

Implicaciones de la Medición Cuántica en la Naturaleza de la Realidad

 Oscar Monroy ^{*1}, Marco Merma¹ y Javier Montenegro¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Recibido 09 Nov 2024 – Aceptado 30 Mar 2025 – Publicado 22 Abr 2025

Resumen

Se analiza el problema de la medición cuántica mostrando sus limitaciones, cuando se intenta llegar a la realidad objetiva partiendo de la perspectiva convencional de que el universo es un sistema aislado y autocontenido. Los aspectos fundamentales en los que se basa el análisis de la medición cuántica son el principio de superposición cuántico y el principio de incertidumbre de Heisenberg. El resultado al que conduce el principio de superposición cuántico es que el proceso de la medición cuántica nunca terminaría cuando se intenta llegar a la realidad objetiva. Utilizando el modelo del paquete de ondas el resultado al que conduce el principio de incertidumbre de Heisenberg es que las ondas armónicas que componen el paquete tienen una diferencia de fase constante, lo cual corresponde a una vibración o fracción de vibración, contradiciendo la naturaleza del campo cuántico. Al utilizar el análisis de Fourier se deduce que el estado de un sistema físico estaría completamente definido por una distribución espectral de frecuencias de vibración y, además, se deduce que todo sistema físico tendría una frecuencia fundamental de resonancia asociada al vacío subyacente del sistema. Por consiguiente, los aparatos de medida que se diseñen basándose en la nueva propuesta tendrían un poder de resolución cada vez mayor, siempre que su frecuencia de funcionamiento se aproxime a la frecuencia de resonancia del sistema.

Palabras clave: Medición cuántica, realidad objetiva, principio de superposición cuántico, principio de incertidumbre, información organizada.

Implications of Quantum Measurement on the Nature of Reality

Abstract

The problem of quantum measurement is analyzed, showing its limitations, when trying to reach objective reality starting from the conventional perspective that the universe is an isolated and self-contained system. The fundamental aspects on which the analysis of quantum measurement is based are the quantum superposition principle and the Heisenberg uncertainty principle. The result that the quantum superposition principle leads to is that the process of quantum measurement would never end when trying to reach objective reality. Using the wave packet model, the result that Heisenberg's uncertainty principle leads to is that the harmonic waves that make up the packet have a constant phase difference, which corresponds to a vibration or fraction of vibration, contradicting the nature of the field. quantum. By using Fourier analysis, it is deduced that the state of a physical system would be completely defined by a spectral distribution of vibration frequencies and, furthermore, it is deduced that every physical system would have a fundamental resonance frequency associated with the underlying vacuum of the system. Consequently, measuring devices designed based on the new proposal would have increasingly greater resolving power, as long as their operating frequency is close to the system's resonance frequency.

Keywords: Quantum measurement, objective reality, quantum superposition principle, uncertainty principle, organized information.

* omonroyc@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Introducción

El problema de la medición cuántica es un tema controversial e inacabado [1]. El principio de superposición de la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre de Heisenberg constituyen los aspectos fundamentales de la teoría de la medición cuántica. Las controversias a través de los años tendrían su origen en los conceptos convencionales de objeto grande y objeto pequeño, los cuales son meramente relativos y subjetivos. Según P.A.M. Dirac un objeto es grande si la perturbación producida por la observación es despreciable, y un objeto es pequeño si la perturbación producida por la observación es significativa [2].

Debido al problema de las mediciones en el nivel micro- cósmico se empezó a construir el formalismo de la mecánica cuántica, revisándose radicalmente el principio de causalidad. Este principio afirma que: si en el curso del tiempo el estado A del universo es seguido una vez por el estado B, siempre que se dé el estado A le seguirá el estado B. Se ha demostrado que este principio no puede ser confirmado ni refutado por la experiencia, porque es una definición puramente convencional [3].

En el contexto de la teoría de la medida, los fundadores de la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica convinieron en considerar que la relación causal en un proceso de medición se aplica solamente a sistemas que no hayan sido alterados. Pero si el sistema es pequeño, será imposible observarlo sin producir en él una perturbación considerable, y en consecuencia no se debe esperar hallar una relación causal entre los resultados de las mediciones. En otras palabras, si el sistema es pequeño, no es posible describir su evolución mediante una ecuación diferencial que exprese una relación causal entre el estado del sistema en un instante dado y su estado en un instante posterior [4, 5].

¿Qué significa estado de un sistema? Desde el punto de vista filosófico el estado de un sistema significa conocer la totalidad de las propiedades observables del sistema en cada instante de tiempo [3]. Esta definición general está muy lejos de ser satisfecha cuando se describe el estado de un sistema clásico (mediante posiciones y velocidades) o cuando se describe el estado de un sistema cuántico (mediante una función de onda). Por consiguiente, debido a los requerimientos de la definición de estado de un sistema no sería posible llegar a describir la realidad objetiva.

En el contexto de la mecánica cuántica convencional, el estado de un sistema cuántico no tiene significado físico. El principio de superposición de la mecánica cuántica no es una definición de estado del sistema, sino un artificio matemático, cuya interpretación consiste en una superposición de todas las realidades posibles cuando no se ha realizado ninguna observación del sistema. Pero tan pronto se empiece a realizar una observación, las propie-

dades del sistema habrán cambiado considerablemente con el tiempo. Por ejemplo, en el sistema cuántico existiría transmutación de una micropartícula en otra diferente debido a las fluctuaciones ultrarrápidas del campo cuántico. Por consiguiente, el principio de superposición cuántico será incapaz de conducir a una descripción de la realidad objetiva

También, el principio de incertidumbre de Heisenberg no sería una limitación que impone la naturaleza a todo intento de conocer con certeza la medida simultánea de cantidades físicas canónicamente conjugadas, sino una medida de las limitaciones del conocimiento humano sobre la realidad objetiva en el mundo cuántico.

Es dudoso que el carácter probabilístico de la medición cuántica invalide el determinismo. Existen formulaciones de la mecánica cuántica que no invalidan el determinismo. Por ejemplo, la formulación de Schrodinger es determinista. Si se conoce la función de onda en un instante dado, puede determinarse formalmente en cualquier otro instante a través del operador evolución temporal. El problema de la impredecibilidad en la medición cuántica surge cuando se asocian los conceptos de partícula cuántica y ondas. Quizás el error haya sido mantener las ideas preconcebidas de posiciones y velocidades de partículas [6].

El propósito de este trabajo es mostrar que, admitiendo la idea de que el universo es un sistema cerrado, aislado y autocontenido, el principio de superposición cuántico y el principio de incertidumbre de Heisenberg no conducen a la realidad objetiva a través de la medición cuántica. Por el contrario, desde la perspectiva opuesta de que el universo es un sistema abierto, no aislado y no autocontenido sería posible comprender cada vez mejor el funcionamiento de los sistemas naturales a toda escala espacial, siempre que se conozca la frecuencia fundamental de resonancia asociada al vacío subyacente que existiría en todo sistema físico [7]. En consecuencia, los aparatos de medida que se diseñen podrían llegar a tener un poder de resolución cada vez mayor al acercarse su frecuencia de funcionamiento a la frecuencia de resonancia intrínseca del sistema.

Metodología

El principio de superposición de la mecánica cuántica convencional y el principio de incertidumbre de Heisenberg constituyen los aspectos fundamentales de la teoría de la medición cuántica. El método de investigación de estos principios implica las siguientes consideraciones:

Revisión del principio de superposición cuántico

El principio de superposición de la mecánica cuántica se aplica a todos los estados posibles de un sistema cuántico, siempre que no se le esté observando [2]. Este

principio dice que, si un sistema físico está en un estado bien definido, simultáneamente puede estar parcialmente en cada uno de una serie de estados. O recíprocamente, todo conjunto de dos o más estados puede superponerse para dar lugar a un nuevo estado.

En la interpretación convencional de la mecánica cuántica el principio de superposición cuántico no representa un conjunto de alternativas separadas independientes, sino una superposición de realidades posibles las cuales coexisten simultáneamente interfiriendo entre sí mediante el fenómeno de interferencia de ondas [8]. Según el físico Niels Bohr, la realidad objetiva queda determinada solamente en el instante en que se realiza la medición. Este principio, que constituye un abandono radical de las ideas newtonianas, surge como consecuencia de la idea de que toda observación de un objeto cuántico induce una perturbación incontrolable del mismo y en consecuencia una incertidumbre considerable en el resultado de la medida de alguna propiedad del objeto cuántico.

Para revisar las implicaciones del principio de superposición cuántico en un proceso de medición cuántica, considérese una cantidad física A , asociada a un sistema cuántico cuyos valores propios son A_n y cuyas correspondientes funciones de onda propias son φ_n , $n = 1, 2, 3, \dots$. Si el estado inicial del sistema cuántico inmediatamente antes de la medida está conformado por una superposición de posibles estados φ_n , es decir:

$$\Psi = c_1\varphi_1 + c_2\varphi_2 + \dots = \sum_n c_n\varphi_n, \quad (1)$$

donde las cantidades c_n se llaman coeficientes de probabilidad. Entonces según el postulado de reducción de Von Neumann existe la probabilidad $|c_1|^2$ que la medida del observable A dé el resultado A_i , y que inmediatamente después que termina el proceso de medida la función de onda del sistema ψ se reduce a una de las funciones de onda propias φ_i [9].

Sin embargo, hay que percatarse de que este principio plantea dos dificultades sutiles. En primer lugar, no dice nada acerca de cómo evoluciona el paquete de ondas durante el intervalo de tiempo en que el sistema cuántico interactúa con el aparato de medida. En segundo lugar, la reducción del paquete de ondas ψ al único término $c_i\varphi_i$ del desarrollo de la serie (1) no constituye una demostración de llegar a una realidad objetiva, porque si admitimos que las propiedades de todos los objetos macroscópicos (como los aparatos de medida) dependen del comportamiento de los átomos que lo constituyen, entonces durante la interacción entre el objeto cuántico y el aparato de medida macroscópico siempre habrá transferencia de energía. Esto significa que una vez terminado el proceso de medición el objeto cuántico y el aparato de medida no pueden considerarse como entidades totalmente aisladas, libres de efectos de interferencia.

En consecuencia, el aparato de medida no indicará una reducción a una realidad objetiva. Esto implicaría a la vez utilizar otro aparato para realizar otra medición del aparato anterior, pero debido a que entre los aparatos habrá también transferencia de energía, entonces el segundo aparato tampoco quedará libre de efectos de interferencia que permitan describir la realidad objetiva. Al repetir el mismo procedimiento utilizando un tercer aparato para medir al segundo aparato los efectos de interferencia de ondas de probabilidad seguirán inevitablemente transmitiéndose de modo sucesivo a los siguientes aparatos medidores, cada vez que se repita la misma operación de medida, requiriéndose así una serie infinita de aparatos medidores, y nunca se llegaría a conocer la realidad objetiva.

Para comprender el problema planteado por el principio de superposición cuántico mediante un ejemplo concreto y sencillo, considérense como objeto cuántico un núcleo atómico radioactivo y como aparato medidor un contador Geiger para detectar la emisión de una o más partículas subatómicas procedentes del núcleo atómico. Un contador Geiger clásico tiene una aguja indicadora que oscila sobre una escala graduada. Por razones de simplicidad considérense dos posiciones A y B en la escala del contador Geiger. Si la aguja indica la posición A (indicador no desviado), significará que el núcleo no se ha desintegrado y si la aguja indica la posición B (indicador desviado), significará que el núcleo se ha desintegrado. Es claro que la posición de la aguja indicadora está correlacionada con el estado del núcleo, porque observando la oscilación de la aguja indicadora se deduce indirectamente la desintegración del núcleo atómico.

En la práctica todo proceso de medición cuántica implica una correlación entre un estado invisible de un objeto cuántico y un estado visible en el aparato de medida macroscópico. Además, este experimento indica que los efectos cuánticos se propagan desde el microcosmos hacia el mundo macroscópico (mediante un mecanismo de transmisión que todavía se ignora) manifestándose como oscilación de la aguja del contador Geiger. Si ψ es la función de onda del núcleo no desintegrado y ψ' es la función de onda del núcleo desintegrado, según el principio de superposición cuántico el estado del núcleo inmediatamente antes de la medida debe describirse por la superposición $\psi(t_0) + \psi'(t_0)$, lo cual significa que el núcleo está parcialmente no desintegrado y parcialmente desintegrado en el instante t_0 .

Análogamente, si ψ_A es la función de onda del contador Geiger cuya aguja está en la posición no desviada A y ψ_B es la función de onda del contador Geiger cuya aguja está en la posición desviada B, entonces el estado del contador inmediatamente antes de la medida debe describirse por la superposición $\psi_A(t_0) + \psi_B(t_0)$, lo cual significa que el contador está parcialmente con la aguja no desviada y parcialmente con la aguja desviada en el

instante t_o .

Si este proceso de medición termina en el instante $t_1 > t_o$, el contador Geiger recibirá efectos de interferencia y quedará en el estado $\psi_A(t_1) + \psi_B(t_1)$. Un segundo contador que se utilice para medir al primero también recibirá efectos de interferencia quedando inmediatamente después de la medida en el estado $\psi_A(t_2) + \psi_B(t_2)$, donde $t_2 > t_1$, (Figura 1) y así sucesivamente se requerirían disponer de un conjunto infinito de contadores Geiger actuando en serie, cada uno como un observador de otro contador hasta ocupar todo el universo y nunca se llegaría a describir la realidad objetiva, porque siempre quedarían efectos de interferencia residuales.



Figura 1: Diagrama que muestra la imposibilidad de describir la realidad objetiva ya que se requerirían infinitos aparatos de medida, cada uno como observador del otro en una cadena interminable. En consecuencia, no hay forma de llegar a una realidad objetiva concreta

Revisión del principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre de Heisenberg constituye otro aspecto fundamental de la teoría de la medición cuántica. Se puede demostrar que el principio de incertidumbre surge al forzar que un paquete de ondas poco extenso conserve su extensión con el tiempo para que describa el movimiento de una micropartícula. Pero esta situación sólo sería posible si el campo cuántico fuese constante o variara lentamente, lo cual contradice su naturaleza [1].

Considérese el movimiento unidimensional, en la dirección del eje x , de una micropartícula libre. Según la mecánica cuántica, la micropartícula puede representarse por un paquete de ondas unidimensional, conocido como onda de probabilidad u onda piloto. Utilizando el análisis de Fourier, este paquete de ondas se puede construir superponiendo ondas planas con número de onda κ , y se expresa por la integral:

$$\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\kappa) e^{\kappa x - \omega t} d\kappa, \quad (2)$$

donde la cantidad $A(\kappa)$ indica las amplitudes de oscilación de las ondas que componen el paquete y $\omega = \omega(\kappa)$ es la relación de dispersión del paquete, lo cual significa que el medio de propagación del paquete de ondas es dispersivo.

Por analogía con el hecho de las fluctuaciones de un campo clásico, por ejemplo, las ondas sonoras en un medio material, se puede afirmar que la Ecuación (2) representa las fluctuaciones de un campo cuántico. Pero

en este caso: ¿qué es lo que está vibrando realmente? La respuesta es relativamente clara para las ondas elásticas en general, en cambio la respuesta es oscura para las ondas en el vacío cuántico [10].

No es sostenible construir un paquete de ondas libre en el sentido de que conserve su extensión con el transcurso del tiempo, porque inmediatamente se dispersaría debido a las rápidas fluctuaciones del campo cuántico [1]. Para mostrar este problema, supóngase que se construye un paquete de ondas de anchura $\Delta\kappa$ alrededor del punto central κ_o . Para $x = 0$ y $t = 0$, el paquete $\psi(x, t)$ de la Ecuación (2) está dado por:

$$\psi(0, 0) = \int_{\Delta\kappa} A(\kappa) d\kappa \quad (3)$$

En un intervalo de tiempo posterior Δt y para un cambio de posición Δx , el paquete ψ se transforma en la expresión:

$$\psi(\Delta x, \Delta t) = \int_{\Delta\kappa} e^{i(\kappa\Delta x - \omega\Delta t)} d\kappa, \quad (4)$$

Es conveniente reescribir la Ecuación (4) en la forma:

$$\psi(\Delta x, \Delta t) = e^{i(\kappa_o\Delta x - \omega_o\Delta t)} \times \int_{\Delta\kappa} A(\kappa) e^{-i[(\kappa - \kappa_o)\Delta x - (\omega - \omega_o)\Delta t]} d\kappa, \quad (5)$$

donde ω_o es la frecuencia central ("centro de gravedad") del paquete de ondas.

Por tanto, se ha obtenido una expresión para el paquete de ondas en la que aparecen en el integrando de modo natural las variables canónicamente conjugadas posición – momento lineal y energía – tiempo. El análisis de este resultado es relevante para mostrar una vez más si la medición cuántica a través del principio de incertidumbre puede conducir a la realidad objetiva.

Resultados y discusión

Análisis espectral del principio de superposición cuántico

Para investigar lo que ocurriría durante el intervalo de tiempo en que el sistema cuántico interactúa con el aparato de medida, se plantea la siguiente pregunta: ¿qué significan las expresiones "inmediatamente antes" e "inmediatamente después" de la medida? En el instante en que comienza el proceso de medida, el principio de superposición cuántico implica que el objeto cuántico y el aparato de medida estén simultáneamente en todos los estados posibles. Sin embargo, teniendo en cuenta el ejemplo de la sección Revisión del principio de superposición cuántico, el proceso de medida nunca terminaría si intentáramos llegar a la realidad objetiva porque siempre existiría transferencia de energía no sólo entre el sistema cuántico y el aparato de medida sino también entre todos

los demás objetos del universo. Por tanto, las expresiones “inmediatamente antes” e “inmediatamente después” referidas al estado del sistema carecen de significado, porque el estado de un sistema depende del estado de cada uno de los demás sistemas del universo.

Es posible que el indeterminismo que caracteriza a la teoría cuántica de la medida radique en el concepto abstracto de onda preconcebido desde la física clásica y trasladado a la mecánica cuántica (Hawking, 1988). La razón es que se ignora el mecanismo de transmisión de la información organizada que existiría en el vacío subyacente de los sistemas físicos. Lamentablemente el segundo principio de la termodinámica es incompleto al respecto, ya que sólo indica la dirección en que fluye la energía, pero no indica cómo se canaliza o distribuye la energía en el universo. Como consecuencia de ello la ley de radiación del cuerpo negro de Planck resultó infructuosa para resolver este problema de incompletitud del segundo principio de la termodinámica.

¿Qué mecanismo podría inducir las vibraciones que se detectan y miden en todos los sistemas físicos? Para intentar contestar esta pregunta podría ser una necesidad introducir la hipótesis del universo como un sistema abierto con influencias externas procedentes de dimensiones espaciales superiores. En esta teoría se podría asumir que a través del 99.99 % de espacio vacío subyacente, existente en todos los sistemas físicos, ingresaría información organizada la cual implantaría la cinemática esencial que se observa en el universo: todo gira, todo vibra, todo fluye, aunque no somos conscientes de ello. Este principio podría conducir a la realidad objetiva. Por consiguiente, la búsqueda de la realidad objetiva implica ir más allá de la mecánica cuántica convencional [11].

Retornando al ejemplo sencillo de la medición cuántica el cual se refiere a la interacción de un núcleo radiactivo y un detector Geiger. Imagínese que el núcleo es inducido a vibrar por una influencia externa al universo observable la cual le transfiere pulsos armónicos de frecuencia ω_o de la forma:

$$f(t) = a(t)\cos\omega_o t, \quad (6)$$

donde:

$$a(t) = \begin{cases} 1, & \text{para } |t| < T/2 \\ 0, & \text{para } |t| > T/2 \end{cases} \quad (7)$$

En la Ecuación (7) la cantidad T denota el periodo de duración de la pulsación (Figura 2).

Utilizando el análisis de Fourier, el espectro vibracional del núcleo sería de la forma:

$$F(\omega) = \frac{\text{sen}[(\omega - \omega_o)\frac{T}{2}]}{\omega - \omega_o} + \frac{\text{sen}[(\omega + \omega_o)\frac{T}{2}]}{\omega + \omega_o} \quad (8)$$

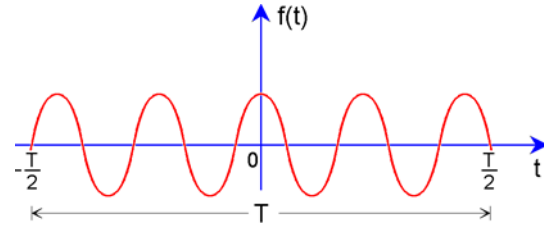


Figura 2: Un pulso armónico hipotético de duración finita T que induciría a vibrar al núcleo radioactivo

El primer término en la Ecuación (8) correspondería a la emisión de la información organizada y el segundo término correspondería a la recepción de la información. Así, la distribución espectral (o densidad de la información organizada) asociada a la emisión de la información sería de la forma:

$$|F(\omega)|^2 = \frac{\text{sen}^2[(\omega - \omega_o)\frac{T}{2}]}{(\omega - \omega_o)^2} \quad (9)$$

En consecuencia, si existiera una influencia determinista externa al universo observable, la Ecuación (9) describiría el estado del núcleo para $|t| < T/2$, y el principio de superposición cuántico perdería significado, ya que mientras dure la pulsación (que sería la duración del proceso de medición) el estado del núcleo estará bien definido. Entonces, el estado de las realidades superpuestas que postula el principio de superposición cuántico sería reemplazado por la distribución de la información organizada expresada por la Ecuación (9):

$$\psi + \psi' \rightarrow |F(\omega)|^2, \text{ para } |t| < T/2 \quad (10)$$

La cantidad $|F(\omega)|^2$, definiría hipotéticamente el estado del núcleo radiactivo (Figura 3).

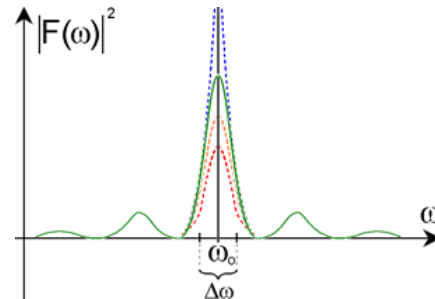


Figura 3: Distribución espectral hipotética de la información organizada que recibiría el núcleo radioactivo (línea continua) y curvas de resonancia correspondientes al contador (líneas discontinuas).

Retornando a la teoría convencional: ¿cómo se podría descifrar el misterioso estado $\psi_A + \psi_B$ del detector Geiger? La respuesta es que sería posible medir la energía de un sistema cuántico con gran exactitud en cada instante siempre que el instrumento de medida interactúe

con el sistema natural en estado de resonancia [1]. Este planteamiento implica que el poder resolutivo del aparato de medida dependerá del grado de conocimiento del sistema físico. Si el núcleo radiactivo se concibe como un resonador de cavidad, entonces cuanto más conocimiento se tenga de él, cualquier contador Geiger que se diseñe será lo suficientemente selectivo y podría sobrepasar el límite cuántico estándar impuesto por el principio de incertidumbre de Heisenberg [12]. En el límite, cuando el poder resolutivo del contador Geiger sea “infinito” se convertiría en un sistema completamente compatible con el funcionamiento del núcleo radiactivo.

Así, la condición para llegar a este límite ideal sería que el contador Geiger opere en estado de resonancia con el núcleo radiactivo. ¿Qué significa esto? El contador Geiger requeriría construirse con ayuda de la inteligencia artificial de modo que sea compatible con el funcionamiento del núcleo radiactivo [Ecuación (9)] y reduciéndose el desgaste del aparato al mínimo. Pero esto implicaría que ambos objetos, el contador Geiger y el núcleo radiactivo, tengan las mismas propiedades.

Si la frecuencia de operación del contador se selecciona de modo que el ancho de banda sea:

$$|\Delta\omega| = |\omega - \omega_o| \gg \omega_o,$$

entonces la respuesta del aparato será muy limitada y totalmente incompatible con el funcionamiento del núcleo radiactivo. En cambio, a medida que la frecuencia del contador Geiger se ajuste de modo que se vaya aproximando a la frecuencia fundamental de resonancia ω_0 del núcleo radiactivo, el ancho de banda $\Delta\omega$ se irá reduciendo cada vez más (Figura 3), es decir la incertidumbre de la medida podría sobrepasar el límite cuántico estándar. En el límite, cuando $\Delta\omega \rightarrow 0$ (o sea, cuando $\omega \approx \omega_o$), se obtendría una medida bien definida de la desintegración radiactiva del núcleo, y el principio de incertidumbre de Heisenberg sería irrelevante.

También pierde significado el principio de superposición cuántico aplicado al contador Geiger, porque al ser el periodo de operación del contador igual a la duración de las pulsaciones del núcleo, entonces el estado del contador quedaría bien determinado. Por consiguiente, la superposición de los estados fantasmales del contador se reemplazaría por una distribución espectral de información organizada de la forma expresada por la Ecuación (9):

$$\psi_A + \psi_B \rightarrow |F'(\omega)|^2, \text{ para } |t| < T/2 \quad (11)$$

Es claro que $|F'(\omega)|^2$ denota la densidad espectral de información organizada del contador la cual debe ser totalmente compatible con la del núcleo radioactivo.

Análisis espectral del principio de incertidumbre

En la Ecuación (5) se obtiene un máximo pronunciado sólo para el caso muy especial en el cual la fase de

la función exponencial en el integrando es cero. Sin embargo, como el campo cuántico varía drásticamente en intervalos de tiempo Δt muy pequeños y ψ es un indicador de este, entonces tal variación debe reflejarse para un intervalo Δx muy grande. Esto equivale a un número de vibraciones muy grande en el intervalo $\Delta\kappa$ [1]. En consecuencia, las contribuciones de las funciones oscilantes a la integral producirán, como efecto promedio, interferencia destructiva y la forma del paquete se dispersaría inmediatamente hasta que:

$$\psi(\Delta x, \Delta t) \simeq 0 \quad (12)$$

donde $\Delta x \gg 0$, para $\Delta t \approx 0$. Sin embargo, no es del todo cierto que el resultado (12) se deba a interferencias destructivas porque siempre habrá ondas en el microcosmos. Es más razonable pensar que las ondas componentes del paquete han reducido considerablemente su amplitud, debido precisamente al esparcimiento de la energía del paquete de ondas [1]. Se asumirá esta interpretación para investigar la transformación casi instantánea del paquete de ondas de un estado definido y ordenado, representado por la Ecuación (5), en otro paquete de ondas en un estado indefinido y aparentemente desordenado, representado por la Ecuación (12), con sus ondas componentes dispersadas.

En la Figura 4 se muestra la transformación del paquete de ondas. En el instante $t_o = 0$ el centro del paquete está en la posición $x_o = 0$. Pero en un instante t , muy próximo al anterior, el centro del paquete dispersado estará en otra posición $x \gg 0$. En otras palabras, tan pronto el centro del paquete esté en un punto dado es arrastrado hacia otro punto muy lejano [1].

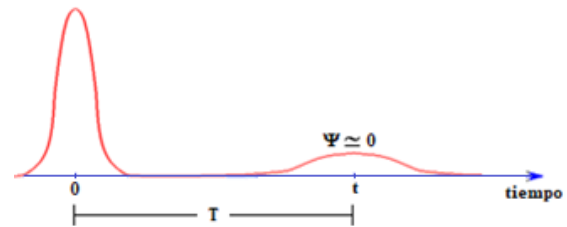


Figura 4: La dispersión casi instantánea ($\Delta t \approx 0$) de un paquete de ondas debido a las fluctuaciones cuánticas. Esto deja sin sentido el concepto de partícula elemental, y en consecuencia la realidad objetiva

Si el paquete $\psi(0, 0)$ corresponde a un acontecimiento y el paquete dispersado $\psi(x, t)$ corresponde a otro acontecimiento muy próximo en el tiempo, pero muy lejano en el espacio, ¿con qué rapidez fluye la información en estos acontecimientos? Si esta rapidez de evolución del paquete de ondas correspondiera a una partícula elemental, el paquete podría conservar su extensión con el transcurso del tiempo. Pero el requerimiento de que el campo cuántico cambia muy rápidamente implica que el paquete de ondas se dispersa casi instantáneamente a través del

espacio vacío y deja sin significado a la medición cuántica. En consecuencia, tampoco tendría sentido definir una realidad objetiva concreta.

Para justificar este resultado, es conveniente recordar que en los libros de texto de física moderna se combinan la relación de De Broglie, la rapidez de fase v_f de las ondas, la energía relativista de Einstein y la ecuación de Planck [13]. Estas relaciones están dadas respectivamente por:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (13)$$

donde λ es la longitud onda asociada a la partícula, h es la constante de Planck, m es la de la partícula y v la rapidez del paquete de onda que representa a la partícula.

$$v_f = \frac{\omega}{\kappa} \quad (14)$$

$$E = mc^2, \quad (15)$$

donde c es la rapidez de la luz en el espacio libre.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (16)$$

Y estas ecuaciones conducen al resultado curioso de que la rapidez de fase de las ondas que componen el paquete es:

$$v_f = \frac{\omega}{\kappa} = \frac{c^2}{v} > c \quad (17)$$

Por consiguiente, el significado físico de la rapidez de fase c^2/v sería que en un medio dispersivo la rapidez de la información transportada por la luz en el vacío subyacente del sistema físico es mayor que la rapidez de la luz c en el espacio libre ordinario.

Es relevante percatarse que las relaciones de incertidumbre posición – momento lineal y energía – tiempo emergen de modo natural a partir del caso extremadamente especial en el que la fase de la función exponencial en el integrando de la Ecuación (5) es igual a cero [1]. Es decir:

$$(\kappa - \kappa_o)\Delta x - (\omega - \omega_o)\Delta t = 0 \quad (18)$$

Multiplicando la Ecuación (18) por la constante de Planck reducida $\hbar = h/2\pi$ y usando las relaciones de dualidad para las variables dinámicas de momento lineal (p) y energía (E) se obtienen:

$$p = \hbar\kappa; E = \hbar\omega \quad (19)$$

Por consiguiente, se pueden escribir las relaciones de incertidumbre, como sigue:

$$\Delta x \Delta p = \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (20)$$

donde la desigualdad es para indicar que $\frac{\hbar}{2}$ es la magnitud mínima de la perturbación inducida al objeto cuántico cuando se mide su estado de movimiento $[x(t), p(t)]$ o cuando se mide su energía (E) durante un intervalo de

tiempo Δt . En la teoría de la medición cuántica la restricción impuesta por las relaciones (20) se llama límite cuántico estándar [12].

En general, la fase de la función exponencial en la Ecuación (5) es diferente de cero. Pero, esto implica la dispersión casi instantánea del paquete de ondas, lo cual deja sin sentido el concepto de partícula cuántica y por consiguiente los conceptos preconcebidos de posición, momento, energía, tiempo y otros conceptos preconcebidos desde la mecánica newtoniana. Lo catastrófico para la teoría cuántica de la medida es que perdería su significado tal como se había concebido hasta ahora, porque el principio de incertidumbre surge de una condición muy especial dada por la Ecuación (5). Por tanto, es razonable pensar en la existencia de una influencia más fundamental, fuera del mundo físico, que sería la responsable de la evolución de los sistemas físicos.

Otra consecuencia relevante respecto a que la fase de la función exponencial en la Ecuación (5) es en general diferente de cero es que, teniendo en cuenta las Ecuaciones (19), se tienen dos posibilidades excluyentes:

$$\Delta x \Delta p > \Delta E \Delta t \text{ o } \Delta x \Delta p < \Delta E \Delta t \quad (21)$$

Las desigualdades dadas en (20) contradicen las relaciones de incertidumbre dadas en (19). Pero la inecuación (21) del lado izquierdo plantea la posibilidad de que exista una influencia externa al universo observable (fuera del mundo físico) la cual podría ser la responsable de la evolución de los sistemas físicos en el mundo físico de las percepciones sensoriales. ¿Cuál sería esa posibilidad? Supóngase que se verifica $\Delta x \Delta p \approx \hbar$, entonces la inecuación (21) del lado izquierdo conduce a la relación:

$$\Delta E \Delta t < \hbar \quad (22)$$

Y como no hay restricción para el límite superior de la inecuación (22), entonces existe la posibilidad:

$$\Delta E \Delta t \simeq 0 \quad (23)$$

Además, como el intervalo de tiempo Δt puede ser arbitrario, entonces se obtiene la proposición lógica [1]:

$$\Delta E = 0 \longleftrightarrow \omega = \omega_o \quad (24)$$

Este resultado significaría que es posible medir la energía de un sistema cuántico con gran exactitud en cada instante siempre que el instrumento de medida interactúe con el sistema natural en estado de resonancia. El resultado (24), oculto a la percepción sensorial humana, podría representar la realidad objetiva.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg hay grandes limitaciones en el conocimiento de las microestructuras. Como este principio no sugiere nada respecto a cómo se debe diseñar un aparato de medida que opere a escala cuántica, entonces cualquier aparato de medición macroscópico que se diseñe tendrá grandes limitaciones en su poder resolutivo, porque siempre dependerá de nuestro grado de conocimiento del objeto cuántico.

Por tanto, no sería cierto que el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica sea inherente a la naturaleza del microcosmos, sino una consecuencia de nuestra ignorancia de la cinemática esencial que existiría en el vacío subyacente de los sistemas físicos, en particular en el nivel microcósmico [1].

El intervalo de frecuencias $\Delta\omega$, es decir el ancho de banda, se debe reconocer como una medida de lo incompatible que es el mecanismo de funcionamiento del instrumento de medición con respecto al funcionamiento del sistema físico. En otras palabras, $\Delta\omega$ es una medida de nuestra ignorancia de la cinemática esencial que existiría en el vacío subyacente de los sistemas físicos en el nivel microcósmico. Por consiguiente, el resultado obtenido (24) sugiere un conocimiento pleno del funcionamiento inteligente del sistema natural. En teoría el poder resolutivo de un aparato de medida puede ser infinito siempre que sea completamente compatible con el funcionamiento del sistema físico, es decir, siempre que el aparato interactúe en estado de resonancia con el sistema físico. Los aparatos que se diseñen con esta cualidad serían lo suficientemente selectivos para realizar mediciones con gran exactitud sobre un sistema físico [1].

Una evidencia empírica que confirmaría el resultado (24) es el equilibrio térmico, es decir la igualdad de temperaturas entre dos o más objetos materiales en interacción térmica. En principio, como todo vibra, es razonable suponer que todos los objetos materiales en el universo pueden considerarse como osciladores inducidos por influencias externas fuera del mundo físico las cuales determinan su evolución [1]. Según la teoría cuántica de la medida, en condiciones de equilibrio, el criterio relevante para que un objeto macroscópico (oscilador) se comporte como un objeto cuántico es que las fluctuaciones térmicas sean comparables con las fluctuaciones cuánticas [12]. Es decir:

$$\omega \sim \frac{2k_B}{\hbar} T, \quad (25)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann. Esto significa que en condiciones de equilibrio la frecuencia de vibración ω de un sistema físico y su temperatura T son cantidades equivalentes: a una frecuencia de vibración térmica característica (ω_o) le corresponde una temperatura típica (T_o) y viceversa. Como el equilibrio térmico implica igualdad de temperaturas $T = T_o$, entonces implicará también igualdad de frecuencias $\omega = \omega_o$ es decir, un estado de resonancia [1].

Conclusiones

Admitiendo la idea de que universo es un sistema aislado, cerrado y autocontenido, donde no existe nada en el exterior que pueda influir en los objetos de su interior, la medición cuántica solo se puede describir en términos

del concepto de probabilidad. No es posible, ni en teoría, la certeza de llegar a una realidad objetiva.

Existen grandes limitaciones en el conocimiento de los sistemas naturales, y como consecuencia de ello, los aparatos de medida que se diseñen tendrán un poder de resolución muy limitado debido a que su frecuencia de operación tendrá una incertidumbre inevitable $\Delta\omega$ respecto a la frecuencia de resonancia fundamental ω_o del sistema físico, siendo $\Delta\omega \sim \omega_o$, tal como lo prescribe el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, es decir:

$$\omega_o - \frac{1}{2}\Delta\omega < \omega < \omega_o + \frac{1}{2}\Delta\omega$$

Desde la perspectiva del universo abierto las vibraciones que se detectan en los sistemas naturales serían inducidas por influencias externas al universo observable. El estado de un sistema estaría completamente definido por una distribución espectral de frecuencias, y todo sistema natural tendría una frecuencia fundamental de resonancia asociada al vacío subyacente. Se podría comprender cada vez mejor el funcionamiento de los sistemas naturales a partir de su frecuencia fundamental de resonancia. Los aparatos de medida que se diseñen tendrían un poder de resolución cada vez mayor al acercarse su frecuencia de funcionamiento a la frecuencia de resonancia del sistema ($\omega \rightarrow \omega_o$). Por tanto, en teoría, cuando $\omega = \omega_o$ la medida sería exacta. Sin embargo, cuando se tiene $|\omega - \omega_o| \gg \omega_o$ la medida carece de significado.

El principio de incertidumbre de la mecánica cuántica y el principio de superposición de estados cuánticos quedarían irrelevantes, si el aparato de medida interactúa en estado de resonancia con el sistema cuántico. Por tanto, la clave para describir la realidad objetiva sobre el funcionamiento inteligente de un sistema estaría en el vacío subyacente existente de los sistemas físicos.

No es posible construir un paquete de ondas para una partícula elemental libre el cual conserve su extensión con el transcurso del tiempo, porque tan pronto se construye se dispersa debido a las fluctuaciones ultrarrápidas del campo cuántico. En consecuencia, el concepto de partícula elemental perdería su significado, así como los conceptos preconcebidos de posición, momento, energía, tiempo, y otros, procedentes de la mecánica newtoniana.

El principio de incertidumbre de Heisenberg emerge del caso extremadamente especial en el cual las ondas armónicas que componen el paquete de ondas tienen una diferencia de fase constante, lo cual corresponde a una vibración o fracción de vibración. Por consiguiente, es incompatible con la naturaleza del campo cuántico en el cual las ondas que componen el paquete tienen fases diferentes, e implica un gran número de vibraciones. Este resultado dejaría sin significado a los fundamentos de la medición cuántica y, en consecuencia, perdería significado definir una realidad objetiva concreta a través de la medición cuántica.

El significado físico de que la rapidez de fase de las ondas que componen el paquete de ondas $c^2/v > c$, sería que en un medio dispersivo la rapidez de la información transportada por la luz en el vacío subyacente de los sistemas físicos es mayor que la rapidez de la luz c en el es-

pacio libre ordinario. Por tanto, hay buenas razones para pensar en la existencia de una influencia más fundamental fuera del mundo físico en la forma de un programa, la cual sería la responsable de la evolución de los sistemas físicos.

Referencias

- [1] O. Monroy, M. Márquez, Crítica a los principios fundamentales de la medición cuántica. Perú: Revista de Investigación de Física. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 11(1), 32-39, (2008). https://www.researchgate.net/publication/379992092_Critica_a_los_principios_fundamentales_de_la_medicion_cuantica
- [2] P. A. Dirac, *Principios de Mecánica Cuántica*. Ediciones Ariel, Barcelona (1967).
- [3] P. Franck, *Entre la física y la filosofía*. Editorial Losada, Buenos Aires (1945).
- [4] N. Bohr. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? Phys. Rev., 696, (1935). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1876-0503\(08\)70375-X](https://doi.org/10.1016/S1876-0503(08)70375-X)
- [5] W. Heisenberg. *Les principes physiques de la théorie des quanta*. Gauthier-Villars, París (1932).
- [6] S. Hawking. *Historia del tiempo*. Crítica, España (1988).
- [7] O. Monroy. Análisis de un sistema de referencia inercial. Perú: Revista de Investigación de Física. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 21(1), 31-40, (2018).
- [8] P. C. Davies y J. R. Brown. *El espíritu en el átomo: Una discusión sobre los misterios de la Física Cuántica*. Editorial Alianza, Madrid (1989).
- [9] V. J. Neumann. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Trans. Robert T. Geyer. Princeton University Press, Princeton (1955).
- [10] O. Monroy, M. Merma y L. Bolarte. Crítica al modelo del campo cuántico. The Virtual Dynamics Intelligencer, 1(2), 1-12, (2022).
- [11] N. Talbot, *Más allá de la teoría cuántica*. Editorial Gedida, España (2000).
- [12] V. Braginsky y F. Khalili. *Quantum Measurement*. Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- [13] A. Beiser. *Conceptos de Física Moderna*. McGraw-Hill, México (1981).