

TEMA 8: FÍSICA CUÁNTICA

8.1- EVOLUCIÓN DAS IDEAS SOBRE A NATUREZA DA LUZ:

* Ata o comezo do S. XX

- Anticamente: luz era algo emitido polo allo
- Logo: luz procede dos obxectos que se vían e entraba no allo producindo a sensación da visión
- S. XVIII: 2 teorías sobre a natureza da luz:

① luz como partículas (Tª corpuscular da luz): Newton (1704)

- Explicaba: propagación rectilínea, reflexión, refracción, sombras
- Supoñía que a luz se movía máis rápido no auga ou vidro que no aire, o que se demostrou que era falso.

② luz como ondas (Tª ondulatoria da luz): Huygens (1690)

- Explicaba: propagación rectilínea, reflexión, refracción
- Supoñía a existencia do éter, medio no que se propagaban as ondas

→ Dominio da Tª corpuscular (Newton)

- S. XIX: Revitalización da Tª ondulatoria, polas observacións de:

- Interferencia (Young, 1801)
- Difracción (Fresnel, 1816)
- $v_{\text{auga}} < v_{\text{aire}}$ (Foucault, 1850)

- Luz é unha onda EM: $v_{\text{vaco}} = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Maxwell, 1873)

- confirmación experimental na natureza EM da luz (Hertz, 1887) mediante un circuíto eléctrico LC oscilante

* S. XX: Doble natureza da luz: dualidade onda-partícula

- 1887, Hertz describe tamén o efecto fotoeléctrico: a teoría EM falla ao explicar a interacción da luz coa materia.
- 1923, Efecto Compton

Concl.: A luz presenta unha dobre natureza, manifestándose preferentemente unha ou outra segundo as condicións do fenómeno que se observa.

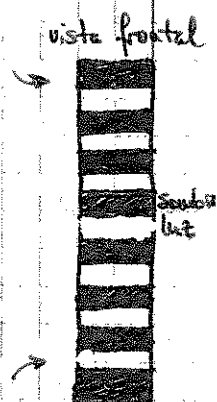
8.2 - TEORÍA ONDULATORIA: EXPERIENCIA DE YOUNG: (1801)

- Interferencia da luz (fenómeno ondulatorio)
- Experimento:

Explicación: Segundo o pprio. de Huygens:

cando a onda chega ás fendas, estas comportábase como novas fontes emisoras

de ondas secundarias, que interfieren na pantalla dando lugar a franxas iluminadas (interferencia constructiva) e franxas escuras (interf. destrutiva)

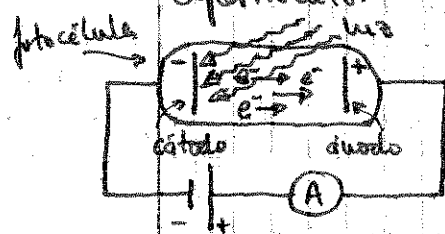


8.3 - TEORÍA CORPUSCULAR: EFECTO FOTOELÉCTRICO (1887)

- Efecto fotoeléctrico: propiedade que teñen algúns metais de emitir electróns cando se encontran sometidos á acción da luz (visíbel ou ultravioleta).

Os electróns así emitidos chámanse fotolelectróns

- Experimento:



- cátodo: recuberto de material fotosensíbel

- Cando un feixe de luz incide no cátodo, emite electróns que son atraídos polo ánodo e fan que o amperímetro detecte paso de corrente. Obsérvase que:

- Para cada metal existe unha frecuencia mínima (long. de onda ~~mínima~~ máxima) chamada frecuencia límite, f_0 ou ν_0 , por baixo da cal non se produce emisión fotoeléctrica, por moí intensa que sexa a luz incidente
- O efecto fotoeléctrico é instantáneo
- A intensidade de corrente é proporcional á intensidade da luz incidente
- A enerxía cinética e a velocidade dos fotolelectróns dependen só da frecuencia da luz non da súa intensidade

Estes fenómenos non os pode explicar a Teoría ondulatoria.

- Explicación de Einstein (Premio Nobel, 1905):

"A luz emítese, propágase e absorbése en paquetes (fotóns), non de forma continua."

Cada fóton tem uma energia: $E = h \cdot \nu$

onde $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ é a constante de Planck. O fóton é uma partícula sem carga nem massa que se move à velocidade da luz.

A energia dos fótons depende da frequência da luz. Sem embargo, uma radiação será mais intensa se transporta muitos fótons.

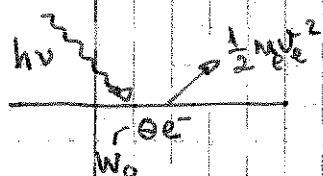
Explicação do efeito fotoelétrico:

a) Cada fóton choca com um electrão do metal. Cada metal precisa uma energia mínima (trabalho de extração, W_0) para poder-lhe arrincar um electrão da sua superfície, escapando das forças atractivas que o unem ao metal. A frequência mínima do fóton incidente deve ser tal que:

$$E \geq W_0 \Rightarrow h\nu_0 = W_0 \Rightarrow \nu_0 = \frac{W_0}{h}, \text{ freq. limite}$$

b) A energia do fóton incidente arranca o electrão e lhe permite sair com uma certa velocidade:

Energia fóton incidente = trabalho de extração + E_c do electrão extraído



$$h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2} m_e v_e^2 \quad E_c: \text{Energia do electrão extraído}$$

c) Para $\nu > \nu_0$, se ↑ a intensidade da radiação $\Rightarrow$ ↑ nº de fótons $\Rightarrow$ ↑ nº de fotoelectrões emitidos -

d) Se $\nu \uparrow \Rightarrow$ ↑ E_c (fotoelectrões), pois W_0 é cte para cada metal

e) A emissão é instantânea, pois a energia está nos fótons.

7.1.2. EFECTO COMPTON

El efecto Compton consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón de rayos X cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su energía. La frecuencia o la longitud de onda de la radiación dispersada depende únicamente de la dirección de dispersión.

El Efecto Compton fue estudiado por el físico Arthur Compton en 1923, quién pudo explicarlo utilizando la noción cuántica de la radiación electromagnética como cuantos de energía y la mecánica relativista de Einstein. El efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de Planck sobre el cuerpo negro y la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico. Como consecuencia de estos estudios Compton ganó el Premio Nobel de Física en 1927.

Este efecto es de especial relevancia científica, ya que no puede ser explicado a través de la naturaleza ondulatoria de la luz. La luz debe comportarse como partícula para poder explicar estas observaciones, por lo que adquiere una dualidad onda corpúsculo característica de la mecánica cuántica.

La variación de la longitud de onda de los fotones dispersados se calcula mediante:

7.1.3. DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA. HIPÓTESIS DE LOUIS DE BROGLIE.

Planck y Einstein dejaron probado el comportamiento dual de la luz (como onda y como partícula), que antes considerábamos únicamente como onda. Pero podríamos plantearnos si ese comportamiento dual es exclusivo de la luz.

¿Podría darse lo contrario? ¿Puede que algo que consideramos una partícula (en electrón, p.e.) se comporte como una onda en algunos experimentos?

El científico francés **Louis de Broglie**, basándose en los resultados de Planck, Einstein y otros (Compton), supuso en 1924 que **cualquier partícula en movimiento puede comportarse como una onda**. Es decir, supuso que toda la materia tiene un comportamiento dual.

Dicho comportamiento ondulatorio vendrá caracterizado por una λ , llamada longitud de onda asociada a la partícula que estemos considerando.

Esta λ viene dada por la expresión $\lambda = h/p$, donde h es la cte de Planck y p la cantidad de movimiento de la partícula ($p = m \cdot v$). Así $\lambda = h/mv$

La onda asociada a una partícula recibe el nombre de **onda de materia**.

Ahora bien, si toda partícula puede comportarse como una onda, tal como supuso de Broglie, dicho comportamiento debe ser observable. Es decir, un haz de electrones debería de producir difracción al encontrarse con un obstáculo del tamaño adecuado. Empleando valores característicos ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, $v = 5 \cdot 10^6$ m/s) obtenemos $\lambda = 1,45 \cdot 10^{-10}$ m, es decir, aproximadamente la distancia entre átomos en algunos metales. En 1927, **Davidson y Germer**, usando una lámina de Níquel como red de difracción, comprobaron que las suposiciones de de Broglie eran ciertas.

Para una partícula macroscópica (p.ej. $m = 1$ kg, $v = 10$ m/s) $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-35}$ m. No existen en el universo obstáculos de tamaño tan pequeño. O sea, no podremos apreciar el carácter ondulatorio de una partícula macroscópica.

Una consecuencia importante de esta suposición es que explica la cuantización de las órbitas de los electrones en el átomo, considerando que dichas órbitas son ondas estacionarias para el electrón. La longitud de la órbita cumple que es un n° entero de veces la λ dada.

7.1.4. PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

El físico alemán Werner Heisenberg, en 1927, teniendo en cuenta el carácter dual de la materia, descubrió que era imposible medir simultáneamente y con exactitud algunas magnitudes de un sistema. De hecho, el propio hecho de medir ya modifica el sistema que estamos midiendo.

Supongamos el siguiente experimento (totalmente imaginario), llamado microscopio de Böhr: Queremos medir a la vez la posición y la velocidad de un electrón. Para poder ver al electrón con un microscopio, al menos tendría que chocar con él un fotón de luz que, al rebotar, llegara hasta el microscopio. Ahora bien, al chocar, el fotón cambiará la velocidad del electrón, y no podremos medir la que tenía anteriormente.

Una forma de expresar este principio de incertidumbre es la siguiente: es *imposible medir simultáneamente y con total exactitud la posición y la cantidad de movimiento (velocidad) de una partícula*. Siempre, la incertidumbre (error que podemos cometer) en la medida cumplirá

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

donde Δx y Δp son las incertidumbres al medir la posición y la cantidad de movimiento. Se observa que si Δx se hace muy pequeña (gran exactitud), Δp se hará muy grande (mucho error).

De este principio de incertidumbre pueden extraerse algunas consecuencias fundamentales.

- Este principio limita en gran medida el conocimiento que podemos tener sobre la naturaleza. De hecho, rompe con el determinismo propio de los científicos del s. XIX, que suponían que todo en la naturaleza podía ser conocido con exactitud.

- Ya no podemos hablar de posición o velocidad exactas de una partícula, únicamente de probabilidad de encontrar a una partícula en una determinada posición. Por lo tanto, el modelo de Böhr para el átomo ya no es válido, hay que buscar una nueva visión de las cosas, una nueva Física. Schrödinger, con su ecuación de onda, proporciona la herramienta básica de la Física Cuántica.

7.1.5. ECUACIÓN DE ONDA. FUNCIÓN DE ONDA

En 1926, el austriaco Erwing Schrödinger, introduce el carácter ondulatorio del electrón en el estudio de la estructura atómica. Un electrón, por tanto, debe tener una función de onda Ψ que describa su comportamiento. Y Ψ se obtiene al resolver una ecuación de onda similar a la de la cuerda de una guitarra, o al sonido. Esta ecuación de onda enunciada inicialmente por **Schrödinger** en 1926, y completada y mejorada por **Dirac** en 1929, permite describir el comportamiento y la energía asociada a partículas como electrones. Para el caso del electrón sometido a

un potencial eléctrico V por parte del núcleo, esta ecuación toma la forma: $\hat{H}\psi = E\psi$

- En coordenadas cartesianas:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V(r) \cdot \Psi = E \cdot \Psi$$

