un gato muerto, y en tal caso malamente podría asumir la función de observador. En efecto, hemos creado sobre el gato de Schrödinger una superposición de estados, uno de los cuales tiene *status* de observador, mientras que el otro carece de él. ¿Y ahora, qué hacemos?

A muchos físicos, esta distinción entre sistemas con *status* de observador y sistemas que no lo poseen les resulta artificial, cuando no repugnante. Además, la idea de que la intervención de un observador provoque un "colapso de la función de onda" -el salto brusco a un estado propio puro, elegido al azar- introduce un elemento de capricho en las leyes últimas de la naturaleza. Durante toda su vida, Einstein tuvo la convicción de que Dios no juega a los dados ("Der Herrgott würfelt nicht").

Un intento radical para salvar a un tiempo la continuidad y el determinismo en mecánica cuántica es el conocido como "interpretación en mundos múltiples", propuesto por vez primera en 1957 por Hugh Everett III. De acuerdo con esta extravagante teoría, no hay ningún sistema que salte discontinuamente a estados propios. Lo que sucede es que la superposición evoluciona sin rupturas, desplegando paralelamente sus diversas ramificaciones. Cada vez que sea necesario, el sistema retoña en nuevas ramas que portan las diversas variantes recién creadas Por ejemplo, en el caso del gato de Schrödinger hay dos ramas, que se desarrollan paralelamente. "Bueno", podríamos preguntar, "¿qué le sucede al gato? ¿Se siente *el gato* con vida, o se siente ya muerto?" Sin duda quedaríamos sin respuesta, pero Everett diría: "Eso dependerá de la rama a que se atienda, En una rama el gato se siente vivo, mientras en la otra

ya no hay gato que pueda sentir nada". Nosotros sentimos en cambio que nuestra intuición comienza a rebelarse, y preguntarnos entonces: "¿Y qué hay de los instantes inmediatamente anteriores a que el gato de la rama letal muriera? ¿Cómo se sentía el gato *entonces*? Sin duda no sería capaz de sentirse vivo y saberse muerto simultáneamente, ¿Cuál de ambas ramas contiene, pues, al autentico gato'?"

El problema cobra toda su viveza cuando nos damos cuenta de las implicaciones que con respecto a nosotros mismos contiene semejante teoría, Pues en cada punto de ramificación "cuántica" de nuestras vidas (que habrán sido billones y billones) nos hemos escindido en dos o más de nosotros mismos, cada uno a horcajadas en ramas paralelas, pero inconexas, pertenecientes a una gigantesca función de onda universal. (Este término pretende describir la enorme función de onda capaz de representar todas las partículas de todos los universos paralelos.) En el punto de su artículo donde surge esta crítica dificultad, Everett inserta, con toda tranquilidad, a pie de página, la siguiente nota:

"Nos tropezamos aquí con una dificultad lingüística. Pues mientras antes de la observación teníamos un único estado para el observador, tras ella hay para el observador cierto número de diferentes estados, que se presentan todos en superposición. Cada uno de estos estados individuales es un estado para un observador, y así podemos hablar de los diferentes observadores descritos por diferentes estados. Por otra parte, está interviniendo el mismo sistema físico, y, desde tal punto de vista, se trata del *mismo* observador, que se encuentra en diferentes estados para diferentes elementos de la superposición (es decir, ha tenido diferentes experiencias en los distintos elementos de la superposición). En este contexto, nos serviremos del singular cuando pretendamos destacar que sólo estamos refiriéndonos a un único sistema físico (Everett alude aquí al universo que va ramificándose múltiplemente), y del plural, en cambio, cuando pretendamos cargar el acento en las diferentes experiencias correspondientes a los elementos individuales de la superposición. (*Exempli gratia*, 'El observador efectúa una medición de la magnitud *A*, tras la cual cada uno de los observadores de la superposición resultante ha percibido un estado característico')"

Todo esto se afirma con auténtica "cara de póker". El problema de la conciencia subjetiva del observador no se trata para nada; ni siquiera lo barre bajo la alfombra. Seguramente lo considerará carente de significado.

Basta, empero, preguntarse, ¿por qué me siento yo únicamente en un mundo? Bien, de acuerdo con el enfoque de Everett no es así: nosotros percibimos todas las alternativas simultáneamente. Lo que sucede es, sencillamente, que *este* yo que recorre *esta* rama concreta no experimenta todas las alternativas. Semejante afirmación no puede ser más chocante. En su famoso relato "El jardín de los senderos que se bifurcan", Jorge Luis Borges describe una fantástica visión del universo. Héla aquí:

"*El jardín de los senderos que se bifurcan* es una imagen incompleta, pero no falsa, del universo tal como lo concebía Ts'ui Pên. A diferencia de Newton y Schopenhauer, su antepasado no creía en un tiempo uniforme, absoluto. Creía en infinitas series de tiempos, en una red creciente y vertiginosa de tiempos divergentes, convergentes y paralelos. Esa trama de tiempos que se aproximan, se bifurcan, se cortan o que secularmente se ignoran, abarca *todas* las posibilidades. No existimos en la mayoría de esos tiempos; en algunos existe usted y no yo. En éste, que un favorable azar me depara, usted ha llegado a mi casa; en otro, usted, al atravesar el jardín, me ha encontrado muerto; en otro, yo digo estas mismas palabras, pero soy un error, un fantasma."

Podemos ver esta cita al principio de *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics: A Fundamental Exposition*, dirigido por Bryce S. De-Witt y Neill Graham (Princeton University Press, 1973). No deja de ser curioso encontrar tema tan extravagante infiltrado en el corazón mismo de la ciencia que pasa por ser la más estable y menos errática de todas.

Pero, en cierto modo, ello no debería sorprendernos. Existe clara conexión entre los mundos imaginarios que pueblan nuestras mentes y los mundos alternativos que evolucionan paralelamente y sin interferencia con el que nosotros experimentamos. Es evidente que, al deshojar la margarita "…me quiere, no me quiere, me quiere…", el proverbial enamorado está desarrollando en su mente dos mundos (cuando menos) fundados de muy distinta manera en otros tantos modelos de conducta de su amada. ¿O quizá sería más exacto decir que hay *un*

solo modelo mental de la adorada, que se encuentra en superposición de estados mecánico-cuántico-mentales?

Y cuando un novelista considera simultáneamente cierto número de posibles desarrollos de un relato, ¿acaso no se encuentran sus personajes -en sentido metafórico- en superposición mental de estados? Si la novela nunca llegara a plasmarse en papel, quizá los personajes pudieran proseguir su evolución y desarrollar sus biografías múltiples en el cerebro de su autor. Más aún, sería inconcebible preguntar cuál sería en este caso la versión *auténtica*, pues todos los mundos serian igualmente genuinos.

Quizás una manera de concebir la función de onda universal sea imaginarla como la mente -o si se quiere, el cerebro- de Dios, en cuyo seno todas las posibles ramificaciones tendrían desarrollo. Nosotros seríamos entonces meros subsistemas del cerebro divino, y *estas* versiones de nosotros mismos no serían más auténticas ni privilegiadas de lo que pueda tener de más genuina nuestra galaxia con respecto a todas las demás del Universo. Concebido de esta forma, el cerebro divino evoluciona determinísticamente y sin discontinuidades, como siempre mantuvo Einstein. El físico Paul Davies, escribiendo precisamente sobre este tema en su reciente obra *Other Worlds* (Simon and Schuster, 1980), dice: "Nuestra consciencia va trazando aleatoriamente una ruta a lo largo de las vías -en permanente ramificación- del cosmos, y por ello, somos nosotros, y no Dios, quienes jugamos a los dados,"

Todas estas consideraciones dejan sin respuesta el enigma fundamental, que todos tenemos necesidad de plantearnos: ¿por qué está mi conciencia de mi mismo haciéndome sentir unitario, y por qué está propagándose a lo largo de esta rama concreta, en lugar de hacerlo por cualquiera otra? ¿Qué ley subyace a las elecciones aleatorias que me hacen proseguir por esta rama? ¿Por qué no sigue la conciencia de mi mismo al costado de mis otros yo, cuando éstos se escinden y siguen otras rutas? En cierto modo, es casi como preguntar ¿por qué siento yo *mis* sentimientos, y no los de algún otro? ¿Qué cosa me liga *a mí* al punto de vista de *este* cuerpo, que evoluciona por *esta* rama del universo en *este* momento concreto? La cuestión es tan básica y fundamental que casi parece desafiar su clara enunciación verbal. Y no parece que la respuesta vaya a provenir de la mecánica cuántica. De hecho, éste es exactamente el colapso de la función de onda, que asoma ahora por la otra punta de la alfombra bajo la cual fue barrida por Everett, convertido esta vez en un problema de identidad personal, no menos paradójico que el problema que vino a sustituir.

Todavía podemos caer más profundamente en las simas de la paradoja, al darnos cuenta de que hay ramas de esta gigantesca y frondosamente ramificada función de onda universal en las que no existe Werner Heisenberg, no existe Max Planck, no existe Albert Einstein; ramas todas ellas donde no existe evidencia alguna de mecánica cuántica, ramas donde no hay principio de indeterminación ni interpretaciones de mundos múltiples de la mecánica cuántica. Hay ramas donde el relato de Borges no ha sido escrito, ramas en las que este artículo no se ha escrito. Hay incluso una rama donde este artículo fue escrito de cabo a rabo exactamente como usted lo está viendo aquí, salvo en que terminaba por una palabra distinta.

Investigación y Ciencia. Edición en español de Scientific American.

Nº 60. Septiembre 1981.