
UN VISTAZO AL MUNDO CUANTICO: EL EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA

CARLOS MARIO IDARRAGA MONTOYA

INTRODUCCION

El mundo en el cual nos sumergiremos a partir de este momento, no es un mundo ordinario, y a pesar de estar frente a nosotros en la experiencia cotidiana, no nos es posible evaluarlo con base en esa experiencia. Es un universo donde nuestra intuición y nuestra lógica no nos sirve de nada, y la primera sensación que se siente es de asombro y luego de rechazo ante una verdad experimental que se niega a seguir los caminos teóricamente trazados y preparados por una cantidad de estudiosos de otras épocas, todos los cuales eran, por lo menos en apariencia, cuerdos.

Ahora invito al lector a "dar un vistazo" a ese mundo, a que comparta el desespero y el asombro que sintieron los físicos de principio de siglo ante el "galimatías experimental" que surgió cuando intentaron conocer la realidad de la materia que compone el universo en que vivimos. Hombres como Niels Bohr, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger y muchos otros intentaron, durante buena parte de su vida, darle piso a una teoría que sirvió para llegar al mundo tal como lo conocemos actualmente. Porque el desarrollo tecnológico que ha logrado el hombre en el último siglo, culminando con la odisea del espacio, fue gracias a esa teoría, tan compleja que el conocimiento que se tiene de ella, después de

tantos años y sacrificios, es aún fragmentario, y tan sencilla que sólo se basa en el estudio de un "pedacito": el cuanto.

¿COMO ES ESE MUNDO?

El experimento que muestra, mejor que ninguno, la forma como trabaja el mundo de "lo muy pequeño", es el llamado "de doble rendija" el cual pasaremos a describir a continuación:

Imaginemos una pantalla de cualquier clase con dos agujeros; éstos pueden ser redondos o largos y estrechos, a la derecha de esta pantalla se coloca otra que servirá de detector. Si el experimento es con luz, la pantalla detectora puede ser una placa fotográfica o una pared blanca; si es con electrones se le colocará un detector adecuado distribuido en toda la pantalla, o un detector móvil, o lo que sea que sirva al propósito; los detalles no importan como sí el resultado.

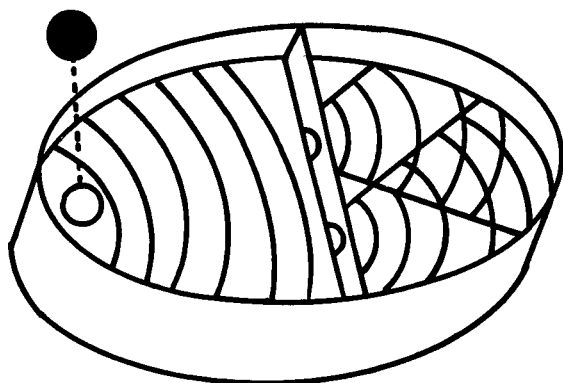
A la izquierda se colocará una fuente de luz o de electrones, como una bombilla para el primero o un cañón de electrones para el segundo, y ahora viene la pregunta: ¿qué sucede cuando los fotones o los electrones, según sea el caso, atraviesan

CARLOS MARIO IDARRAGA MONTOYA. Profesor del Departamento de Producción de la Universidad EAFIT.

los agujeros y llegan a la pantalla detectora? Para evaluar mejor lo que sucede, apartémonos por un instante del mundo cuántico y veamos qué ocurre en la realidad cotidiana (el mundo de "los grandes"):

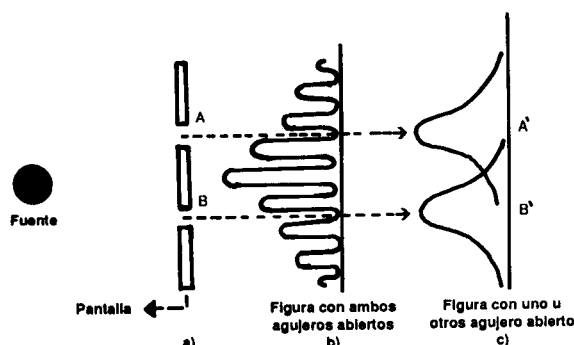
Simulemos el experimento con agua, y la fuente puede ser una piedra que se deja caer en el estanque en reposo (o algo que produzca vibraciones de la misma amplitud y a un intervalo de tiempo constante), tal como lo muestra la Figura 1.

FIGURA 1
Experimento de la doble rendija en un tanque con agua



Las ondas se dispersan a través de los agujeros y su intensidad forma una superficie como crestas y valles, donde el máximo se obtiene en los puntos equidistantes de los dos agujeros, pero la intensidad decrece enormemente a ambos lados de los máximos, donde las ondas se compensan entre sí, proporcionando una figura con máximos y mínimos que se van alternando hasta atenuarse por completo (Figura 2).

FIGURA 2
Formas de onda posibles de obtener en el experimento de la doble rendija



Si se tapa un agujero se observa una figura simple. Las ondas grandes aparecen en la zona más próxima al agujero y a ambos lados la amplitud es menor; si se cambia de agujero se obtiene idéntico resultado: esto es lógico, debido a que cuando ambos agujeros están abiertos, tenemos dos ondas que evidentemente van a interactuar entre sí, dando como resultado la figura de interferencia mostrada (Figura 1b), en la cual los máximos suceden porque ambas ondas llegan en fase al detector, y los mínimos porque llegan desfasadas 180°. (No se extrañe el lector por lo que hemos llamado "obvia interacción" entre ambas ondas; una onda es un fenómeno que puede "tocar" amplias regiones de un espacio dado, es "algo" disperso). Cuando una sola onda actúa (o sea cuando se ha tapado un agujero), no tiene sentido hablar de interferencia, y por tanto la figura no tiene las oscilaciones debidas a los máximos y mínimos alternados.

La energía que transporta la onda, o su intensidad, es proporcional al cuadrado de su altura o amplitud, y podemos por tanto escribir (despreciando cualquier posible constante de proporcionalidad):

$$I + H^2 \quad (1)$$

I : Intensidad de la onda
H : Altura de la onda

El sentido común nos indicaría entonces erróneamente, que la intensidad de la onda formada con ambos agujeros abiertos serían igual a la suma de las intensidad de las ondas debidas a cada agujero actuando por separado, y por tanto escribiríamos:

$$W = H_A^2 + H_B^2 \quad (2)$$

pero esto no es lo observado en la onda respectiva; la energía de la onda debida a los dos agujeros es:

$$W = (H_A + H_B)^2 = H_A^2 + H_B^2 + 2 H_A \cdot H_B = H_A^2 + H_B^2 + 2 H_A \cdot H_B \cos \phi \quad (3)$$

donde el último sumando representa la contribución a la interferencia de las dos ondas, y como H_A y H_B pueden ser positivas o negativas, ello produce los máximos y mínimos de la figura observada (es importante tener en cuenta que el término positivo se asocia al fenómeno de las dos ondas en fase, y el término negativo al defase de 180° entre las mismas).

Ahora imaginemos un experimento semejante, pero usando partículas macroscópicas (del mundo cotidiano), como por ejemplo balas disparadas por un arma de fuego (Figura 3).

Con un solo agujero abierto, la distribución de las balas sería análoga a la variación de intensidad de la onda de agua debida a un solo agujero; pero con ambos agujeros abiertos la distribución sería exactamente la suma de los efectos individuales: un máximo en la zona que equidista de los dos agujeros y una suave cola decreciente hacia ambos lados del máximo, sin efectos de interferencia (Figura 4).

Claramente se observa que la suma de estas dos figuras da como resultado la Figura 3.

No debe parece ilógico al lector, que el máximo de proyectiles se localice en el punto equidistante de los dos agujeros, cuando el experimento se realiza

con ambos abiertos. Esto es simplemente el resultado de superponer los efectos individuales observados cuando se realiza el experimento con un solo agujero abierto a la vez, en el cual es obvio que la mayoría de los proyectiles se encontrará casi frente al agujero en cuestión (el "casi" es debido al ángulo entre la ametralladora y el hueco), y como es factible que alguno rebote en el borde del agujero y cambie de trayectoria, se establece una zona donde "probablemente" se situarán todos los proyectiles disparados en cada una de las dos etapas del experimento (para un agujero y luego para el otro).

Es también lógico pensar que no hay interferencia porque "no es posible" que un proyectil alcance a otro que salió primero e interactúen entre sí antes de llegar a la pared detectora, debido a que todos parten del arma a la misma velocidad, y además no se fraccionan: siempre llegan enteros.

FIGURA 3

Distribuciones observadas en el experimento de doble rendija usando partículas macroscópicas:
 a) Distribuciones obtenidas con ambos agujeros abiertos,
 b) Distribuciones obtenidas tapando alternadamente cada agujero.

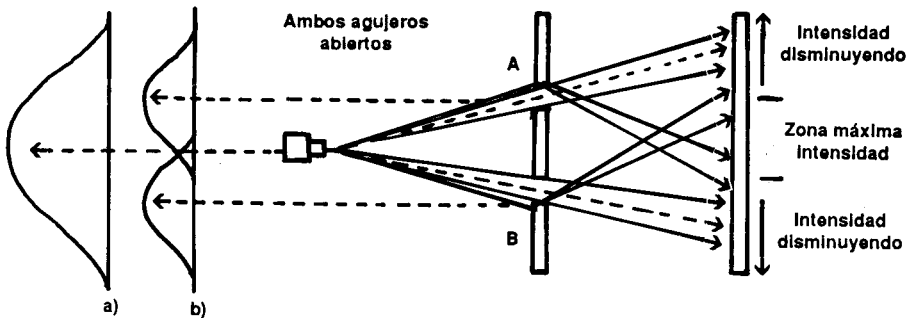
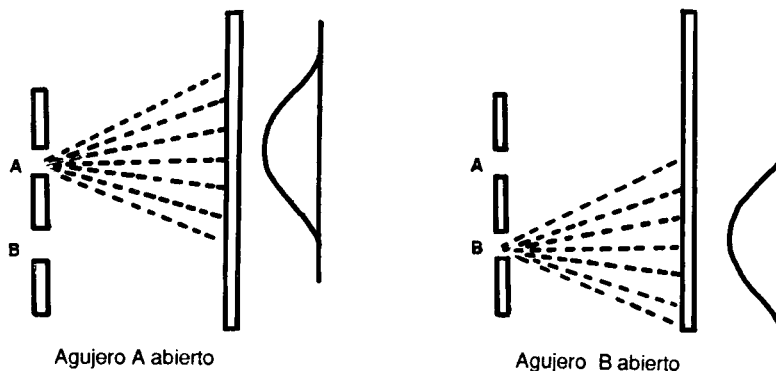


FIGURA 4

Formas de onda individuales obtenidas en el experimento de doble rendija



¿Qué significa lo anterior? Realizamos el experimento primero con ondas y luego con corpúsculos y el resultado fue distinto en ambos, o sea:

Para el agua:

$$I = (H_A + H_B)^2 = H_A^2 + H_B^2 + 2H_A \cdot H_B \quad (4)$$

Para las balas:

$$I = H_A^2 + H_B^2 \quad (5)$$

¿Qué pasará si usamos luz en vez de agua y electrones en vez de balas? ¿Pasará lo mismo? ¿Son los electrones ondas o corpúsculos?

Si se realiza el experimento con luz se obtiene la figura de interferencias igual que en el experimento con ondas, lo cual nos hace pensar que la luz es una onda; aunque su representación visual varíe con respecto a las ondas de agua, el resultado es análogo: un máximo central en el punto equidistante de los dos agujeros, seguido de máximos y mínimos que se van alternando y disminuyendo de amplitud, lo cual se verá, en la pared detectora, como un espectro de franjas claras y oscuras en forma alternada, en donde las primeras van disminuyendo de intensidad hasta llegar al nivel de oscuridad.

Pero si realizamos el experimento con electrones ¿qué pasaría? La "inercia mental" que se tiene sobre un electrón es que es una "bolita dura", un corpúsculo clásicamente hablando, por tanto la lógica nos indicaría esperar un resultado idéntico al del experimento con balas; sin embargo, la figura que se obtiene es análoga a la figura con interferencia descrita para la onda de agua o de luz. Aún más, si el cañón de electrones se logra controlar a tal punto que sólo dispare un electrón cuando se tenga certeza de que el anterior ya haya llegado a su destino, y se añade un detector por emisión de luz o por sonido a la pantalla detectora, de modo que supiéramos con certeza cuándo ha llegado un electrón, tendríamos la seguridad que lo que sale del cañón (lo que sea que salga) llega entero a la pared detectora, o sea que llega en "bultos", no fraccionados, y por tanto lo lógico sería pensar que si es un "bulto" completo lo que realiza el viaje hasta la detección, sólo pudo pasar por uno de los agujeros, no por ambos, dando por lógico resultado una figura sin interferencias. Sin embargo, la figura obtenida es la misma que para el experimento con luz, con máximos y mínimos alternados.

Pero ¿cómo es esto posible? Una onda puede pasar por dos agujeros a la vez, ¿una onda es algo disperso! Pero ¿cómo puede un electrón hacer lo mismo? ¿No es acaso una partícula? ¿No es lógico pensar que cada electrón pase por un agujero o por el otro pero no por ambos a la vez? La solución del problema en conjunto fue propuesta por el físico teórico Max Born, y se basa en la función U que es el centro de la teoría ondulatoria propuesta por el físico alemán Erwin Schrödinger; si U es una onda, no es raro que produzca una figura con interferencia. Debido a que se puede considerar a U como la amplitud y U^2 como la energía asociada o intensidad, la figura de difracción del experimento con doble rendija sólo es la representación de U^2 (U se verá más adelante como la función de onda asociada a una partícula y U^2 como la probabilidad de encontrar dicha partícula en un punto determinado), que representa la probabilidad de encontrar un electrón en un sitio determinado.

Lo anterior quiere decir que cuando salen todos los electrones del cañón y atraviesan los agujeros, la figura que se observa es la función de probabilidad que sirve para situar, estadísticamente, dónde pueden estar los electrones disparados. Estamos diciendo entonces que la figura obtenida no fue debida al electrón en sí, sino a su función de onda asociada, pero eso suena como un poco incoherente y carente de piso físico, ¿no le parece? Además, no nos dice que le pasó a cada electrón. En un nuevo intento por resolver el problema, usaremos la interpretación que el físico danés Niels Bohr le dió al experimento y de paso se hará algo más clara la idea de Born.

Pero ¿cómo es esto posible?
Una onda puede pasar por dos agujeros a la vez, ¿una onda es algo disperso! Pero ¿cómo puede un electrón hacer lo mismo?
¿No es acaso una partícula?
¿No es lógico pensar que cada electrón pase por un agujero o por el otro pero no por ambos a la vez?

Es fácil entender que una onda pase simultáneamente por los dos agujeros y, por tanto, forme una figura de interferencia como la descrita anteriormente, pero un electrón aún se considera una

partícula y, por tanto, es irresistiblemente lógico pensar que va a pasar por un agujero o por el otro ¡pero no por ambos!; si se tapa uno de los agujeros se obtiene la figura esperada para los experimentos hechos con un agujero, es decir, el electrón se comporta como las balas, pero si le damos otra "opción", otro camino posible de llegar a la pared detectora, los electrones abandonan la lógica, pierden su condición de partícula y se manifiestan como una onda, y todo porque el observador que realiza el experimento desconoce por cuál de los dos agujeros pasó el electrón. Cuando sólo hay un agujero no hay otra opción y el observador sabe con certeza que por allí pasó el electrón, pero con ambos agujeros abiertos parece como si el electrón que comienza su viaje "supiera" que tiene varias opciones para realizar su trayectoria hasta la pared detectora, y esa incógnita se manifiesta en la figura de interferencia mostrada, que no es otra cosa que la representación de la función de probabilidad U^2 .

Ahora se puede mejorar el experimento hasta lograr colocar un detector en cada agujero, de tal manera que el observador sepa con certeza por cuál agujero pasa cada electrón en tránsito hacia la pared detectora. En este caso los electrones se comportan como las partículas del mundo cotidiano y la figura en la pared detectora es análoga al caso de las balas; ahora se detectará un electrón pasando por un agujero o por el otro, pero no por ambos. El mundo cuántico nos dice así, con su elocuencia característica, que los electrones no sólo "saben" si ambos agujeros están abiertos, sino también si están siendo observados o no y ajustan su comportamiento en consecuencia.

En términos de las probabilidades de Born, el electrón se ve forzado, a causa de la observación, a escoger una línea de acción entre varias opciones. Existe cierta probabilidad que pase por un agujero y otra equivalente que lo haga por el otro; la interferencia de las probabilidades genera la figura de interferencia descrita. Si se detecta el electrón, éste sólo puede estar en un sitio y esto modifica la distribución de probabilidades en su evolución posterior debido a esa certeza; para este electrón en cuestión, se sabe por cual agujero pasó, lo cual lo logró el observador colocando los detectores; pero si no se logra saber cuál trayectoria fue elegida, o sea, si no es observado ¡ni la naturaleza misma sabe por cuál agujero pasó el electrón!

Nos vamos acercando a una conclusión que está en franca rebeldía con la física clásica (la que rige

al mundo macroscópico) y con nuestra intuición. Según lo descrito anteriormente en el mundo de la mecánica cuántica sólo se puede hablar sobre lo observado en un experimento. Si la observación se interrumpe, carece de sentido hablar o extrapolar conclusiones sobre el mismo experimento, es decir que el aparato, los electrones y el observador tienen valor como un todo. No se puede afirmar que un electrón pasa por uno de los agujeros si éstos no están siendo observados. Como dice el físico teórico Richard Feynman: "Concluir que el electrón pasa bien por uno o por otro agujero cuando no se le está observando, es originar un error". Es el acto de observar el sistema físico lo que lo obliga a seleccionar una de sus opciones.

La interpretación de Bohr (llamada también interpretación de Copenhague) para el experimento con los dos agujeros sin detector es como sigue: "la interferencia de las probabilidades puede interpretarse en términos del electrón que, tras abandonar el disparador, se 'desvanece' desapareciendo de la vista, y es sustituido por una colección de electrones 'fantasmas', cada uno con un camino diferente hasta llegar a la pantalla detectora. Los 'fantasmas' interfieren entre sí y cuando se observa la detención de los electrones en la pantalla, se encuentran las huellas de esta interferencia; incluso si se trabaja con un solo electrón real en cada instante. Sin embargo, esta distribución de electrones fantasmas sólo da cuenta de lo que pasa cuando no se observa; cuando se hace, todos los fantasmas, excepto uno, desaparecen y uno de esos fantasmas se materializa como un electrón real".

Recordando la interpretación de Born, la cual se basa en la función de onda de Schrödinger (U), es como si a cada electrón fantasma se le asignara una función de onda, y cuando el electrón es sometido a observación, sabemos que todos los electrones se "condensan" en uno solo, lo cual sería equivalente a la desaparición de todas las ondas de probabilidad, con excepción de una, la cual caracteriza al electrón "condensado" real y al desaparecer las funciones de onda, desaparece la interferencia; lo anterior recibe el nombre de Colapso de la función de onda.

En el mundo de la mecánica cuántica sólo se puede hablar sobre lo observado en un experimento.

“Nada es real salvo que sea observado, y cesa de ser real cuando se detiene la observación”. Y ¿por qué el universo se comporta así? como dice el mismo Feynman: “no tenemos la menor idea”.

Todo lo anterior está vivo en la realidad experimental diaria del estudiante de Ingeniería Electrónica, del Ingeniero y de muchos profesionales que usan sin saber lo que el físico teórico John Gribbin ha llamado “el recetario cuántico”. Sin embargo ni unos ni otros saben (o si lo saben, prefieren olvidarlo) que lo que tan exactamente manipulan se basa en electrones fantasmas que viajan por el mundo cuántico, sin ser observados y que al ser sometidos a observación se “condensan” en un electrón real, el cual se “desdoblará” nuevamente en una cantidad de electrones fantasmas cuando cesa la observación, o sea, como dice Feynman: “nada es real salvo que sea observado, y cesa de ser real cuando se detiene la observación”. Y ¿por qué el universo se comporta así? como dice el mismo Feynman: “no tenemos la menor idea”.

BIBLIOGRAFIA

- Einsberg, Robert. Física cuántica. New York: Willey, 1974.
- Einsberg, Robert. Física de Partículas. México: Limusa, 1978.
- Feynman, Richard. Lectures on Physics.
- Gribbin, John. En busca del gato de Schrödinger. Madrid: Salvat, 1986.
- Kittel, Charles. Física cuántica. 4a. ed. New York, 1967.
- Marcelo Alonso, Edward J. Finn. Física, fundamentos cuánticos y estadísticos. Bogotá, Fondo Educativo Interamericano, 1986.
- Oldenberg, Otto. Introducción a la Física Atómica y Nuclear, 3a. ed. México: McGraw-Hill Book, 1966.
- Slater, John C. Física cuántica. New York: Dover, 1955.
- Trefil, James S. El momento de la creación. Madrid: Salvat, 1986.
- Wichmann, Eyvin. Física cuántica. New York: McGraw-Hill Book, 1967.