

El paradigma cuántico

Manuel Béjar

Cátedra Ciencia, Tecnología y Religión
Universidad Pontificia Comillas (Madrid)
Email: mbejar@recuerdo.net

Sabemos que la física funciona bien como explicación de múltiples fenómenos de la realidad. Sabemos también que la física cuántica funciona muy bien para explicar los resultados de complejos experimentos realizados en el régimen microscópico (partículas, núcleos, átomos, moléculas...) y en experimentos donde la sombra de lo cuántico se alarga lo suficiente para permitir que múltiples elementos microscópicos pierdan su identidad, transformándose solidariamente en algo así como una macropartícula cuántica (fullerenos, láseres, superconductores, condensados...). Sin duda, la teoría cuántica nos sirve para resolver problemas físicos y avanzar en el conocimiento de la materia. Eso sí, no sabemos cómo interpretarla. Algo hay en lo cuántico que no nos deja tranquilos. ¿Por qué nos resulta tan extraño todo lo cuántico?

Cuando Newton explicó el movimiento de los cielos con su teoría de la gravedad, hizo una expli-

cación de los fenómenos celestes a partir de un fundamento más profundo denominado gravitación. El mismo Newton renunció a formular una hipótesis acerca de la naturaleza de la gravedad. Y no pareció importar demasiado a sus sucesores. La gravitación era una fuerza que se transmitía a distancia entre cuerpos masivos y los físicos clásicos fueron aumentando su conocimiento de la mecánica celeste haciendo cálculos basados en la ley de la gravedad newtoniana, sin aparentemente sentirse a disgusto con esa fuerza de atracción a distancia. Claro está que la pregunta más filosófica acerca de la naturaleza de la gravitación produjo diseños experimentales como el de Michelson-Morley cuya orientación final daría lugar a una explicación más profunda de la gravedad. Con Einstein aparece un sustrato para que la gravitación pueda fluir como una onda gravitatoria por una realidad material conocida como espacio-tiempo. Y su teoría pasó a conocerse como la

más bella de la física, a pesar de su endiablada estructura matemática subyacente.

Con lo cuántico parece ocurrir todo lo contrario. Comparte con la teoría de la relatividad todo el potencial para explicar fenómenos, con una extraordinaria congruencia entre predicciones y resultados experimentales. Pero, a nadie le deja satisfecho. Ya desde sus orígenes siempre se cuestionaron sus fundamentos y no le faltaron alternativas teóricas que hicieran de ella una teoría más completa. ¿Qué le falta? ¿Por qué gusta tan poco? ¿Cómo podemos familiarizarnos con ella?

Dos han sido las corrientes de interpretación más extendidas entre físicos y algún filósofo interesado en la temática. Primero, con Niels Bohr a la cabeza, nos encontramos con los instrumentalistas, que entienden la física cuántica como un lenguaje matemático para hacer predicciones estadísticas de los fenómenos cuánticos. El lenguaje funciona, funciona muy bien, pero simplemente es funcional. ¿Qué realidad física hay tras este funcionalismo? Esa es la gran pregunta de los partidarios de la segunda gran corriente de interpretación, quizás con Einstein como primer abanderado. La postura del realismo consiste en suponer elementos de realidad insustituibles por un lenguaje puramente funcional.

La realidad es como es, tiene una identidad nos guste o no, y no podemos prescindir de ella; sino que debemos expandir nuestras teorías hasta conectar con la realidad misma. ¿Y cómo es esta realidad? Los instrumentalistas dirían que esta realidad, de existir, es inalcanzable por la teoría cuántica, limitada a las congruencias entre los resultados experimentales y sus predicciones probabilistas. ¿Probabilidad? Probablemente una asunción demasiado elevada para unos realistas tan confiados en creer que la realidad es como es, hoy y en el Medioevo.

1. La probabilidad cuántica

Lo inaceptable en la teoría cuántica es la probabilidad, tanto para realistas como instrumentalistas. Einstein fue el último gran físico clásico, siempre tan disconforme con la probabilidad en una teoría física como para sentirse convencido de que *el Viejo no juega a los dados*. ¿Y un instrumentalista? Estos asumen la probabilidad como elemento básico de su lenguaje matemático para describir la realidad. El gran problema es que no saben cómo aparece la probabilidad en la teoría cuántica. Efectivamente –dirían–, por eso es mejor *callar y calcular*. Hay que silenciar la pretensión filosófica y dedicarse a lo que funciona; esto

es, hacer cálculos con una teoría que no deja fenómeno físico sin explicación cuántica.

La ecuación de Schrödinger, que resuelta ofrece una descripción de la evolución del estado de un sistema cuántico, es tan determinista como las ecuaciones de la gravitación en la teoría de la relatividad o en la física de Newton. Las ecuaciones de lo atómico y las ecuaciones que gobiernan los cielos son deterministas; en el sentido de que supuestas unas condiciones iniciales, es posible determinar el estado futuro del sistema –ya sea, macroscópico o microscópico–. Entonces, ¿por qué se habla de probabilidades en física cuántica en vez de certezas como en la física clásica? ¿De dónde salen estas probabilidades?

La probabilidad cuántica es lo que hace que la teoría no se acoja tan bien como las teorías clásicas de la gravedad; ni se acepte tan fácilmente como otras teorías revolucionarias, por carecer de una interpretación suficientemente consensuada. En realidad, las interpretaciones sugeridas son tan variadas como desafiantes al sentido común. Se puede hacer física cuántica con probabilidades, pero hay que callar ante la pregunta sobre su fundamentación. La revolución cuántica es ya una realidad gracias a sus cálculos y predicciones estadísticas. Su interpretación

fundamental está por hacerse y su realización marcará la activación de un nuevo paradigma cuántico; probablemente no limitado a lo microscópico, ni a lo físico, sino a los propios fundamentos de la realidad y a los sistemas complejos emergentes.

El problema de la probabilidad cuántica radica en la transición del régimen cuántico al clásico. En el régimen clásico no hay problema con las probabilidades. Y si aisláramos una sistema cuántico complemente de su entorno clásico, su evolución siempre sería cuántica y determinista. El problema aparece cuando se entrelazan estos dos mundos. Es el clásico problema de la medida cuántica. Mientras el sistema está en un comportamiento cuántico sus estados futuros siguen una transformación temporal determinada por la ecuación de Schrödinger y su evolución se parece a la de los sistemas clásicos. Ahora bien, ¿qué está determinado en la evolución de un sistema cuántico? Su determinación es extraña y cualitativamente diferente a la de los sistemas clásicos, que encadenan sucesivos estados donde sus propiedades están bien definidas. En general, un sistema cuántico se describe cuánticamente mediante una superposición de estados posibles. Esto es inexistente en los sistemas clásicos, siempre confi-

gurados en estados bien definidos y únicos.

La ecuación que gobierna el régimen cuántico nos indica determinísticamente cómo evoluciona en el tiempo esta superposición cuántica de estados posibles: bien definidos, pero no únicos. Pues bien, estos estados en superposición no son observables. Pero es necesario formularlos con esta coherencia cuántica para explicar los resultados experimentales. Por eso, los instrumentalistas consideran todo esto más como un lenguaje útil, que como una realidad. Los realistas acentuarían la discusión en el hecho de que tras medir un sistema cuántico el aparato de medida devuelve una magnitud propia del régimen clásico. Y, lógicamente, esta propiedad ha de emerger de algún sitio; quizás de un sustrato subcuántico real. Lacónicamente, los instrumentalistas dirían que las probabilidades simplemente son el precio a pagar por la coherencia cuántica que hace posible la superposición de estados. Mejor acostumbrarse a ellas.

2. La realidad subcuántica

Ya nos habíamos acostumbrado a tratar la gravedad como una fuerza a distancia, sin construir hipótesis acerca de su naturaleza, cuando Einstein supo generalizar

las genialidades newtonianas y regalarnos una profunda imagen de la realidad en términos de un tejido dinámico de espacio-tiempo. Igualmente, la costumbre de trabajar con probabilidades puede dejar paso a una nueva imagen de la realidad, a un nuevo paradigma cuántico.

Un colega de Einstein durante su etapa en Princeton fue David Bohm, un pionero en el impulso del paradigma cuántico. Somos conscientes de buena parte de los celos que pueden surgir al mencionar a este autor. Pero, ciertamente Bohm fue un gran físico, una personalidad en física cuántica y un profesional interesado por las implicaciones metafísicas de lo cuántico. Esta amplitud de intereses le condujo a introducir la idea de la existencia de unas variables ocultas que permitirían generalizar la teoría cuántica. Rápidamente, los instrumentalistas enfatizarían que esta pretensión ha sido un fracaso por acentuar un ingenuo determinismo en un extraño mundo dominado por la indeterminación ontológica y la coherencia que sostiene la indefinición de la superposición de estados cuánticos.

Es verdad que la idea de estas variables ocultas nada nuevo ha aportado a la física cuántica. Pero muy probablemente Bohm no fue un determinista, ni sus pretensio-

nes fueran estrictamente físicas. Más bien, él asume –como no puede ser de otro modo– las fortalezas de la teoría cuántica, al tiempo que es consciente de la necesidad de un soporte metafísico que la dote de mayor realismo. Y en este sentido, la realidad subcuántica es una potente idea metafísica para acercarnos a una comprensión mayor de esta realidad descubierta por la física cuántica.

La física cuántica nos muestra que los procesos cuánticos son como son, que su lenguaje descriptivo guarda una lógica interna. Pero no nos ofrece una razón suficiente de cómo se producen los fenómenos experimentales a partir de este fondo de indeterminación y coherencia cuántica. Falta una explicación causal de la realidad tal como la observamos, a partir de unos principios que hoy no entendemos. Y aquí, las ideas de Bohm pueden servir como germen de una concepción más profunda de la realidad. Nos referimos al paradigma cuántico, que bien pudiera hacernos comprender mejor las propiedades de los sistemas complejos (físicos, biológicos, conscientes e inteligentes).

¿Cómo es esta realidad subcuántica? Esta realidad subcuántica es el fundamento de la realidad cuántica y de su transformación en la realidad observable. Los sistemas cuánticos pueden permanecer en

estados de indefinición clásica porque la realidad subcuántica lo permite. Gracias también a esta realidad subcuántica puede acontecer la transición cuántico-clásica (problema de la medida) y producirse la emergencia de los elementos de realidad propios de nuestra experiencia consciente. Esta realidad subcuántica es material. Es la materia en su nivel fundamental: sin definición clásica, en coherencia cuántica y donde se hace posible hablar de una máxima conectividad en un todo sin partes (ontología holista).

3. Entrelazamiento cuántico

Uno de los fenómenos sin duda más extraño y desafiante en física cuántica es el denominado entrelazamiento cuántico. Consiste en la combinación de dos sistemas cuánticos diferentes en un solo sistema holista, donde ya no es posible diferenciar las partes que lo constituyeron; porque han perdido su identidad en favor de la emergencia de un sistema único. La globalidad del sistema es tal que su entrelazamiento parece no resentirse con la distancia. En principio podríamos mantener entrelazadas dos partículas de luz por toda la galaxia. Experimentalmente, lo que empezó siendo un entrelazamiento cuántico submilimétrico, es hoy una

realidad a la escala de los cientos de kilómetros que separan las islas Canarias.

Cuando dos fotones quedan entrelazados han perdido su identidad, hasta el punto de que al medir una propiedad cuántica de uno de ellos en una ubicación, determina la misma propiedad del otro, instantáneamente, sin importar la distancia que los separa. Sin entrar en detalles, esta acción no-local a distancia no viola los principios de la relatividad. Eso sí, el sentido común se resiente. Al medir una propiedad cuántica de un fotón en un laboratorio y, en consecuencia, quedar determinada experimentalmente; se determina automáticamente esa misma propiedad en el otro fotón, sin que haya mediado una medida directa. Previamente al acto de medida el sistema carece de tal propiedad física, pues su ontología no está determinada. Es la medida la causa directa de la emergencia de esta propiedad en uno de los fotones que, al rom-

perse el entrelazamiento cuántico, provoca indirectamente tanto la síntesis del otro fotón particular como la emergencia de sus propiedades homólogas. De veras, esto es extrañísimo. Si alguien deseara comprobar que esa propiedad cuántica en el segundo fotón verdaderamente ha quedado determinada, basta comprobarlo experimentalmente y quedar perplejo por la complejidad de este fenómeno real.

A nuestro entender estos fenómenos ocurren porque existe una ontología subcuántica que lo permite. La materia puede formar estos estados de entrelazamiento cuántico. Quizás lo verdaderamente sorprendente no sea que metafísicamente la materia asuma el holismo, sino que esta naturaleza holista se manifieste fenomenológicamente en el orden de lo físico. Puesto que así parece ser realmente, entonces el paradigma cuántico puede ofrecerse como renovador intelectual de la metafísica de la materia. ■