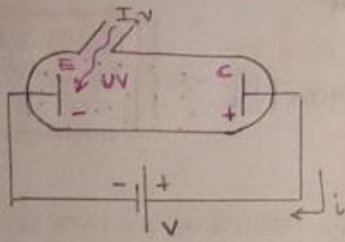
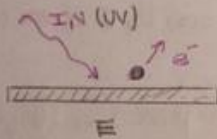


EFEECTO FOTOELÉCTRICO:



Se utiliza un tubo de rayos catódicos con un potencial  $V$  que no sea capaz de ionizar el gas.

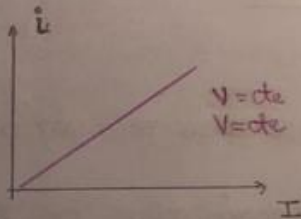
↳ HERTZ (1887) vio que al iluminar el emisor  $E$  (placa metálica) con luz de  $\lambda$  muy chica se cargaba positivamente "ESCAPE  $e^-$ ".



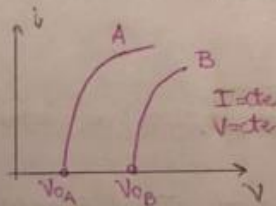
Esto se observa, generalmente, para  $\lambda > 10^{-10} - 10^{-8} \text{ \AA}$  (Radiación UV, visible).

Explicación clásica:

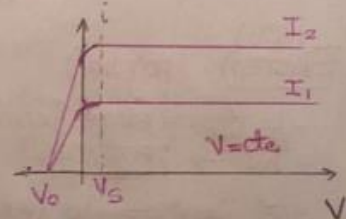
- La luz, que se propaga en forma de ondas, le va entregando energía a los  $e^-$ , hasta que tienen la suficiente para "liberarse".



$v$  y  $V$  cambian la pendiente.  
A mayor  $I$ , se desprenden más  $e^-$ .



- A y B son distintos materiales.
- Existe frecuencia de corte ( $\nu_0$ ) no donde, por debajo, no se emite  $e^-$ .
- La dependencia de  $V$  puede deberse a "resonancias".
- Para un  $V > V_0$ , no existe  $I$  de corte.



- A partir de cierto  $V_s$  (voltaje saturación) todos los  $e^-$  van de  $E$  a  $C$  y un aumento de  $V$  no modifica  $i$ .
- Si cambia la polaridad de  $V \rightarrow$  potencial retardador que se opone al flujo de  $e^-$ .

Al cambiar la polarización de  $V$ , se van frenando algunos  $e^-$  y solo llegan los más energéticos. Para un valor  $V_0$  (potencial frenador) se frenan hasta los más energéticos ( $i=0$ ).

↳  $V_0$  es una medida de la  $T_{\text{máx}}$  de los  $e^-$

$$qV_0 = T_{\text{máx}}$$

$T$ : Energía cinética  
 $q$ : carga de los  $e^-$ .

Si aumentamos  $I$  ¿aumenta  $|V_0|$ ? Mayor  $I$  implica luz con ondas más energéticas, por lo que es de esperarse que ocurra

→ NO ES ASÍ?  
 → SI AUMENTO LA FRECUENCIA, ¿SI AUMENTA  $|V_0|$ ?  
 (V)

MÁX NO DEPENDE DE  $I$ , SINO DE  $\nu$

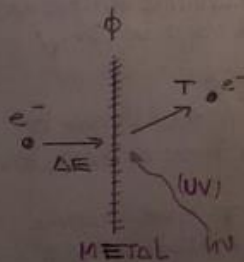
RESUMEN DE INCONSISTENCIAS (CLÁSICAS):

- 1 - EXISTENCIA DE UNA FRECUENCIA DE CORTE  $\nu_0 \forall I$ , PERO NO DE UNA INTENSIDAD DE CORTE
- 2 - LA ENERGÍA DE LOS  $e^-$  DEPENDEN DE LA FRECUENCIA CON LA QUE SE INCIDE LA LUZ EN LA PLACA Y NO DE SU INTENSIDAD.
- 3 - (ADICIONAL) UNO ESPERARÍA QUE, EN UNA INTERACCIÓN ONDA-PARTÍCULA (Luz- $e^-$ ) A MENOR  $I$  el  $e^-$  TARDARÍA MÁS EN ACUMULAR LA ENERGÍA NECESARIA PARA SER EYECTADO QUE CON  $I$  MAYOR
  - NO SE OBSERVA DIFERENCIAS EN TIEMPOS A MISMA  $\nu$ .
  - LOS  $e^-$  SE INYECTAN DE INMEDIATO, SIN IMPORTAR LA  $I$ , COMO SI SE TRATARA DE UNA COLISIÓN.

(1905)

EINSTEIN: (PROPONE)

- LA FUENTE EMITE "PAQUETES" (CUANTOS) DE ENERGÍA CON UN CONTENIDO ENERGÉTICO  $h\nu \rightarrow$  ¡FOTONES!
- EL "PAQUETE" LO ABSORBE EL  $e^-$  DEL EMISOR Y LA INTERACCIÓN OCURRE COMO UNA COLISIÓN ENTRE PARTÍCULAS (PLÁSTICA)
- ACÁ, LA FRECUENCIA  $\nu$  LA ASOCIA A, NO TANTO A LA OSCILACIÓN DE LOS CAMPOS, SINO A UNA MEDIDA DE ENERGÍA DE LOS FOTONES.
  - LOS FOTONES CON  $\nu < \nu_0$  NO TIENEN SUFICIENTE ENERGÍA PARA ARRANCAR LOS  $e^-$ .
  - AUMENTAR  $I$  HACE QUE HAYA MÁS FOTONES  $\Rightarrow$  MÁS  $e^-$  LIBERADOS.



LA ENERGÍA CINÉTICA DEL  $e^-$  ES:

$$T = h\nu - \phi - \Delta E$$

SI ESTÁ EN LA SUPERFICIE ( $\Delta E = 0$ )

$$T_{\text{máx}} = h\nu - \phi$$

$e^-$  MÁS ENERGÉTICOS (2)

$\Delta E$ : ENERGÍA QUE LE LLEVA AL  $e^-$  LLEGAR A LA SUPERFICIE  
 $\phi$ : "FUNCIÓN TRABAJO"; ENERGÍA QUE DEBE SUPERAR PARA "GANAR" A LAS FUERZAS ATRACTIVAS DE LOS NÚCLEOS POSITIVOS CERCA DE LA SUPERFICIE (BARRERA POTENCIAL)

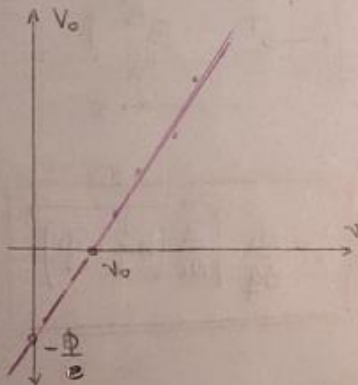
USANDO (1) y (2):

$$\begin{cases} T_{\text{máx}} = qV_0 \\ T_{\text{máx}} = h\nu - \phi \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_0(\nu) = \frac{h\nu}{q} - \frac{\phi}{q}$$

( $q=e$ )

DEPENDENCIA DEL POTENCIAL FRENOADOR CON LA FRECUENCIA  $\nu$  Y LA FUNCIÓN TRABAJO  $\phi$ .



Pendiente:  $\frac{h}{e}$ , si sabemos  $e$  podemos obtener el valor de  $h$  (CONSTANTE DE PLANCK)

Ordenada al origen:  $-\frac{\phi}{e}$ , si sabemos  $e$  podemos obtener el valor de  $\phi$ .

Relaj:  $\nu = \phi/h \equiv \nu_0$ , que corresponde a la frecuencia mínima para vencer a  $\phi$  (FRECUENCIA UMBRAL)

### EJERCICIO:

SABIENDO QUE LA FUNCIÓN TRABAJO DEL CÉSIO ES  $\phi = 1,94 \text{ eV}$ :

- HALLAR LA FRECUENCIA UMBRAL Y LA LONGITUD DE ONDA DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO.
- DETERMINAR LA ENERGÍA CINÉTICA MÁXIMA DE LOS ELECTRONES SI  $\lambda = 250 \text{ nm}$ .

a) Para conocer el desprendimiento de  $e^-$ , PUEDO USAR UNA FRECUENCIA MÍNIMA (UMBRA) QUE LOS QUE LOS DE LA SUPERFICIE VENCEN A  $\phi$ :

$$h\nu_0 = \phi \Rightarrow \nu_0 = \frac{\phi}{h} \Rightarrow \nu_0 = \frac{1,9 \text{ eV}}{4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} \approx 4,59 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

MESES, SU LONGITUD DE ONDA  $\lambda_0$  ES:

$$\lambda_0 \nu_0 = c \Rightarrow \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4,59 \times 10^{14} \text{ 1/s}} \approx 653,6 \text{ nm}$$

(ROJO)

b) PODEMOS DETERMINAR LA FRECUENCIA  $\nu$  ASOCIADA A ESTE  $\lambda$ :

$$\lambda \nu = c \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \nu = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,5 \times 10^{-7} \text{ m}} \approx 1,2 \times 10^{15} \text{ Hz} > \nu_0 \checkmark$$

(SE DESPRENDEN  $e^-$ ).

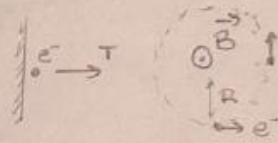
$$T_{\text{máx}} = h\nu - \phi \Rightarrow T_{\text{máx}} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s} \cdot 1,2 \times 10^{15} \frac{1}{\text{s}} - 1,9 \text{ eV} \approx 3,1 \text{ eV}$$

## Ejercicio 12

\* Consideraremos a un  $e^-$  de la superficie:

(CASO NO-RELATIVISTA)

$$\left. \begin{aligned} T &= h\nu - \phi \\ T &= \frac{1}{2} m v^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{v = \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - \phi)}}$$



(UEGO, SABIENDO QUE:  $\vec{v} \perp \vec{B}$ )

$$\left. \begin{aligned} F &= |q(\vec{v} \times \vec{B})| = qvB \\ F &= \frac{mv^2}{R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB} \Rightarrow \boxed{R = \frac{m}{Bq} \sqrt{\frac{2}{m}(h\nu - \phi)}}$$

$v = \frac{c}{\lambda}$

HACER MENCIÓN EFECTO COMPTON

- APORTE CLASICO
- $e^-$  LIBRE NO ABSORBE FOTÓN → colisión ELÁSTICA.
- ¿POR QUÉ RELATIVIDAD?

### TEORÍA DE DE BROGLIE:

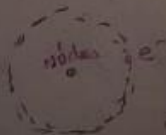
PODEMOS VER CIERTAS CARACTERÍSTICAS para el comportamiento de la MATERIA y su INTERACCIÓN con la LUZ:

- Toda la MATERIA puede absorber ENERGÍA de la radiación en cantidades  $h\nu$ .
- Naturaleza dual en la radiación electromagnética:

- CORPUSCULAR: INTERACCIÓN con la materia en forma de FOTONES.
- ONDULATORIA: SE PROPAGA en forma de ONDAS y HAY EFECTOS de INTERFERENCIA y DIFRACCIÓN.

• Además, el modelo atómico de BOHR MOSTRA NIVELES de ENERGÍA DISCRETOS para el  $e^-$  y ESTADOS ESTACIONARIOS

- NO EMITE radiación en esos ESTADOS ¿?
  - solo irradia al pasar de un NIVEL a OTRO.
  - MOVIMIENTO clásico pero órbitas cuantizadas que cumplen
- $$L_n = n \frac{h}{2\pi} = nh, \quad n \in \mathbb{Z}^+, \quad h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s}$$



HACER MENCIÓN CUANTIZACIÓN BOHR - SOMMERFELD

→ APORTE CLASICO.



• LOUIS DE BROGLIE: (1924) ③

→ Aparición de un conjunto discreto de velocidades permitidos para energía, frecuencias... análogo a MODOS ESTACIONARIOS DE ONDAS.

↳ EXISTE UNA CALIDAD ONDA-PARTÍCULA (¿ondas?)

→ Así como la luz se comporta como onda o como partícula, a la materia le pasa lo mismo.

Para un fotón:  $E = h\nu$   
 $E = pc \Rightarrow pc = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$

Postulados de Broglie

$$\begin{aligned} E &= h\nu & (\lambda, \nu) &: \text{PROPIEDADES DE ONDA} \\ p &= \frac{h}{\lambda} & (E, p) &: \text{PROPIEDADES DE PARTÍCULA} \end{aligned}$$

$v_f = \lambda \cdot \nu$

VELOCIDAD DE FASE

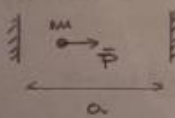
↓  
 ≠ Velocidad de la partícula

$(v_g = \frac{E}{p} = \frac{pc^2}{2mc^2 p} = \frac{pc}{2m})$

• NOTA: VELOCIDAD DE GRUPO  $v_g = \frac{d\omega}{dk}$        $\omega = 2\pi\nu$   
 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

• Ejemplos:

a) SEGMENTO DE LONGITUD 'a':



- MOVIMIENTO <sup>ALICADO</sup> PERIÓDICO: ONDA ESTACIONARIA

$$\lambda_n = \frac{2a}{n} \Rightarrow \left[ p_n = \frac{h}{\lambda_n} = \frac{nh}{2a} \right]$$

$$\Rightarrow \left[ E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{n^2 h^2}{8ma^2} \right]$$

si  $a \rightarrow \infty$ , OBTENEMOS  $p_n$  y  $E_n$  COMO UN CONTINUO.

b) ESTADOS DE UN  $e^-$  EN ÁTOMO DE H:



- MOVIMIENTO CIRCULAR Y PERIÓDICO: ONDA ESTACIONARIA

$$2\pi r_0 = n \lambda_n \Rightarrow \lambda_n = \frac{2\pi r_0}{n} \Rightarrow \left[ p_n = \frac{nh}{2\pi r_0} = \frac{nh}{r_0} \right]$$

$L_n = r_0 p_n = nh$  ✓ (BOHR)

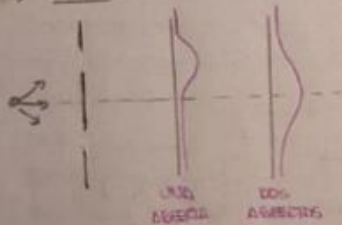
$\Rightarrow E = \frac{mv^2}{2} + \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{r} \Rightarrow \left[ E_n = -\frac{me^4}{2n^2 h^2} \right]$       donde  $r_0 = \frac{L^2}{me^2}$  (MÓDULO del pot. efectivo)

• Estas ondas asociadas a las partículas NO SON ELECTROMAGNÉTICAS ( $h\nu = hc$ )  
(¿ONDAS DE MATERIA?)

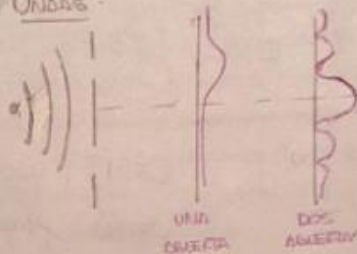
• De Broglie argumentó que primero se creía que la luz era corpuscular (Newton) por viajar en línea recta, y solo al estudiar en escalas comparadas a su  $\lambda$  se ven fenómenos ondulatorios (interferencia/difracción).

↳ ¿con la materia pasa lo mismo?

a) BOLAS:



b) ONDAS:



Los  $e^-$  tendrán un comportamiento de acuerdo a la relación entre su  $\lambda$  y el ancho de rendijas.

• Los  $e^-$ , si se observan fenómenos ondulatorios, se detectan como cuantos enteros, pero su probabilidad se comporta como la distribución de intensidad de una onda.

• ¿El  $e^-$  pasa por una de las rendijas? ¿O se difracta? ¿Podemos medir por cuál de ellas pasa?

↳ Necesitamos luz cuya  $\lambda$  sea menor al tamaño del  $e^-$ . → compton (otro experimento)

• ¿y si las partículas son <sup>puramente</sup> ondas? → resultan ser dispersivas

↳ No puede pasar esto, la materia no son ondas clásicas

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dk} \left( \frac{p^2}{2m} \right) = \frac{p}{m} = v \rightarrow \boxed{v_g = v} \rightarrow \text{SE ASERVA EN PARTICULA DE ONDA}$$

$$E = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow \hbar\omega = \frac{(\hbar k)^2}{2m} \Rightarrow \omega = \frac{\hbar k^2}{2m} \rightarrow v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\hbar k}{m} \neq v \rightarrow \text{DISPERSIVO } \times$$