

Hipótesis de de Broglie. Experimento de Davisson y Germer.

A continuación, vamos a ver que la dualidad onda-corpúsculo no ocurre sólo para la radiación electromagnética sino que es algo universal. El siguiente paso en el establecimiento de la física cuántica lo dio Louis de Broglie, en lo que se conoce como la hipótesis de de Broglie.

En su tesis doctoral, de Broglie propuso que se podrían unificar los comportamientos de la radiación y la materia si no sólo asociamos propiedades corpusculares a la radiación, si no que también asociamos propiedades ondulatorias a las partículas. De esta forma, podríamos construir una nueva teoría más universal que sirviera para describir tanto la radiación como la materia. Podemos asociar propiedades ondulatorias a las partículas invirtiendo las relaciones que asocian propiedades corpusculares a las ondas. Estas propiedades son la energía y cantidad de movimiento que asignamos a los fotones, que son:

$$E = h\nu \quad p = \frac{h\nu}{c}$$

Vamos a escribir estas relaciones de otra forma:

$$E = \frac{h}{2\pi} 2\pi\nu = \frac{h}{2\pi} \omega \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k$$

donde ω y k son la frecuencia angular y número de ondas respectivamente. Podemos definir una nueva constante $h/2\pi$:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Esta constante, que hemos notado como \hbar , se denomina constante de Planck reducida y su valor es $1.05457 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$. Hoy en día la constante que se utiliza habitualmente es \hbar en lugar de h . Por tanto, las relaciones anteriores quedan:

$$E = \hbar\omega \quad p = \hbar k$$

Podemos dar un paso más si tenemos en cuenta que la cantidad de movimiento es una magnitud vectorial, cuya dirección será la de propagación de la onda. El vector de onda, \vec{k} , es un vector de módulo k y cuya dirección es la de propagación de la onda, de modo que podemos escribir las relaciones anteriores finalmente como:

$$E = \hbar\omega \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}$$

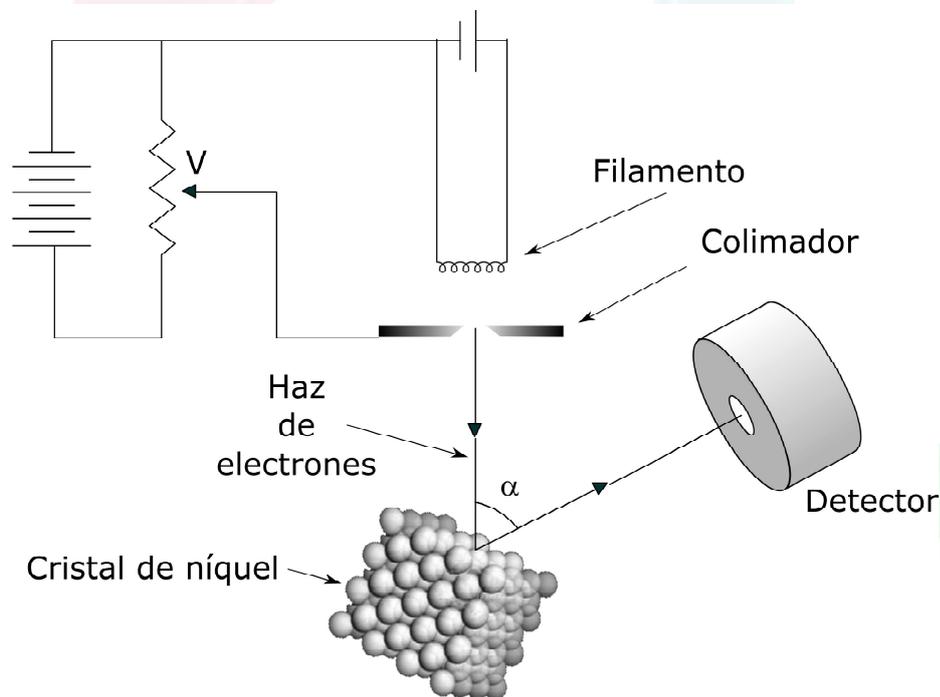
Si las invertimos podemos asociar una frecuencia angular y un vector de onda a una partícula cuya energía sea E y cuya cantidad de movimiento sea \vec{p} , de modo que:

$$\omega = \frac{E}{\hbar} \quad \vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$$

Estas dos ecuaciones se denominan las relaciones de de Broglie-Einstein. A la tesis de de Broglie se le pusieron objeciones alegando que, aún siendo muy interesante, no tenía

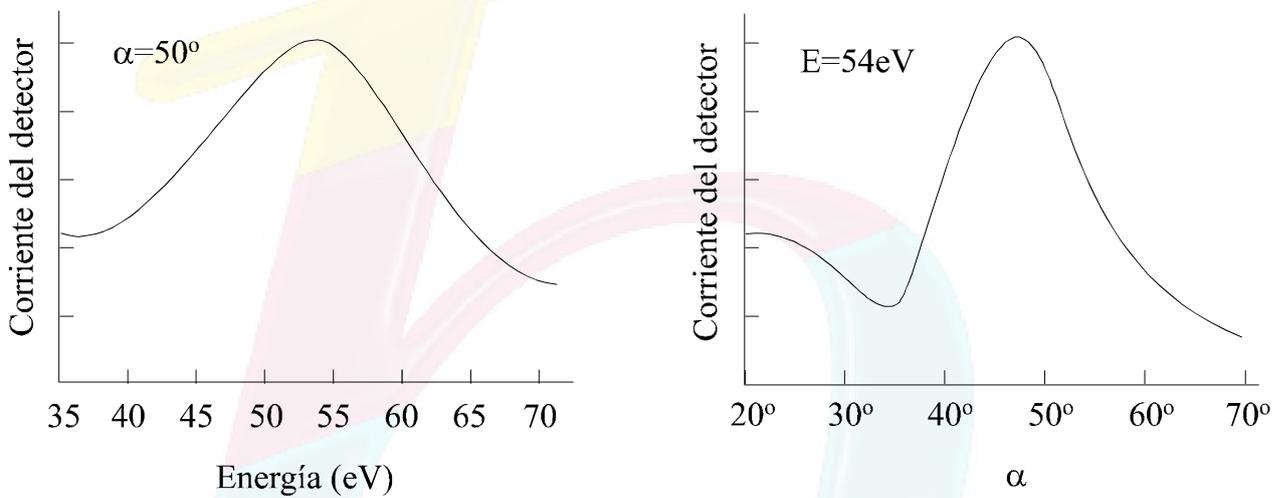
ningún fundamento real, ya que nunca se habían observado efectos ondulatorios para las partículas. La razón es la siguiente. La longitud de onda asociada con una partícula de acuerdo con la hipótesis de de Broglie será $\lambda = h/p$. Para un cuerpo macroscópico la cantidad de movimiento es grande y si consideramos además el valor tan pequeño de la constante de Planck, obtenemos que la longitud de onda asociada a una partícula es tan pequeña que no permite observar fenómenos ondulatorios. Para observar la interferencia de la luz, como en el experimento de Young, necesitamos que la distancia entre las rendijas sea del mismo orden de magnitud que la longitud de onda.

Sin embargo, con una partícula de masa muy pequeña como un electrón podríamos en principio observar su naturaleza ondulatoria, ya que podemos conseguir que tenga una cantidad de movimiento pequeña y, por tanto, puede tener una longitud de onda apreciable como para permitir observar fenómenos como la interferencia o la difracción. Lo que necesitamos es un dispositivo de dimensiones similares a la longitud de onda del electrón. Davisson y Germer pusieron de manifiesto la naturaleza ondulatoria de las partículas al observar el fenómeno de la difracción con electrones, haciendo incidir un haz de electrones, todos de la misma energía, sobre una red cristalina de Níquel, obteniendo un patrón de difracción similar al que se observa con la radiación electromagnética. Davisson y Germer analizaron el patrón obtenido para los electrones como si se tratara de una reflexión de Bragg con una onda electromagnética, obteniendo un valor de la longitud de onda que coincidía con el que predicen las relaciones de de Broglie Einstein. La siguiente figura muestra un esquema del dispositivo experimental utilizado por Davisson y Germer.



El filamento produce electrones por emisión termoiónica (este mismo fenómeno es el que se utiliza en un osciloscopio para producir un haz de electrones que podemos ver cuando

colisiona con la pantalla que contiene fósforo). Los electrones son acelerados mediante una fuente de tensión variable. Los electrones que atraviesan el colimador tienen todos aproximadamente la misma energía y misma cantidad de movimiento, de modo que les podemos asociar una longitud de onda de acuerdo con las relaciones de de Broglie-Einstein. El haz de electrones se refleja en un cristal de níquel, y el haz de electrones reflejado se puede analizar con un detector (sería como el colector del efecto fotoeléctrico). De acuerdo con la ley de Bragg, para un determinado ángulo α se debe observar un máximo de difracción. En la siguiente figura podemos ver parte de los resultados que obtuvieron Davisson y Germer en su experimento. Si se aplica la ley de Bragg podemos calcular la longitud de onda que corresponde al máximo que se muestra en las siguientes figuras. La longitud de onda coincide con la que le corresponde a los electrones de acuerdo con las relaciones de de Broglie-Einstein.



Por tanto, no sólo la radiación está dotada de una doble naturaleza sino que también las partículas presentan la dualidad onda-corpúsculo. Se pueden comportar como partículas, como describe la mecánica de Newton, o como ondas, como en el experimento de Davisson y Germer.