

Fin a 100 años del misterio “dualidad onda-partícula” en la física cuántica

José Bernabéu

Como la quintaesencia aristotélica para el cielo, el flogisto para la combustión, el fluido calórico para los estados de la materia o el éter para las ondas electromagnéticas, las “ondas de materia” de la física cuántica son un reminiscente histórico sin correspondencia real en el mundo natural. El concepto cuántico —no clásico— fundamental es la amplitud de probabilidad, sin importar que haga referencia a propiedades espaciales o internas de los sistemas físicos.

© Freepik

El misterio de la “dualidad onda-partícula”, presente en el lenguaje de la física cuántica desde sus orígenes históricos hace 100 años, no tiene una correspondencia real con el comportamiento de la naturaleza al ser observada. El dilema de la llamada “interferencia con partículas separadas” no es entre partículas y ondas: la interferencia en física cuántica es entre amplitudes de probabilidad para alternativas distintas no marcadas en una transición entre estados definidos. En este artículo se muestra que la misma base conceptual aparece en una plétora de “sistemas de dos estados” como consecuencia del principio de superposición lineal, sin importar que los observables hagan referencia a propiedades espaciales o internas. Se discuten ejemplos que van desde el experimento de Young de doble rendija al fenómeno de oscilación del “sabor” de neutrinos en un lenguaje interpretativo común.

En 1924 Louis de Broglie publicó el artículo “Tentative Theory of Light Quanta” en *Philosophical Magazine* **47**, 446 (1924). En él se postula la relación entre la longitud de onda λ de ondas y el momento p de partículas

$$\lambda = h/p, \quad (1)$$

conectados para todo sistema físico, no solo para cuantos de luz —fotones—, sino también para la materia, a través de la constante h de acción de Planck. Aunque la naturaleza de esas “ondas” era desconocida, la ecuación de De Broglie permitió una razón de ser sencilla de las reglas de cuantización *ad hoc* de la vieja teoría cuántica y representó la primera idea influyente que alimentó la avalancha de la construcción de la mecánica cuántica. La “mecánica ondulatoria” de Schrödinger, con la ecuación de Schrödinger para esas “ondas de materia”, y la mecánica de matrices de Heisenberg convergieron en una síntesis formulada en términos de estados y observables. La interpretación de la “función de ondas” vino con Max Born como “amplitud de densidad de probabilidad” y el lenguaje fue moldeado por Niels Bohr en la llamada interpretación

de Copenhague. El principio de complementariedad de Bohr para dos observables conjugados —incompatibles—, apareciendo en las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, fue incluso extendido para explicar una “dualidad onda-partícula” universal.

La revolución científica que la mecánica cuántica ha representado no tiene precedentes en la historia de la física. Además de explicar los fenómenos previamente observados incompatibles con la física clásica, ha predicho novedosos efectos paradójicos con un dominio de validez universal que la catapultan como la unificación de conceptos de mayor éxito en la descripción de la naturaleza. El teorema de John Bell para sistemas enmarañados establece que ninguna teoría clásica futura será capaz de reproducir todos los resultados de la mecánica cuántica. El Premio Nobel de Física de 2022 a Aspect, Clauser y Zeilinger reconoce la prueba experimental de las correlaciones cuánticas entre observables de dos partes más allá de una relación causal, conduciendo a una falta de realismo local y al nuevo campo de información cuántica. Los últimos 100 años han visto desarrollos complementarios de la teoría, desde discusiones epistemológicas a física real, desde nuevos efectos observados en múltiples campos de la física a tecnologías cuánticas. Esos avances, incluyendo nuevos sensores cuánticos para explorar nuevos fenómenos en una variedad de física desafiante, no ocultan, sin embargo, preguntas pendientes acerca de los fundamentos del mundo cuántico y la clarificación de su base conceptual.

En este artículo se discute si el concepto de una “dualidad onda-partícula”, que persiste después de 100 años en el lenguaje de muchos científicos, tiene una base real en el comportamiento de la naturaleza o es simplemente un remanente de los orígenes históricos de la teoría. Aun hoy se lee en libros de texto estándar y en artículos de investigación frases como: “el fotón es una onda al propagarse y una partícula al detectarse” o “la existencia de interferometría atómica se debe a las ondas de materia de la física cuántica”. Esas expresiones vienen motivadas porque las ondas interfieren, las partículas no. Para este análisis, se supone que el lector está familiar-

zado con la formulación de la mecánica cuántica, de tal modo que no se darán aquí deducciones matemáticas ni referencias explícitas.

Se puede formular la pregunta esencial como **¿Es la función de ondas $\psi(x,t)$ un campo en el espacio-tiempo?**

A priori, puede parecer que la formulación de la teoría en la imagen de evolución temporal de los estados —realismo instantáneo— y la representación de posiciones como variable observable conduce a una descripción de la dinámica de una partícula en términos de una “verdadera” función de ondas que satisface una ecuación de ondas con todas las propiedades ondulatorias. Esta formulación explica, en particular, la interferencia espacial en experimentos canónicos al mejor nivel cuantitativo y daría crédito al lenguaje de “ondas de probabilidad” en el espacio-tiempo. ¿Es “real” este lenguaje o es un artefacto de la interpretación de la representación usada para el comportamiento de una partícula separada?

Para responder a esta pregunta, el punto crucial es **¿Qué es “ x ”? un punto espacial o el observable de posición de la partícula.**

La propia formulación proporciona la respuesta en favor de la segunda acepción, porque:

- (1) La misma predictibilidad se puede obtener mediante la representación de momentos, con los estados base siendo el observable momento conjugado, que conduce a una “función de ondas” $\psi(p,t)$ en el espacio de momentos. Identificamos la “realidad instantánea” con el estado $\Psi(t)$ —el tiempo no es un observable cuántico—, independiente de la representación usada.
- (2) Para un sistema de dos partículas (1,2), incluso en la representación de posiciones, la función de ondas $\psi(x_1, x_2; t)$ está definida en el espacio de configuración, no en el espacio ordinario. Las dos variables hacen referencia al observable de posición para cada partícula.

¿Por qué entonces la interferencia espacial en un experimento de doble rendija con partículas separadas se manifiesta exactamente como en el lenguaje de la dualidad onda-partícula? De hecho, el resultado experimental con partículas separadas preparadas en el mismo estado desconectadas una-a-una se anuncia en ocasiones como: “La dualidad onda-partícula observada en el experimento de Young de doble rendija con sensibilidad para partículas individuales”. Como una partícula separada no se puede compartir entre las dos rendijas, se invoca su “onda dual” para dar una explicación. Sin embargo, el único ingrediente necesario es la interferencia de amplitudes de probabilidad para las dos alternativas, como consecuencia del principio de superposición lineal de los dos posibles estados de paso de la partícula. Por qué rendija

pasa la partícula no está definido en la superposición de estados y, por tanto, no es una pregunta permitida. En consecuencia,

- (3) si $\Psi_1(t)$ es el estado para una propagación definida por la rendija 1 y $\Psi_2(t)$ lo es para el paso por rendija 2, el estado de la partícula viene dado por su superposición lineal, conduciendo a la suma de las correspondientes amplitudes de probabilidad en su llegada a la pantalla en un experimento de interferometría espacial.

Las componentes que interfieren en mecánica cuántica no son partículas —ni ondas asociadas—, son las amplitudes de probabilidad para diferentes alternativas no marcadas accesibles en el experimento. **Es el hecho de que las amplitudes de probabilidad sumen como números complejos lo que es responsable de todas las interferencias cuánticas.** Un fotón, electrón o átomo no es “compartido” por las dos rendijas como se describe invocando a su onda asociada. La suma coherente de amplitudes conduce a la figura de interferencia para la densidad de probabilidad en cada punto de la pantalla. Lo que nos demuestra el experimento de interferometría con partículas separadas es que cada partícula tiene toda la información, aunque la evidencia experimental de la figura de interferencia necesite la acumulación estadística de llegadas individuales de las partículas a la pantalla. En la formulación de Feynman de integrales de camino no hay lenguaje alguno “ondulatorio”: reemplaza la trayectoria, determinada clásicamente, mediante el principio de acción estacionaria, por la integral funcional sobre todas las trayectorias cuánticas posibles, con las amplitudes de probabilidad dadas por su acción, en el cálculo de la probabilidad de transición. La aplicación práctica del método funcional para resolver la dinámica cuántica, sin embargo, no compite bien en general con el método bien desarrollado de resolver una ecuación diferencial como la de Schrödinger.

Si las dos alternativas en el montaje experimental de las dos rendijas son distinguibles, incluso si no son en la práctica distinguidas, la superposición lineal no es operativa. El comportamiento de la partícula es entonces de probabilidades clásicas, pudiendo hablar de su paso por una u otra rendija. La probabilidad de transición a la pantalla sería la suma (incoherente) de las dos probabilidades. Y concluimos que

- (4) la denominada “interferencia con partículas separadas” ha de ser entendida con precisión llamándola “interferencia de las amplitudes de probabilidad para cada partícula” en un experimento de medidas repetidas separadas.

Esta argumentación proclama que el experimento de interferencia de Young de la doble rendija para partículas separadas tiene la misma base conceptual como otros de la plétora de fenómenos cuánticos para “sistemas de dos estados”, con el principio de superposición como guía. Para un sistema ligado, el ejemplo paradigmático del **enlace covalente** del ion molecular H_2^+ sigue el mismo razonamiento: el estado del electrón en la molécula es una superposición lineal de los dos estados atómicos del electrón con cada protón. La simetría entre las dos alternativas asegura que el estado fundamental de este ion molecular (en la aproximación de Born-Oppenheimer) es la superposición simétrica de los dos estados atómicos. La superposición lineal implica una lógica cuántica en la que la frase diciendo que el electrón está “o bien con un protón o con el otro” no tiene sentido, está prohibida. Así

- (5) En el estado fundamental del ion molecular H_2^+ , el estado deslocalizado del electrón con energía definida tiene igual **amplitudes de probabilidad** para los dos estados localizados. El lenguaje misterioso de “el electrón es compartido por los dos protones” en el enlace covalente es meramente un remanente del lenguaje de su onda dual, no su comportamiento físico real.

Históricamente, quizás el ejemplo más clarificador de los conceptos involucrados en un sistema de dos estados es el de la molécula de amoníaco NH_3 . Los dos posibles estados geométricos, con el átomo de nitrógeno a derecha o izquierda del plano de los tres hidrógenos, son dos alternativas para describir la molécula de energía definida E . Esos estados geométricos serían —por simetría bajo paridad— degenerados con energía E_0 . Sin embargo, existe una mezcla “A” entre ellos inducida por efecto túnel cuántico, de modo que el hamiltoniano H del sistema en la base geométrica viene dado por la matriz 2×2

$$H = \begin{pmatrix} E_0 & A \\ A & E_0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Los estados estacionarios con evolución temporal definida que diagonalizan H son los dos estados con simetría izquierda-derecha definida, simétrica o antisimétrica, con igual u opuesta amplitud de probabilidad para los dos estados geométricos. El estado fundamental tiene la simetría de H y los dos estados, fundamental y excitado, rompen la degeneración E_0 de los estados geométricos y son de energías E no degeneradas. Como corolario, la producción de la molécula en uno de los dos estados geométricos conduce al fenómeno de “oscilación de la molécula” con el tiempo entre los dos estados geométricos. El lenguaje preciso para la interferencia izquierda-derecha responsable de la oscilación es

- (6) ¿cuál es la probabilidad como función del tiempo que, habiendo preparado la molécula NH_3 en el estado izquierdo, aparezca en el estado derecho?

Este es un experimento de aparición, que puede predecir el lector. Otra pregunta es la probabilidad de supervivencia de seguir en el mismo estado inicial. Esos fenómenos tienen la misma base conceptual que los experimentos de interferencia espacial, asociados con la superposición lineal de estados. Si tenemos un nitrógeno localizado, su energía no está definida. Si tenemos energía definida, la posición relativa del átomo de nitrógeno no está definida. No hay traza alguna de tener que invocar un lenguaje ondulatorio. Esas propiedades cuánticas son esenciales en el comportamiento de NH_3 en presencia de un campo eléctrico dependiente del tiempo, usando los momentos dipolares opuestos de los dos estados geométricos. La preparación con población invertida del estado energético excitado conduce a la emisión estimulada de radiación de microondas en el máser de amoníaco, creado por primera vez por Charles H. Townes en 1953.

Desde mediados del siglo xx, la física de partículas ha visto la aparición de partículas con grados de libertad internos, identificados como cargas más allá de la carga eléctrica, llamados “sabores”. El primer caso fue la “extrañeza”, necesaria para distinguir el mesón- K^0 de su antipartícula \bar{K}^0 , así como para otras partículas incluyendo bariones. K^0 y \bar{K}^0 , tienen carga eléctrica nula y extrañeza opuesta, mientras el mesón- π^0 no extraño es su propia antipartícula. La extrañeza se conserva en las interacciones fuertes y electromagnéticas y es violada en las interacciones débiles, contrariamente a la conservación rigurosa de la carga eléctrica. Las interacciones débiles mezclan K^0 y \bar{K}^0 . En la base de extrañeza definida, la dinámica del kaón neutro se describe como un sistema de dos estados con un hamiltoniano H como el de la ecuación (2). Ello conduce a dos estados estacionarios con masa y energía definidos por una superposición simétrica (antisimétrica) de extrañezas opuestas en el estado fundamental (excitado). Así, el estado fundamental (excitado) tiene igual (opuestas) amplitudes de probabilidad de K^0 y \bar{K}^0 . El lector habrá notado que, debido a la mezcla, hablamos de dos estados del Kaón neutro en vez de hablar de dos partículas. La superposición de estados de extrañeza opuesta fue introducida por primera vez por Gell-Mann y Pais en 1955.

- (7) La mezcla de extrañeza y la no-degeneración de los dos estados con masa definida predice “oscilaciones del kaón neutro” entre los dos estados K^0 - \bar{K}^0 de extrañeza definida. Ello se debe a la interferencia de las amplitudes de

probabilidad de que un estado de K^0 (o \bar{K}^0) tenga una u otra masa alternativas.

Esas oscilaciones han sido observadas en distintas instalaciones experimentales produciendo, por ejemplo, K^0 . Se inducen por una interferencia que involucra propiedades internas —cargas de sabor— que nada tienen que ver con ondas en el espacio-tiempo. Pero la base conceptual para la interferencia en el kaón neutro y para el experimento de Young de la doble rendija con partículas separadas es la misma: **la superposición lineal de estados con la interferencia de las dos amplitudes de probabilidad**. En el caso de la oscilación del kaón neutro, las amplitudes para tener una u otra masa; en la interferencia espacial, las amplitudes para pasar por una u otra rendija.

Para beneficio del lector, se ha de añadir que la física del kaón neutro posee otros efectos que son “complicaciones esenciales”: i) es inestable con los dos estados de masa y evolución temporal bien definidos teniendo vidas medias muy distintas, así que para tiempos lejanos hay decoherencia desapareciendo la interferencia; ii) regeneración del estado de vida media corta por interacción con la materia ordinaria; iii) la mezcla “A” entre materia (K^0) y antimateria (\bar{K}^0) no es simétrica, por lo que “A” ha de ser compleja con $H_{12} = A$ y $H_{21} = A^*$, encontrándose la primera violación de la simetría materia-antimateria en 1964. Con todo ello, Feynman, Lee y Okun han elevado este sistema de dos estados a ser la joya de laboratorio más preciada de la naturaleza para entender los entresijos del mundo cuántico.

Las tres familias de leptones —electrón, muon y tauón— contienen la correspondiente especie de neutrino con interacciones débiles tan solo. La física de esos tres “sabores” de neutrinos es tan fascinante como desafiante para su observación: la materia ordinaria es (casi) transparente a la propagación de neutrinos. Si no tenemos en cuenta la “complicación esencial” de tener tres sabores —esencial para una posible asimetría entre neutrinos y antineutrinos aún (en 2025) no observada— en vez de dos, tendríamos con los neutrinos otro “sistema de dos estados” entre los estados de sabor neutrino-e y neutrino-mu. De hecho, esta es una buena aproximación para describir el problema de neutrinos solares, emitidos como neutrinos-e en las reacciones de fusión nuclear en el corazón del Sol. Debido a la mezcla de sabores, que nos dicen que los estados de sabor definido son distintos a los estados de masa definida, el lenguaje apropiado de “oscilación del sabor de neutrinos” se aplica a su propagación desde el Sol a la Tierra. Y preguntamos

(8) ¿cuál es la probabilidad de supervivencia de que un neutrino-e producido en el Sol siga siendo un neutrino-e al detectarse en la Tierra?

Bruno Pontecorvo, que había predicho la existencia del segundo neutrino antes de su descubrimiento en 1962, anticipó el “problema de neutrinos solares” en la respuesta al punto (8). Una probabilidad de supervivencia inferior al 100 % para el neutrino-e es predicha con los dos ingredientes mencionados: mezcla con neutrino-mu y no degeneración de los estados de masa y energía definidos. La física de las cargas de sabor es aún un problema abierto en el campo de las partículas elementales y una posible simetría entre los estados de sabor no está establecida. El hamiltoniano H de la ecuación (2) tendrá por tanto elementos de matriz desiguales E_1, E_2 en la diagonal principal en vez de un E_0 común. Tal matriz real y simétrica se diagonaliza mediante una matriz ortogonal

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

con una superposición $\cos \theta \neq \sin \theta$ no máxima en general. El déficit de neutrinos-e observado en 2002, comparado al flujo total llegado desde el Sol, dio una probabilidad de supervivencia de 1/3 y estableció el fenómeno cuántico de la “oscilación del sabor de neutrinos-e solares”. En 1998, la “oscilación del sabor de neutrinos-mu atmosféricos” había sido observada en la llegada de neutrinos-mu producidos en la atmósfera terrestre por las interacciones de rayos cósmicos. Esos resultados implican que los neutrinos tienen masas no nulas, mucho menores que las de los demás constituyentes de la materia. El Premio Nobel de Física de 2015 se concedió a Takaaki Kajita y Arthur McDonald por esos descubrimientos.

Las oscilaciones del sabor de neutrinos han sido también observadas con reactores nucleares terrestres y aceleradores a distintas distancias —hasta el millar de kilómetros— entre su producción y detección. Esos experimentos son hoy el método de explorar cuestiones abiertas sobre las propiedades de neutrinos. La interferencia de amplitudes de probabilidad hace referencia en este caso a estados de sabor, sin relación alguna con propiedades espaciales. De hecho, todos los neutrinos de distinto sabor se propagan en la misma dirección espacial y no hay posibilidad de hablar el lenguaje de ondas duales en el espacio ordinario.

Conclusión

Con esta discusión conceptual de la interferencia de amplitudes de probabilidad que aparecen en la física de una variedad de sistemas cuánticos de dos estados descubrimos que hay un origen fundamental común: la superposición lineal de estados. Las propiedades alternativas no marcadas presentes en la superposición pueden ser espaciales o internas, sin necesidad de invocar una dualidad misteriosa e inconsistente para explicar el caso de la interferencia espacial. Las ondas satisfacen el

principio de superposición en el espacio-tiempo, pero no es el que aparece en la física cuántica. La comparación de los distintos casos discutidos en los puntos del (1) al (8) dice que el dilema histórico para la interferencia no es entre partículas y ondas. La interferencia es entre amplitudes de probabilidad de tener propiedades alternativas no marcadas presentes en la superposición de estados cuánticos. **Amplitud de probabilidad** es el concepto fundamental. En la lógica cuántica, gracias a la superposición lineal de estados, las cosas no son necesariamente una u otra.

El autor no pretende erradicar un lenguaje tan enraizado en la literatura sobre física cuántica. Pero la conclusión de este análisis es llamar la atención que, después de 100 años del desarrollo de la teoría más precisa sobre la respuesta de la naturaleza cuando es observada, el misterio de la dualidad onda-partícula asociado a su lenguaje no tiene una correspondencia conceptual con la realidad física.

Otros misterios del mundo cuántico asociados al papel de la observación en la descripción

de la realidad no están abordados en este análisis y persisten en los fundamentos de la física cuántica.

Agradecimientos

El autor agradece a Francisco Botella, Catalina Espinoza y Arcadi Santamaría las muchas discusiones científicas sobre el tema de este artículo. La investigación ha sido financiada por los proyectos CIPROM/2021/054 (Prometeo, Generalitat Valenciana), PID2023-151418NB-I00 (MCIU/AEI/10.13039/501100011033/ FEDER, UE) y CEX2023-001292-S (SO, MCIU/AEI).

José Bernabéu

Dpto. de Física Teórica, Universidad de Valencia, e IFIC, Centro Mixto UV-CSIC, Burjassot, Valencia

