

# Principio de Incertidumbre

## Trabajo de Investigación

1. [Introducción](#)
2. [Principio de incertidumbre](#)

### Introducción

Considero de mucha importancia este principio, debido a la **naturaleza** del mismo, en este trabajo de describe de la manera mas practica todas las características del mismo, aunque a veces se piense que no es necesario, puede servir en muchas ocasiones para delatar algo, o simplemente para justificarlo.

El Principio de **Incertidumbre** de Heisenberg es sin duda algunos unos de los enigmas de la **historia**, debido a que este menciona que "Lo que estudias, lo cambias", entonces, si esto es cierto, ¿Qué tanto a cambiado la realidad de lo que nos narra la **historia**?

### PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

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 un imposible calcular ambos **datos** con exactitud al mismo **tiempo**.

Siendo así, no podrá haber una ausencia completa de energía ni en el cero absoluto siquiera. Si la energía alcanzara el punto cero y las partículas quedaran totalmente inmóviles, sólo sería necesario determinar su posición, puesto que la velocidad equivaldría a cero. Por tanto, sería

de esperar que subsistiera alguna "energía residual del punto cero", incluso en el cero absoluto, para mantener las partículas en movimiento y también, por así decirlo, nuestra incertidumbre. Esa energía "punto cero" es lo que no se puede eliminar, lo que basta para mantener líquido el helio incluso en el cero absoluto.

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 racionalidad 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:

$$h/2\pi \geq \Delta x \Delta p$$

$\Delta x, \Delta p$  donde **incertidumbre** en la medida de la  $p$ ,  $\Delta$  posición; **incertidumbre** en la medida del impulso; ; en ambas relaciones  $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$  para la energía,  $E$ , y el tiempo,  $t$ , se tiene el límite de precisión posible viene dado por la constante de Planck,  $h$ .

Para ver el gráfico seleccione la opción "Bajar trabajo" del menú superior

Una consecuencia ineludible del **carácter** dual de la **materia** es el principio de **incertidumbre** o de indeterminación propuesto por el físico alemán Werner Heisenberg en 1927. Este principio se refiere a la exactitud con que podemos hacer mediciones.

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)**

Si (1) es decir, aumentar la precisión en el conocimiento de la posición aumenta la incertidumbre del momento o de la velocidad.

En tres dimensiones: (1)

Podemos determinar con precisión y  $y$  simultáneamente, es decir, tener (1) y (1) arbitrariamente pequeños al mismo tiempo. Pero dos variables que se refieren al mismo eje. ( $x$ , (1) o bien  $y$ , (1), etc.) deben satisfacer las relaciones de incertidumbre. Estas variables se llaman conjugadas.

Debido al valor tan pequeño de  $h$  la incertidumbre propia de las variables conjugadas no es importante en el mundo macroscópico. Sin embargo, el principio de la incertidumbre nos dice que la imposibilidad de medir con precisión absoluta no es imputable al observador, no se debe a su falta de habilidad para construir aparatos de medición más exactos, si no que esta en la naturaleza de las cosas el no poder ser medidas con exactitud.

Estos resultados de la Física Moderna han tenido repercusiones importantes en nuestras concepciones del Universo y en general en nuestra filosofía.

Otra forma importante del principio de incertidumbre es la siguiente: (1)

que se obtiene de (1) simplemente recordando que (1)

y que (1) Sustituyendo: (1)

E y t son también variables conjugadas. Esta forma del principio nos dice que no podemos conocer simultáneamente la energía y el tiempo que dura un evento con precisión ARBITRARIA.

O bien, que no podemos hacer una medición precisa de la energía en un tiempo ARBITRARIAMENTE corto.

Hay otras propiedades de las partículas microscópicas que si pueden determinarse con precisión absoluta. Por ejemplo, el signo de su carga eléctrica.

Como ilustración vamos algunos ejemplos.

1.- Para una molécula de hidrógeno la incertidumbre con la que se conoce su posición en un cierto experimento es del orden del diámetro de dicha molécula, aproximadamente (1)

m. La incertidumbre en el momento lineal es entonces: (1)

Si su velocidad es 2000 m/seg (velocidad que tendría a temperatura ambiente) y sabiendo que la masa es  $m =$  Kg, tenemos: (1)

La incertidumbre relativa es entonces: (1)

O sea que para esta molécula no puede determinarse el momento lineal con mejor exactitud que el 170% de su valor original.

En caso de una bala de 50 g. disparada a m/seg y cuya posición se conoce con un error de 1.0 mm:

(1) y resulta entonces: (1)

Este numero es tan pequeño que prácticamente no existe incertidumbre.

Nótese como ha influido la masa de la partícula en el resultado.

2.- Cuando un electrón en un átomo es excitado puede pasar a ocupar un nivel de mayor energía. Pero no pasa mucho tiempo antes que el electrón regrese a su estado inicial (o estado base). El tiempo que tarda el electrón en el estado excitado se llama tiempo de vida de ese estado excitado. Sea (1)

sec, el tiempo de vida de un estado excitado. La incertidumbre en la determinación de la energía de ese estado es:

(1)

Esto se llama <<a anchura de energía>> del estado excitado.

**NOTA:** Las relaciones de incertidumbre a veces se dan en términos de (1), que se define como:

(1)

por conveniencia en los cálculos. Así, a veces usamos (1) en vez de (1). La discrepancia por el factor (1) entre una expresión y otra no es fundamental.

### - Supuesta demostración

El hecho de que cada partícula lleva asociada consigo una onda, impone restricciones en la capacidad para determinar al mismo tiempo su posición y su velocidad. Este principio fue enunciado por W. Heisenberg en 1927.

- Es natural pensar que si una partícula está localizada, debemos poder asociar con ésta un paquete de ondas más o menos bien localizado.

Un paquete de ondas se construye mediante la superposición de un número infinito de ondas armónicas de diferentes frecuencias.

En un instante de tiempo dado, la función de onda asociada con un paquete de ondas está dado por (1)

donde  $k$  representa el número de onda (1)

y donde la integral representa la suma de ondas con frecuencias (o número de ondas) que varían desde cero a más infinito ponderadas mediante el factor

$g(k)$ .

El momento de la partícula y el número de ondas están relacionados

ya que (1)

de lo cual se deduce que (1)

- Queda claro que para localizar una partícula es necesario sumar todas las contribuciones de las ondas cuyo número de onda varía entre cero e infinito y por lo tanto el momento (1)

también varía entre cero e infinito. Es decir que está completamente indeterminado.

- Para ilustrar lo anterior hemos indicado en la siguiente figura diferentes tipos de paquetes de onda y su *transformada de Fourier* que nos dice como estan distribuidas las contribuciones de las ondas con número de ondas  $k$  dentro del paquete.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Bajar trabajo" del menú superior

- En el primer caso vemos que un paquete de ondas bien localizado en el
- espacio  $x$ , tiene contribuciones practicamente iguales de todas las ondas
- con número de ondas  $k$ .
- En el segundo caso vemos que si relajamos un poco la posición del paquete de ondas, también es posible definir el número de ondas (o el momento) de la partícula.

En el último caso vemos que para definir bien el momento **(1)** de la partícula, entonces su posición queda completamente indefinida.

Es posible determinar el ancho, o la incertidumbre, del paquete de ondas tanto en el espacio normal **(1)** como en el espacio de momentos **(1)**

El *principio de incertidumbre* nos dice que hay un límite en la precisión con el cual podemos determinar al mismo tiempo la posición y el momento de una partícula.

- La expresión **matemática** que describe el principio de incertidumbre de Heisenberg es **(1)**
- Si queremos determinar con total precisión la posición: **(1)**

De la desigualdad para el principio de incertidumbre verificamos entonces que **(1)**

Es decir, que la incertidumbre en el momento es infinita.

**(1)** Para ver las fórmulas seleccione la opción "Bajar trabajo" del menú superior