

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

## FÍSICA MODERNA I

---

### AULA 05

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**  
**Pelletron – sala 220**  
**rizzutto@if.usp.br**

**1o. Semestre de 2015**

**Monitor: Gabriel M. de Souza Santos**

Página do curso:

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=5215>

**11/03/2015**

# Teoria de Planck:

A densidade de energia na cavidade, em função da frequência ou do comprimento de onda é dada por:

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT \cdot d\lambda$$

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} \bar{\epsilon} \cdot d\lambda$$

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{\lambda \Delta \epsilon}{e^{\Delta \epsilon / kT} - 1} \cdot d\lambda$$

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{hc}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda$$

Escrevendo  $\Delta \epsilon = h\nu$  e  $\lambda \nu = c$

$c$  é a velocidade da luz

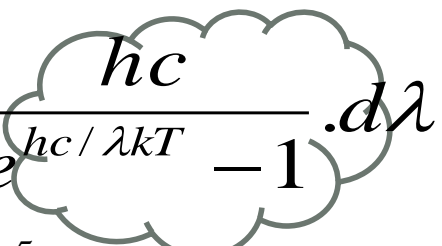
$h$  = constante de Planck

$h = 6,23 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  ou  $4,14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi \nu^5}{c^5} \frac{ch\nu}{\nu e^{h\nu/kT} - 1} \cdot \frac{c}{\nu^2} d\nu$$

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot d\nu$$

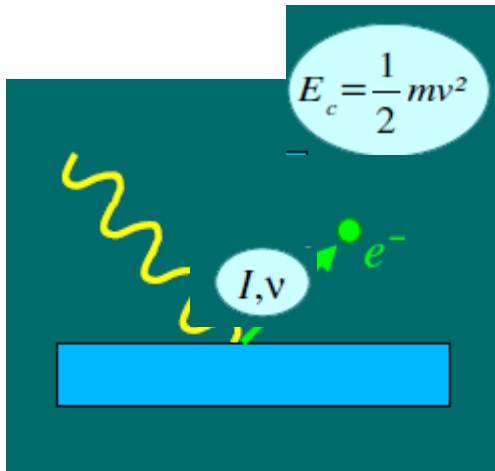
Deve ser a função que Wien procurava



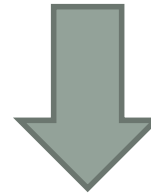
# Exercícios:

- 1) De acordo com a Lei de Planck, qual é a energia média de um oscilador cuja energia é  $kT$ ?
- 2) Use a lei de Planck para mostrar que a densidade total de energia de um corpo negro é proporcional a  $T^4$  como afirma a Lei de Stefan-Boltzmann

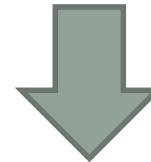
# Efeito Foto-elétrico



- Quando a radiação eletromagnética incide sobre um material há emissão de elétrons



- Este é o chamado efeito foto-elétrico



- Este efeito foto-elétrico contradiz as previsões da teoria ondulatória (puramente) da radiação eletromagnética (clássica)

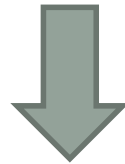
# Contradições da física ondulatória clássica:

<i>Previsões:</i>	<i>Observações experim.:</i>
1) A energia cinética dos elétrons ( $E_c$ ) deveria aumentar com a intensidade ( $I$ ) da onda E-M.	✗ $\Rightarrow$ 1) $E_c$ não varia com $I$ .
2) Deveria “demorar” para haver emissão de elétrons, dependendo de $I$ .	✗ $\Rightarrow$ 2) Não há atraso perceptível.
3) $E_c$ não deveria depender de forma descontínua da frequência ( $\nu$ ) da onda E-M.	✗ $\Rightarrow$ 3) Para frequências baixas ( $\nu < \nu_0$ ) não ocorre e.f.e.

- ✓ A energia do foto-elétron depende da frequência da radiação incidente  $\longrightarrow E_c \sim \nu$
- ✓ Existe uma frequência de corte para a radiação eletromagnética, abaixo desta ( $\nu < \nu_0$ ) não ocorre efeito foto-elétrico  $\longrightarrow$  Frequência de corte depende do material da superfície emissora

# Teoria Quântica

- ❑ A quantização de energia é postulado por Einstein em 1905 – teoria corpuscular da luz



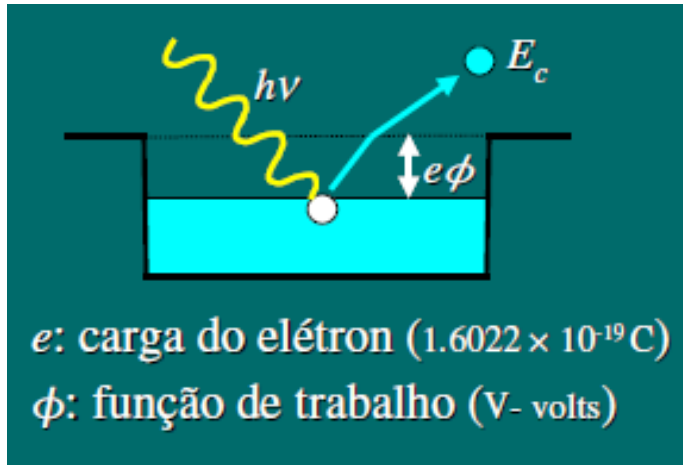
- ❑ Propôs que a radiação eletromagnética é composto de “pacotes” de energia ou “fótons”. A energia  $E$  de cada fóton é proporcional a frequência  $\nu$  da radiação:

$$E_f = h\nu$$

- ❑ onde  $h$  é a constante de Planck usada originalmente para explicar a radiação de corpo negro

# Teoria Quântica

□ A energia do fóton ao incidir sobre uma superfície metálica, é totalmente absorvida por um elétron, o qual pode ser ejetado da superfície com energia cinética de:



$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

□ Isto explica por que a energia máxima dos elétrons independe da intensidade da fonte, pois aumentar a intensidade da fonte significa aumentar o número de fótons que vai aumentar o número de elétrons (corrente fotoelétrica), mas a energia máxima de cada elétron é a mesma

□ No entanto se a frequência da radiação ( $h\nu$ ) for menor que  $e\phi$ , isto é: nenhum elétron terá energia para escapar do metal

frequência de corte



$$\nu_0 = \frac{e\phi}{h}$$

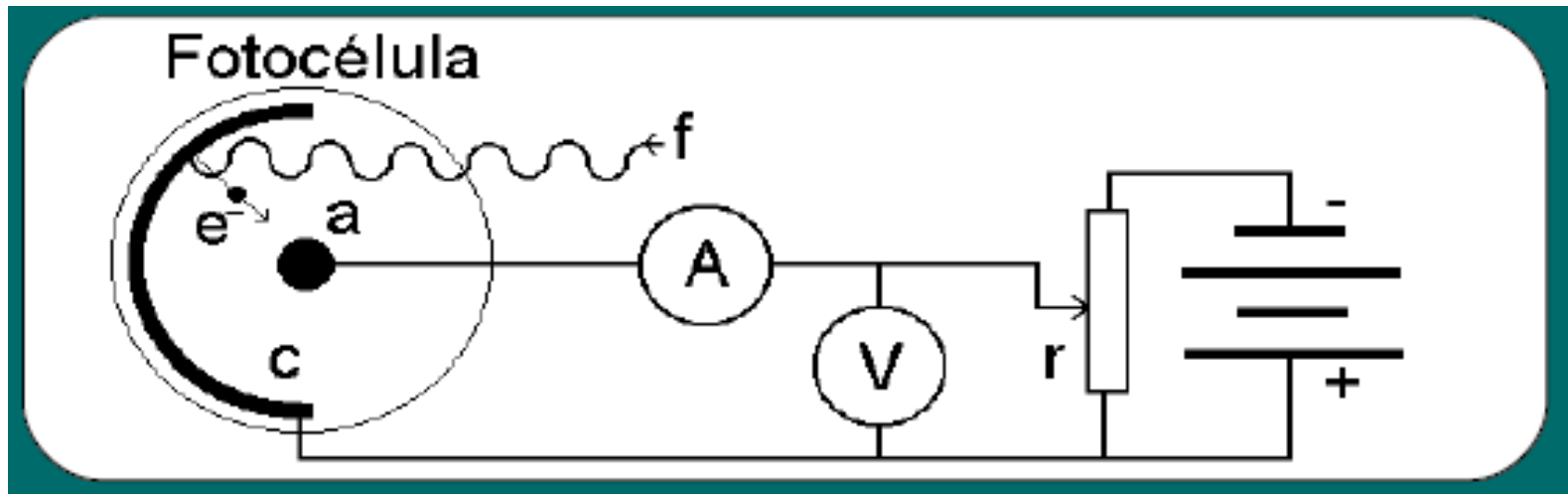
$$h\nu < e\phi$$

□ Não há atrasos na emissão dos fotoelétrons, mesmo baixa I (há fótons incidente) ejetando elétrons, o elétron não fica acumulando energia para depois escapar.

- 1) ✓
- 2) ✓
- 3) ✓

# Arranjo Experimental

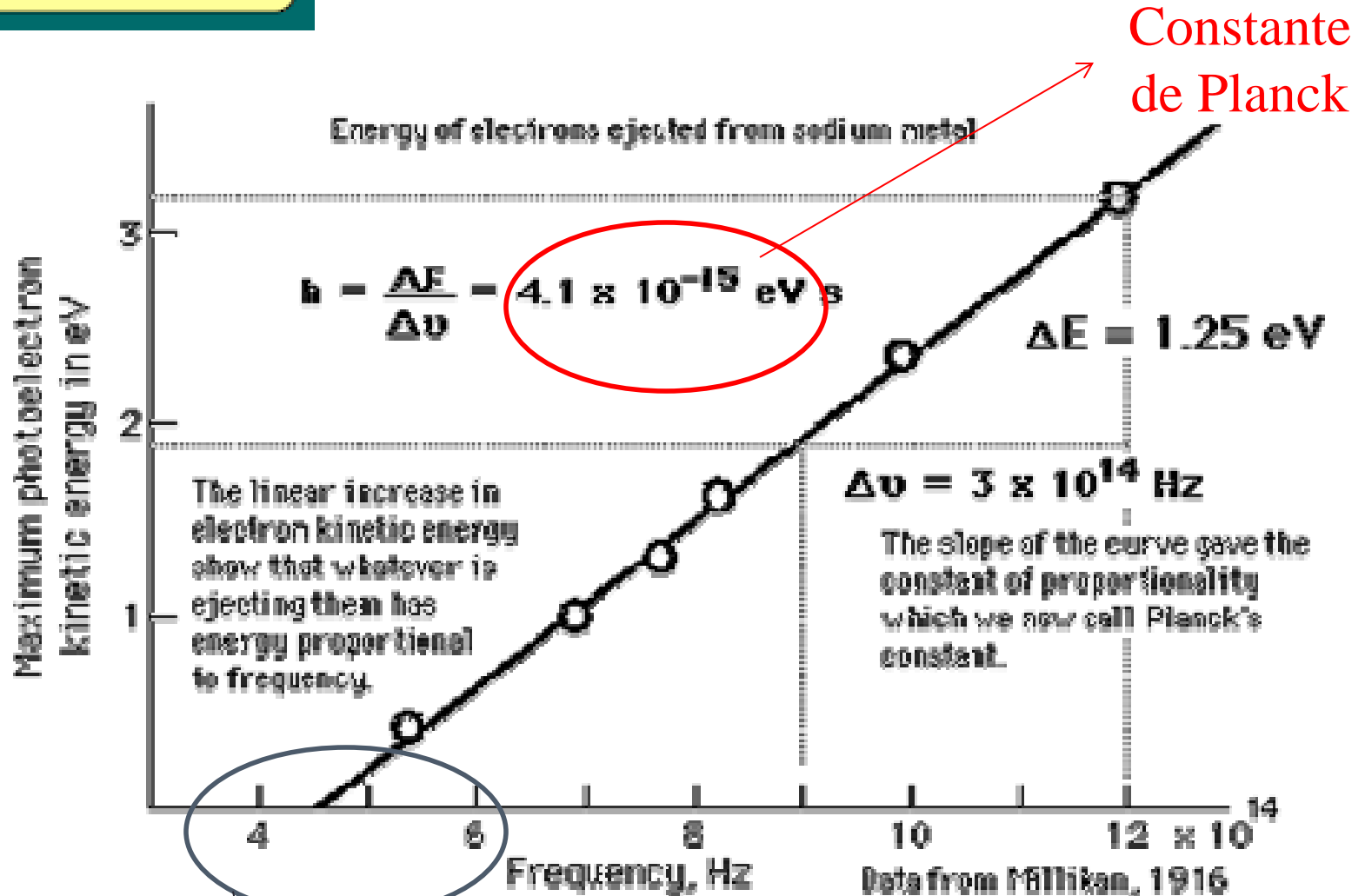
- ❑ A teoria prevê uma relação linear entre a energia máxima dos fotoelétrons e a frequência da radiação incidente
- ❑ Verificado experimentalmente por Millikan em 1916
  - ❑ Usou uma célula fotoelétrica





$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

## Resultados para $V_{xf}$



Só a partir de um certo valor de frequência ( $\nu$ ) que começa a ocorrer o efeito fotoelétrico (independente da intensidade)

$$E_c^{m\acute{a}x} = h\nu - e\phi$$

Trabalho necessário para remover o elétron do metal (este trabalho é necessário para superar os campos atrativos dos átomos na superfície)

□ A frequência mínima para que o efeito fotoelétrico seja observado,  $V_0=0$

$$0 = h\nu - \phi$$

$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

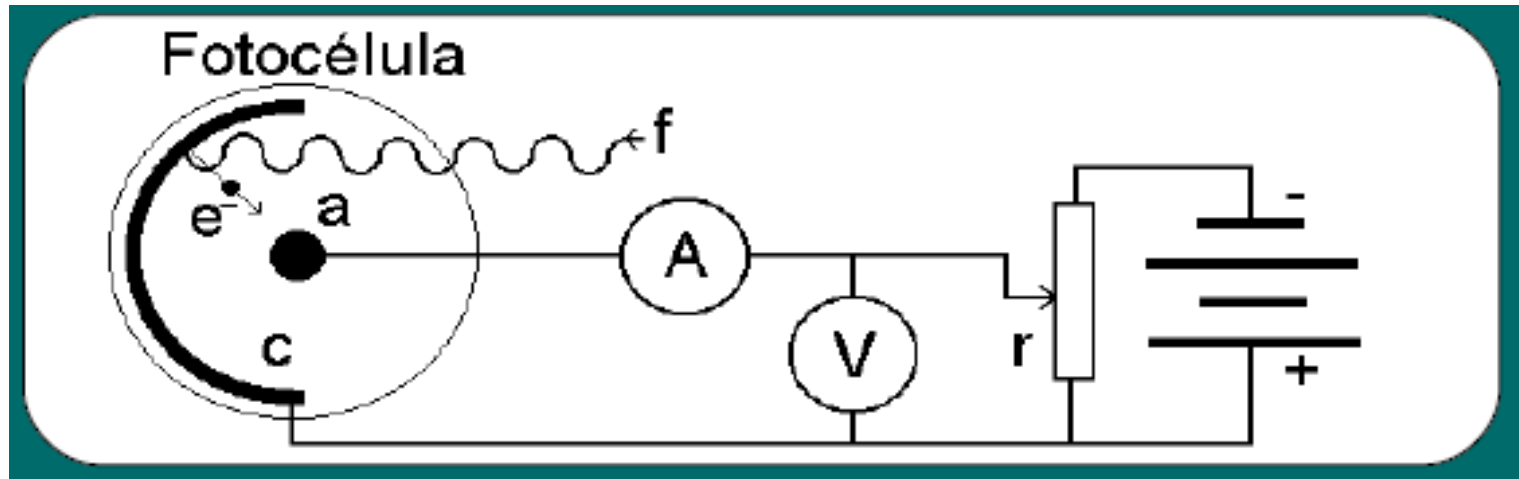
$$\nu_0 = \frac{\phi}{h}$$

□ Os fótons com frequência menores que  $\nu_0$  não têm energia suficiente para ejetar elétrons do metal

□ Para a maioria dos metais a função trabalho é da ordem de alguns elétrons-volts

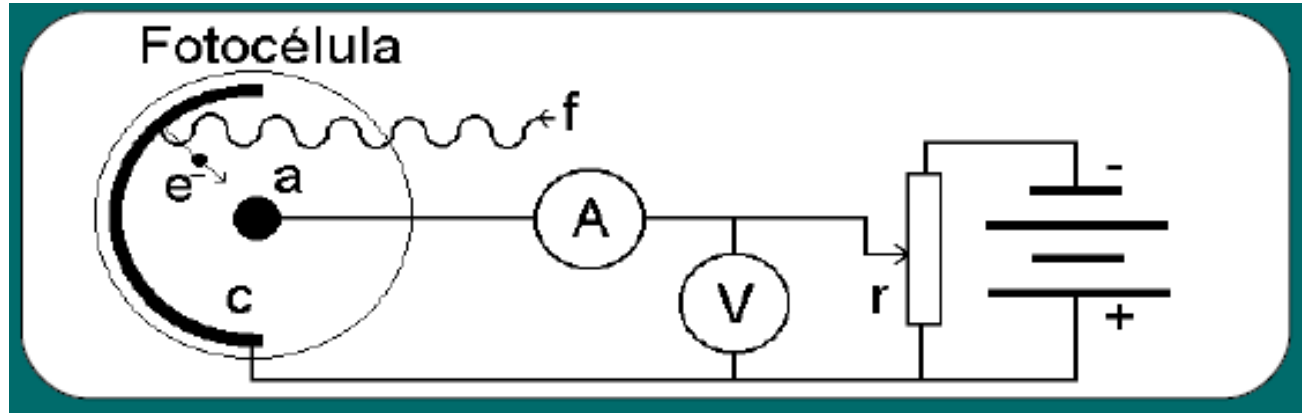
elemento	$\Phi$ (ev)
Na	2,28
Cd	4,07
Al	4,08
Pt	6,35
Ni	5,01
Pb	4,14

# Arranjo Experimental

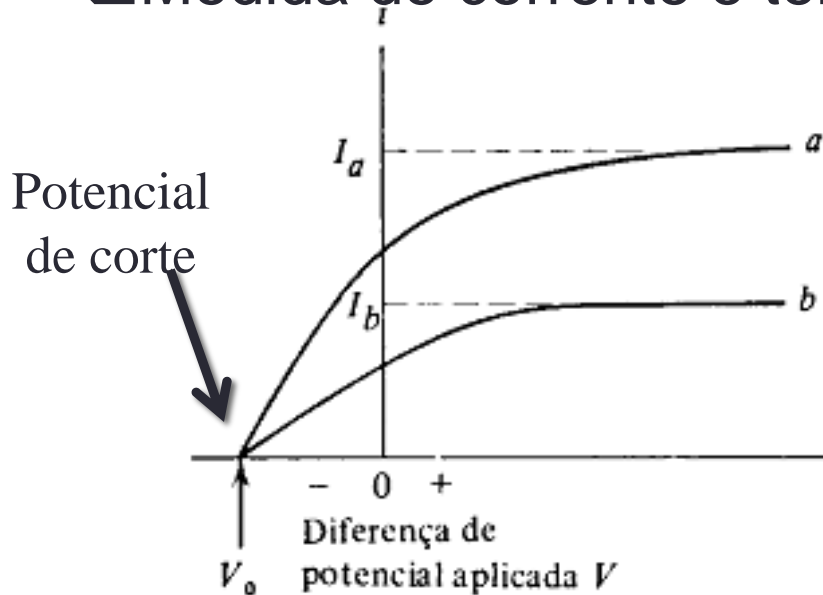


- Pico-amperímetro (A)
- Voltímetro (V)
- Fonte de tensão variável
- Na fotocélula temos:
  - Catodo feito de metal de baixa função trabalho
  - Ânodo com metal de alta função trabalho
- Fonte de luz monocromática (iluminar o catodo), visível, Infravermelho

# Arranjo Experimental



☐ Medida de corrente e tensão



☐ Variando a tensão  $V$  de freamento é possível determinar a tensão  $V_0$  na qual a corrente fotoelétrica é nula

Quando  $V > 0 \Rightarrow i \rightarrow i_{\max}$

Quando  $V < 0 \Rightarrow i \rightarrow 0$

$$I_b < I_a$$

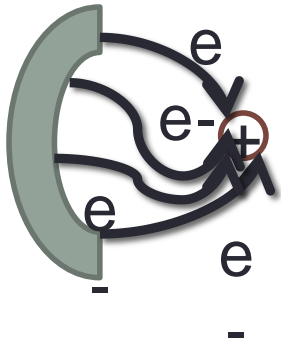
☐ Este valor de  $V_0$  independe da intensidade de luz incidente

☐ Este valor de  $V_0$ , multiplicado pela carga, mede a energia cinética  $K_{\max}$  do mais rápido fotoelétron emitido

$$E_c^{\max} = eV_0$$

# Arranjo Experimental

☐ Medida de corrente e tensão

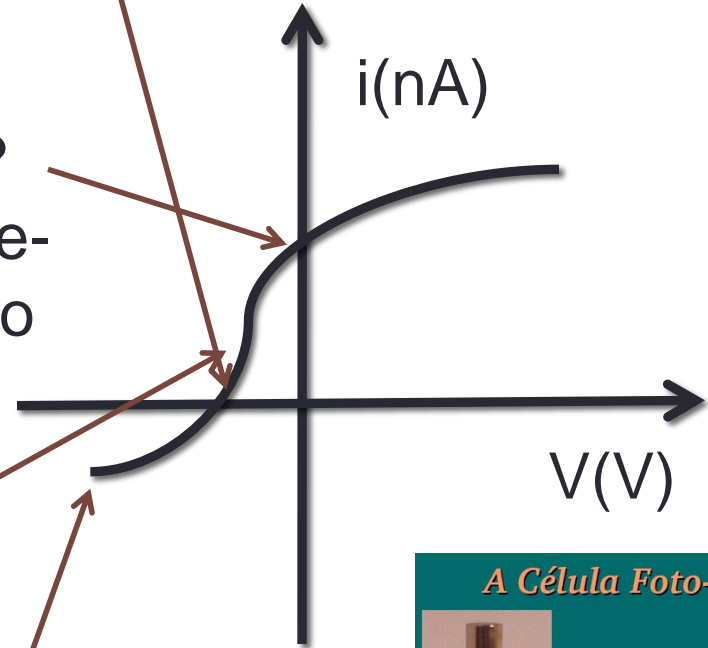


☐ Tensão = 0  
Tenho corrente?  
Naturalmente os e-  
chegam ao ânodo

☐ tensão negativa tenho  
freamento dos elétrons até não  
ter mais e- do cátodo chegando  
no ânodo ( $V$  diminui  $i$  diminui)

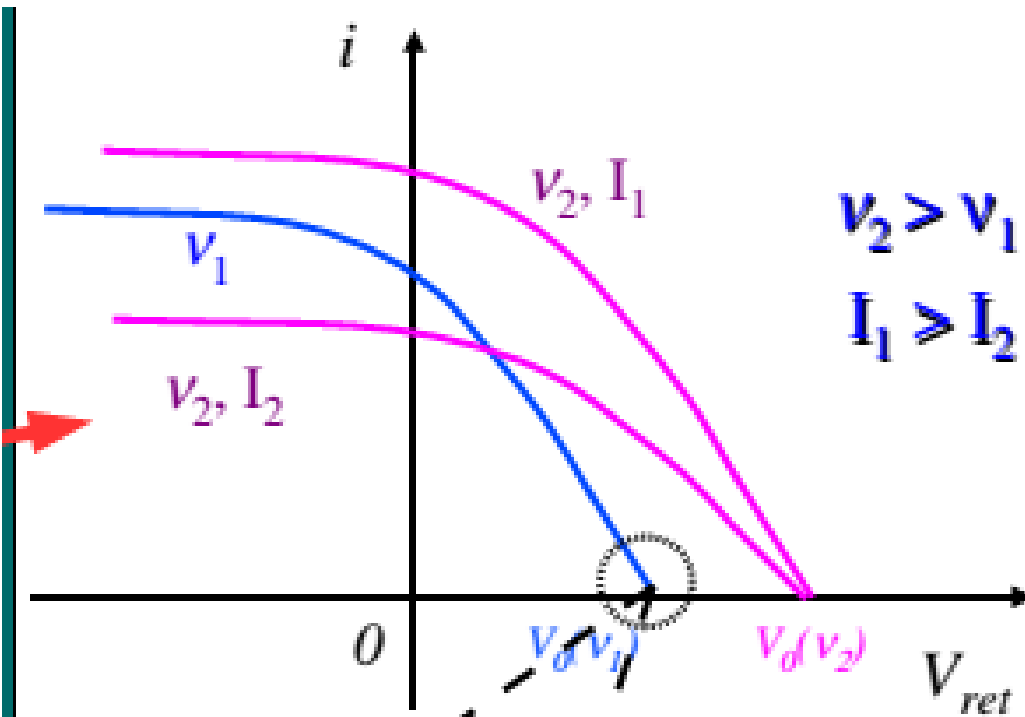
☐ corrente fotoelétrica é negativa devido a  
simetria cilíndrica da fotocélula, catodo é  
irradiado ao mesmo tempo

☐ a tensão  $V_0$  na a qual a  
corrente fotoelétrica é nula



# Medida $V \times i$ – potencial de corte ( $V_0$ )

- Podemos ainda observar que o valor de  $V_0$  independe da intensidade da luz incidente, mas
- Depende da radiação incidente, ( $\lambda$  ou  $\nu$ )



- O efeito fotoelétrico é um efeito de superfície.
- Este experimento do efeito fotoelétrico mostrou que a radiação eletromagnética comportava-se como corpúsculo.

# Exemplos

□ O comprimento de onda de corte do potássio é 558nm  
Qual a função trabalho do potássio

$$\square hc = 1240eV.nm$$

$$eV_o = K_{\max} = h\nu - \phi$$

$$0 = h\nu - \phi$$

$$\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\phi = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{558} = 2,22eV$$

Qual o potencial de corte para uma luz incidente de 400nm

$$eV_o = \frac{hc}{\lambda} - \phi$$

$$eV_o = \frac{1240}{400} - 2,22$$

$$eV_o = 3,1 - 2,22 = 0,88eV$$

Observe que o potencial de corte  $V_o$  em Volts é numericamente igual a energia cinética máxima dos elétrons em eV

Logo  $V_o = 0,88V$

# Exemplos

□ Qual é a energia associada aos elétrons de um feixe de micro-ondas. É possível com esta energia ejetar fotoelétrons de superfícies metálicas?

□  $E = h\nu$

□ Micro-ondas  $\lambda = 10\text{cm}$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{10 \times 10^{-2}\text{m}} = 124 \times 10^2 \times 10^{-9}\text{eV}$$

$$E = 1,24 \times 10^{-5}\text{eV}$$

Esta energia é muito pequena para ejetar fotoelétrons da superfície metálica (para os metais a função trabalho é da ordem de eV)



# Exercício

☐ Luz de comprimento de onda mínimo de 400nm incide sobre uma placa de metal de Lítio ( $\Phi=2.93\text{eV}$ ). Calcule

- A energia do fóton
- O potencial de corte  $V_0$
- Qual a frequência de luz necessária para produzir elétrons de energia cinética de 3eV do Lítio iluminado

$$a) E = h\nu$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{400\text{nm}}$$

$$E = 3,10\text{eV}$$

$$b) E_{\text{max}} = h\nu - \phi$$

$$eV_0 = 3,10 - 2,93$$

$$eV_0 = 0,17\text{eV}$$

$$V_0 = 0,17\text{V}$$

$$c) E_{\text{max}} = h\nu - \phi$$

$$h\nu = eV_0 + \phi$$

$$h\nu = 3,0 + 2,93$$

$$h\nu = 5,93\text{eV} = E$$

$$\nu = \frac{5,93\text{eV}}{h} = \frac{5,93\text{eV}}{4,136 \times 10^{-15}\text{eV}\cdot\text{s}}$$

$$\nu = 1,43 \times 10^{15}\text{ Hz}$$

Menor que o ultravioleta