

## Heisenberg y el principio de incertidumbre

El físico alemán Werner K. Heisenberg es conocido sobre todo por formular el principio de incertidumbre, una contribución fundamental al desarrollo de la teoría cuántica. Este principio afirma que es imposible medir simultáneamente de forma precisa la posición y el momento lineal de una partícula. Heisenberg fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1932. El principio de incertidumbre ejerció una profunda influencia en la física y en la filosofía del siglo XX.

Werner Karl Heisenberg nació el 5 de diciembre de 1901 en Würzburgo y estudió en la Universidad de Munich. En 1923 fue ayudante del físico alemán Max Born en la Universidad de Gotinga, y desde 1924 a 1927 obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller para trabajar con el físico danés Niels Bohr en la Universidad de Copenhague. En 1927 fue nombrado profesor de física teórica en la Universidad de Leipzig. Después fue profesor en las universidades de Berlín (1941-1945), Gotinga (1946-1958) y Munich (1958-1976). En 1941 ocupó el cargo de director del Instituto Kaiser Wilhelm de Química Física, que en 1946 pasó a llamarse Instituto Max Planck de Física.

Estuvo a cargo de la investigación científica del proyecto de la bomba atómica alemana durante la II Guerra Mundial. Bajo su dirección se intentó construir un reactor nuclear en el que la reacción en cadena se llevara a cabo con tanta rapidez que produjera una explosión, pero estos intentos no alcanzaron éxito. Estuvo preso en Inglaterra después de la guerra. Murió en 1976.

Heisenberg había presentado su propio modelo de átomo renunciando a todo intento de describir el átomo como un compuesto de partículas y ondas. Pensó que estaba condenado al fracaso cualquier intento de establecer analogías entre la estructura atómica y la estructura del mundo. Prefirió describir los niveles de energía u órbitas de electrones en términos numéricos puros, sin la menor traza de esquemas. Como quiera que usó un artificio matemático denominado "matriz" para manipular sus números, el sistema se denominó "mecánica de matriz".

Heisenberg recibió el premio Nobel de Física en 1932 por sus aportaciones a la mecánica ondulatoria de Schrödinger, pues esta última pareció tan útil como las abstracciones de Heisenberg, y siempre es difícil, incluso para un físico, desistir de representar gráficamente las propias ideas.

Una vez presentada la mecánica matriz (para dar otro salto atrás en el tiempo) Heisenberg pasó a considerar un segundo problema: cómo describir la posición de la partícula. ¿Cuál es el procedimiento indicado para determinar dónde está una partícula? La respuesta obvia es ésta: observarla. Pues bien, imaginemos un microscopio que pueda hacer visible un electrón. Si lo queremos ver debemos proyectar una luz o alguna especie de radiación apropiada sobre él. Pero un electrón es tan pequeño, que bastaría un solo fotón de luz para hacerle cambiar de posición apenas lo tocara. Y en el preciso instante de medir su posición, alteraríamos ésta.

Aquí nuestro artificio medidor es por lo menos tan grande como el objeto que medimos; y no existe ningún agente medidor más pequeño que el electrón. En consecuencia, nuestra medición debe surtir, sin duda, un efecto nada desdeñable, un efecto más bien decisivo en el objeto medido. Podríamos detener el electrón y determinar así su posición en un momento dado. Pero si lo hiciéramos, no sabríamos cuál es su movimiento ni su velocidad. Por otra parte, podríamos gobernar su velocidad, pero entonces no podríamos fijar su posición en un momento dado.

Heisenberg demostró que no nos será posible idear un método para localizar la posición de la partícula subatómica mientras no estemos dispuestos a aceptar la incertidumbre absoluta respecto a su posición exacta. Es imposible calcular ambos datos con exactitud al mismo tiempo.

Consideramos la pregunta: ¿no sería posible para un electrón y observarlo?. Vamos a suponer que disponemos de un aparato que puede "ver" a los electrones. Para "ver" un electrón necesitamos iluminarlo

con " luz ". No podemos usar luz ordinaria porque su longitud de ondas es muchísimas veces mayor que el electrón y este no es dispersaría o reflejaría. Tendremos entonces que usar " luz " de una longitud de ondas muy pequeñas, o lo que es lo mismo, fotones de energía muy alta que al ser dispersados por electrones nos proporcionan una imagen de él. Pero he aquí que al hacer incidir un fotón muy energético sobre el electrón estamos comunicados a este un momento lineal muy grande, que lo perturba demasiado y lo hace cambiar del estado en que se encontraba. Nos enfrentamos como la imposibilidad de observar al electrón sin perturbarlo. Podemos reducir la magnitud de la perturbación disminuyendo la energía de fotones, pero entonces la longitud de onda de esto se hace mayor y tendremos paquetes de ondas menos localizadas; esto disminuye la precisión con la que puede conocerse la posición del electrón. Recíprocamente, si queremos aumentar la precisión en la determinación de la posición del electrón, necesitamos más paquetes más <<concentrados>> (menores longitudes de ondas) lo cual implica fotones más energéticos y más perturbados para el electrón. Tenemos así que no podemos determinar simultáneamente la posición y la velocidad (o momento lineal) del electrón con precisión tan buena como queramos. Y no hay forma de vencer esta dificultad que la naturaleza nos presenta. Razonamientos como este llevaron a heisenberg a enunciar su famoso principio <<si es la incertidumbre en la posición de una partícula y es la incertidumbre o error en la determinación de su momento lineal, entonces necesariamente: (1)

En 1930, Einstein demostró que el principio de incertidumbre (donde se afirma la imposibilidad de reducir el error en la posición sin incrementar el error en el momento) implicaba también la imposibilidad de reducir el error en la medición de energía sin acrecentar la incertidumbre del tiempo durante el cual se toma la medida. Él creyó poder utilizar esta tesis como trampolín para refutar el principio de incertidumbre, pero Bohr procedió a demostrar que la refutación tentativa de Einstein era errónea.

A decir verdad, la versión de la incertidumbre, según Einstein, resultó ser muy útil, pues significó que en un proceso subatómico se podía violar durante breves lapsos la ley sobre conservación de energía siempre y cuando se hiciese volver todo al estado de conservación cuando concluyesen esos períodos: cuanto mayor sea la desviación de la conservación, tanto más breves serán los intervalos de tiempo tolerables. Yukawa aprovechó esta noción para elaborar su teoría de los piones. Incluso posibilitó la elucidación de ciertos fenómenos subatómicos presuponiendo que las partículas nacían de la nada como un reto a la energía de conservación, pero se extinguían antes del tiempo asignado a su detección, por lo cual eran sólo "partículas virtuales". Hacia fines de la década 1940-1950, tres hombres elaboraron la teoría sobre esas partículas virtuales: fueron los físicos norteamericanos Julian Schwinger y Richard Phillips Feynman y el físico japonés Sin-itiro Tomonaga. Para recompensar ese trabajo, se les concedió a los tres el premio Nobel de Física en 1965.

A partir de 1976 se han producido especulaciones acerca de que el Universo comenzó con una pequeña pero muy masiva partícula virtual que se expandió con extrema rapidez y que aún sigue existiendo. Según este punto de vista, el Universo se formó de la Nada y podemos preguntarnos acerca de la posibilidad de que haya un número infinito de Universos que se formen (y llegado el momento acaben) en un volumen infinito de Nada.

El "principio de incertidumbre" afectó profundamente al pensamiento de los físicos y los filósofos. Ejerció una influencia directa sobre la cuestión filosófica de "casualidad" (es decir, la relación de causa y efecto). Pero sus implicaciones para la ciencia no son las que se suponen por lo común. Se lee a menudo que el principio de incertidumbre anula toda certeza acerca de la naturaleza y muestra que, al fin y al cabo, la ciencia no sabe ni sabrá nunca hacia dónde se dirige, que el conocimiento científico está a merced de los caprichos imprevisibles de un Universo donde el efecto no sigue necesariamente a la causa. Tanto si esta interpretación es válida desde el ángulo visual filosófico como si no, el principio de incertidumbre no ha conmovido la actitud del científico ante la investigación. Si, por ejemplo, no se puede predecir con certeza el comportamiento de las moléculas individuales en un gas, también es cierto que las moléculas suelen acatar ciertas leyes, y su conducta es previsible sobre una base estadística, tal como las compañías aseguradoras calculan con índices de mortalidad fiables, aunque sea imposible predecir cuándo morirá un individuo determinado.

Ciertamente, en muchas observaciones científicas, la incertidumbre es tan insignificante comparada con la escala correspondiente de medidas, que se la puede descartar para todos los propósitos prácticos. Uno puede determinar simultáneamente la posición y el movimiento de una estrella, o un planeta, o una bola de billar, e incluso un grano de arena con exactitud absolutamente satisfactoria.

Respecto a la incertidumbre entre las propias partículas subatómicas, cabe decir que no representa un obstáculo, sino una verdadera ayuda para los físicos. Se la ha empleado para esclarecer hechos sobre la radiactividad, sobre la absorción de partículas subatómicas por los núcleos, así como otros muchos acontecimientos subatómicos, con mucha más razonabilidad de lo que hubiera sido posible sin el principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre significa que el Universo es más complejo de lo que se suponía, pero no irracional.

En la búsqueda de una estructura que fuera compatible con la mecánica cuántica Werner Heisenberg descubrió, cuando intentaba hallarla, el «principio de incertidumbre», principio que revelaba una característica distintiva de la mecánica cuántica que no existía en la mecánica newtoniana.

Según el principio de incertidumbre, ciertos pares de variables físicas, como la posición y el momento (masa por velocidad) de una partícula, no pueden calcularse simultáneamente con la precisión que se quiera. Así, si repetimos el cálculo de la posición y el momento de una partícula cuántica determinada (por ejemplo, un electrón), nos encontramos con que dichos cálculos fluctúan en torno a valores medios. Estas fluctuaciones reflejan, pues, nuestra incertidumbre en la determinación de la posición y el momento. Según el principio de incertidumbre, el producto de esas incertidumbres en los cálculos no puede reducirse a cero. Si el electrón obedeciese las leyes de la mecánica newtoniana, las incertidumbres podrían reducirse a cero y la posición y el momento del electrón podrían determinarse con toda precisión. Pero la mecánica cuántica, a diferencia de la newtoniana, sólo nos permite conocer una distribución de la probabilidad de esos cálculos, es decir, es intrínsecamente estadística.

En síntesis, se puede describir que el principio de incertidumbre postula que en la mecánica cuántica es imposible conocer exactamente, en un instante dado, los valores de dos variables canónicas conjugadas (posición-impulso, energía-tiempo, ..., etc.) de forma que una medición precisa de una de ellas implica una total indeterminación en el valor de la otra. Matemáticamente, se expresa para la posición y el impulso en la siguiente forma:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \text{cte}$

El principio de incertidumbre tiene además consecuencias curiosas, tales como el efecto túnel, y es también la causa de que se hayan desarrollado conceptos tales como los orbitales atómicos.

**Gamow** descubrió que según el principio de incertidumbre de **Heisenberg** una pequeña parte de un núcleo atómico, la parte que más tarde constituye la partícula alfa, no está exactamente en el núcleo sino ligeramente separada de él, lo bastante separada como para que predominen los efectos de la fuerza de repulsión electrostática y no la interacción nuclear fuerte.

**Gamow** describió la situación utilizando la analogía de un valle. La partícula alfa se hallaba en un valle con el resto del núcleo atómico, un valle donde predominaban las fuerzas nucleares y que estaba rodeado por altas montañas difíciles de subir, ya que ello requería mucha energía. Las partículas alfa detectadas no poseían la energía necesaria para salir de aquel valle. Sin embargo, gracias a la incertidumbre cuántica la partícula alfa podía salir del valle como si cavase un *túnel* a través de las montañas. Una vez fuera del valle de la fuerza nuclear, la repulsión electrostática se hacía cargo de la situación.

El efecto túnel descrito por **Gamow** no sólo explica el proceso que permite la emisión de una partícula alfa, sino que es también la explicación de la fusión nuclear que tiene lugar en las estrellas. Allí, dos protones deben acercarse lo bastante como para formar un nuevo núcleo atómico. Sin embargo, cuanto más se acercan

mayor es repulsión electrostática entre ellos. El efecto túnel permite que los protones *caven* un túnel a través de esa repulsión y se aproximen lo bastante como para que la interacción nuclear fuerte los mantenga unidos. De hecho, la existencia del efecto túnel compensa la falta de energía que sería necesaria para llevar a cabo el proceso en su ausencia, una energía tal que en la mayoría de las estrellas la temperatura sería insuficiente para que hubiese fusión. El efecto túnel se manifiesta también en procesos tan cotidianos como los que tienen lugar en una pila eléctrica o en un circuito electrónico.

Una obra de dos escritores españoles ha conseguido llevar el efecto túnel a la ciencia-ficción. Se trata de *HIJOS DE LA ETERNIDAD*, de **Juan Miguel Aguilera** y **Javier Redal**. En ella se observa cómo una civilización futura ha desarrollado un efecto túnel macroscópico. Merced a ello, son capaces de disparar haces de luz a través de asteroides, mover éstos, o viajar un millón de años-luz en cero segundos por el simple procedimiento de hacer probable lo improbable.

Es importante insistir en que la incertidumbre no se deriva de los instrumentos de medida, sino del propio hecho de medir. Con los aparatos más precisos imaginables, la incertidumbre en la medida continúa existiendo. Así, cuanto mayor sea la precisión en la medida de una de estas magnitudes mayor será la incertidumbre en la medida de la otra variable complementaria.

## OTRA EXPLICACIÓN

Según la mecánica clásica de Newton, por la **ley fundamental de la dinámica**, para conocer el estado de una partícula en un instante dado basta con indicar su posición y su velocidad. Newton y sus seguidores presuponían que se podía determinar con precisión el valor de estas dos magnitudes.

Sin embargo, Heisenberg demostró que no era posible conocer tal valor con absoluta exactitud en el marco de la física cuántica. El **principio de incertidumbre**, o de indeterminación, que lleva su nombre sostiene que, si es una coordenada de posición de la partícula y  $p_x$  su momento lineal en la dirección de esta coordenada, el producto de la indeterminación de estas dos magnitudes es siempre mayor o igual que la constante reducida de Planck dividida por dos. Es decir:

Ello indica que si se pudiera determinar con total exactitud, por ejemplo, el valor de la posición, aumentaría la indeterminación en el conocimiento del momento lineal (y, por tanto, de la velocidad) hasta igualar o superar el límite indicado.

Es decir, no es posible determinar simultáneamente y sin errores el valor exacto de la energía de un proceso y el momento en que dicho proceso se producirá.

Desde Aristóteles, la física influye sobre la filosofía. En el siglo XX, uno de los físicos que probablemente más haya marcado a la “madre de las ciencias” es Werner Heisenberg (1901-1976), el alemán que postuló el principio de incertidumbre y puso en marcha la mecánica cuántica anticipada por Planck, Einstein y Bohr.

Ahora bien, ¿en qué consiste tal principio, en su ámbito estrictamente físico? Básicamente, quiere decir que en el microcosmos, a nivel nuclear, es imposible conocer al mismo tiempo ciertas magnitudes como la posición y la velocidad de una partícula. O, dicho de otro modo, cuanto más precisamente se conozca la velocidad de una partícula (digamos, un electrón) menos se sabrá de su posición. Y lo mismo a la inversa.

Pero no es por un problema de la técnica de medición; no es que la ciencia no ha avanzado lo suficiente como para lograr una medición exacta de ambas magnitudes. El electrón es así, y eso fue lo que perturbó sobremanera la física, y por ende la filosofía. El solo hecho de medir una magnitud altera la otra. Para graficar la idea, se puede poner un ejemplo tomado de la “vida moderna”, por llamarla así; un ejemplo con teléfonos. Cuando uno llama a un teléfono fijo, sabe a qué lugar llama pero no quién atiende; en cambio, cuando se llama a un celular se conoce a quién atiende, pero no dónde estará esa persona.

**Y otra: ¿Qué es el principio de incertidumbre de Heisenberg?**

Antes de explicar la cuestión de la incertidumbre, empecemos por preguntar: ¿qué es la certidumbre? Cuando uno sabe algo de fijo y exactamente acerca de un objeto, tiene certidumbre sobre ese dato, sea cual fuere.

¿Y cómo llega uno a saber una cosa? De un modo o de otro, no hay más remedio que interactuar con el objeto. Hay que pesarlo para averiguar su peso, golpearlo para ver cómo es de duro, o quizá simplemente mirarlo para ver dónde está. Pero grande o pequeña, tiene que haber interacción.

Pues bien, esta interacción introduce siempre algún cambio en la propiedad que estamos tratando de determinar. O digámoslo así: el aprender algo modifica ese algo por el mismo hecho de aprenderlo, de modo que, a fin de cuentas, no lo hemos aprendido exactamente.

Supongamos, por ejemplo, que queremos medir la temperatura del agua caliente de un baño. Metemos un termómetro y medimos la temperatura del agua. Pero el termómetro está frío, y su presencia en el agua la enfría una chispa. Lo que obtenemos sigue siendo una buena aproximación de la temperatura, pero no exactamente hasta la billonésima de grado. El termómetro ha modificado de manera casi imperceptible la temperatura que estaba midiendo.

O supongamos que queremos medir la presión de un neumático. Para ello utilizamos una especie de barrita que es empujada hacia afuera por una cierta cantidad del aire que antes estaba en el neumático. Pero el hecho de que se escape este poco de aire significa que la presión ha disminuido un poco por el mismo acto de medirla.

¿Es posible inventar aparatos de medida tan diminutos, sensibles e indirectos que no introduzcan ningún cambio en la propiedad medida?

El físico alemán Werner Heisenberg llegó, en 1927, a la conclusión de que no. La pequeñez de un dispositivo de medida tiene un límite. Podría ser tan pequeño como una partícula subatómica, pero no más. Podría utilizar tan sólo un cuanto de energía, pero no menos. Una sola partícula y un solo cuanto de energía son suficientes para introducir ciertos cambios. Y aunque nos limitemos a mirar una cosa para verla, la percibimos gracias a los fotones de luz que rebotan en el objeto, y eso introduce ya un cambio.

Tales cambios son hartos diminutos, y en la vida corriente de hecho los ignoramos; pero los cambios siguen estando ahí. E imaginemos lo que ocurre cuando los objetos que estamos manejando son diminutos y cualquier cambio, por diminuto que sea, adquiere su importancia.

Si lo que queremos, por ejemplo, es determinar la posición de un electrón, tendríamos que hacer rebotar un cuanto de luz en él —o mejor un fotón de rayos gamma— para «verlo». Y ese fotón, al chocar, desplazaría por completo al electrón.

Heisenberg logró demostrar que es imposible idear ningún método para determinar exacta y simultáneamente la posición y el momento de un objeto. Cuanto mayor es la precisión con que determinamos la posición, menor es la del momento, y viceversa. Heisenberg calculó la magnitud de esa inexactitud o «incertidumbre» de dichas propiedades, y ese es su «principio de incertidumbre».

El principio implica una cierta «granulación» del universo. Si ampliamos una fotografía de un periódico, llega un momento en que lo único que vemos son pequeños granos o puntos y perdemos todo detalle. Lo mismo ocurre si miramos el universo demasiado cerca.