

La Física Cuántica se pone de moda

La película ¿Y Tú qué sabes? populariza el ancestral debate sobre la naturaleza de la realidad

Después de recorrer multitud de círculos y foros, llega a las grandes pantallas de España la película ¿Y Tú qué sabes? (What The Bleep Do We Know?), avalada por el éxito de taquilla en las salas comerciales de Estados Unidos. La película está poniendo de moda la Física Cuántica, ya que trae a colación un importante debate filosófico y científico que se remonta a Platón, si bien tiene connotaciones metafísicas que trascienden el mundo de la ciencia. Los Creativos Culturales encuentran en ella una nueva fuente de inspiración porque la película les ofrece un posible modelo de integración, al mismo tiempo que populariza la duda sobre la naturaleza de la realidad, restringida hasta ahora a ámbitos académicos. Por Eduardo Martínez.



La película documental [¿Y Tú qué sabes?](#) (What The Bleep Do We Know?) lleva por fin a la gran pantalla un importante debate filosófico y científico. Lo hace con lucidez, aunque no está exenta de un cierto aire californiano que ha irritado a algunos medios académicos.

Sin embargo, la película constituye un nuevo intento por acercar al gran público las cuestiones sobre las que se está planteando una profunda revolución cultural, surgida de los conocimientos sobre las partículas elementales, englobados en lo que ha dado en llamarse la Física Cuántica.

La Física Cuántica, tal como explicamos en otro [artículo](#), es una manera de describir el mundo. Su campo de actuación es el de las partículas elementales, que se desenvuelven de manera misteriosa para la percepción ordinaria, ajenas a las leyes de los objetos físicos, dando lugar a diferentes interpretaciones.

Dudas de realidad

La revolución cultural que se deriva de estos conocimientos tiene que ver, sobre todo, con la naturaleza de la realidad. La tesis de la película es que la realidad se reduce a la percepción y que la percepción (a la que llamamos realidad) se forma por el efecto combinado de pensamientos y emociones.

La consecuencia de esta tesis es que el sujeto es el artífice último de lo real y que, cuando descubrimos la estrecha relación entre el mundo interno de las personas y lo que acontece en su entorno, alcanzamos la capacidad de alterar la realidad, una de las más antiguas aspiraciones humanas.

El argumento sobre la estructura cuántica de la realidad se completa en la película con recientes descubrimientos sobre el funcionamiento del cerebro, capaz de reaccionar de la misma forma tanto respecto a un objeto real como a otro imaginario, siempre que una emoción esté asociada a estos procesos.

Este descubrimiento lleva a los protagonistas a proponer una mayor atención a los procesos de pensamiento y a la profundización en las emociones, al considerar que una revisión profunda del interior humano puede ayudar a comprender mejor el mundo que nos rodea y a hacerlo más habitable y confortable. Y, sobre todo, mucho más feliz.

Dos críticas

Las críticas que ha recibido la película tienen dos dimensiones. Una se refiere al rigor de los descubrimientos comentados, que si por una parte de la comunidad científica se consideran consistentes, por otra parte no están completamente aceptados como ciertos.

La película está articulada en torno a una protagonista que busca sentido a su vida, a la que acompañan en su experiencia una serie de expertos de diferentes disciplinas: física, neurología, psiquiatría, filosofía, medicina, biología, teología, explicando conocimientos relativos a la experiencia de la protagonista, Amanda

(Marlee Matlin).

Los argumentos que los diferentes expertos exponen en la película están documentados en muchos casos, pero en otros aspectos son más débiles. La fragilidad de algunas de las exposiciones de la película está bien recogida en un [artículo](#) de Wikipedia. Además, según [Popular Science](#), uno de los expertos entrevistados, David Albert, profesor en la Universidad de Columbia, considera que las declaraciones suyas que aparecen en la película son incompletas y que están distorsionadas.

Aspectos metafísicos

Otra dimensión de la crítica se refiere a los aspectos metafísicos, que están deliberadamente entremezclados con los planteamientos científicos. Lo más grave es que la película no desvela su estrecha relación con la [Ramtha School of Enlightenment](#), que pretende la iluminación de las personas a partir de una serie de prácticas que no están basadas en el conocimiento científico.

No se trata de negar a esta escuela el derecho a realizar las películas y documentales que mejor estime y que pretenda su máxima divulgación, sino que es una obligación moral dejar constancia a los posibles públicos de la inspiración que está detrás del documental. Es lo que se echa en falta y lo que explica ese aire próximo al movimiento cultural de la [New Age](#) que refleja la película.



Para Creativos Culturales

Según explican sus promotores, sin embargo, la finalidad de la película es presentar una propuesta al movimiento llamado de los [Creativos Culturales](#), un concepto acuñado por Paul Ray y Sherry Anderson en su emblemática obra [The Cultural Creatives: How 50 Million People Are Changing the World](#), publicada en 2001.

La propuesta consiste, según ha explicado la única mujer de la terna de directores de la cinta, Betsy Chasse, a [El País](#), en *abrir un diálogo para descubrir dónde está la unión entre la realidad y nuestra mente*.

El movimiento de los Creativos Culturales está constituido por una amplia capa social de profesionales desencantados del actual modelo cultural y que representan más de 50 millones de personas en Estados Unidos y alrededor de 80 o 90 millones en Europa.

El objetivo de elaborar un mensaje para este colectivo tiene mucho sentido porque la película ofrece tanto un tema como un formato atractivo y un guión comprensible, alcanzando así la capacidad de atraer el interés de personas con un nivel de formación medio, con inquietudes personales y sociales insatisfechas y que están buscando modelos en los que desenvolver su actividad. La prueba del acierto se observa en el inesperado éxito obtenido en las salas comerciales de Estados Unidos y en el hecho de que, antes de llegar a las grandes pantallas de España, ha estado circulando casi clandestinamente por países latinoamericanos y regiones españolas, aglutinando foros de reflexión "sobre física cuántica" a partir de esta película.

La Física Cuántica, de esta forma, se está poniendo de moda, con todo lo bueno y lo malo que eso supone: despertar el interés por una disciplina científica es positivo, pero reducirla a una tertulia de salón y convertirla casi en una religión capaz de resolverlo prácticamente todo, es algo que no tiene nada que ver con la ciencia.

Telón de fondo

En cualquier caso, lo cierto es que la película evoca un importante debate filosófico y científico que se remonta al Siglo IV antes de Cristo, cuando Platón señaló con el mito de la caverna que no conocemos la realidad, sino las sombras que el mundo refleja en las paredes de la caverna en la que estamos encerrados. En 1781 Kant especula con que sólo podemos conocer a través de modelos de realidad, innatos en nosotros, que son sólo una tenue representación del mundo real, por lo demás inaccesible al conocimiento.

Más de cien años después, Einstein descubre, ya sobre bases científicas, que el mundo real no coincide siempre con nuestras estructuras mentales, ya que a partir del conocimiento de las partículas elementales, hemos descubierto que lo que sabemos del mundo objetivo es muy diferente de las ideas que tenemos sobre ese mismo mundo.

En realidad este es el punto de partida de la película, que recupera el papel del sujeto (observador en el lenguaje de la Física) en la construcción de la realidad planteado por la teoría cuántica: en 1984, John Wheeler y Wojciech Zurek, en su obra [Quantum Theory and Measurement](#), señalaron que *son necesarios los observadores para dar existencia al mundo*.

Aunque más tarde el físico alemán Dieter Zeh cuestionara esta hipótesis con su propuesta de los procesos de [decoherencia](#) para explicar los mecanismos de formación de la realidad, el debate sobre el papel del observador en el mundo no ha concluido.

La neurología ha venido a arrojar nueva luz al señalar que el cerebro nos ofrece, no un reflejo de la realidad, sino una interpretación de señales, símbolos y signos a través de un complicado ejercicio vertiginoso de matemáticas complejas, lo que aparentemente reduce la naturaleza de la realidad a un conjunto de ondas electromagnéticas que se concretan en objetos por mediación del cerebro.

[Edgar Morin](#), entre otros, explica muy bien estos procesos en su obra *El Conocimiento del Conocimiento* y concluye: *el cerebro se ha construido en el mundo y ha reconstruido el mundo a su manera dentro de sí, por lo que el mundo está en nuestro espíritu, que a su vez está en el mundo*.

Un buen resumen del argumento básico de la película y una posible explicación de su mensaje porque, si damos por ciertos estos supuestos, realmente estamos adentrándonos en la próxima evolución de nuestra especie.

La Teoría Cuántica, una aproximación al universo probable

Es un conjunto de nuevas ideas que explican procesos incomprensibles para la física de los objetos

La Teoría Cuántica es uno de los pilares fundamentales de la Física actual. Recoge un conjunto de nuevas ideas introducidas a lo largo del primer tercio del siglo XX para dar explicación a procesos cuya comprensión se hallaba en conflicto con las concepciones físicas vigentes. Su marco de aplicación se limita, casi exclusivamente, a los niveles atómico, subatómico y nuclear, donde resulta totalmente imprescindible. Pero también lo es en otros ámbitos, como la electrónica, en la física de nuevos materiales, en la física de altas energías, en el diseño de instrumentación médica, en la criptografía y la computación cuánticas, y en la Cosmología teórica del Universo temprano. La Teoría Cuántica es una teoría netamente probabilista: describe la probabilidad de que un suceso dado acontezca en un momento determinado, sin especificar cuándo ocurrirá. A diferencia de lo que ocurre en la Física Clásica, en la Teoría Cuántica la probabilidad posee un valor objetivo esencial, y no se halla supeditada al estado de conocimiento del sujeto, sino que, en cierto modo, lo determina. Por Mario Toboso.



La Teoría Cuántica es uno de los pilares fundamentales de la Física actual. Se trata de una teoría que reúne un formalismo matemático y conceptual, y recoge un conjunto de nuevas ideas introducidas a lo largo del primer tercio del siglo XX, para dar explicación a procesos cuya comprensión se hallaba en conflicto con las concepciones físicas vigentes.

Las ideas que sustentan la Teoría Cuántica surgieron, pues, como alternativa al tratar de explicar el comportamiento de sistemas en los que el aparato conceptual de la Física Clásica se mostraba insuficiente.

Es decir, una serie de observaciones empíricas cuya explicación no era abordable a través de los métodos existentes, propició la aparición de las nuevas ideas.

Hay que destacar el fuerte enfrentamiento que surgió entre las ideas de la Física Cuántica, y aquellas válidas hasta entonces, digamos de la Física Clásica. Lo cual se agudiza aún más si se tiene en cuenta el notable éxito experimental que éstas habían mostrado a lo largo del siglo XIX, apoyándose básicamente en la [mecánica](#) de Newton y la [teoría electromagnética](#) de Maxwell (1865).

“Dos nubecillas”

Era tal el grado de satisfacción de la comunidad científica que algunos físicos, entre ellos uno de los más ilustres del siglo XIX, William Thompson (Lord Kelvin), llegó a afirmar:

Hoy día la Física forma, esencialmente, un conjunto perfectamente armonioso, iun conjunto prácticamente acabado! ... Aun quedan “dos nubecillas” que oscurecen el esplendor de este conjunto. La primera es el resultado negativo del experimento de Michelson-Morley. La segunda, las profundas discrepancias entre la experiencia y la Ley de Rayleigh-Jeans.

La disipación de la primera de esas “dos nubecillas” condujo a la creación de la [Teoría Especial de la Relatividad](#) por Einstein (1905), es decir, al hundimiento de los conceptos absolutos de espacio y tiempo, propios de la mecánica de Newton, y a la introducción del “relativismo” en la descripción física de la realidad. La segunda “nubecilla” descargó la tormenta de las primeras ideas cuánticas, debidas al físico alemán Max Planck (1900).

El origen de la Teoría Cuántica

¿Qué pretendía explicar, de manera tan poco afortunada, la Ley de Rayleigh-Jeans (1899)? Un fenómeno físico denominado [radiación del cuerpo negro](#), es decir, el proceso que describe la interacción entre la materia y la radiación, el modo en que la materia intercambia energía, emitiéndola o absorbiéndola, con una fuente de radiación. Pero además de la Ley de Rayleigh-Jeans había otra ley, la Ley de Wien (1893), que pretendía también explicar el mismo fenómeno.

La Ley de Wien daba una explicación experimental correcta si la frecuencia de la radiación es alta, pero fallaba para frecuencias bajas. Por su parte, la Ley de Rayleigh-Jeans daba una explicación experimental correcta si la frecuencia de la radiación es baja, pero fallaba para frecuencias altas.

La frecuencia es una de las características que definen la radiación, y en general cualquier fenómeno en el que intervengan ondas. Puede interpretarse la frecuencia como el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Toda la gama de posibles frecuencias para una radiación en la Naturaleza se hallan contenidas en el [espectro electromagnético](#), el cual, según el valor de la frecuencia elegida determina un tipo u otro de radiación.

En 1900, Max Planck puso la primera piedra del edificio de la Teoría Cuántica. Postuló una ley (la [Ley de Planck](#)) que explicaba de manera unificada la radiación del cuerpo negro, a través de todo el espectro de frecuencias.

La hipótesis de Planck

¿Qué aportaba la ley de Planck que no se hallase ya implícito en las leyes de Wien y de Rayleigh-Jeans? Un ingrediente tan importante como novedoso. Tanto que es el responsable de la primera gran crisis provocada por la Teoría Cuántica sobre el marco conceptual de la Física Clásica. Ésta suponía que el intercambio de energía entre la radiación y la materia ocurría a través de un proceso continuo, es decir, una radiación de frecuencia f podía ceder cualquier cantidad de energía al ser absorbida por la materia.

Lo que postuló Planck al introducir su ley es que la única manera de obtener una fórmula experimentalmente correcta exigía la novedosa y atrevida suposición de que dicho intercambio de energía debía suceder de una manera discontinua, es decir, a través de la emisión y absorción de cantidades discretas de energía, que hoy denominamos “quants” de radiación. La cantidad de energía E propia de un quantum de radiación de frecuencia f se obtiene mediante la relación de Planck: $E = h \times f$, siendo h la [constante universal de Planck](#) = 6.62×10^{-34} (unidades de “acción”).

Puede entenderse la relación de Planck diciendo que cualquier radiación de frecuencia f se comporta como una corriente de partículas, los quants, cada una de ellas transportando una energía $E = h \times f$, que pueden ser emitidas o absorbidas por la materia.

La hipótesis de Planck otorga un carácter corpuscular, material, a un fenómeno tradicionalmente ondulatorio, como la radiación. Pero lo que será más importante, supone el paso de una concepción continuista de la Naturaleza a una discontinuista, que se pone especialmente de manifiesto en el estudio de

la estructura de los átomos, en los que los electrones sólo pueden tener un conjunto discreto y discontinuo de valores de energía.

La hipótesis de Planck quedó confirmada experimentalmente, no sólo en el proceso de radiación del cuerpo negro, a raíz de cuya explicación surgió, sino también en las explicaciones del [efecto fotoeléctrico](#), debida a Einstein (1905), y del [efecto Compton](#), debida a Arthur Compton (1923).

Marco de aplicación de la Teoría Cuántica

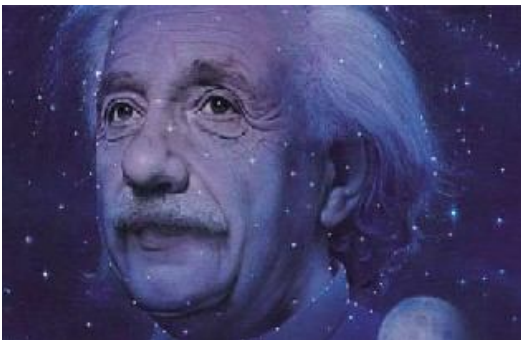
El marco de aplicación de la Teoría Cuántica se limita, casi exclusivamente, a los niveles atómico, subatómico y nuclear, donde resulta totalmente imprescindible. Pero también lo es en otros ámbitos, como la electrónica (en el diseño de transistores, microprocesadores y todo tipo de componentes electrónicos), en la física de nuevos materiales, (semiconductores y superconductores), en la física de altas energías, en el diseño de instrumentación médica (láseres, tomógrafos, etc.), en la criptografía y la computación cuánticas, y en la Cosmología teórica del Universo temprano. De manera que la Teoría Cuántica se extiende con éxito a contextos muy diferentes, lo que refuerza su validez.

Pero, ¿por qué falla la teoría clásica en su intento de explicar los fenómenos del micromundo? ¿No se trata al fin y al cabo de una simple diferencia de escalas entre lo grande y lo pequeño, relativa al tamaño de los sistemas? La respuesta es negativa. Pensemos que no siempre resulta posible modelar un mismo sistema a diferentes escalas para estudiar sus propiedades.

Para ver que la variación de escalas es un proceso con ciertas limitaciones intrínsecas, supongamos que queremos realizar estudios hidrodinámicos relativos al movimiento de corrientes marinas. En determinadas condiciones, podríamos realizar un modelo a escala lo suficientemente completo, que no dejase fuera factores esenciales del fenómeno. A efectos prácticos una reducción de escala puede resultar lo suficientemente descriptiva.

Pero si reducimos la escala de manera reiterada pasaremos sucesivamente por situaciones que se corresponderán en menor medida con el caso real. Hasta llegar finalmente a la propia esencia de la materia sometida a estudio, la molécula de agua, que obviamente no admite un tratamiento hidrodinámico, y habremos de acudir a otro tipo de teoría, una teoría de tipo molecular. Es decir, en las sucesivas reducciones de escala se han ido perdiendo efectos y procesos generados por el aglutinamiento de las moléculas.

De manera similar, puede pensarse que una de las razones por las que la Física Clásica no es aplicable a los fenómenos atómicos, es que hemos reducido la escala hasta llegar a un ámbito de la realidad "demasiado esencial" y se hace necesario, al igual que en el ejemplo anterior, un cambio de teoría. Y de hecho, así sucede: la Teoría Cuántica estudia los aspectos últimos de la substancia, los constituyentes más esenciales de la materia (las denominadas "partículas elementales") y la propia naturaleza de la radiación.



Cuándo entra en juego la Teoría Cuántica

Debemos asumir, pues, el carácter absoluto de la pequeñez de los sistemas a los que se aplica la Teoría Cuántica. Es decir, la cualidad "pequeño" o "cuántico" deja de ser relativa al tamaño del sistema, y adquiere un carácter absoluto. Y ¿qué nos indica si un sistema debe ser considerado "pequeño", y estudiado por medio de la Teoría Cuántica? Hay una "regla", un "patrón de medida" que se encarga de esto, pero no se trata de una regla calibrada en unidades de longitud, sino en unidades de otra magnitud física importante denominada "acción".

La acción es una magnitud física, al igual que lo son la longitud, el tiempo, la velocidad, la energía, la temperatura, la potencia, la corriente eléctrica, la fuerza, etc., aunque menos conocida. Y al igual que la temperatura indica la cualidad de frío o caliente del sistema, y la velocidad su cualidad de reposo o movimiento, la acción indica la cualidad de pequeño (cuántico) o grande (clásico) del sistema. Como la energía, o una longitud, todo sistema posee también una acción que lo caracteriza.

Esta acción característica, A , se obtiene de la siguiente multiplicación de magnitudes: $A = P \times L$, donde P representa la [cantidad de movimiento](#) característica del sistema (el producto de su masa por su velocidad) y L su "longitud" característica. La unidad de esa "regla" que mencionábamos, con la que medimos la acción de los sistemas, es la constante de Planck, h . Si el valor de la acción característica del sistema es del orden de la constante de Planck deberemos utilizar necesariamente la Teoría Cuántica a la hora de estudiarlo.

Al contrario, si h es muy pequeña comparada con la acción típica del sistema podremos estudiarlo a través de los métodos de la teoría clásica. Es decir: Si A es del orden de h debemos estudiar el sistema según la Teoría Cuántica. Si A es mucho mayor que h , podemos estudiarlo por medio de la Física Clásica.

Dos ejemplos: partículas y planetas

Veamos dos ejemplos de acción característica en dos sistemas diferentes, aunque análogos:

1. *El electrón orbitando en torno al núcleo en el nivel más bajo de energía del átomo de hidrógeno.*

Vamos a calcular el orden de magnitud del producto $P \times L$. P representa el producto de la masa del electrón por su velocidad orbital, esto es $P = 10$ (expo-31) (masa) \times 10 (exp 6) (velocidad) = 10 (expo-25) (cantidad de movimiento). El valor característico de L corresponde al radio de la órbita, esto es, $L = 10$ (expo-10) (longitud). Realizamos ahora el producto $P \times L$ para hallar la magnitud de la "acción" característica asociada a este proceso: $A_1 = P \times L = 10$ (expo-25) \times 10 (expo-10) = 10 (expo-35) (acción).

2. *El planeta Júpiter orbitando en torno al Sol (consideramos la órbita circular, para simplificar).*

Para este segundo ejemplo, realizamos cálculos análogos a los anteriores. Primeramente la cantidad de movimiento P , multiplicando la masa de Júpiter por su velocidad orbital: $P = 10$ (expo 26) (masa) \times 10 (expo 4) (velocidad) = 10 (expo 30) (cantidad de movimiento). Igualmente, la longitud característica será la distancia orbital media: $L = 10$ (expo 11) (longitud). La magnitud de la acción característica en este segundo caso será: $A_2 = 10$ (expo 30) \times 10 (expo 11) = 10 (expo 41) (acción).

Si comparamos estos dos resultados con el orden de magnitud de la constante de Planck tenemos:

$$\begin{aligned}h &= 10 \text{ (expo-34)} \\A_1 &= 10 \text{ (expo -35)} \\A_2 &= 10 \text{ (expo 41)}\end{aligned}$$

Vemos que para el caso 1 (electrón orbitando en un átomo de hidrógeno) la proximidad en los órdenes de magnitud sugiere un tratamiento cuántico del sistema, que debe estimarse como "pequeño" en el sentido que indicábamos anteriormente, en términos de la constante de Planck, considerada como "patrón" de medida. Al contrario, entre el caso 2 (Júpiter en órbita en torno al Sol) y la constante de Planck hay una diferencia de 75 órdenes de magnitud, lo que indica que el sistema es manifiestamente "grande", medido en unidades de h , y no requiere un estudio basado en la Teoría Cuántica.

La constante de Planck tiene un valor muy, muy pequeño. Veámoslo explícitamente:

$$h = 0' 00000000000000000000000000000000662 \text{ (unidades de acción)}$$

El primer dígito diferente de cero aparece en la trigésimo cuarta cifra decimal. La pequeñez extrema de h provoca que no resulte fácil descubrir los aspectos cuánticos de la realidad, que permanecieron ocultos a la Física hasta el siglo XX. Allí donde no sea necesaria la Teoría Cuántica, la teoría clásica ofrece descripciones suficientemente exactas de los procesos, como en el caso del movimiento de los planetas, según acabamos de ver.

Breve cronología de la Teoría Cuántica

1900. "Hipótesis cuántica de Planck" (Premio Nobel de Física, 1918). Carácter corpuscular de la radiación.

1905. Einstein (Premio Nobel de Física, 1921) explica el "efecto fotoeléctrico" aplicando la hipótesis de Planck.

1911. Experimentos de Rutherford, que establecen el [modelo planetario](#) átomo, con núcleo (protones) y órbitas externas (electrones).

1913. [Modelo atómico de Niels Bohr](#) (Premio Nobel de Física, 1922). Tiene en cuenta los resultados de Rutherford, pero añade además la hipótesis cuántica de Planck. Una característica esencial del modelo de Bohr es que los electrones pueden ocupar sólo un conjunto discontinuo de órbitas y niveles de energía.

1923. Arthur Compton (Premio Nobel de Física, 1927) presenta una nueva verificación de la hipótesis de

Planck, a través de la explicación del efecto que lleva su nombre.

1924. [Hipótesis de De Broglie](#) (Premio Nobel de Física, 1929). Asocia a cada partícula material una onda, de manera complementaria a cómo la hipótesis de Planck dota de propiedades corpusculares a la radiación.

1925. Werner Heisenberg (Premio Nobel de Física, 1932) plantea un formalismo matemático que permite calcular las magnitudes experimentales asociadas a los estados cuánticos.

1926. Erwin Schrödinger (Premio Nobel de Física, 1933) plantea la ecuación ondulatoria cuyas soluciones son las ondas postuladas teóricamente por De Broglie en 1924.

1927. V Congreso Solvay de Física, dedicado al tema "Electrones y fotones". En él se produce el debate entre Einstein y Bohr, como defensores de posturas antagónicas, sobre los problemas interpretativos que plantea la Teoría Cuántica.

1928. Experimentos de difracción de partículas (electrones) que confirman la hipótesis de de Broglie, referente a las propiedades ondulatorias asociadas a las partículas. El fenómeno de difracción es propio de las ondas.

1932. Aparición del trabajo de fundamentación de la Teoría Cuántica elaborado por el matemático Jon von Neumann.

Aspectos esencialmente novedosos de la Teoría Cuántica

Los aspectos esencialmente novedosos (no clásicos) que se derivan de la Teoría Cuántica son:

- a) Carácter corpuscular de la radiación (Hipótesis de Planck).
- b) Aspecto ondulatorio de las partículas (Hipótesis de Broglie).
- c) Existencia de magnitudes físicas cuyo espectro de valores es discontinuo. Por ejemplo los niveles de energía del átomo de hidrógeno (Modelo atómico de Bohr).

Implicaciones de a): carácter corpuscular de la radiación.

Tradicionalmente se había venido considerando la radiación como un fenómeno ondulatorio. Pero la hipótesis de Planck la considera como una corriente de partículas, "quantums". ¿Qué naturaleza tiene, entonces, la radiación: ondulatoria o corpuscular? Las dos. Manifiesta un carácter marcadamente "dual". Se trata de aspectos que dentro del formalismo cuántico no se excluyen, y se integran en el concepto de "quantum".

El quantum de radiación puede manifestar propiedades tanto corpusculares como ondulatorias, según el valor de la frecuencia de la radiación. Para valores altos de la frecuencia (en la región gamma del espectro) predomina el carácter corpuscular. En tanto que para frecuencias bajas (en la región del espectro que describe las ondas de radio) predomina el aspecto ondulatorio.

Implicaciones de b): carácter ondulatorio de las partículas.

Se comprobó en experimentos de difracción de electrones y neutrones. Lo que ponen de manifiesto estos experimentos es que una clase de onda acompaña el movimiento de las partículas como responsable del fenómeno de difracción. De manera que nuevamente tenemos un ejemplo de [dualidad](#) entre las propiedades corpusculares y ondulatorias, asociadas en este caso a las partículas.

Pero la aparición del fenómeno ondulatorio no se produce únicamente a nivel microscópico, también se manifiesta para objetos macroscópicos, aunque en este caso la onda asociada tiene una longitud de onda tan pequeña que en la práctica es inapreciable y resulta imposible la realización de un experimento de difracción que la ponga de manifiesto.

Implicaciones de c): existencia de magnitudes físicas discontinuas.

Pone de manifiesto el carácter intrínsecamente discontinuo de la Naturaleza, lo que se evidencia, como ejemplo más notable, en el espectro de energía de los átomos. A partir de la existencia de estas discontinuidades energéticas se explica la estabilidad de la materia.



Un ejemplo concreto

Analicemos para el caso del átomo de hidrógeno, según el modelo de Bohr, cómo se conjugan estos tres supuestos cuánticos anteriores, a), b) y c). El átomo de hidrógeno se entiende como un sistema estable formado por un electrón y un protón. El electrón puede hallarse en un conjunto infinito, pero discontinuo de niveles de energía [supuesto c)].

Para pasar de un nivel a otro, el electrón debe absorber o emitir un quantum discreto de radiación [supuesto a)] cuya energía sea igual a la diferencia de energía entre esos niveles. Los niveles posibles de energía de los electrones se representan matemáticamente por funciones ondulatorias [supuesto b)], denominadas "funciones de estado", que caracterizan el estado físico del electrón en el nivel de energía correspondiente.

Para conocer el valor experimental de cualquier propiedad referente a la partícula debe "preguntarse" a su función de estado asociada. Es decir, dicha función constituye un tipo de representación del estado físico, tal que el estado del electrón en el n-ésimo nivel de energía es descrito por la n-ésima función de estado.

La función de onda

La descripción más general del estado del electrón del átomo de hidrógeno viene dada por la "superposición" de diferentes funciones de estado. Tal superposición es conocida como "función de onda". La superposición de estados posibles es típica de la Teoría Cuántica, y no se presenta en las descripciones basadas en la Física Clásica.

En esta última, los estados posibles nunca se superponen, sino que se muestran directamente como propiedades reales atribuibles al estado del sistema. Al contrario, especificar el estado del sistema en la Teoría Cuántica implica tomar en consideración la superposición de todos sus estados posibles. Las funciones de onda no son ondas asociadas a la propagación de ningún campo físico (eléctrico, magnético, etc.), sino representaciones que permiten caracterizar matemáticamente los estados de las partículas a que se asocian.

El físico alemán Max Born ofreció la primera interpretación física de las funciones de onda, según la cual el cuadrado de su amplitud es una medida de la probabilidad de hallar la partícula asociada en un determinado punto del espacio en un cierto instante. Aquí se manifiesta un hecho que se repetirá a lo largo del desarrollo de la Teoría Cuántica, y es la aparición de la probabilidad como componente esencial de la gran mayoría de los análisis.

La probabilidad en la Teoría Cuántica

La Teoría Cuántica es una teoría netamente probabilista. Nos habla de la probabilidad de que un suceso dado acontezca en un momento determinado, no de cuándo ocurrirá ciertamente el suceso en cuestión. La importancia de la probabilidad dentro de su formalismo supuso el punto principal de conflicto entre Einstein y Bohr en el V Congreso Solvay de Física de 1927.

Einstein argumentaba que la fuerte presencia de la probabilidad en la Teoría Cuántica hacía de ella una teoría incompleta reemplazable por una hipotética teoría mejor, carente de predicciones probabilistas, y por lo tanto determinista. Acuñó esta opinión en su ya famosa frase, "Dios no juega a los dados con el Universo".

La postura de Einstein se basa en que el papel asignado a la probabilidad en la Teoría Cuántica es muy distinto del que desempeña en la Física Clásica. En ésta, la probabilidad se considera como una medida de la ignorancia del sujeto, por falta de información, sobre algunas propiedades del sistema sometido a estudio. Podríamos hablar, entonces, de un valor subjetivo de la probabilidad. Pero en la Teoría Cuántica la probabilidad posee un valor objetivo esencial, y no se halla supeditada al estado de conocimiento del sujeto,

sino que, en cierto modo, lo determina.

En opinión de Einstein, habría que completar la Teoría Cuántica introduciendo en su formalismo un conjunto adicional de elementos de realidad (a los que se denominó "variables ocultas"), supuestamente obviados por la teoría, que al ser tenidos en cuenta aportarían la información faltante que convertiría sus predicciones probabilistas en predicciones deterministas.

Mario Toboso es Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Salamanca y Editor del Blog [Tempus](#) de Tendencias21. Este artículo es la primera entrega de una serie de dos sobre Teoría Cuántica. Ver el siguiente: [La Teoría Cuántica cuestiona la naturaleza de la realidad](#).

Viernes 12 Mayo 2006
Mario Toboso
Artículo leído 5287 veces

La Teoría Cuántica cuestiona la naturaleza de la realidad

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

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 Toboso.



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.
- 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.

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 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):

$$E = \text{sup. EP}(n) \text{ siendo } n = 1, 2, 3, \dots \text{ tantos estados como pueda adoptar el sistema}$$

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.
2. 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 $N(EPR)$. Por otra parte, la interpretación de Bohr (Copenhague) de la Teoría Cuántica predice un nivel análogo de correlación $N(B)$ algo mayor que $N(EPR)$, 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 $N(B)$ 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 $N(EPR)$ y $N(B)$?

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 $N(B)$ es experimentalmente correcta.

De manera que el nivel de correlación obtenido experimentalmente no coincidía con el valor $N(EPR)$ 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.

Mario Toboso es Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Salamanca y Editor del Blog [Tempus](#) de Tendencias21. 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](#).

Mario Toboso
Artículo leído 3556 veces