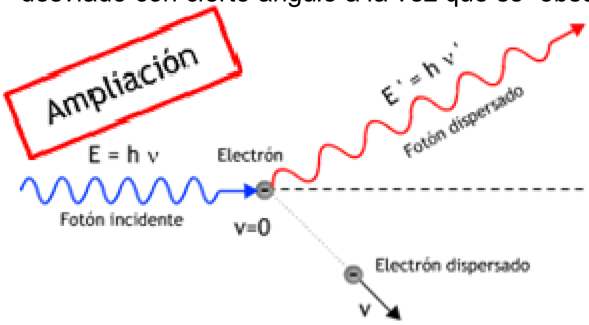
La explicación dada por A. Einstein al efecto fotoeléctrico (1905) reavivó la vieja polémica sobre la naturaleza de la luz.

Einstein consideraba que la luz estaba formada por pequeños cuantos de energía (fotones), sin embargo la teoría electromagnética de Maxwell (1860) otorgaba a la luz una naturaleza ondulatoria apoyada por hechos tales como el fenómeno de la interferencia, la difracción o el valor de la velocidad de la luz en el agua (Fizeau, 1849).

Einstein recupera la vieja idea de Newton de que ***la mejor manera de entender la naturaleza de la luz podría consistir en una fusión de las teorías ondulatoria y corpuscular.***

La idea de que la luz estaba formada por cuantos recibió un fuerte apoyo cuando ***Compton*** en 1923 explicó el fenómeno de la dispersión de rayos X por electrones.

Cuando los rayos X chocan con un electrón se observa que el electrón gana energía y momento saliendo desviado con cierto ángulo a la vez que se observa la emisión de radiación de menor frecuencia.



El llamado ***efecto Compton*** puede explicarse como una colisión de una partícula con masa en reposo nula (fotón) con el electrón. Combinando la TER con la hipótesis de Planck se deduce que tanto la energía del fotón como su momento dependen de la frecuencia.

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \; ; \; E = p\,c$$

$$\text{Como: } E = h\,\upsilon \Rightarrow p\,c = h\,\upsilon \; ; \; p = \frac{h\,\upsilon}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

El fotón incidente intercambia energía y momento con el electrón que sale desviado. La pérdida de energía del fotón se traduce en una pérdida de frecuencia. De ahí que la radiación dispersada sea de longitud de onda mayor que la incidente. La explicación del efecto Compton combina en su explicación la consideración de la luz como onda y como partícula.

Podemos considerar que el efecto Compton sucede en dos etapas:

- El electrón absorbe un fotón.
- El electrón emite un nuevo fotón de menor frecuencia, adquiriendo energía.

Esto equivale a que el electrón absorbe un fotón de energía: $E_{abs} = h\,\upsilon - h\,\upsilon' = h\,(\upsilon - \upsilon')$

Por tanto podemos considerar que en la interacción se produce el intercambio de un fotón. Esta idea se extendió a la interacción entre partículas cargadas. Cuando dos de éstas interaccionan intercambian fotones, así que:

Las interacciones electromagnéticas se pueden considerar como el resultado de un intercambio de fotones entre partículas cargadas.

Ejemplo 1 (Oviedo 2010 - 2011)

Un fotón tiene una longitud de onda en el vacío asociada de 500 nm. Si se duplica su energía, ¿cuál es la nueva longitud de onda asociada en el vacío?

Solución:

Según Planck la energía de los fotones depende de su frecuencia (o longitud de onda):

$$\left.\begin{array}{l} E_1 = h\,\upsilon_1 \\ E_2 = h\,\upsilon_2 \end{array}\right\} \frac{E_1}{E_2} = \frac{E_1}{2\,E_1} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$$

$$\upsilon_2 = 2\,\upsilon_1 \quad \text{Como: } c = \lambda\,\upsilon \Rightarrow \boxed{\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2}} \quad \lambda_2 = 250\text{ nm}$$

Dualidad onda - partícula

Louis de Broglie (entre los años 1923-1925) propuso extender la dualidad onda-partícula a toda la materia, desarrollando la teoría matemática que describe las llamada ***ondas de materia:***

Toda partícula en movimiento lleva asociada una onda, tal que su longitud de onda viene dada por:

$$\boxed{p\,\lambda = h\,;\; m\,v = \frac{h}{\lambda}}$$

Louis de Broglie
(1892 -. 1987)
P. Nobel Física 1929

La materia tiene, por tanto, naturaleza dual. Puede comportarse como onda o como partícula. El aspecto ondulatorio queda prácticamente anulado cuando consideramos objetos macroscópicos, grandes, a escala humana, pero cuando consideramos partículas de tamaño subatómico, como electrones, por ejemplo, la dualidad entre onda y partícula es patente.

Los electrones se comportan como una partícula cuando consideramos su movimiento en el seno de un campo magnético, por ejemplo, pero si hacemos incidir un haz de electrones sobre un cristal los espacios existentes entre los iones hacen las veces de minúsculas rendijas de tamaño comparable a la longitud de onda de los electrones y obtenemos un diagrama de difracción análogo al que se obtenía al difractar la luz mediante una rendija estrecha. Esta experiencia, propuesta por el propio de Broglie como posible comprobación de su teoría, fue realizada por ***Davisson y Germer*** en 1927.

Ejemplo 2 (Oviedo 2009 - 2010)

Un electrón tiene una velocidad v (no relativista) y su onda asociada tiene una longitud de onda de 0,10 nm. Si la velocidad del electrón se duplica, ¿cuánto valdrá la longitud de onda asociada?

Solución:

Aplicando la ecuación de de Broglie tenemos:

$$\left.\begin{aligned} m_e\,v_1 &= \frac{h}{\lambda_1} \\ m_e\,v_2 &= \frac{h}{\lambda_2} \end{aligned}\right\}\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

$$\lambda_2 = \lambda_1\frac{v_1}{v_2} = \lambda_1\frac{\cancel{v_1}}{2\,\cancel{v_1}} = \frac{\lambda_1}{2} = \frac{0{,}10\ \text{nm}}{2} = 0{,}05\ \text{nm}$$

Ejemplo 3 (Oviedo 2009 - 2010)

Un electrón se pone en movimiento por la acción de un potencial de 750 V. Determinar:

a) La velocidad que adquire.
b) La longitud de onda asociada al mismo.

DATOS: $c = 3\ 10^8$ m/s ; $m_e = 9{,}110\ 10^{-31}$ kg ; $e = 1{,}60.\ 10^{-19}$ C; $h = 6{,}626.\ 10^{-34}$ J . s

Solución:

a) Un electrón situado en un campo eléctrico corre espontáneamente hacia los potenciales positivos, por lo que disminuye su energía potencial (Ep = V. q). La energía potencial perdida se transforma en cinética:

$$V\,q = \frac{1}{2}\,m\,v^2\,;\; v = \sqrt{\frac{2\,V\,q}{m}} = \sqrt{\frac{2\,.750\,\frac{J}{\cancel{C}}\,1{,}60\ 10^{-19}\,\cancel{C}}{9{,}11\ 10^{-31}\text{kg}}} = 2{,}20\ 10^7\,\frac{m}{s}$$

b) Usando la ecuación de De Broglie:

$$m\,v = \frac{h}{\lambda}\;\;;\;\; \lambda = \frac{h}{m\,v} = \frac{6{,}63\ 10^{-34}\,\text{J s}}{9{,}11\ 10^{-31}\ \text{kg}\ 2{,}20\ 10^7\,\frac{m}{s}} = 3{,}31\ 10^{-11}\text{m} = 0{,}0331\,\text{nm}$$

Ejemplo 4 (Oviedo 2007 - 2008)

Un fotón posee una longitud de onda igual a 500 nm. Calcula:

a) Su cantidad de movimiento.
b) Su energía.

DATOS: c = 3 10^8 m/s ; h= 6,626. 10^{-34} J . s

Solución:

a) El momento lineal, o cantidad de movimiento, de una partícula está relacionada con su longitud de onda a través de la ecuación de de Broglie:

$$p = m\ v = \frac{h}{\lambda} = \frac{6{,}625\ 10^{-34}\,J\ s}{500\ 10^{-9}\,m} = 1{,}325\ 10^{-27}\ kg\frac{m}{s}$$

b) Le energía del fotón podemos calcularla a partir de la fórmula de Planck:

$$E = h\ \upsilon = h\ \frac{c}{\lambda} = 6{,}625\ 10^{-34}\,J\ \cancel{s}\ \frac{3\ 10^8\ \frac{\cancel{m}}{\cancel{s}}}{500\ 10^{-9}\,\cancel{m}} = 3{,}975\ 10^{-19}\,J$$

Podemos llegar a idéntico resultado a partir de la ecuación que da la energía de una partícula de masa m en la TER si consideramos que el fotón tiene masa nula:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2\ ;\ E = p\ c = 1{,}325\ 10^{-27}\ kg\frac{m}{s}.3\ 10^8\ \frac{m}{s} = 3{,}975\ 10^{-19}\,J$$

Ejemplo 5 (Oviedo 2001)

Admitiendo que el protón tiene una masa en reposo que es, aproximadamente, 1 836 veces la del electrón, ¿qué relación existirá entre las longitudes de onda de de Broglie de las dos partículas suponiendo que se mueven con la misma energía cinética y considerando despreciables los efectos relativistas?

DATOS: c = 3 10^8 m/s ; h= 6,626. 10^{-34} J . s

Solución:

Sabiendo que la energía cinética de ambas partículas es idéntica podemos establecer la relación entre las velocidades con que se mueven:

$$\left.\begin{aligned} Ec_e &= \frac{1}{2}\,m_e\ v_e^2 \\ Ec_p &= \frac{1}{2}\,m_p\ v_p^2 \end{aligned}\right\} Ec_e = Ec_p\ ;\ \frac{1}{2}\,m_e\ v_e^2 = \frac{1}{2}\,m_p\ v_p^2\ ;\ m_e\ v_e^2 = m_p\ v_p^2$$

$$\frac{v_e^2}{v_p^2} = \frac{m_p}{m_e} = \frac{1\,836\ \cancel{m_e}}{\cancel{m_e}} = 1\,836$$

$$v_e = \sqrt{1\,836}\ v_p$$

Aplicando la ecuación de de Broglie podemos establecer una relación entre las longitudes de onda y las velocidades:

$$\left.\begin{aligned} m_e\ v_e &= \frac{h}{\lambda_e} \\ m_p\ v_p &= \frac{h}{\lambda_p} \end{aligned}\right\} \frac{m_e\ v_e}{m_p\ v_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_e}$$

$$\frac{\cancel{m_e}\ \sqrt{1\,836}\ \cancel{v_p}}{1836\ \cancel{m_e}\ \cancel{v_p}} = \frac{\lambda_p}{\lambda_e}\ ;\ \frac{\lambda_p}{\lambda_e} = \frac{\sqrt{1\,836}}{1\,836} = 0{,}0233$$

$$\boxed{\lambda_p = 0{,}0233\ \lambda_e}$$

La ecuación de onda del electrón

Schrödinger, desarrollando la teoría de de Broglie, ***considera al electrón como una onda e intenta obtener la correspondiente ecuación.***

En 1925 propone la llamada ***ecuación de onda para un electrón*** que describe su comportamiento en el átomo de hidrógeno.

$$\nabla^2\psi + \frac{8\,\pi^2 m}{h^2}\,(E - V)\,\psi = 0$$

Erwin Schrödinger
(1887-1961)
P. Nobel Física 1933

La resolución de la ecuación de onda permite obtener la llamada ***función de onda para el electrón,*** ψ ***, u orbital atómico,*** y su energía, E.

La función de onda lleva asociados unos ***números cuánticos n, l y m*** los cuales han de tener determinados valores para que la solución obtenida sea válida. ***La energía del electrón no puede tomar valores cualesquiera***, sólo los correspondientes a los valores permitidos de los números cuánticos. ***La energía del electrón en el átomo está cuantizada.***

La diferencia del tratamiento efectuado por Schrödinger frente al efectuado por Bohr es que éste debe introducir los números cuánticos "ad hoc" para obtener las rayas que se observaban en los espectros. Sin embargo, en el tratamiento de Schrödinger, los números cuánticos surgen de forma espontánea como consecuencia de las condiciones impuestas a un electrón ligado al núcleo, ***la cuantización de la energía surge de la propia teoría, no se impone.***

El desarrollo de Schrödinger dio lugar a una de las ramas de la Física Cuántica, ***la Mecánica Ondulatoria.***

Principio de Incertidumbre

Werner Heisenberg desarrolló la otra rama de la Física Cuántica, conocida como ***Mecánica de Matrices,*** ya que estos elementos matemáticos (las matrices) constituyen la parte esencial del lenguaje matemático utilizado.

La mecánica de matrices se caracteriza por un formalismo matemático riguroso, sin concesión alguna a imágenes o modelos:

> *"Todas las cualidades del átomo de la física moderna son inferidas, sólo pueden simbolizarse mediante una ecuación en derivadas parciales en un espacio abstracto multidimensional. No se le puede atribuir directamente propiedad material alguna. Así pues, cualquier representación suya que pueda crear nuestra imaginación es intrínsecamente deficiente; la comprensión del mundo atómico de ese modo primario y sensorial... es imposible"*
>
> *W. Heisenberg*

Werner Heisenberg
(1901-1976)
P Nobel Física 1932

Las conclusiones más sorprendentes que se extraen de la Mecánica de Matrices surgen cuando se analiza el proceso de medida, según la teoría de Heisenberg:

- ***No es posible determinar, en general, con absoluta certidumbre el resultado de una medida. O lo que es lo mismo, sólo es posible determinar la probabilidad de que la medida dé un valor dado.***
- ***El hecho de medir origina una alteración drástica del propio sistema que se mide.***

En 1927 enuncia el llamado ***Principio de Incertidumbre*** o ***Principio de Indeterminación*** surgido como un consecuencia del desarrollo de su teoría.

"Existen ciertos pares de magnitudes físicas (aquellas cuyo producto tenga las mismas dimensiones que la constante de Planck: J.s) que no pueden ser medidas de forma simultánea con total exactitud ya que debe cumplirse que el producto de la indeterminación de las medidas debe ser igual o mayor que $h / 4\pi$***"***

La posición y el momento lineal, o la energía y el tiempo son dos ejemplos de estas magnitudes

$$\boxed{\Delta x \,.\, \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}} \qquad \boxed{\Delta E \,.\, \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}}$$

$\Delta x = \text{Indeterminación en la posición}$ $\quad$ $\Delta E = \text{Indeterminación en la energía}$

$\Delta p = \text{Indeterminación en el momento}$ $\quad$ $\Delta t = \text{Indeterminación en el tiempo}$

En muchas ocasiones $\frac{h}{2\pi}$ se nota como $\hbar$ (se lee "hache cruzada"). $\hbar = 1{,}05\ 10^{-34}\ \text{J s}$

$$\boxed{\Delta x \,.\, \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}} \qquad \boxed{\Delta E \,.\, \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}}$$

Es importante saber que la imposibilidad de medir ***de forma simultánea y con exactitud*** las magnitudes consideradas, no es debido a la falta de precisión de los aparatos de medida, sino que ***es algo intrínseco a la propia naturaleza. Esta indeterminación, al ser del orden de la constante de Planck, solamente es apreciable en el mundo de lo muy pequeño (partículas elementales) siendo inapreciable en el mundo macroscópico.***

El Principio de Incertidumbre echa por tierra la vieja imagen del átomo planetario. No nos podemos imaginar al electrón girando alrededor del núcleo siguiendo una trayectoria definida ya que la observación de dicha trayectoria no es posible según dicho principio.

Si queremos observar al electrón en su órbita algún tipo de luz debería incidir sobre él y, tras ser reflejada, llegar a nuestros ojos (o aparatos de observación) permitiéndonos detectar su posición. Esto que es posible en el mundo macroscópico, no lo es en el mundo subatómico. Debido a la extrema pequeñez del electrón cualquier fotón que chocara contra él modificará su velocidad desviándolo de su trayectoria.

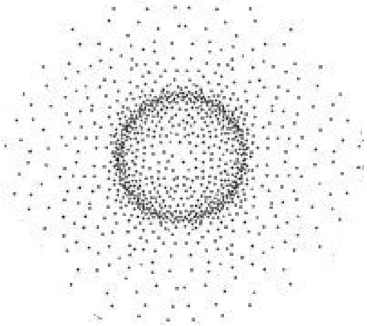
Podemos pensar en usar luz de una frecuencia muy baja con el fin de que la energía de sus fotones sea tan pequeña que la transferencia de energía sea muy pequeña con el fin de alterar muy poco su velocidad. Si es así, la baja incertidumbre cometida en la medida de la velocidad (o el momento) llevará aparejada una gran incertidumbre en la posición, ya que cuanto mas baja es la frecuencia de una luz menor poder de resolución tiene. No veríamos entonces al electrón como una partícula nítida, sino como una especie de mancha borrosa. Sólo podremos afirmar que se encuentra en una zona, tanto más amplia cuando menor sea la frecuencia de la luz utilizada.

Si no podemos observar el electrón en su órbita, y dado que una teoría física sólo debe versar sobre cosas observables y verificables mediante experimentos, ***Heisenberg propone abandonar cualquier imagen del átomo y describir éste de modo puramente matemático.***

Max Born propuso una interpretación que permite la conciliación de la mecánica de Heisenberg y la teoría ondulatoria de Schrödinger. Según Born ***el cuadrado de la función de onda de Schrödinger da la probabilidad de encontrar al electrón en un punto del espacio en un momento dado.***

No es posible hablar de órbitas definidas, pero sí de regiones del espacio en las que existe una gran probabilidad de encontrar al electrón.

La mecánica de matrices de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger son dos formas equivalentes de la Mecánica Cuántica.



Orbital atómico s

La máxima probabilidad de encontrar al electrón (puntos) se localiza a una distancia igual al radio de la primera órbita del átomo de Bohr.