



# Efeito Fotoelétrico

Profa Rosangela Itri

Agosto 2023

# Contexto histórico

Heinrich Hertz,



O efeito fotoelétrico foi descoberto acidentalmente em 1887 por Hertz

J. J. Thomson



Um estudo da eletricidade negativa emitida pelo efeito fotoelétrico foi conduzido por J. J. Thomson em 1899



1906 - Descoberta do Elétron

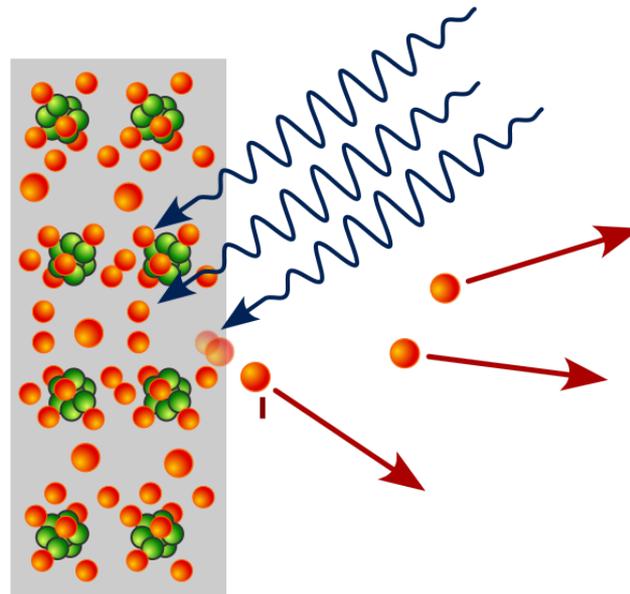
# Contexto histórico

Philipp Lenard



1905 - raios  
catódicos

- Phillip von Lenard, *Annales de Physique, Leipzig* 8, p. 149, 1902
- Realizou um experimento onde ele faz incidir luz em um eletrodo e mede a corrente gerada entre os eletrodos e a energia cinética dos recém descobertos elétrons quando emitidos pelo efeito da luz no eletrodo



# Contexto histórico

Philipp Lenard



1905 - raios  
catódicos

estabeleceu, in 1902, que o número de elétrons liberados, mas não sua energia, era afetado pela intensidade da luz iluminando uma placa metálica.

Lenard também encontrou, para sua surpresa, que a energia dos elétrons dependia do comprimento de onda da luz e que comprimentos de onda menores tendem a gerar elétrons mais rápidos; contudo, Lenard foi incapaz de desenvolver condições experimentais adequadas para determinar como este efeito variava.

É importante ressaltar que "... Lenard não demonstrou que a foto-resposta varia com a frequência da luz "

# Contexto histórico

Albert Einstein



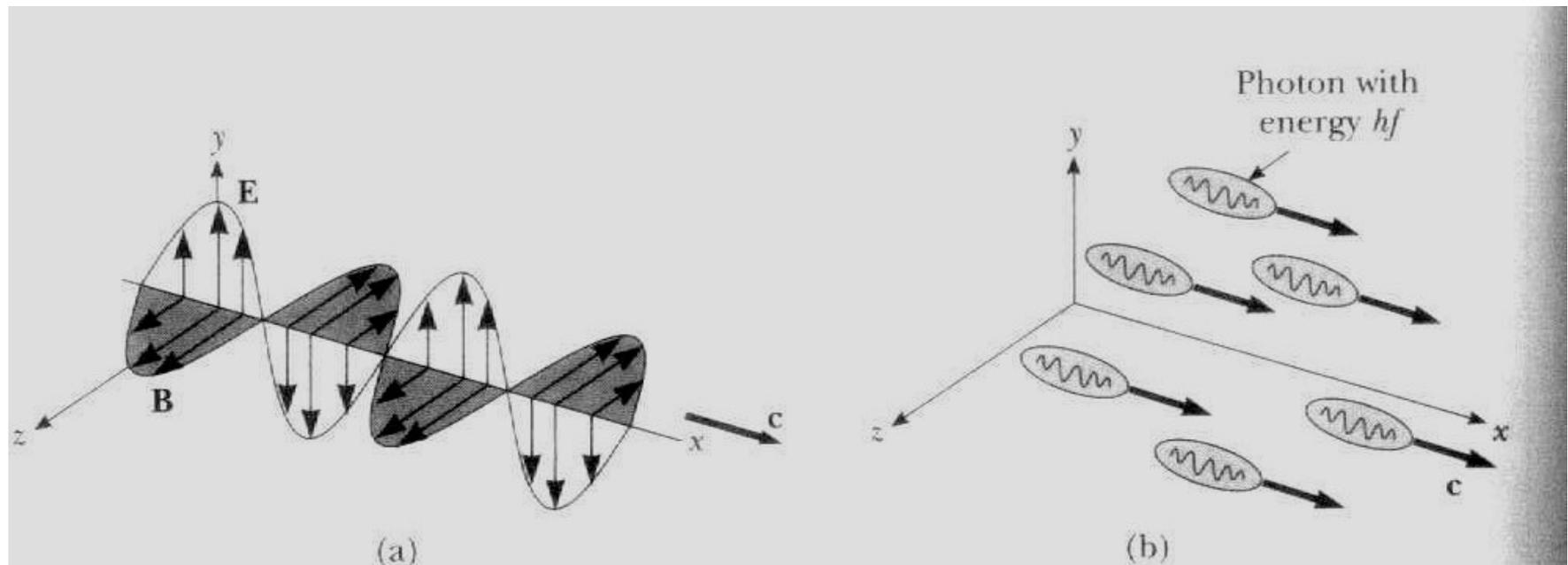
It was not until 1905 that Einstein published his revolutionary explanation of the photoelectric effect, based on his "lightquantum" hypothesis. His theory explained the photoelectric effect fully, but it was controversial. Einstein proposed that light behaves as though it consists of a stream of independent, localized units of energy that he called lightquanta.



1921 - Efeito Fotoelétrico  
"por suas contribuições à  
física teórica"

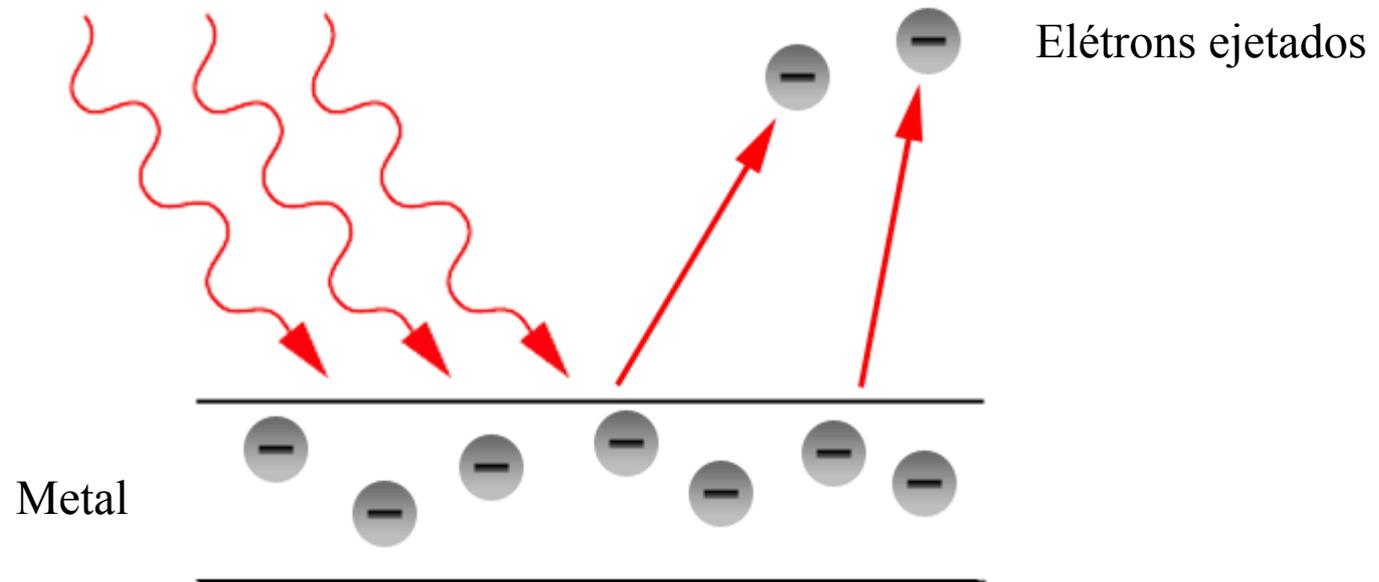
# Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo!
- Ela se propaga como onda e interage como partícula...



# O que é o Efeito Fotoelétrico

Radiação eletromagnética



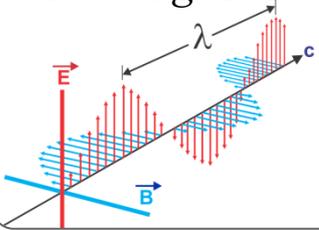
# Descrição teórica

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{S} dt$$

## Classicamente:

- A intensidade da radiação é proporcional a amplitude do campo elétrico ao quadrado
- Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo, a energia cinética dos mesmos deveria aumentar com a intensidade da luz.

### Eletromagnetismo



$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

$$E(t, \mathbf{r}) = E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$B(t, \mathbf{r}) = B_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$B_0 = \frac{1}{c} E_0 \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$I = \langle S \rangle = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2 \longrightarrow \text{Intensidade} \propto E^2$$

### Mecânica clássica

$$F = ma$$

$$v = v_0 + at$$

$$F_e = eE$$

$$v_0 = 0$$

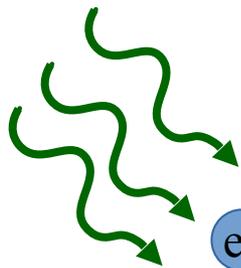
$$F = F_e$$

$$v = \frac{eE}{m} t$$

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \left( \frac{eE}{m} t \right)^2$$

### Radiação eletromagnética



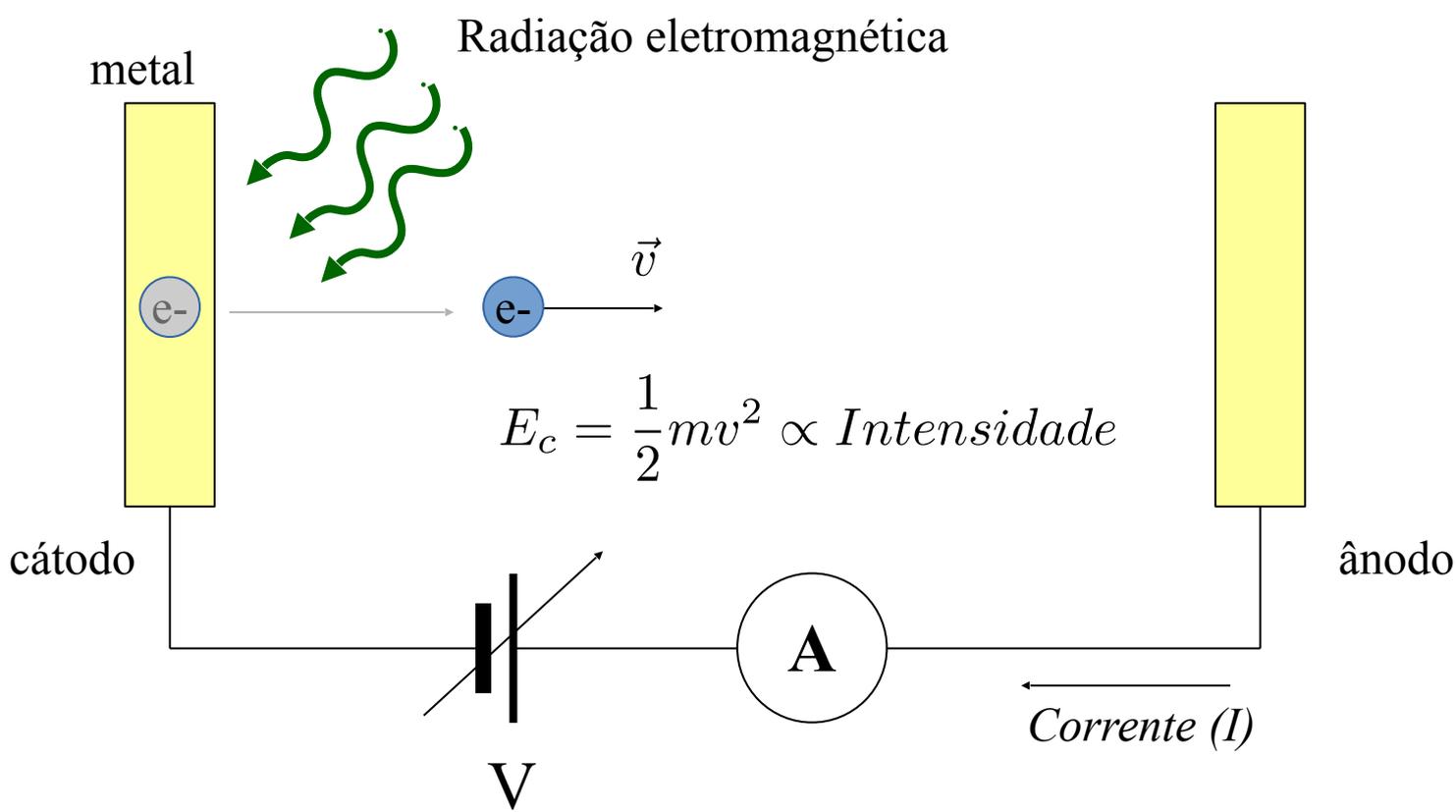
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \propto \text{Intensidade}$$

$$E_c \propto \text{Intensidade}$$

- $\vec{E}$  : Campo elétrico
- $\vec{B}$  : Campo magnético
- $\vec{S}$  : Vetor de Poynting
- $E_c$  : Energia cinética

Este efeito **deveria ocorrer para qualquer frequência de luz**, sendo importante apenas a intensidade da mesma.

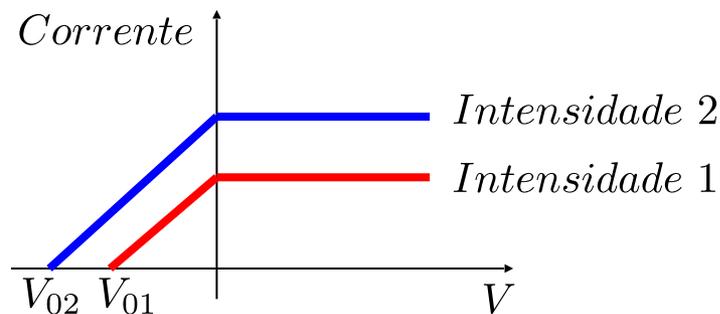
# Descrição teórica / Aparato para medir $E_c$ :



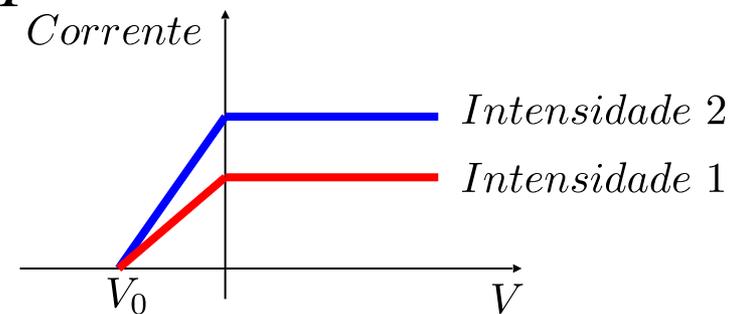
$$E_c = \frac{1}{2}m \left( \frac{eE}{m} t \right)^2$$

- Tempo que a partícula fica exposta a radiação!
- Mesmo se a radiação não for intensa podemos acumular energia durante um tempo suficiente e ejetar elétrons de qualquer forma!

## Previsão da Teoria Clássica



## Medidas Experimentais

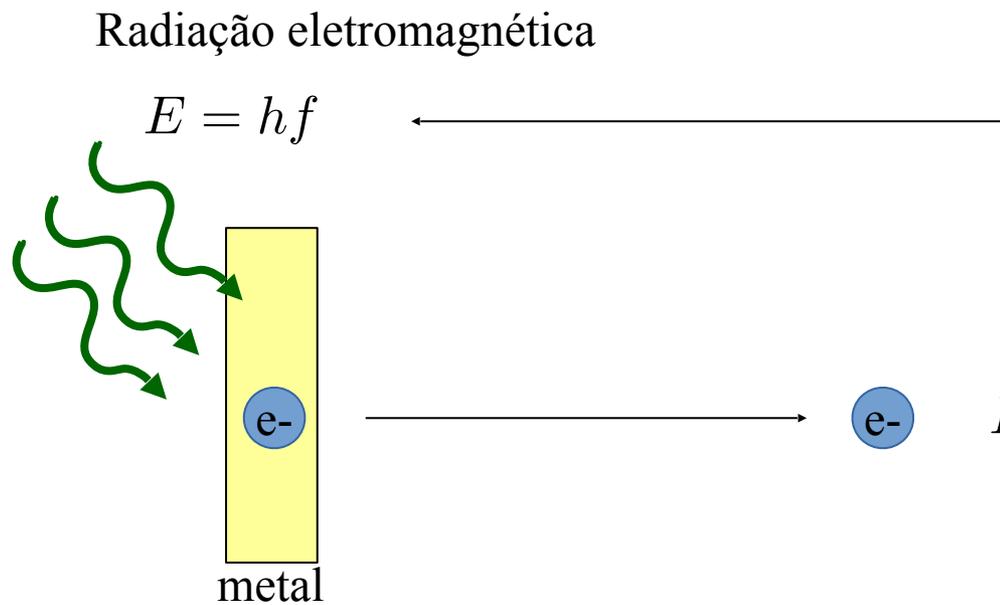


# Nova descrição teórica (Albert Einstein)

“... a radiação monocromática de baixa energia se comporta como se ela consistisse de um quanta de energia independente com magnitude  $E = hf$ ”

“A situação mais simples é aquela em que o quantum de luz dá toda a sua energia para um único elétron.”

“... devemos assumir que cada elétron que deixa o sólido deve realizar uma quantidade de trabalho  $W_0 = e\phi$  (característica daquele sólido)”



$f$  : Frequência da radiação eletromagnética

$h$  : Constante de Planck

$\phi$  : Função trabalho do material irradiado

$e$  : Carga elementar do elétron

$E$  : Energia do fóton incidente   
(Não confundir)

$$E_c = hf - e\phi$$

$$h = 4,135\ 67\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}$$

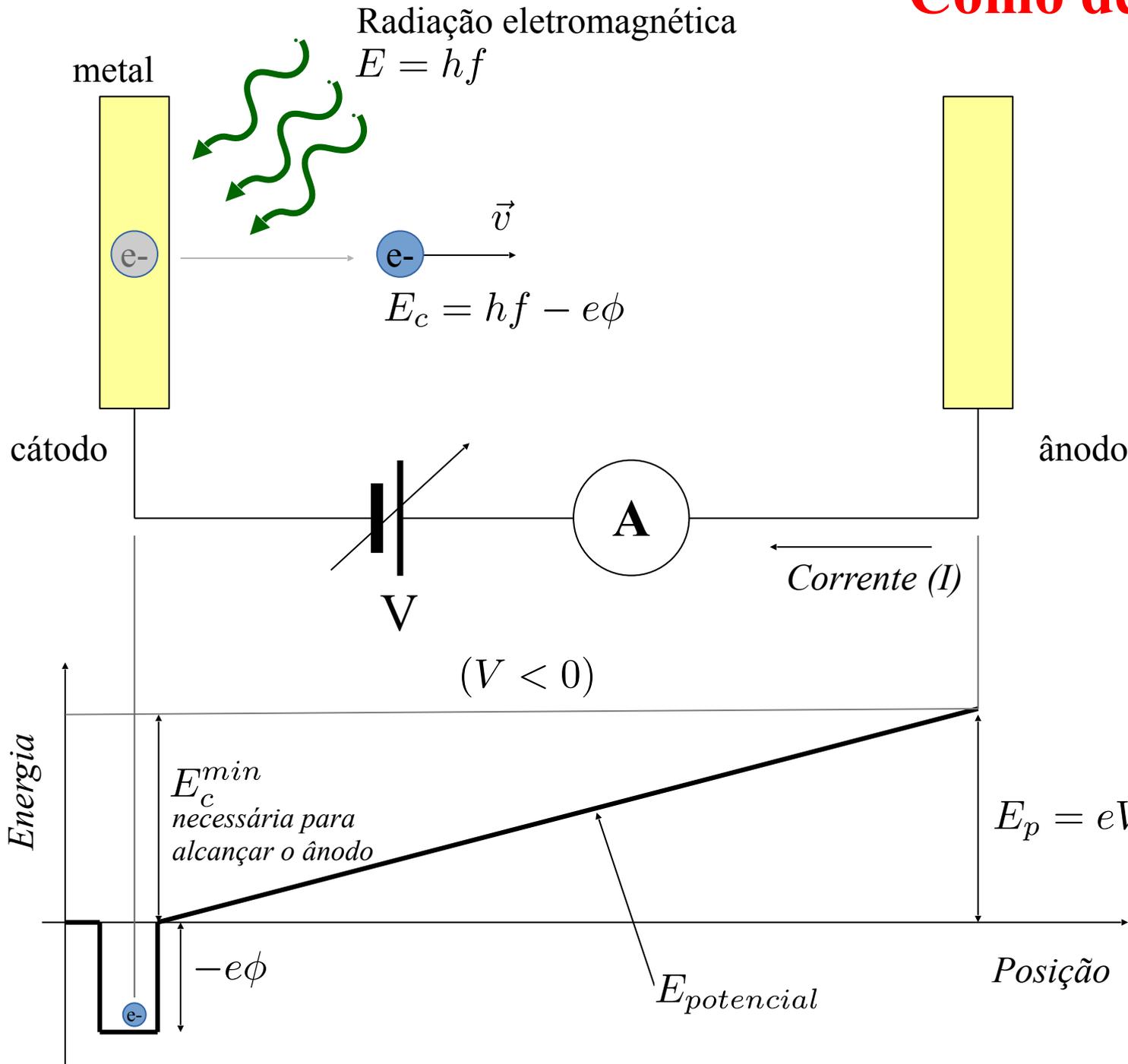
$$e = -1.6021766208(98) \times 10^{19} \text{ [C]}$$

Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, p. 132, 1905

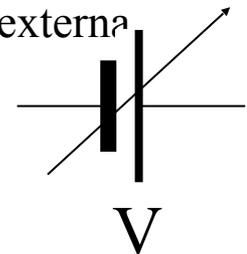
[https://en.wikisource.org/wiki/On\\_a\\_Heuristic\\_Point\\_of\\_View\\_about\\_the\\_Creation\\_and\\_Conversion\\_of\\_Light.](https://en.wikisource.org/wiki/On_a_Heuristic_Point_of_View_about_the_Creation_and_Conversion_of_Light.))

# Nova descrição teórica / Caracterização Experimental

Como determinar  $E_c$ ??

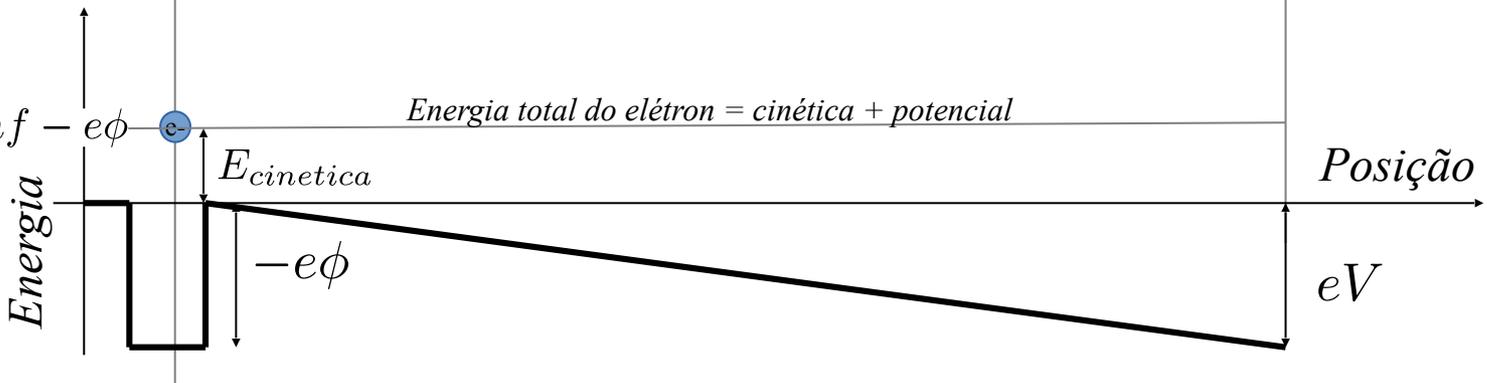
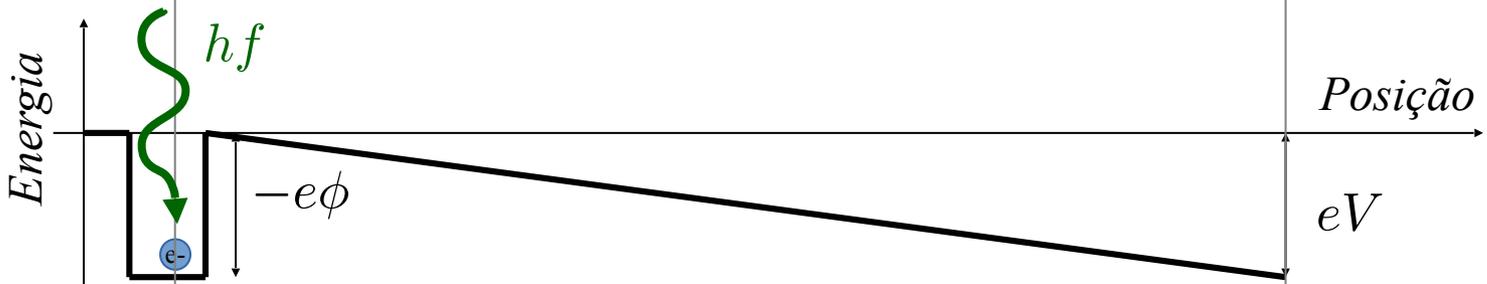
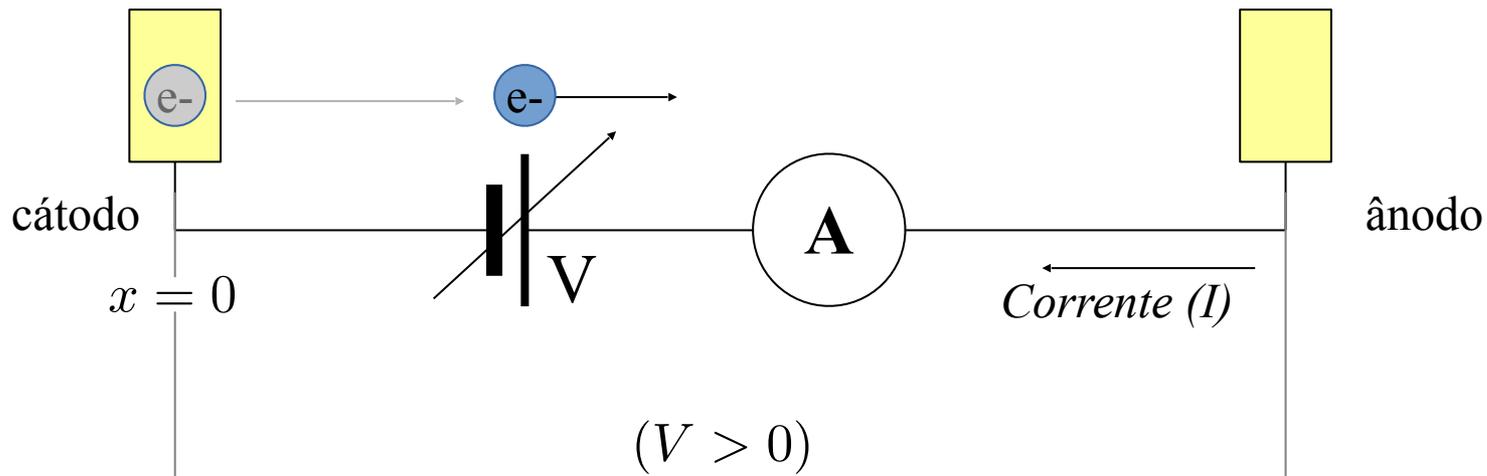


A inclinação do gráfico de energia potencial é ajustado pela fonte de tensão externa

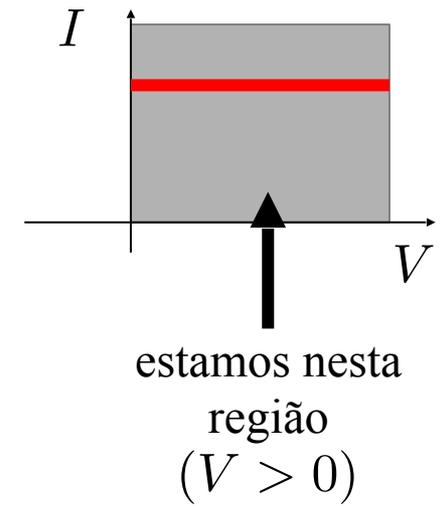


# ... Variando o potencial $V$ : ( $V > 0$ )

(Potencial atrativo)



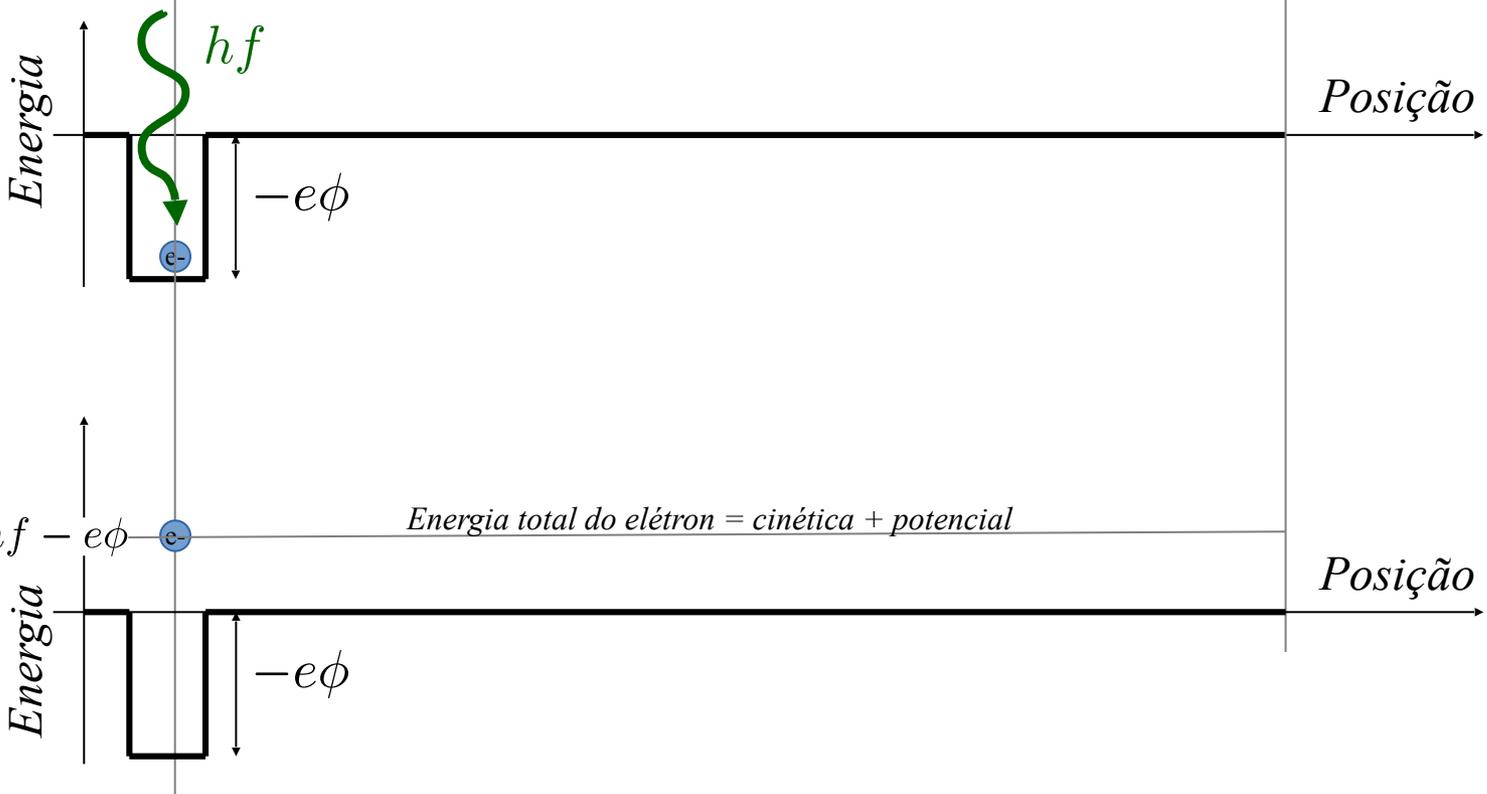
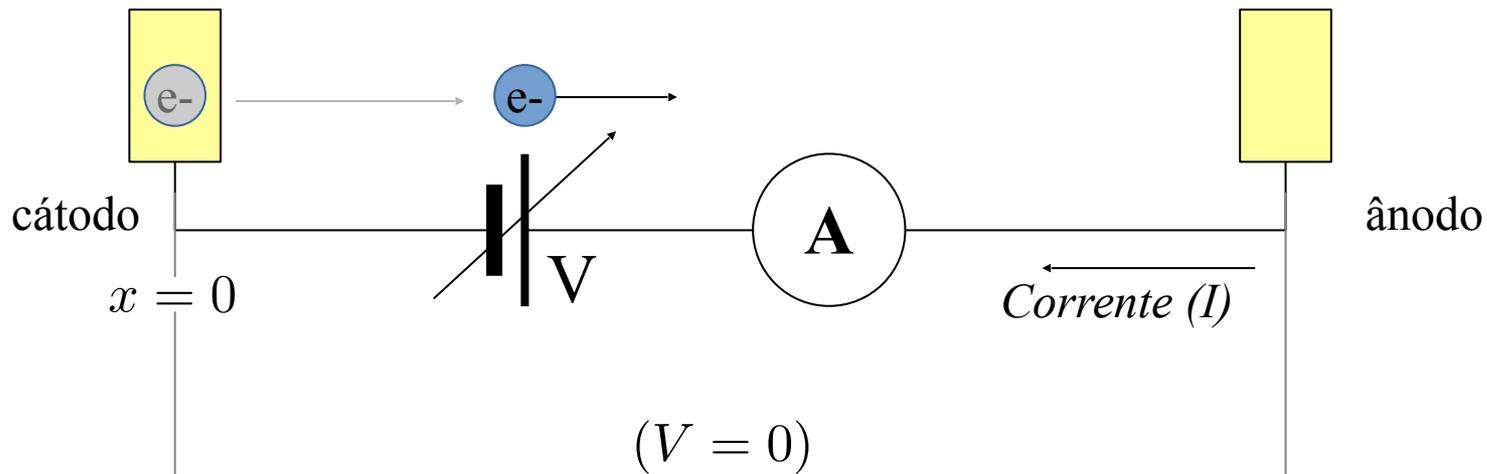
Curva ( $I \times V$ )



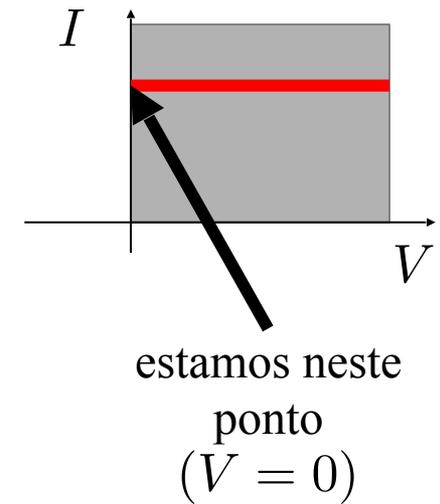
(antes de absorver)

(depois de absorver)

# ... Variando o potencial $V$ : ( $V = 0$ )



Curva ( $I \times V$ )

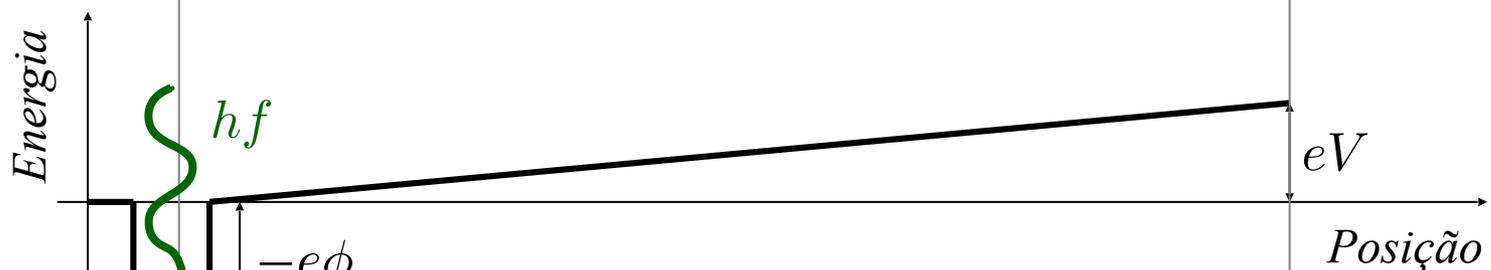
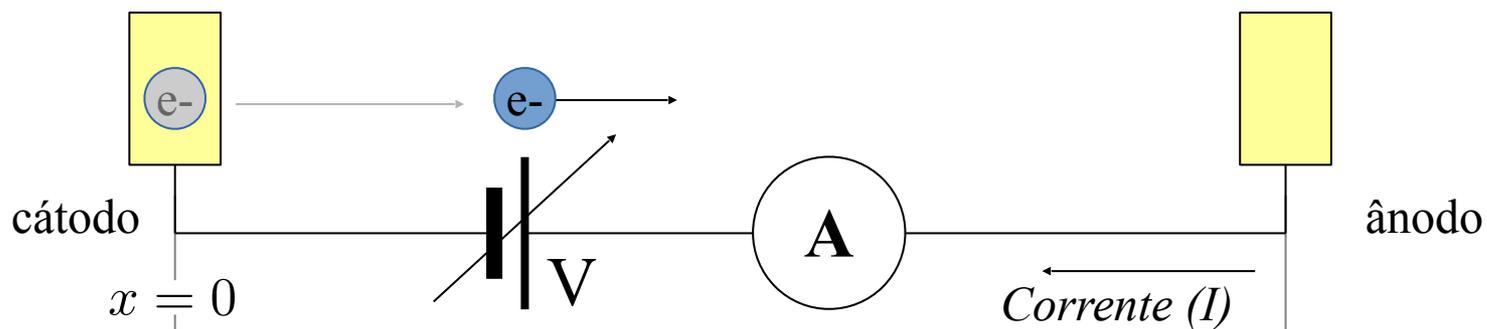


(antes de absorver)

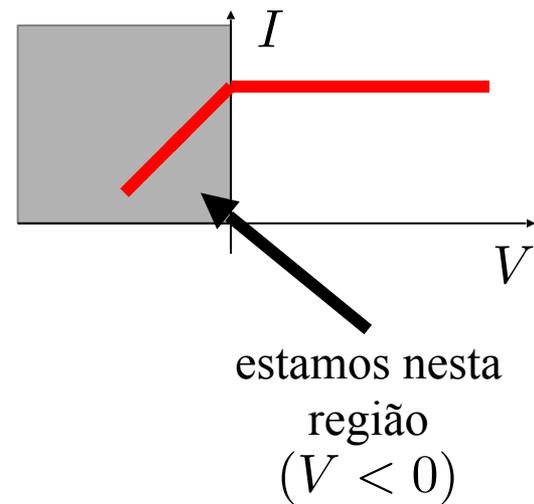
(depois de absorver)

# ... e para Potencial $V < 0$ ?

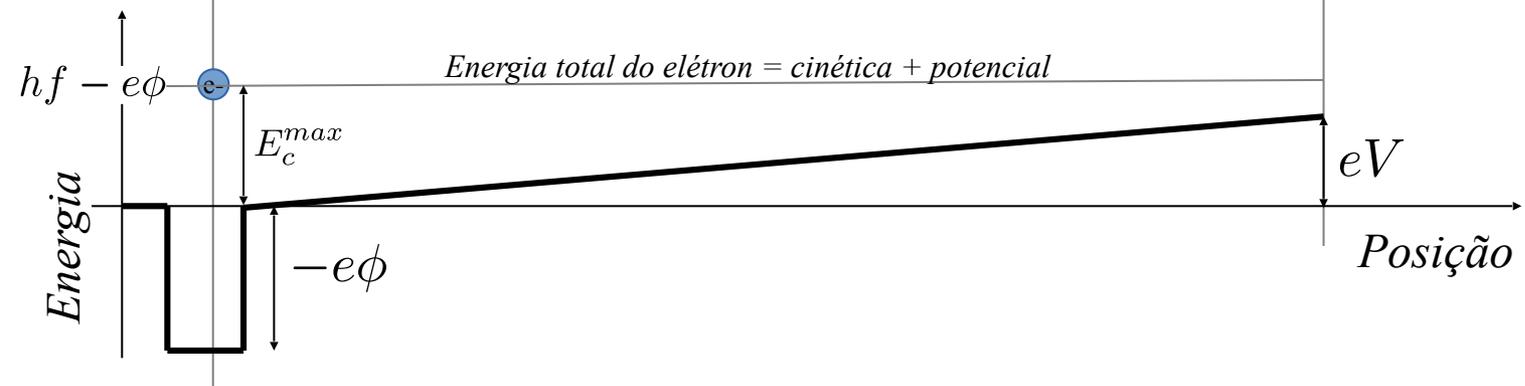
(Potencial repulsivo)



Curva ( $I \times V$ )

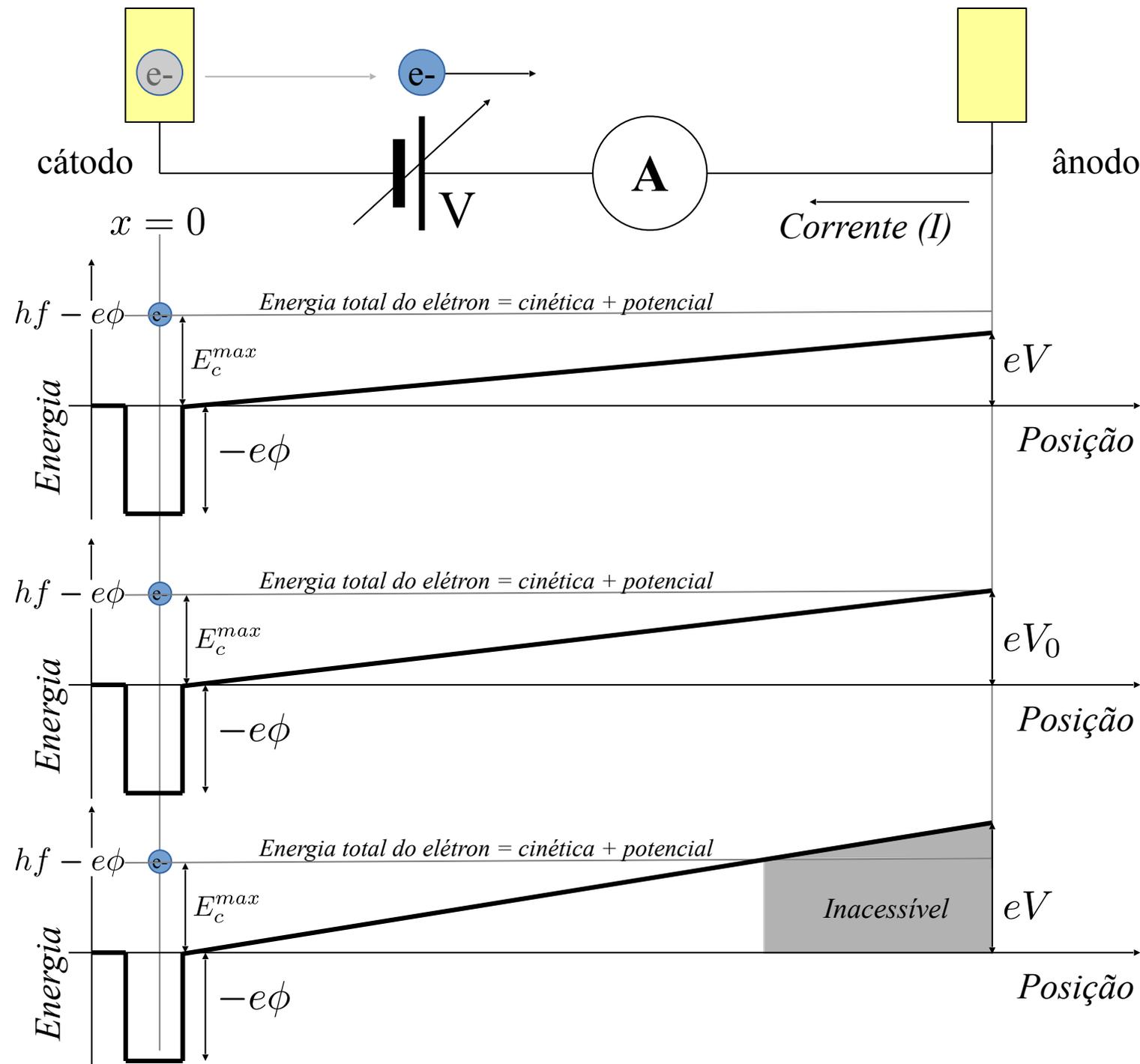


(antes de absorver)

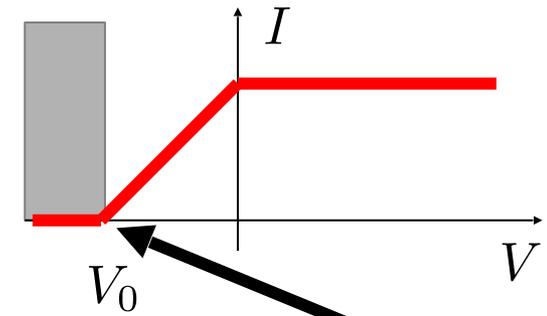


(depois de absorver)

# ... se fizer $V$ cada vez mais negativo?



Curva ( $I \times V$ )



estamos nesta região  
( $V \leq V_0$ )

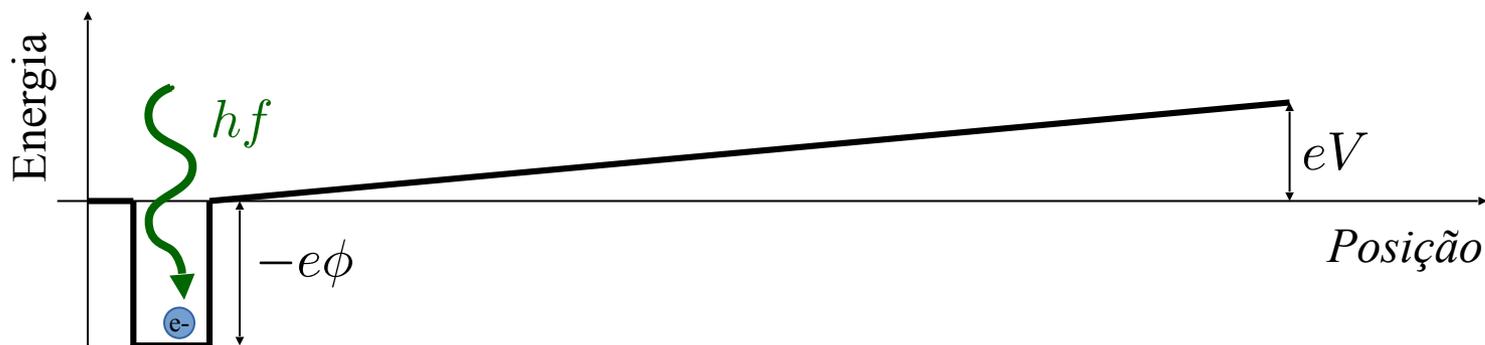
Vai existir um potencial  $V = V_0$  no qual o elétron não tem energia para atingir o ânodo.

**Corrente  $\rightarrow$  ZERO!**

Se tornar  $V$  mais negativo ainda  $\rightarrow$  a corrente **permanece nula.**

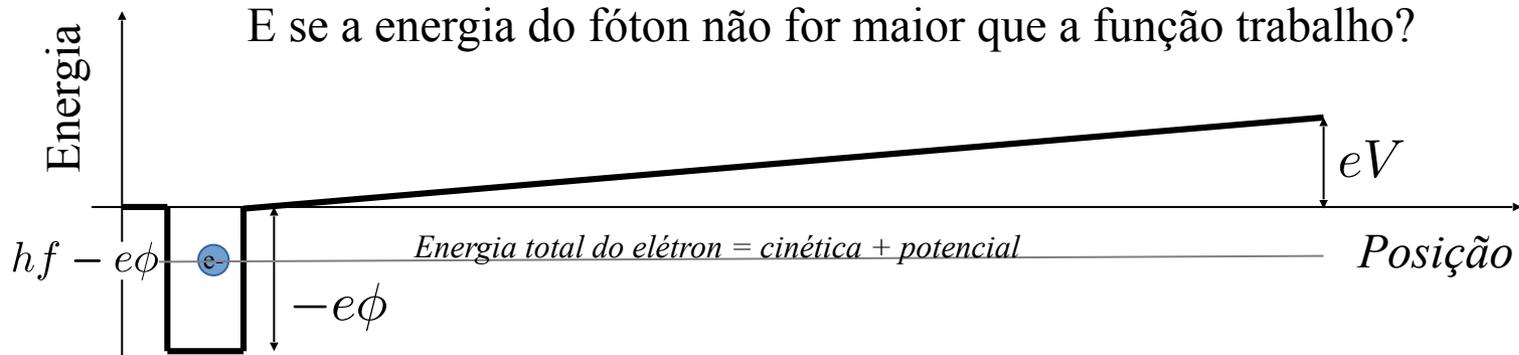
# O que acontece quando $hf < e\phi$ ?

Será possível determinar o potencial de corte para todos os comprimentos de onda?



(antes de absorver)

E se a energia do fóton não for maior que a função trabalho?



(depois de absorver)

# Relembrando

- Einstein considerou que a energia da radiação eletromagnética é dada por:

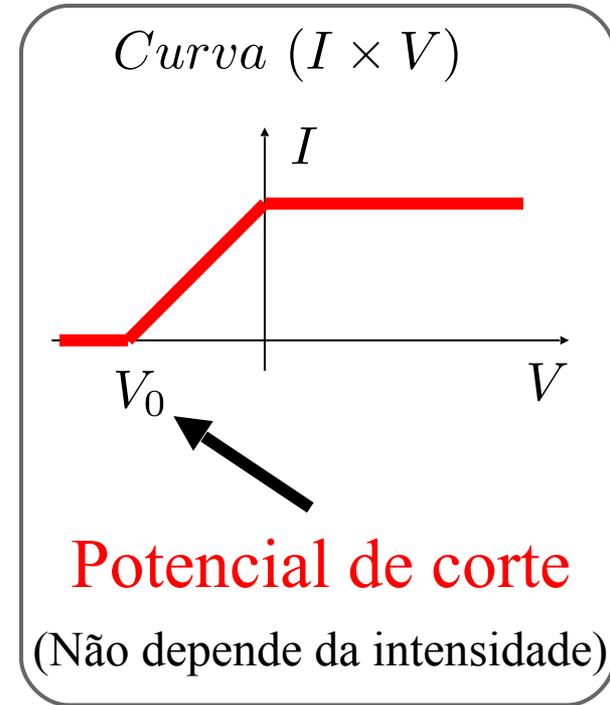
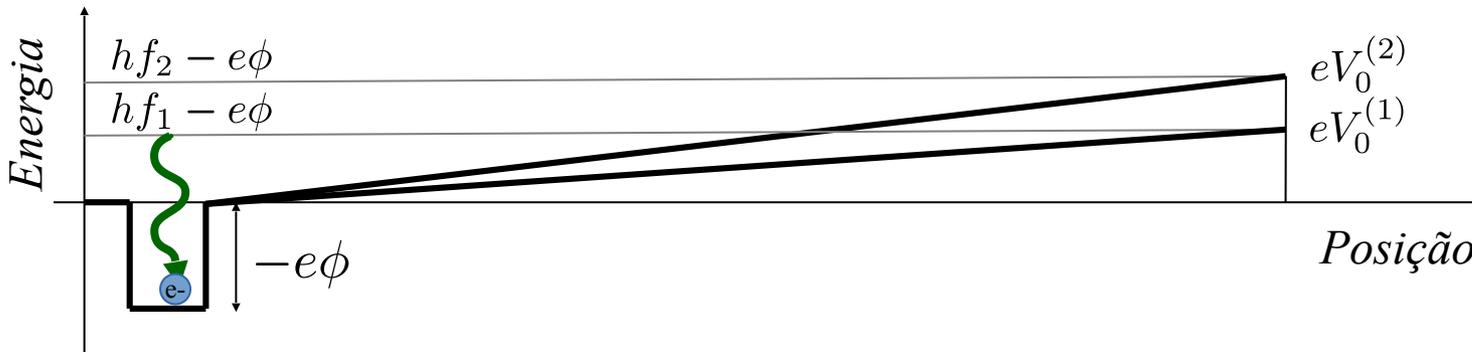
$$E = hf$$

Então a energia cinética máxima dos fotoelétrons é dada por:

$$E_c^{max} = hf - e\phi \longrightarrow eV_0 = hf - e\phi$$

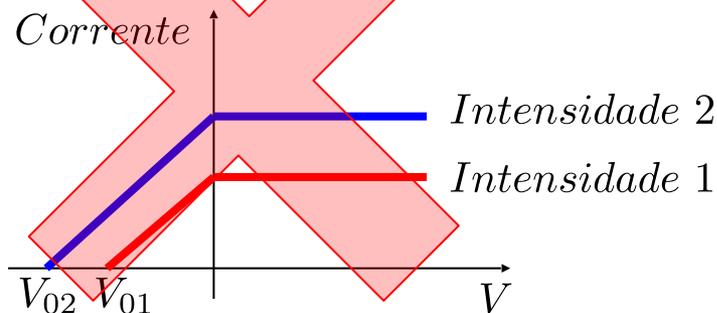
E o gráfico que obtivemos reproduz as medidas experimentais!!!

Note que o valor de  $V_0$  depende da energia da radiação incidente!



## Previsão da Teoria Clássica

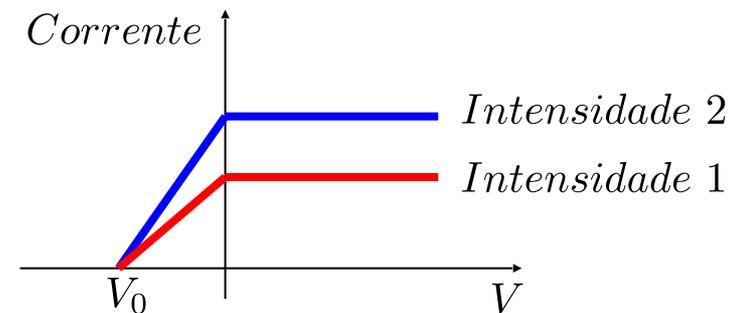
(antes dependia da intensidade)



(e nova teoria)

## Medidas Experimentais

(agora depende só da frequência)



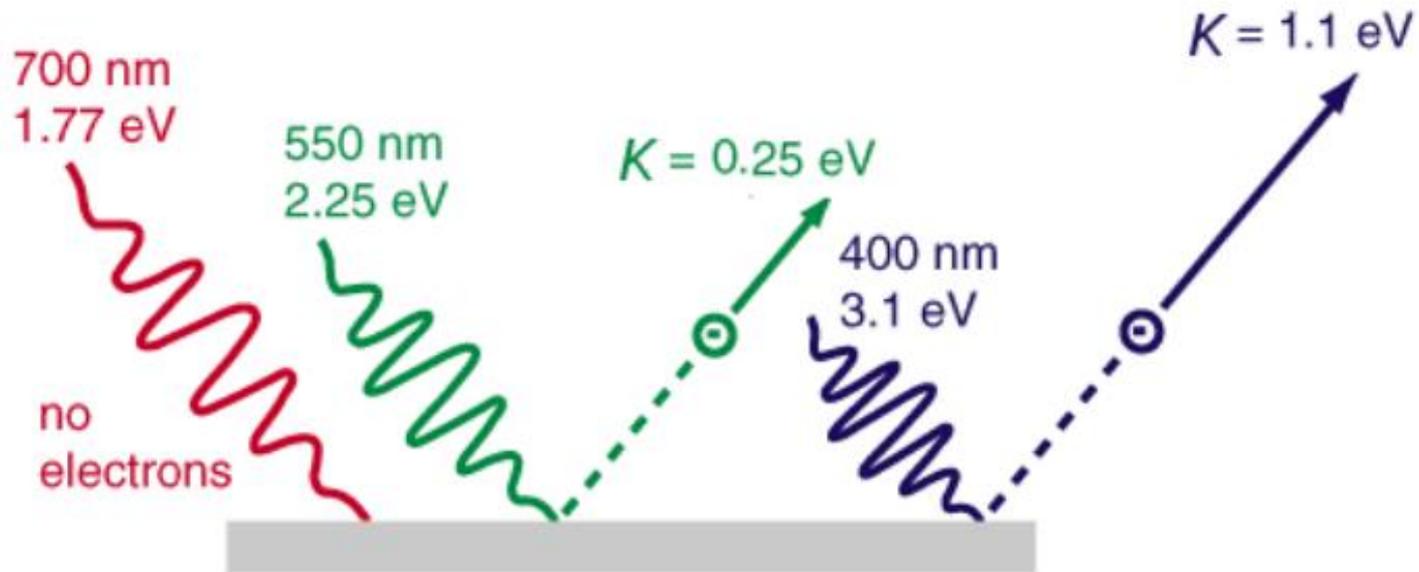
$$h = 4,135\ 67\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}$$

$$e = -1.6021766208(98) \times 10^{19} \text{ [C]}$$

# Exemplo para um eletrodo de Potássio

$$E = h\nu$$

$$E_c = K = h\nu - e\phi$$



Para o Potássio,  $e\phi = 2 \text{ eV}$