

# EXPERIMENTOS EN FÍSICA MODERNA

**Luis Demetrio López–Carreño, Dr, Sc.**

*ldlopezca@unal.edu.co*

*Of:404-357    Lab:405-111*

**Grupo de Materiales con Aplicaciones Tecnológicas, GMAT  
Departamento de Física  
Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional de Colombia**



*L.D. López C*

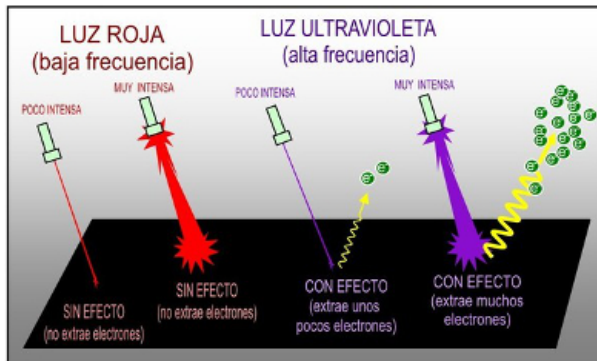
# EXPERIMENTOS EN FÍSICA MODERNA

*"No son los más fuertes de la especie los que sobreviven, ni los más inteligentes. Sobreviven los más flexibles y adaptables a los cambios"*

Charles Darwin

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EFECTO FOTOELÉCTRICO



URL:[https://lh3.googleusercontent.com/proxy/g6RH1tNkmuTEWP\\_MMmIbnAUxJ2PNhXTj14BvcFM3qRrNmr](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/g6RH1tNkmuTEWP_MMmIbnAUxJ2PNhXTj14BvcFM3qRrNmr)

FX3O5BoBnquMdybolOcUsVHeTA01YBqwRB4T0QqYqsl5jOT7j9zk8

*L. D. López*

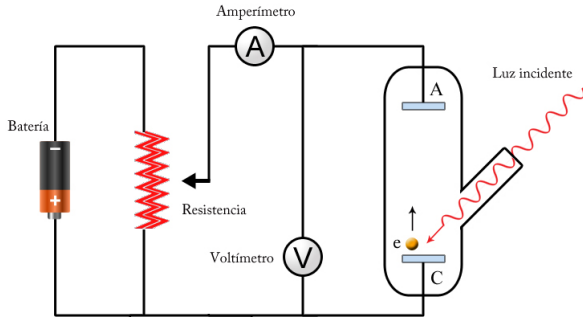
# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- DEFINICIÓN

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se hace incidir sobre él, radiación electromagnética, (luz visible o ultravioleta, en general), de cierta frecuencia.

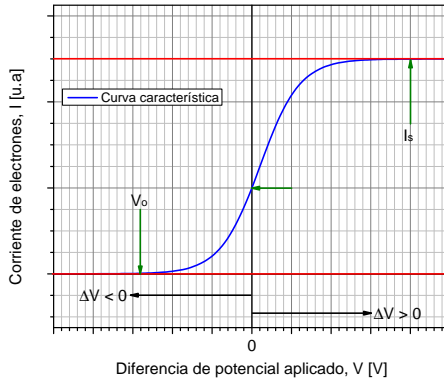
# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- RESULTADOS EXPERIMENTALES



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

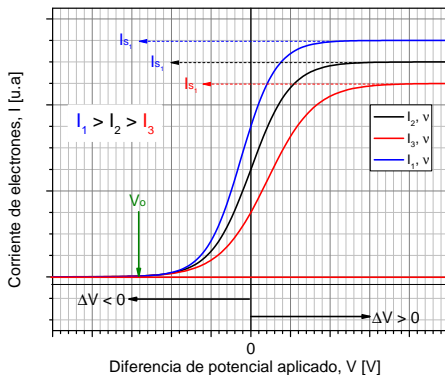
- RESULTADOS EXPERIMENTALES



$$e|V_0| = k_{max}$$

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- RESULTADOS EXPERIMENTALES

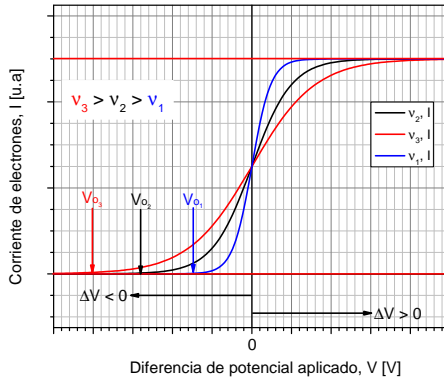


$$e|V_0| = k_{max}$$

L. D. López

# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

- RESULTADOS EXPERIMENTALES



$$e|V_o| = k_{max}$$

L. D. López



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- RESULTADOS EXPERIMENTALES

- 1 Existe una frecuencia umbral  $\nu_o$ , de la radiación incidente, por debajo de la cual no se observa la emisión de fotoelectrones, cualquiera que sea la intensidad de la radiación y el tiempo.
- 2 El tiempo de emisión de los fotoelectrones es del orden de  $t \approx 10^{-9}$  s.
- 3 Si se fija la frecuencia  $\nu$ , de la radiación incidente y se varía la intensidad media  $I_m$ , las curvas  $I - V$  presentan el mismo potencial de frenado pero, la corriente de saturación es proporcional a la intensidad de la onda incidente.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- RESULTADOS EXPERIMENTALES

- ④ Si se fija la intensidad media  $I_m$  de la radiación incidente y se varía la frecuencia  $\nu$ , las curvas  $I - V$  presentan la misma corriente de saturación, mientras que el potencial de frenado varía, siendo éste proporcional a la frecuencia de la onda incidente.
- ⑤ La energía cinética máxima de los fotoelectrones aumenta con la frecuencia de la radiación incidente.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO

- La radiación son ondas electromagnéticas (OEM).
- Las OEM son ondas transversales originadas en las oscilaciones sincronizadas de los campos eléctrico,  $\vec{E}$  y magnético,  $\vec{B}$ .
- La dirección de propagación de una OEM queda definida por el vector de onda,  $\vec{k}$ .

$$\vec{k} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{E} \times \vec{B}|}$$

- Las OEM se propagan a una velocidad igual a  $c$ .
- La ecuación de onda electromagnética se deriva de las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r})}{\partial t^2}$$

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO

- En la dirección del eje  $\hat{x}$  se tiene:

$$E = E_o \sin(kx - \omega t) \quad B = B_o \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_o}{B_o} = c$$

- Las ondas electromagnéticas portan energía (vector de Poynting):

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_o} (\vec{E} \times \vec{B})$$

$$|\vec{S}| = \frac{1}{\mu_o} |\vec{E}| |\vec{B}|$$

# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO

- La luz, (OEM), pueden caracterizarse mediante la *intensidad media*,  $I_m$ , y por la frecuencia,  $\nu$  asociada a las oscilaciones temporales de los campos, eléctrico y magnético.
- La *intensidad media*,  $I_m$ , de una onda plana está dada por:

$$I_m = |\vec{S}| = \frac{1}{c\mu_o} \frac{|E_o|^2}{2}$$

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
  - La luz, (OEM), pueden caracterizarse mediante la *intensidad media*,  $I_m$ , y por la frecuencia,  $\nu$  asociada a las oscilaciones temporales de los campos, eléctrico y magnético.
  - En física del estado sólido, la *función trabajo*, es la energía mínima, necesaria para extraer un electrón de un sólido, a un punto inmediatamente fuera de la superficie del sólido (o la energía necesaria para mover un electrón desde el nivel de energía de Fermi hasta el vacío).

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- 1 La existencia de una frecuencia umbral  $\nu_o$ , de la radiación incidente.....

- Esto contradice la teoría electromagnética, según la cual la densidad de energía (por unidad de volumen) de una onda luminosa es proporcional a su intensidad (suma de los cuadrados de los módulos de las amplitudes de los campos eléctrico y magnético correspondientes).
- A pesar de que la frecuencia de la luz sea muy baja, con suficiente intensidad luminosa o tiempo debería llegar un momento en el que los electrones adquiriesen la energía necesaria para escapar de la superficie del cátodo.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
  - ② La energía cinética de los fotoelectrones aumenta con la frecuencia de la radiación incidente.
    - Esto nuevamente resulta incompatible con la electrodinámica de Maxwell, donde la densidad de energía de una onda luminosa no tiene relación alguna con su frecuencia.



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CLÁSICO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
  - ③ La ausencia de tiempo de retardo en la emisión de fotoelectrones, con independencia del valor de la intensidad de la radiación incidente.
  - ④ En 1928, Lawrence y Beams demostraron que este tiempo de retardo no podía ser superior a  $3 \times 10^{-9}$  s.
    - Según la teoría electromagnética debe existir un tiempo de retardo inversamente proporcional a la intensidad de la onda incidente.
    - Este retraso, entre el instante de incidencia de la radiación y el de emisión de fotoelectrones, se debe a que para intensidades de iluminación muy bajas, los fotoelectrones requieren un cierto tiempo para adquirir la energía necesaria para abandonar el metal.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO CUÁNTICO - MODELO DE EINSTEIN
  - Einstein logró explicar el efecto fotoeléctrico en su artículo de 1905, "*Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*".

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN
  - Consideraciones del modelo:
    - 1 La energía de la radiación no está distribuida de manera continua, como en una onda luminosa, sino de manera discreta, en paquetes indivisibles de energía. Posteriormente G.N. Lewis llamaría a estos paquetes de energía, **Fotones**.

$$E = h\nu$$

$\nu \longrightarrow$  representa la frecuencia.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN

- Consideraciones del modelo:

- ② La intensidad,  $I$ , de la radiación queda definida mediante la expresión:

$$I = N(h\nu)$$

$N \longrightarrow$  representa el número de fotones.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN

- Consideraciones del modelo:

- ② La intensidad,  $I$ , de la radiación queda definida mediante la expresión:

$$I = N(h\nu)$$

$N \longrightarrow$  representa el número de fotones.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN
  - Consideraciones del modelo:
    - 3 En las interacciones entre luz y materia, la energía se intercambia de forma localizada, mediante la absorción o emisión de un cuanto luminoso.
    - 4 Einstein consideró que el efecto fotoeléctrico se produce cuando sobre la superficie metálica que hace de electrodo incide un número finito de, *quanta* de luz, de energía  $h\nu$ , que interactúan con los electrones del cátodo.

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN

- Consideraciones del modelo:

- 5 Cada *quantum* es absorbido por un único electrón al que le transfiere toda su energía.
- 6 Los electrones excitados, pierden parte de esta energía en el trabajo de extracción, (función trabajo,  $W$ ), que deben realizar para *escapar* de las fuerzas que les mantienen ligados al metal.
- 7 Si uno de esos fotoelectrones absorbe un fotón de energía,  $E = h\nu$ , su energía cinética puede expresarse de la forma,

$$h\nu = W + k_{max}$$

- 8  $k_{max}$ , no depende de la intensidad de la radiación incidente puesto que cada electrón interactúa con un único *textitquantum* de energía.

L. D. López

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

- MODELO DE EINSTEIN

- Consideraciones del modelo:

- 9 De la ecuación anterior se desprende que, el fotoelectrón sólo puede emitirse si el *quantum* de radiación incidente tiene una energía, igual o superior, a la función trabajo. Por tanto, la frecuencia umbral,  $\nu_o$ , del *quantum* luminoso será:

$$k_{max} = 0$$

$$h\nu = W$$

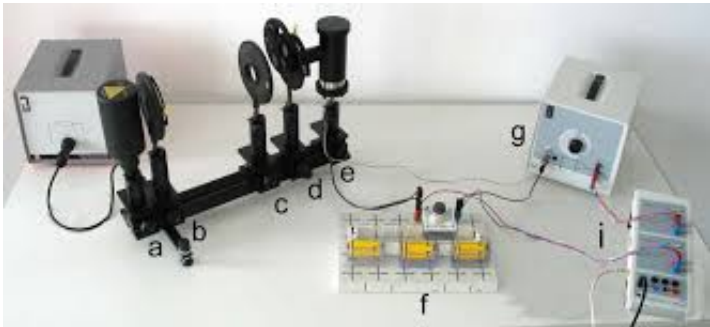
$$\nu_o = \frac{W}{h}$$



# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Montaje experimental



URL:

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- El equipo
  - Lámpara de mercurio de alta presión
  - Fuente de alto voltaje
  - Diafragma óptico
  - Lente convergente,  $f = 100$  mm
  - Rueda de filtros de color
  - Fococelda
  - pico-Amplificador de corriente
  - Interfase de adquisición de datos
  - Divisor de tensión
  - Computador

# EFEECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Equipo
  - Lámpara de mercurio



URL: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcR2OcQA\\_Tr9Y-3Wb47Z8KISmC2bMbbgr26DVg&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcR2OcQA_Tr9Y-3Wb47Z8KISmC2bMbbgr26DVg&usqp=CAU)

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Equipo
  - Diafragma



URL: <https://www.leybold-shop.com/media/phk/images/150dpi/46026.jpg>

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Equipo
  - Rueda de filtros de color



URL: [https://nimax-img.de/Produktbilder/zoom/14520\\_2/Orion-Set-de-filtros-de-colores-1-25-.jpg](https://nimax-img.de/Produktbilder/zoom/14520_2/Orion-Set-de-filtros-de-colores-1-25-.jpg)

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Equipo
  - Fococelda



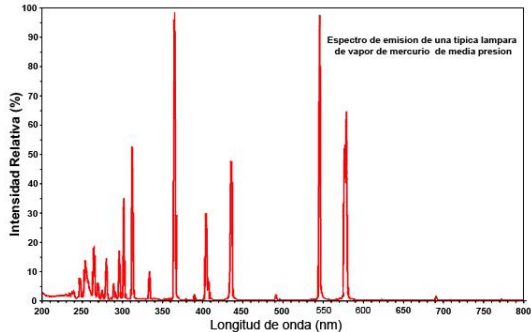
URL: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTXuKk-3XTfS1EvReGFHDF4a4ze\\_6U3yZiC4w&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcTXuKk-3XTfS1EvReGFHDF4a4ze_6U3yZiC4w&usqp=CAU)

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Equipo
  - Espectro de emisión - Lámpara de Hg



URL: <https://www.foro->

[minerales.com/forum/files/espectro\\_de\\_emision\\_de\\_lampara\\_de\\_vapor\\_de\\_mercurio\\_792.jpg](https://www.minerales.com/forum/files/espectro_de_emision_de_lampara_de_vapor_de_mercurio_792.jpg)

*L. D. López*

# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

- Procedimiento
  - Parte I
    - ➊ Tomar las curvas de  $I_e[u.a.]$  vs  $V_r[V]$ , (sólo la parte negativa), para la misma intensidad y diferentes longitudes de onda.

$\lambda \longrightarrow 365 \text{ nm}; 405 \text{ nm}; 436 \text{ nm}; 546 \text{ nm}; 578 \text{ nm}$

- ➋ Determinar el potencial de frenado,  $V_o$ .
- ➌ Verificar la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico.

$$h\nu = W + k_{max}$$

$$h\nu = W + eV_o$$

$$V_o = \left(\frac{h}{e}\right) \nu - \left(\frac{W}{e}\right)$$

L. D. López



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO

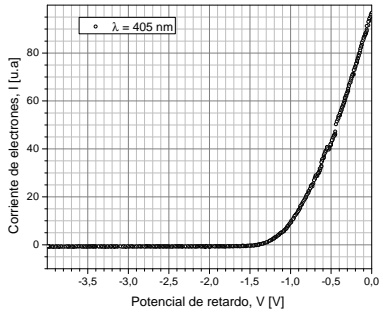
- Procedimiento
  - Parte II
    - ➊ Tomar las curvas de  $I_e[u.a.]$  vs  $V_r[V]$ , (sólo la parte negativa), para la misma longitud de onda, (frecuencia), y diferentes intensidades.
    - ➋ Repetir para cada una de las longitudes de onda.  
 $\lambda \longrightarrow 365 \text{ nm}; 405 \text{ nm}; 436 \text{ nm}; 546 \text{ nm}; 578 \text{ nm}$
    - ➌ Determinar el potencial de frenado,  $V_o$ .
    - ➍ Verificar, para cada una de las longitudes de onda, que el potencial de frenado,  $V_o$ , no depende de la intensidad de la radiación incidente.

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

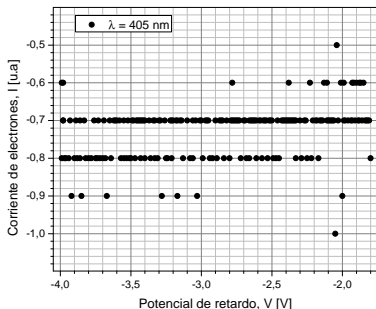
- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 1
    - Curva  $I$  vs  $V$ , característica.



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 1
    - Curva  $I$  vs  $V$ . *Background,  $I_o$ .*

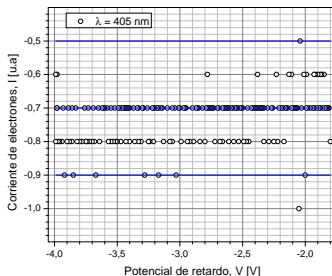


# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 1
    - Curva  $I$  vs  $V$ .

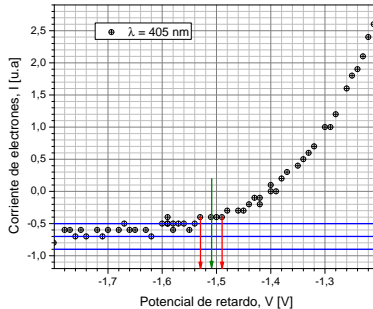
$$I_o = \langle I_o \rangle \pm 3\sigma_o$$



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 1



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 1
    - Apreciación de la escala del voltaje:  $A = 0.02 \text{ V}$
    - Incertidumbre de la escala del voltaje:  $\Delta V = 0.01 \text{ V}$
    - Límite inferior del intervalo:  $V_{o-inf} = -1.49 \pm 0.01 \text{ V}$
    - Límite superior del intervalo:  $V_{o-sup} = -1.53 \pm 0.01 \text{ V}$
    - Rango del intervalo:  $R = \frac{|V_{o-sup} - V_{o-inf}|}{2} = 0.02 \pm 0.01 \text{ V}$
    - Valor central del intervalo:  $R = \frac{V_{o-sup} + V_{o-inf}}{2} = -1.51 \text{ V}$
    - El potencial de frenado:

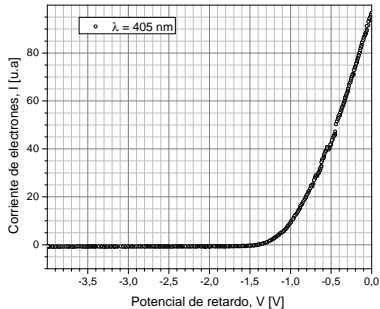
$$V_o = -(1.51 \pm 0.01) \text{ V}$$

*L. D. López*

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

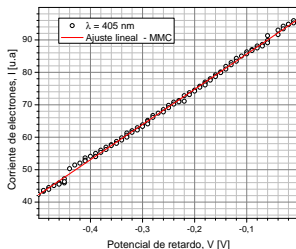
- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 2
    - Curva  $I$  vs  $V$ , característica.



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 2
    - Curva  $I$  vs  $V$ . Ajuste lineal - MMC



$$I = (96.5 \pm 0.1) + (108.6 \pm 0.4) V$$

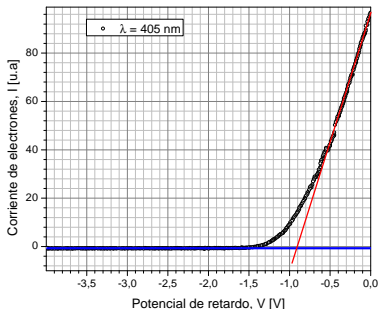
L. D. López



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

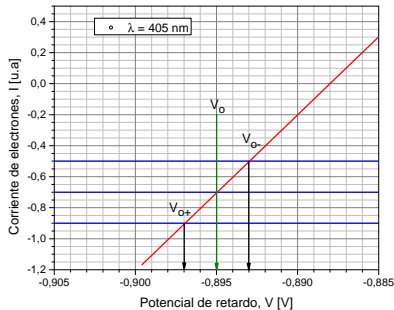
- Determinación del potencial de frenado,  $V_0$ .
  - Método 2
    - Curva  $I$  vs  $V$ , característica.



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 2
    - Curva  $I$  vs  $V$ , característica.



# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 2
    - $I_o = \langle I_o \rangle \pm 3\sigma_o$
    - $\langle I_o \rangle = -0.7 \text{ u.a}; \quad \sigma_o = 0.07 \text{ u.a}$
    - $\langle I_o \rangle_{(-)} = -0.9 \text{ u.a} \quad \langle I_o \rangle_{(+)} = -0.5 \text{ u.a}$
    - $I = (96.5 \pm 0.1) + (108.6 \pm 0.4) V$
    - El potencial de frenado:
    - $V_{o(-)}$   
 $-0.5 = 96.5 + 108.6 V_{o(-)} \quad V_{o(-)} = -0.893186 V$
    - $V_{o(+)}$   
 $-0.9 = 96.5 + 108.6 V_{o(+)} \quad V_{o(+)} = -0.896869 V$
    - $R = \frac{|V_{o(+)} - V_{o(-)}|}{2} = 0.003683 V$

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

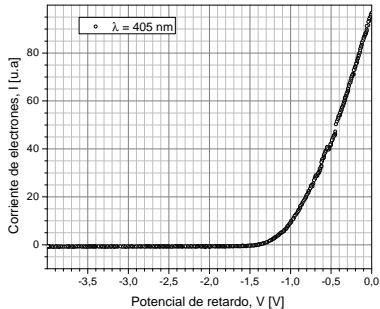
## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 2
    - El potencial de frenado:
    - $R = \frac{|V_o(+)-V_o(-)|}{2} = 0.003683\text{ V}$
    - $\Delta V_o = \frac{R}{2} = 0.001842\text{ V} \approx 0.002\text{ V}$
    - $V_o = \frac{|V_o(+)+V_o(-)|}{2} = -0.895028\text{ V}$   
 $V_o = -(0.895 \pm 0.002)\text{ V}$

# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

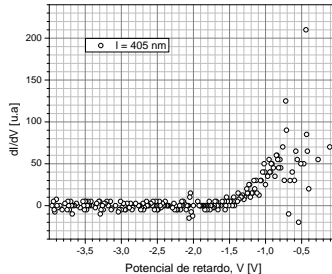
- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 3
    - Curva  $I$  vs  $V$ , característica.



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

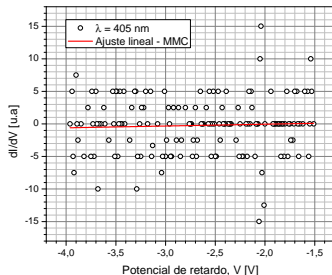
- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 3
    - Curva  $\left(\frac{dI}{dV}\right)$  vs  $V$ .



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

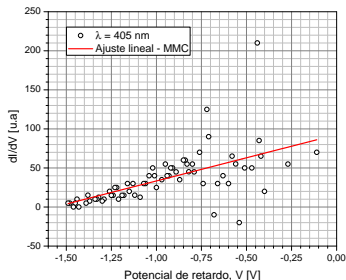
- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 3
    - Curva  $\left(\frac{dI}{dV}\right)$  vs  $V$ .



# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .
  - Método 3
    - Curva Curva  $\left(\frac{dI}{dV}\right)$  vs  $V$ .





# EFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Determinación del potencial de frenado,  $V_o$ .

- Método 3

- Ajuste lineal  $V \leq V_o$

- $\frac{dI}{dV} = (-0.2406 \pm 1.4071) + (0.0370 \pm 0.5028) V$

- Ajuste lineal  $V \geq V_o$

- $\frac{dI}{dV} = (91.9749 \pm 9.0561) + (58.3781 \pm 8.3609) V$

$$V_o = -(1.5806 \pm 0.4193) V$$

$$V_o = -(1.5806 \pm 0.4) V$$

$$V_o = -(1.6 \pm 0.4) V$$

# EFFECTO FOTOELÉCTRICO

## EL EXPERIMENTO - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EL MODELO DE EINSTEIN

