

Naturaleza de los objetos cuánticos

Los conceptos de la física clásica

Para la física clásica (precuántica) todo sistema físico puede entenderse a partir de dos nociones fundamentales: la de onda, o campo, y el de partícula, o corpúsculo. Son dos conceptos teóricos elaborados a partir de una larga experiencia acumulada de siglos sobre los objetos que constituyen lo cotidiano, hasta que la experimentación física a finales del siglo XIX y principios del XX los haya puesto en una difícil tesitura y reemplazado por un concepto nuevo.

El concepto de partícula es una idealización de una clase de objetos reales, susceptible de moverse en el espacio definiendo una *trayectoria*. Fruto de ello, a cada partícula se la asocian unas magnitudes: *energía, cantidad de movimiento y momento angular*.

El otro concepto clave es el de onda, o campo. Como el anterior, idealiza ciertos fenómenos reales. Algunos son de fácil visualización en términos de desplazamiento y medio de propagación, como las olas sobre la superficie del agua, mientras que para otros no es así, como es el caso del campo electromagnético. La noción de campo contrasta con la de partícula en que es *continua*, frente al carácter discreto de la segunda. Está definida **en todo punto del espacio-tiempo** mediante una función, $\Phi(x, t)$, llamada amplitud de onda. Un campo es un fenómeno **no localizado**.

Es con la alternancia de los conceptos de campo y partícula que la física clásica describe los fenómenos naturales. Por ejemplo, la interacción entre partículas cargadas. Más que una influencia a distancia, se la concibe como mediatizada por un campo. Una de las partículas emite un campo que se propaga y actúa sobre la otra. Esta segunda hace exactamente lo mismo que la primera. Ambas son fuentes de un campo. En lugar de hablar de simples fuerzas a distancia entre partículas, se habla de emisión y propagación de un campo creado por cada una de las partículas y por la fuerza ejercida por esos campos sobre las otras partículas. El campo viene descrito por las ecuaciones de Maxwell y la fuerza sobre cualquier partícula por la fuerza de Lorentz. Son todas leyes locales, definidas en todo el espacio y no solo sobre las partículas.

Los nuevos objetos

Esta dicotomía partícula-campo de la física clásica lleva a conflictos en una serie de situaciones en las que un fenómeno reconocido como ondulatorio tiene ciertas propiedades discretas, o que objetos etiquetados como partículas tienen comportamientos incomprensibles dentro de la mecánica clásica.

Uno de estas situaciones aparece en la difracción de la luz. Conocemos el fenómeno de difracción en nuestra experiencia diaria cuando una onda incide sobre un obstáculo con una apertura, como por ejemplo en los casos que nos muestra la figura 1.

Figura 1a difracción de la marea a través de rocas

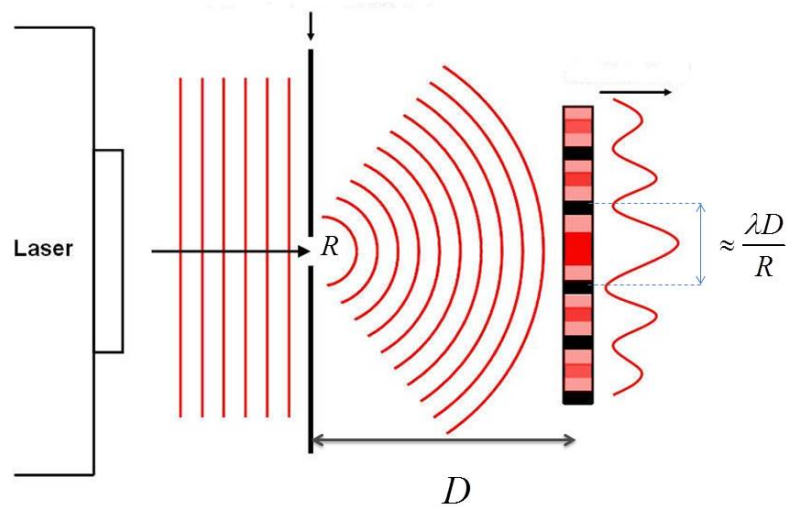


Figura 1b Difracción de olas a través de la bocana de un puerto



Para entender lo que sucede en el caso de la luz, imaginemos (Figura 2) una luz monocromática, de longitud de onda λ , que incide sobre una pantalla opaca que dispone de una apertura de anchura R (para mayor simplicidad en la visualización, imaginemos que todo sucede en un plano). Detrás de la primera pantalla, a una distancia D , hay una segunda pantalla de observación (placa fotográfica, por ejemplo). Mientras R sea suficientemente grande, veremos sobre la pantalla de observación la simple proyección de la fuente a través de la apertura. A medida que reducimos el valor de R (mediante un diafragma) empieza a aparecer sobre la placa una alternancia de franjas brillantes y oscuras. Estas franjas son manifestación del principio de superposición y invaden toda la pantalla de observación cuando $R \sim \lambda$. El tamaño de la franja central (la más luminosa) es del orden de $\lambda D / R$.

Figura 2 Experimento de difracción

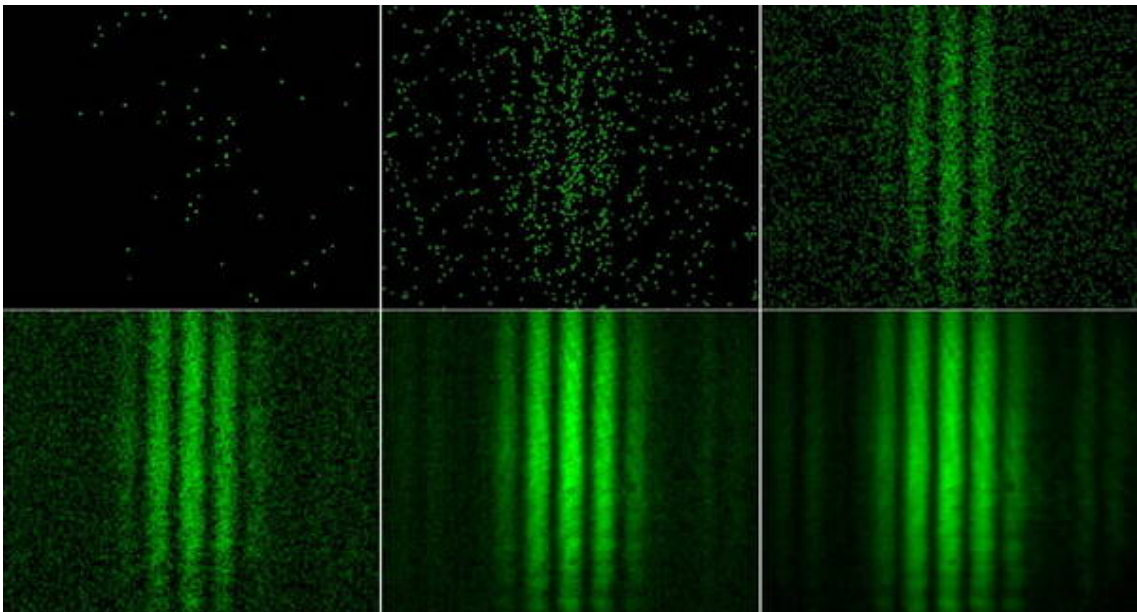


La luminosidad de las franjas (y esto es importante) es tanto mayor cuanto mayor sea el tiempo de exposición de la placa fotográfica.

Hasta ahora, todo es muy clásico y estudiado en óptica geométrica. Reduzcamos ahora la potencia de la fuente. Las franjas no desaparecen, lo que confirma que son resultado del principio de superposición. Por supuesto, la luminosidad de las bandas disminuye. Sin embargo, al examinar más de cerca las bandas cuando se va reduciendo la potencia, se observa que las bandas luminosas están, en realidad, formadas de la agregación de pequeños puntos luminosos discretos.

Esta constitución de las bandas puede verse mejor si hacemos si visualizamos la secuencia temporal de formación de estas a potencia de emisión muy baja. La figura 3 indica, de izquierda a derecha y de arriba abajo, la secuencia de formación de las bandas. Vemos que estas van formándose punto a punto, de forma a configurar las bandas cuando el número de puntos es suficientemente alto: la energía luminosa llega a la placa grano a grano. En otras palabras, cuando reducimos suficientemente la potencia de emisión el fenómeno pierde su apariencia continua y el concepto clásico de onda su sentido.

Figura 3 Secuencia de formación de una figura de difracción



Sabemos ahora que estos “granos” no son más que fotones. La fuente manda N fotones por unidad de tiempo, sea un total de $N\tau$ fotones si τ indica la duración total del experimento. Para que las franjas adquieran una apariencia continua, el número total de fotones empleados debe ser muy grande:

$$N\tau \gg 1 \tag{1}$$

La condición (1) marca la validez del concepto clásico de onda. Veamos que coincide con el criterio que hemos desarrollado en términos de una acción característica del sistema. Esta

acción debe calcularse a partir de parámetros clásicos conocidos del sistema: P , potencia de la fuente; R , tamaño de la apertura; λ , longitud de onda; τ , tiempo de duración de la experiencia; c , velocidad de la luz. La energía transportada a lo largo del experimento es $P\tau$, a la que corresponde una cantidad de movimiento $P\tau/c$. Recordemos que la acción es [cantidad de movimiento] X [longitud/distancia]. Una longitud característica del experimento es, R , el tamaño de la rendija. Luego:

$$A = \frac{P\tau R}{c} \quad (2)$$

Dijimos que la difracción aparece cuando la longitud de onda de la luz incidente se hace del orden de R . La acción característica será:

$$A = \frac{P\tau R}{c} \cong \frac{P\tau\lambda}{c} = \frac{2\pi P\tau}{ck} \cong \frac{P\tau}{ck} = \frac{P\tau}{\omega}$$

Recordemos que esta acción debe compararse al valor de la constante de Planck, \hbar . Como la potencia es el número de fotones por unidad de tiempo, N , multiplicado por la energía por fotón, $\hbar\omega$, tenemos que el límite clásico debe cumplirse cuando:

$$\frac{N\hbar\omega\tau}{\omega} \gg 1$$

O $N\tau \gg 1$, que coincide con el criterio que llevó a (1).

Los nuevos conceptos

En el experimento anterior la noción clásica de onda encuentra sus limitaciones cuando el número de fotones incidente es reducido, sin que por ello los fotones puedan ser considerados enteramente como partículas clásicas puesto que la figura de difracción, con alternancia de bandas luminosas y oscuras, no desaparece en ese límite (aunque no sea simple de reconocer).

Cuando la acción característica del sistema es del orden de \hbar debemos abandonar la idea de que un objeto es *exclusivamente* partícula o *exclusivamente* onda. Sin embargo, no por ello es válida la afirmación popular de la *doble naturaleza* de los objetos cuánticos: que **son simultáneamente** onda y partícula; **afirmación falsa** puesto que ambos conceptos se excluyen. Debemos reconocer que nos enfrentamos a objetos de nuevo cuño y a nuevos conceptos para describirlos, teniendo en cuenta que la teoría cuántica no reconocerá más que un único tipo de objetos para los cuales los conceptos excluyentes entre sí de onda o partícula no serán válidos más que en la aproximación clásica ($A \gg \hbar$).

¿Cómo hemos de describir estos nuevos objetos? Pensemos que su *comportamiento* (no su naturaleza) manifiesta simultáneamente características que, en términos clásicos, son bien propias de las partículas bien propias de las ondas. Por lo tanto, los nuevos conceptos que hemos de construir para describir su comportamiento, deberán “enlazar” con los conceptos de clásicos correspondientes a las partículas y a las ondas, sin por ello quedar reducidos a una u otra de las descripciones clásicas.

La ecuación de Planck-Einstein, $E = \hbar\omega$, que nos indica la energía que cada fotón transporta, liga un concepto corpuscular, la energía, con uno ondulatorio, la frecuencia o pulsación, a través de la constante estrictamente cuántica \hbar . Es una relación puramente cuántica y caracteriza un objeto que, repetimos, **no ni una partícula ni una onda**. La relación de Planck-Einstein *importa* de la física clásica las nociones de energía y frecuencia, y las liga a través de la constante de Planck, formando un nuevo concepto que podríamos denominar **energía-pulsación-cuántica**, que solo en el límite clásico puede identificarse con los conceptos clásicos: energía o pulsación.

Vayamos un poco más lejos en la argumentación empezada con la relación de Planck-Einstein. Fijémonos en el hecho de que los conceptos que liga, energía y pulsación, están asociados al tiempo, o mejor dicho, a la evolución temporal de los sistemas físicos. Desde un punto de vista clásico, asociamos a la invariancia por traslación en el tiempo de un sistema físico la conservación de una magnitud: la energía. De la misma forma, la pulsación está asociada a una onda armónica que, por naturaleza, es invariante a traslaciones a lo largo del eje del tiempo. Luego la relación de Planck-Einstein está, en cierto modo, relacionada con el principio de invariancia de las leyes de la física por traslación en el tiempo. Hemos establecido una especie de **principio de correspondencia** entre las físicas clásica y cuántica que debería extenderse a las otras simetrías fundamentales de la física.

La cantidad de movimiento, \mathbf{p} , es la cantidad que la física clásica asocia, mediante su conservación, a la invariancia por traslación en el espacio. Del mismo modo, el vector de onda, \mathbf{k} , está asociado a la dependencia espacial de un determinado armónico, y este, sabemos, es invariante por traslación espacial. El saldo es inmediato: si al tiempo le corresponde la relación $E = \hbar\omega$, podemos lanzar la hipótesis de que al espacio le corresponda la relación:

$$p = \hbar k$$

Esto es lo que hizo en su día de Broglie. En una dimensión, $|\mathbf{k}| = k = 2\pi/\lambda$, $|\mathbf{p}| = p$, por lo que tendremos:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Que es la forma más conocida de la relación de de Broglie.