

La Teoría Cuántica cuestiona la naturaleza de la realidad

La descripción física del mundo basada en la idea de una realidad separable ¡falla!

https://www.tendencias21.net/La-Teoria-Cuantica-cuestiona-la-naturaleza-de-la-realidad_a1001.html

En un [artículo](#) anterior, explicamos que La Teoría Cuántica es una teoría netamente probabilista. En esta entrega descubrimos que el Principio de Determinismo de la Física no es aplicable a los sistemas descritos a través de la Teoría Cuántica. Asimismo, que cuánticamente el proceso de medida afecta al estado sobre el que se mide, y además lo hace de una manera impredecible, lo que constituye uno de los problemas de interpretación más serios de la Teoría Cuántica. Finalmente descubrimos que una descripción de los fenómenos basada en la Teoría Cuántica obliga a replantear al menos una de las dos premisas que sustentan la idea de la realidad separable. Por Mario Toboso¹.

Una de las principales pretensiones de la Física es el estudio de la “evolución” de los estados de un sistema. Al estudiar la evolución de cualquier sistema resulta interesante la predicción de su estado en un instante futuro. Esta labor se apoya en el denominado “Principio de Determinismo”, el cual afirma que si en un instante dado son conocidas con precisión arbitrariamente grande:

1. Las posiciones y velocidades de todas las partículas del sistema, es decir, su “estado” en ese instante.
2. y 2. El conjunto total de influencias, tanto internas como externas, a que quedan sometidas.

Entonces es posible “determinar”, a través de las ecuaciones de movimiento, el estado del sistema en cualquier instante posterior.

3. Tres ejemplos

Veamos cómo funciona el Principio de Determinismo en los tres casos siguientes:

- A. La evolución de los planetas en sus órbitas.
- B. La evolución de las nubes y las masas de aire.
- C. La evolución de los sistemas atómicos.

Los casos A y B corresponden a sistemas macroscópicos (clásicos) en cuyo estudio no resulta necesario aplicar la Teoría Cuántica. No sucede así en el caso C, como ya hemos visto en nuestro artículo anterior.

En A es posible hallar con precisión arbitrariamente grande tanto 1 como 2, de ahí los buenos resultados experimentales y predictivos de la Astronomía, que se ilustran por ejemplo en el

¹ Mario Toboso es Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Salamanca y miembro de la [Cátedra Ciencia, Tecnología y Religión](#) de la Universidad Pontificia Comillas. Editor del Blog [Tempus](#) de Tendencias21 y miembro del [Consejo Editorial](#) de nuestra revista. Este artículo es la segunda entrega de una serie de dos sobre Teoría Cuántica. Ver el anterior: [La Teoría Cuántica, una aproximación al universo probable](#)

descubrimiento de Neptuno en 1846 a partir de los cálculos teóricos realizados por Le Verrier.

En el caso B la situación es un poco más complicada, y puede llegar a determinarse 1 pero no 2, es decir, conocemos con precisión la posición y velocidad de una masa de aire en un instante dado, pero no el conjunto total de influencias a que está sometida, de ahí que en Meteorología las predicciones no sean del todo satisfactorias a medio y largo plazo. Se trata de una “limitación subjetiva”, es decir, una falta de conocimiento de los detalles experimentales por nuestra parte.

El Principio de Indeterminación de Heisenberg

En el caso C resulta imposible cumplir la condición 1 a causa del denominado [Principio de Indeterminación](#) de Heisenberg. Este Principio establece que para todo sistema cuántico existen magnitudes físicas denominadas “complementarias”. Que dos magnitudes físicas sean complementarias significa que resulta imposible determinar simultáneamente, con precisión arbitraria, sus valores sobre un mismo estado.

Si, por ejemplo, M y N son dos magnitudes complementarias, y $D(M)$ y $D(N)$ son las respectivas imprecisiones experimentales que se obtienen al realizar la medida de tales magnitudes, entonces la relación de indeterminación de Heisenberg establece que:

$$D(M) \times D(N) > h$$

(Obsérvese el notable protagonismo de la [constante de Planck](#), h , en este fenómeno cuántico de complementariedad).

De manera que si para un estado particular queremos precisar mucho, por ejemplo la magnitud M, haciendo $D(M)$ más y más pequeño, a cambio, para mantener la validez de la relación anterior (y puesto que h es diferente de cero), deberá aumentar el valor de $D(N)$, volviéndose más imprecisa la medida simultánea de la magnitud complementaria N.

La quiebra cuántica del Principio de Determinismo

Resulta que en la Teoría Cuántica la posición y la velocidad son magnitudes “complementarias”, de manera que la imprecisión en sus medidas se halla ligada a través de la relación de Heisenberg, lo que prohíbe su conocimiento simultáneo con precisión arbitrariamente grande, y por ello la condición 1 del Principio de Determinismo no puede cumplirse.

Al contrario de lo que sucedía en el caso B, aquí en C no se trata de una limitación experimental subjetiva, sino de un Principio inherente a la Realidad Cuántica, el Principio de Indeterminación de Heisenberg, que establece la existencia de magnitudes complementarias imposibles de precisar de manera simultánea. De modo que debemos hablar en este caso de una “limitación objetiva” del conocimiento sobre las características del sistema.

De este resultado se deriva una conclusión inmediata: no es aplicable el Principio de Determinismo a los sistemas descritos a través de la Teoría Cuántica. Es este el primer conflicto de esta teoría con la idea de determinismo.

No obstante, como veremos más adelante, se puede reformular el concepto de “estado” para los sistemas descritos por la Teoría Cuántica y obtener todavía una evolución determinista. Aunque sólo será uno de los dos posibles modos de evolución del estado cuántico. El otro resultará nuevamente indeterminista, no en el sentido que acabamos de ver, sino en un sentido aún más fuerte.

El estado de los sistemas en la Teoría Cuántica

El estado E más general de los sistemas descritos por la Teoría Cuántica viene representado por una “superposición” de todos sus estados posibles $EP(n)$:

$E = \text{sup. } EP(n)$ siendo $n = 1, 2, 3, \dots$ tantos estados como pueda adoptar el sistema. La noción de superposición de estados posibles es fundamental en la Teoría Cuántica y no se presenta en la Física Clásica. En esta última, los estados posibles nunca se superponen, sino que se muestran directamente como descripciones reales del estado del sistema.

Al contrario, especificar el estado del sistema en la Teoría Cuántica implica tener en cuenta la superposición de todos sus estados posibles; no podemos atribuir “a priori” ninguno de tales estados posibles al sistema, sino únicamente su superposición (salvo tras una “operación de medida”; más adelante veremos el papel tal importante que juegan estas operaciones en la Teoría Cuántica).

Tales superposiciones tienen un carácter totalmente real; de hecho, las superposiciones de estados posibles adquieren en la Teoría Cuántica un significado ontológico, es decir, describen “lo que realmente es” [el estado del sistema](#).

El estado E (también denominado función de onda, y representado por la letra griega “psi”) corresponde al aspecto superposicional del sistema cuántico, en tanto que el conjunto de estados posibles $EP(n)$ representa su aspecto experimental.

El experimento de la doble rendija

Sólo si se considera que la superposición E de estados posibles $EP(n)$ representa realmente el estado del sistema se pueden explicar fenómenos observados de interferencia cuántica, que constituyen un aspecto esencial de la Teoría Cuántica, como en el caso del experimento de la doble rendija, o experimento de Young.

El [experimento de Young](#) original data de 1803 y fue propuesto por Thomas Young, dentro del marco de la Física Clásica, como demostración supuestamente “concluyente” de la naturaleza exclusivamente ondulatoria de la radiación.

La [versión cuántica](#) del experimento de la doble rendija es un elemento de análisis importante en la Teoría Cuántica, ya que permite estudiar, no sólo el fenómeno de interferencia cuántica, sino también la dualidad que la teoría establece entre las descripciones de partícula y onda.

Evolución de los estados cuánticos

En la [formulación de la Teoría Cuántica](#) presentada por Jon von Neumann en 1932, denominada “ortodoxa”, el estado superposición E del sistema (o su función de onda “psi”), que consideramos como representante real de su estado físico, puede evolucionar de dos modos distintos y excluyentes. La elevada exactitud de las predicciones cuánticas descansa en la intervención combinada de estos dos modos de evolución:

La ecuación de evolución de Schrödinger (modo 1)

Esta ecuación gobierna la evolución en el tiempo de los estados superposición E , en presencia, o no, de influencias y campos externos. Puede reformularse el Principio de Determinismo para adaptarlo a este tipo de evolución, considerando que si en un momento de tiempo inicial, dado como t_0 , son conocidos:

1. El estado $E(t_0)$ del sistema, como superposición del conjunto de sus estados posibles $EP(n)$.
- y 2. El conjunto total de influencias externas que sobre dicho estado actúan.

Entonces, en estas condiciones, la resolución de la [ecuación de Schrödinger](#) permite determinar el nuevo estado superposición $E(t_1)$ del sistema en cualquier momento de tiempo posterior t_1 .

Así pues, el estado E del sistema evoluciona con la ecuación de evolución de Schrödinger, de una manera determinista, en el sentido de que dado el mismo en un momento inicial, la evolución ofrecida por dicha ecuación “determina” exactamente el estado del sistema en cualquier instante posterior.

Operaciones de medida (modo 2)

Hagámonos la siguiente pregunta: ¿qué es una operación o un proceso de medida? Se trata de un proceso que supone la interacción de un observador (sujeto) con un sistema (objeto) sometido a estudio del que se quiere extraer información referente al valor experimental de una o varias de sus propiedades. Ejemplos de proceso de medida son la medida de la longitud de un objeto mediante una regla, o una medida de temperatura por medio de un termómetro, o la medida de una corriente eléctrica a través de un amperímetro.

Problemas de interpretación

Clásicamente se supone, sobre la base del sentido común y de la experiencia cotidiana, que una operación de medida no afecta al estado sometido a la misma, y así el estado anterior y posterior a la observación o medida son idénticos (la altura de una mesa, por ejemplo, no varía porque la midamos). Cuánticamente la situación es del todo distinta: el proceso de medida afecta al estado sobre el que se mide, y además lo hace de una manera impredecible, lo que constituye uno de los problemas de [interpretación](#) más serios de la Teoría Cuántica.

Analicemos el esquema típico de un proceso cuántico de medida: el estado previo a la misma es un estado E , formado por la superposición de todos los estados posibles experimentales $EP(n)$ asociados a la propiedad que se desea medir. Cada uno de tales estados posibles tiene una probabilidad de obtenerse como resultado de la medida.

De manera que, a partir del estado previo E conocemos sólo la probabilidad de los diferentes estados posibles $EP(n)$, pero no cuál de ellos actualizará. De hecho, la actualización del estado experimental tras la medida ocurre totalmente al azar. La Teoría Cuántica predice probabilidades de sucesos, en tanto que la Física Clásica predice sucesos.

El proceso cuántico de medida provoca que el estado superposición E del sistema se reduzca (“colapse”, suele decirse) a uno de sus estados posibles $EP(n)$, cuya probabilidad de actualización pasa a valer 1, en tanto que la del resto toma el valor 0.

En este proceso de medida, u observación, la superposición inicial de estados posibles, que configura el estado E previo a la misma, se rompe y pasamos del aspecto superposicional al aspecto experimental del sistema cuántico. Los aspectos paradójicos del proceso cuántico de medida, relacionados con la superposición de estados posibles y su ruptura, suelen ilustrarse por medio del denominado experimento del [gato de Schrödinger](#).

La interpretación de Copenhague de la Teoría Cuántica

Es el resultado de los trabajos de Heisenberg, Born, Pauli y otros, pero fundamentalmente fue promovida por el físico danés Niels Bohr (de ahí su denominación). Sus puntos esenciales pueden resumirse de la siguiente manera:

1. Dentro del esquema de la Teoría Cuántica se establece una relación esencial entre el sistema microscópico y el aparato de medida macroscópico.

Sólo el conjunto (sistema + aparato) posee propiedades físicas definidas.

3. Sólo después de una medida (pasando del aspecto superposicional al aspecto experimental del sistema) se puede atribuir al estado obtenido la propiedad física que se mide.

4. El Principio de Complementariedad: supone que los sistemas cuánticos muestran características y propiedades “complementarias” que no pueden determinarse de manera simultánea (por ejemplo: el carácter onda-partícula, o la pareja de magnitudes posición-velocidad).

En la Teoría Cuántica la presencia de los aspectos complementarios, corpuscular y ondulatorio, de un sistema depende del aparato elegido para su observación. Al contrario, la Física Clásica suponía que onda y partícula representaban dos descripciones distintas mutuamente excluyentes.

5. La descripción de las propiedades físicas del estado cuántico E, anterior a una medida, no está definida. Sólo aporta los estados posibles EP(n) y sus probabilidades respectivas de obtenerse tras la medida en cuestión.

El argumento, o paradoja, EPR

Propuesto por Einstein, Podolsky y Rosen en 1935, el argumento, o paradoja, EPR se planteó como un reto directo a la interpretación de Copenhague y, tácitamente, como un argumento “ad hominem” dirigido por Einstein contra Bohr como un nuevo capítulo de su particular debate, iniciado en el Congreso Solvay de 1927.

El [argumento EPR](#) no pretendía mostrar que la Teoría Cuántica fuese incorrecta, sino “incompleta”, y que, por lo tanto, debía completarse introduciendo una serie de elementos de realidad (denominados “variables ocultas”) que, debidamente acomodados dentro del formalismo de la teoría, permitiesen elaborar predicciones deterministas, no probabilistas, ya que Einstein pensaba que las probabilidades cuánticas tenían un origen subjetivo como consecuencia de carecer de una información completa relativa a las propiedades de los sistemas estudiados.

La [descripción del argumento EPR](#) se basa en el análisis de un experimento “mental”, es decir, un experimento conceptualmente consistente, aunque imposible de llevar a la práctica, al menos en el momento histórico en que se plantea.

El Teorema de Bell

Desarrollado por John Bell en 1965, se trata de un teorema matemático que analiza teóricamente el “nivel de correlación” entre los resultados de medidas realizadas sobre sistemas separados (como los sistemas S1 y S2 del argumento EPR). De hecho, las dos premisas implícitas en el Teorema de Bell son las mismas que en el argumento EPR:

1. Realidad objetiva: la realidad del mundo externo es independiente de nuestras observaciones y se basa en un conjunto de variables ocultas.

y 2. Condición de “separabilidad”: no existe “acción a distancia” ni comunicación a velocidad mayor que la luz entre regiones separadas del espacio.

Las premisas 1 y 2 constituyen la base de la denominada “realidad separable”. Basándose en ellas el Teorema de Bell predice un cierto valor de dicho nivel de correlación, que vamos a denominar $N(\text{EPR})$. Por otra parte, la interpretación de Bohr (Copenhague) de la Teoría Cuántica predice un nivel análogo de correlación $N(\text{B})$ algo mayor que $N(\text{EPR})$, debido a la propiedad conocida como [entrelazamiento cuántico](#).

Esta diferencia sugería que podía establecerse una diferencia real (no sólo de opinión) entre el planteamiento de la realidad separable de Einstein y el planteamiento de Bohr basado en la interpretación de Copenhague. Si la predicción de la Teoría Cuántica para el valor $N(\text{B})$ resultase ser experimentalmente correcta, entonces el planteamiento de Einstein fallaría, y al menos una de las dos premisas implícitas en la realidad separable debería abandonarse.

La cuestión clave era, entonces: ¿podría dirimirse de manera experimental la diferencia teórica entre los niveles de correlación $N(\text{EPR})$ y $N(\text{B})$?

El veredicto del experimento

El experimento llevado a cabo por Aspect, Dalibard y Roger en 1982, supuso, después de cuarenta y siete años, la materialización práctica del experimento “mental” expuesto en el argumento EPR en 1935. El resultado fundamental de este experimento es que la predicción de la Teoría Cuántica para el valor del nivel de correlación $N(\text{B})$ es experimentalmente correcta.

De manera que el nivel de correlación obtenido experimentalmente no coincidía con el valor $N(\text{EPR})$ deducido a partir del Teorema de Bell, sobre la base de las dos premisas de la realidad separable implícita en el argumento EPR. La conclusión es clara: la descripción física del mundo basada en la idea de una realidad separable ¡falla! Hay que destacar que la Física Clásica acepta igualmente la descripción de los fenómenos basada en dicha realidad separable.

En su vertiente “realista” la descripción clásica se basa en el concepto intuitivo de una realidad “exterior”, a la que se le suponen propiedades definidas, sean o no observables por el hombre. Esto permite, como consecuencia, hacer referencia al estado real de un sistema, con independencia de cualquier observación.

En su vertiente “separable” la descripción clásica se basa en el concepto intuitivo de una realidad mentalmente separable en elementos distintos y localizados, cuya posible relación mutua vendría limitada por el valor máximo permitido para la velocidad de las señales (la velocidad de la luz en el vacío).

Pero, lamentablemente para la descripción clásica, “intuitivo” no es sinónimo de “verdadero”.

El resultado del experimento de Aspect indica que una descripción de los fenómenos basada en la Teoría Cuántica obliga a replantear al menos una de las dos premisas que sustentan la idea de la realidad separable. La actitud más frecuente adoptada por los estudiosos es conservar su vertiente “realista” y someter a revisión su naturaleza “separable”, tratando de integrar en esa vertiente, entre otros, los efectos característicos del entrelazamiento cuántico.