

# Efeito Fotoelétrico

Física Experimental C

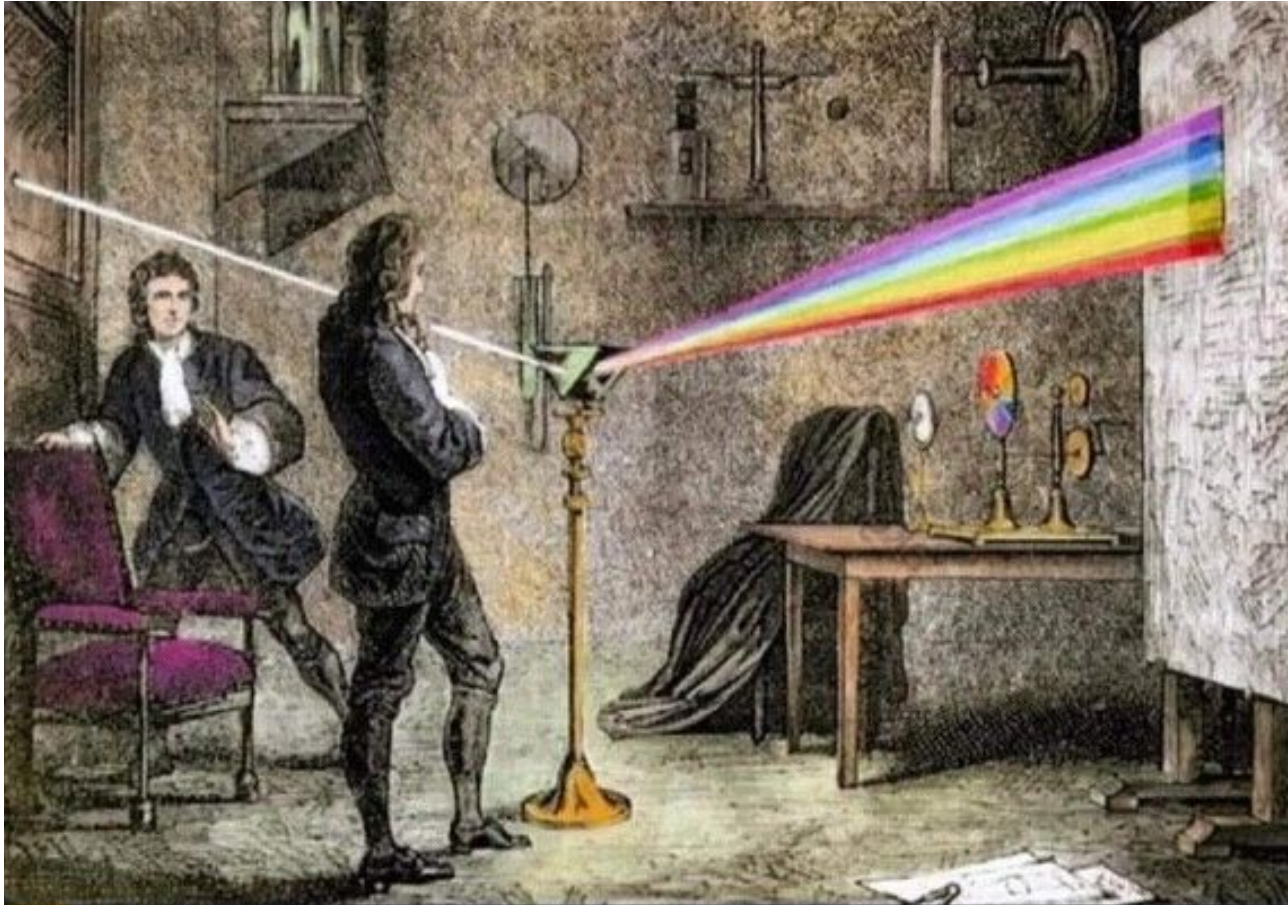
**Gilson Schaberle Goveia**

**gilson.goveia@usp.br**

[https://fap.if.usp.br/~jhsevero/Fisica\\_Experimental\\_C\\_Semestral\\_2023/page-6/page-26/](https://fap.if.usp.br/~jhsevero/Fisica_Experimental_C_Semestral_2023/page-6/page-26/)

1º semestre 2023

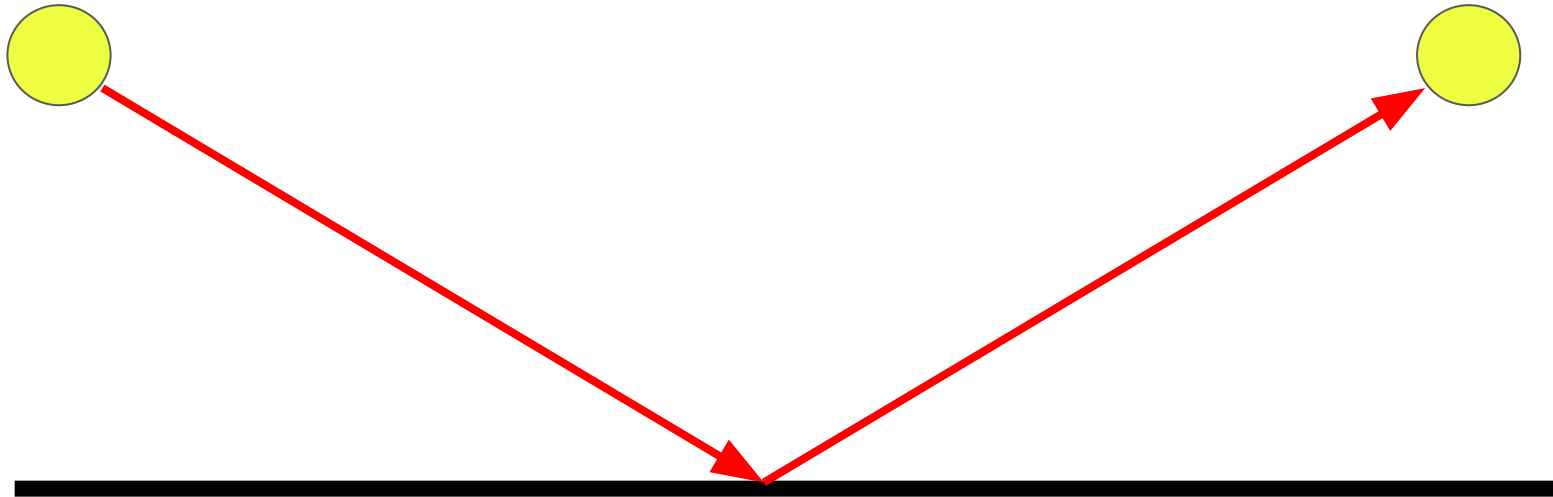
# A luz Onda ou Partícula (Século XVII)?



## A luz Onda ou Partícula (Século XVII)?

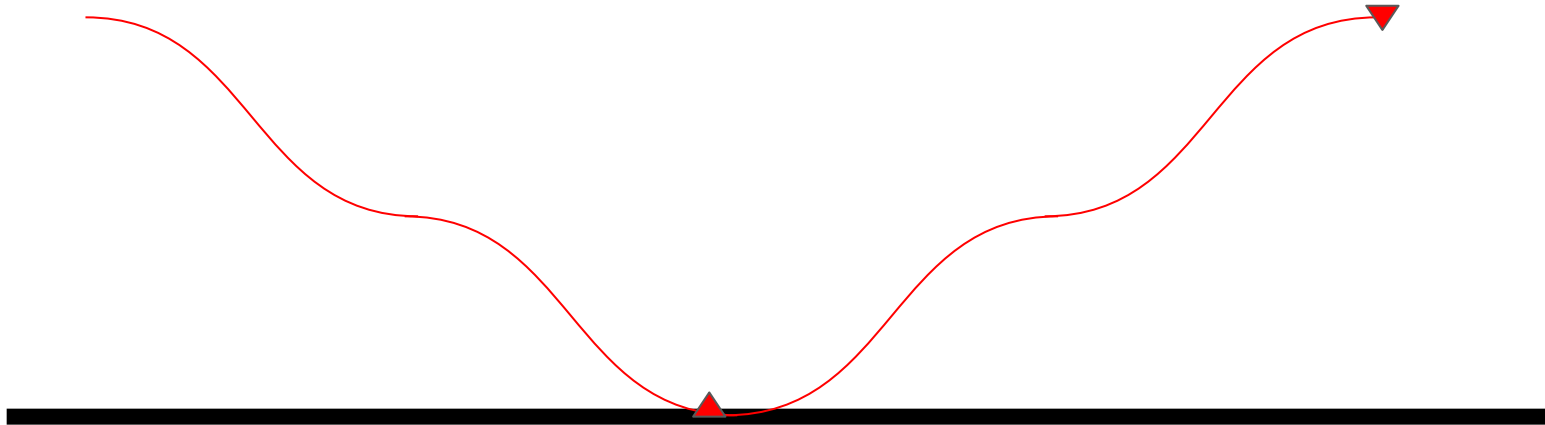
- **Newton achava que algo que se propaga em linha reta, como a luz, não pode ser uma onda, pois ondas tendem a se espalhar.**

**Ou seja, ele achava que a luz era uma colisão elástica de grãos de luz com o espelho.**



## A luz Onda ou Partícula (Século XVII)?

- **Huygens** achava que este mesmo fenômeno era a reflexão de onda.

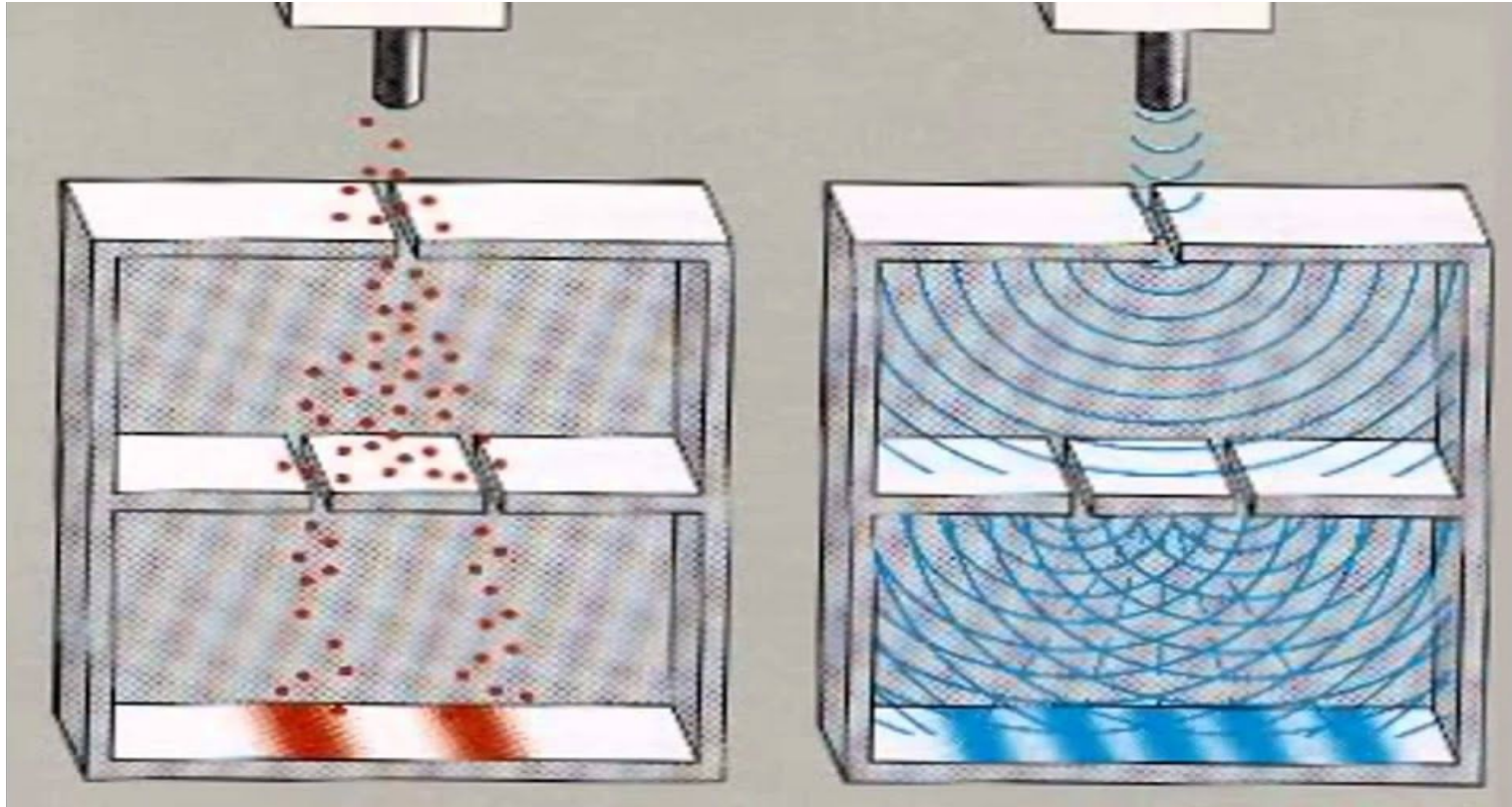


- Quem estava certo:

Newton? ou Huygens?

## A luz Onda ou Partícula (Século XIX)?

- **Thomas Young retoma o debate de onda ou partícula:**



## A luz Onda ou Partícula ?

- **Contudo com a teoria quântica, passou a existir uma nova definição a respeito da luz.**
- **Pois interpretá-la apenas como uma onda contínua, não descreve completamente o comportamento da luz, faltava alguma coisa na teoria, pois a teoria não era representada experimentalmente de forma correta.**
- **A luz então deixou de ser uma onda contínua e passou a ser quantizada em pequenos “pacotes de energias” que hoje em dia chamamos de fótons, que possuem uma energia muito bem definida.**

# A luz Onda ou Partícula ?

## Contexto histórico (obituário)



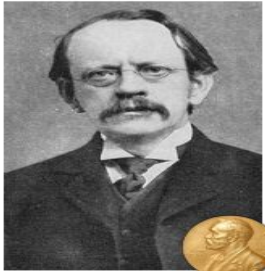
### Heinrich Hertz,

The photoelectric effect was discovered accidentally in 1887 by Hertz



### Wilhelm Hallwachs

That task was first taken up in 1888 by Hertz's student, Wilhelm Hallwachs, who established that a negatively charged zinc plate discharged rapidly when exposed to ultraviolet light, but showed no response to the light when it was charged positively and, moreover, no effect was produced when a charged plate was illuminated by visible light.

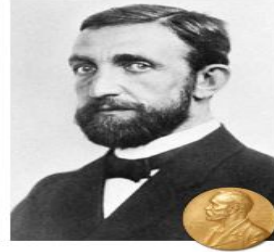


### J. J. Thomson

A study of the negative electricity emitted in the photoelectric effect was taken up by J. J. Thomson in 1899

1906 – Descoberta do Elétron

## Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in Laboratory Instructions - May 2012 – DOI: 10.1007/s11191-011-9360-5

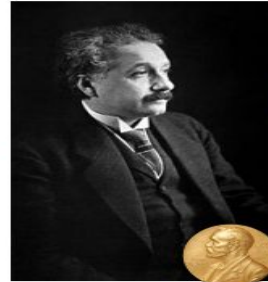


### Philipp Lenard,

established, in 1902, that the number of electrons given off, but not their energy, was affected by the intensity of the light illuminating a metal plate.

Lenard also found, to his surprise, that the energy of the electrons depended on the wavelength of the light and that shorter wavelength light tended to yield faster electrons; however, Lenard was unable to develop adequate experimental conditions to determine precisely how this effect varied. It is important to note that "... Lenard did not ... demonstrate that photoresponse varies with light frequency

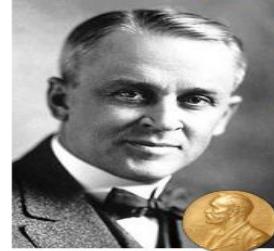
1905 – raios catódicos



### Albert Einstein

It was not until 1905 that Einstein published his revolutionary explanation of the photoelectric effect, based on his "light quantum" 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 light quanta

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



### Robert Millikan

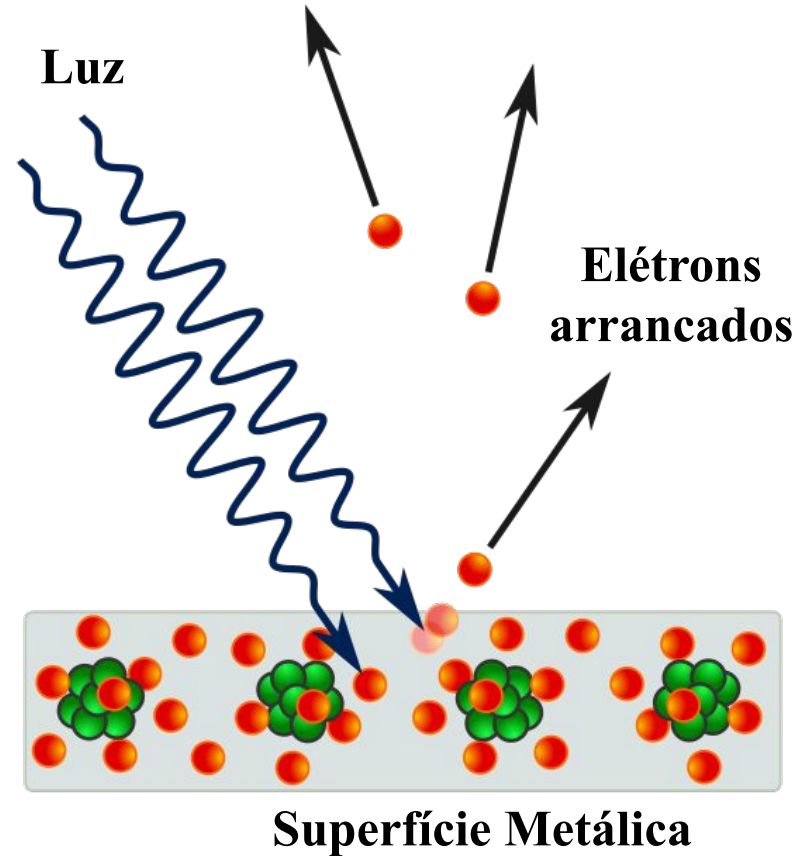
who was a strong believer in the wave theory of light. From 1912 to 1915, Millikan put all his efforts into measuring the photoelectric effect, hoping to disprove Einstein's hypothesis. By 1915, it had become clear to Millikan that he had verified Einstein's equation exactly.

1923 – Quantização da Carga elétrica e Efeito Fotoelétrico



# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Clássica)?

Quando uma radiação eletromagnética “qualquer” incide sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser arrancados dessa superfície. E esses elétrons arrancados são chamados de fotoelétricos.



## O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Clássica)?

- **Luz emitida;**
- **Intensidade;**
- **Tempo de exposição.**

# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Clássica)?

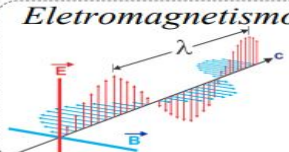
## Descrição teórica

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

### 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.

**Eletrromagnetismo**



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


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

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

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

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

**Mecânica clássica**



$$F = ma$$

$$v = v_0 + at$$

$$F_e = eE$$

$$v_0 = 0$$

$$F = F_e$$

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

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

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

### Radiação eletromagnética



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

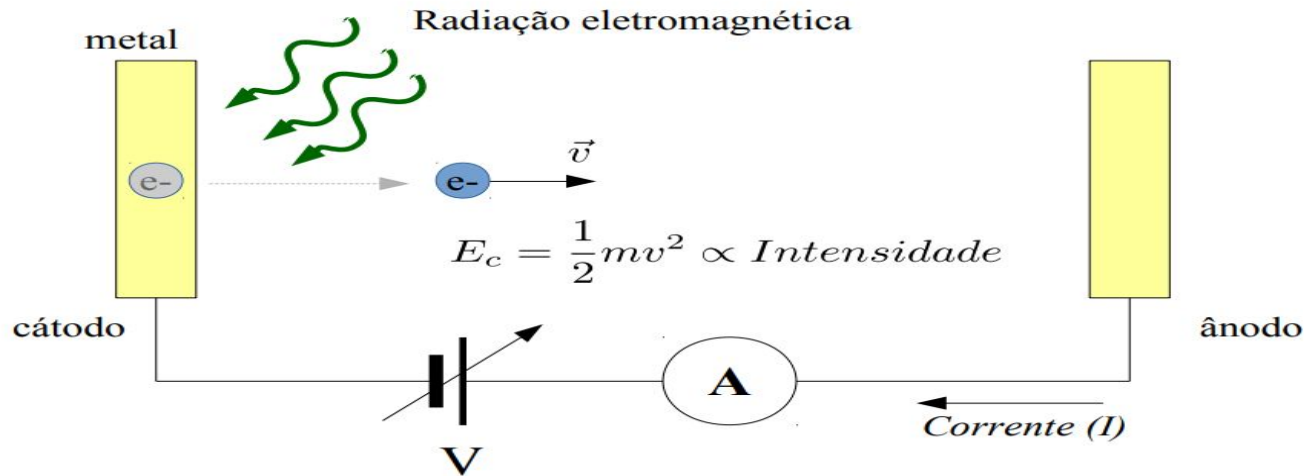
$$E_c \propto \text{Intensidade}$$

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

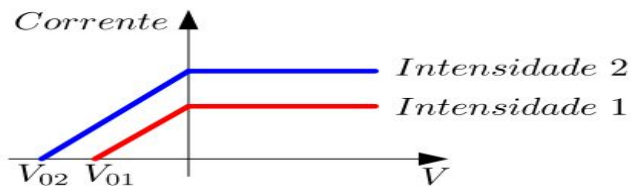
Este efeito **deveria ocorrer para qualquer frequência de luz**, sendo importante apenas a intensidade da mesma.

# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Clássica)?

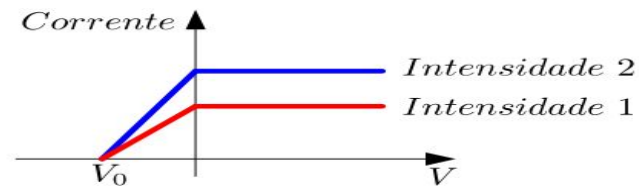
## Descrição teórica / Aparato para medir $E_c$ :



### *Previsão da Teoria Clássica*

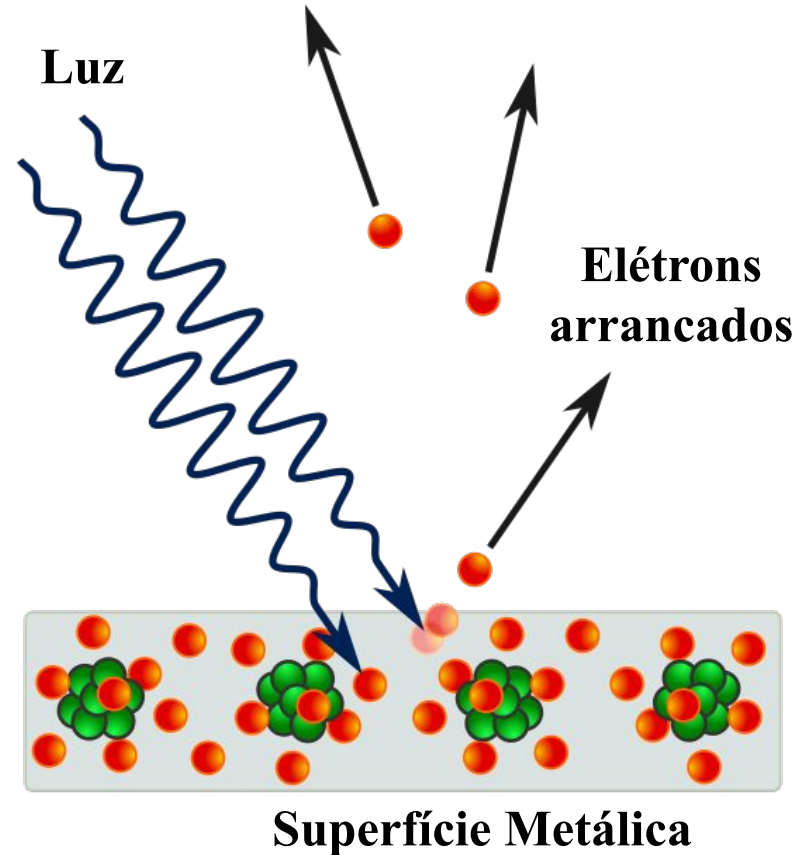


### *Medidas Experimentais*



# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Quântica)?

Quando uma radiação eletromagnética "específica" incide sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser arrancados dessa superfície. E esses elétrons arrancados são chamados de fotoelétricos.



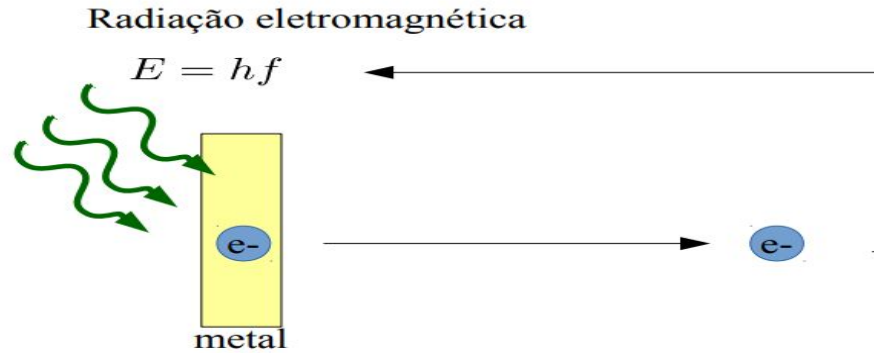
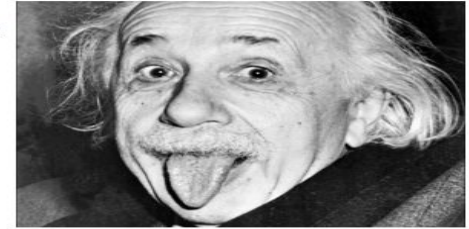
# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Quântica)?

## 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 aquele 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)

$$E_c = hf - e\phi$$

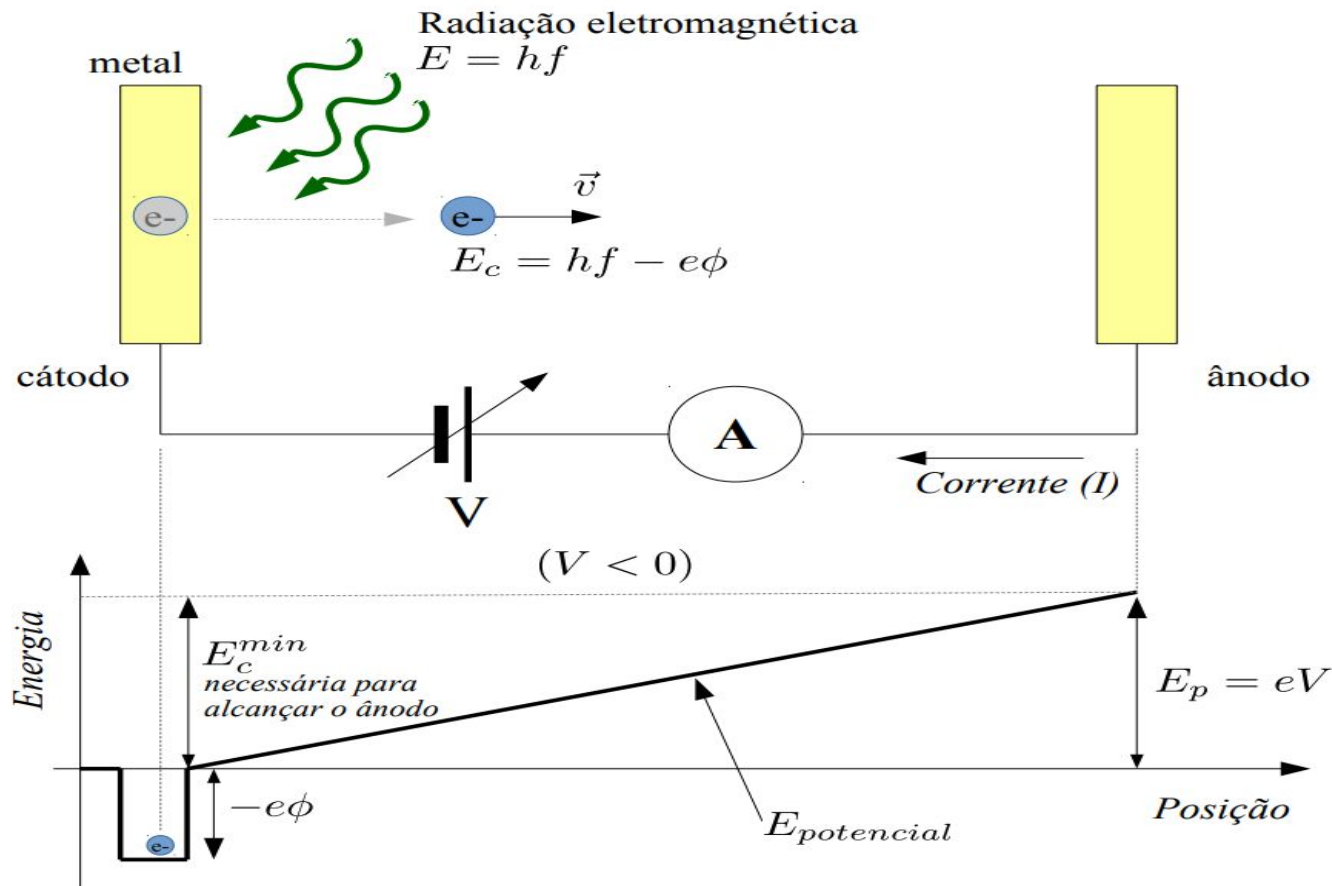
$$h = 4,135\ 667\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}$$

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

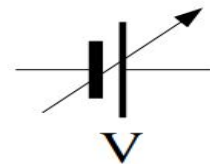
Albert Einstein, Annalen der Physik, 17, p. 132, 1905

[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.))

# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Quântica)?



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



# O que é Efeito Fotoelétrico (Teoria Quântica)?

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

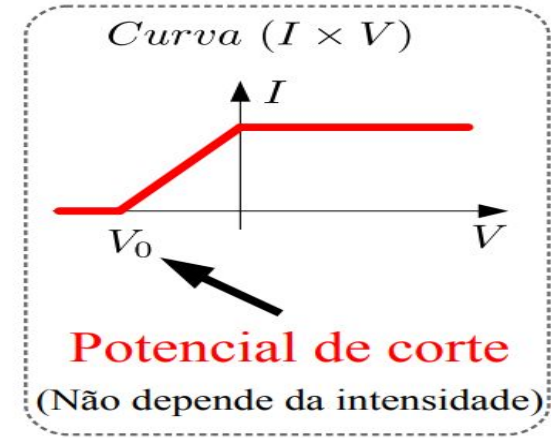
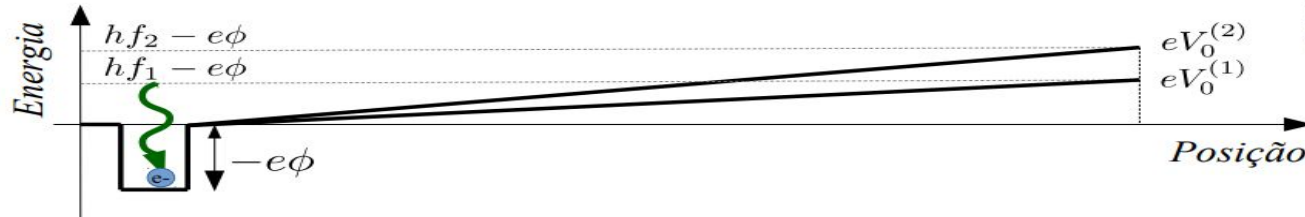
$$E = hf$$

Então a energia cinética máxima dos fotoelétrons é dada por:

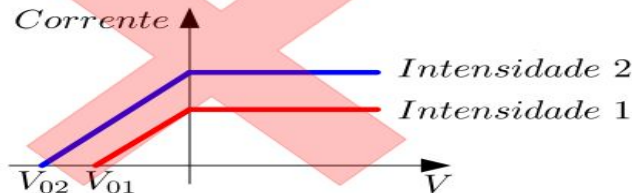
$$E_c^{max} = hf - e\phi \longrightarrow eV_0 = hf - e\phi$$

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

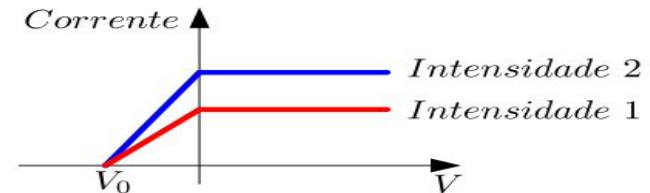
Note que o valor de  $V_0$  depende da energia da radiação incidente!



*Previsão da Teoria Clássica*  
(antes dependia da intensidade)



(e nova teoria)  
*Medidas Experimentais*  
(agora depende só da frequência)





# Parte Experimental:

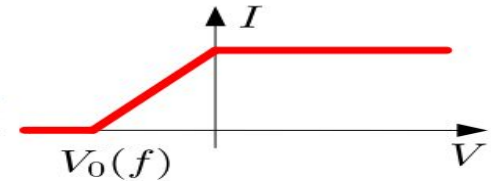
- Verificar as observações de Lenard / Millikan
- Verificar a previsão de Einstein, e determinar o valor da constante de Planck
- Medir a função trabalho da válvula fotoelétrica



## O que será feito?

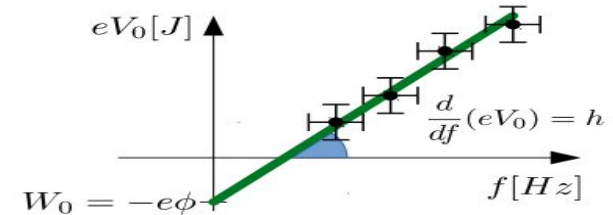
- Para várias radiações de comprimentos de onda e frequência diferentes iremos construir a curva ( $I \times V$ ) de uma válvula fotoelétrica.
- Destas curvas será obtido o potencial de corte  $V_0$  em função de  $f$ .
- Ajuste de reta para encontrar a constante de Planck.

Curva ( $I \times V$ )



$$eV_0 = hf - e\phi$$

Ajuste de reta  $\longrightarrow y = ax + b$

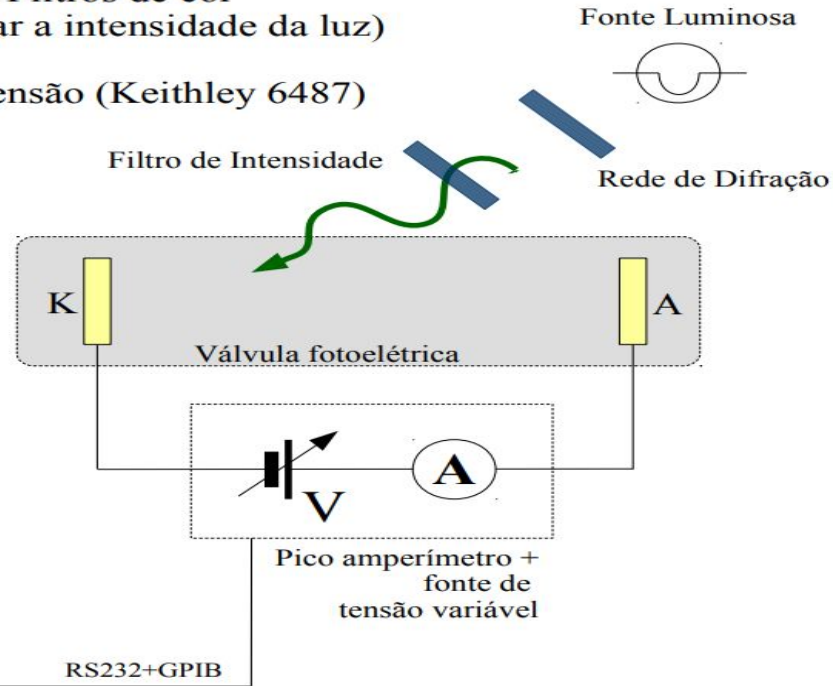


Lembre que:  $c = \lambda f$

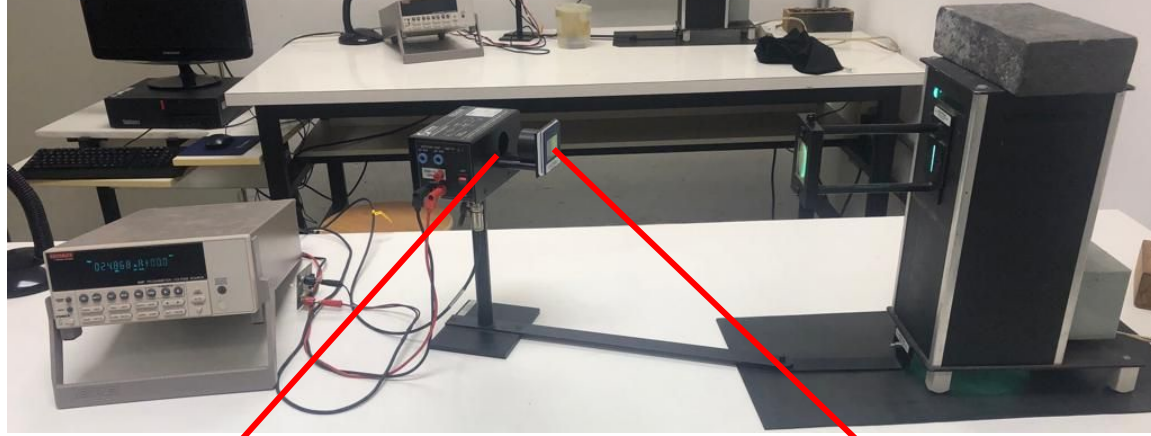
- $f$  : Frequência da radiação eletromagnética  
 $\lambda$  : Comprimento de onda da radiação  
 $c$  : Velocidade da luz no vácuo

# Aparato Experimental:

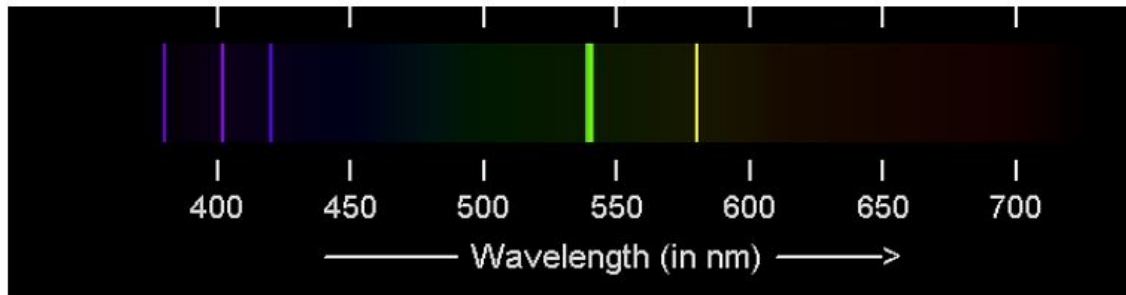
- Fonte de luz: Led's branco + Filtros de cor
- Gerador de funções (controlar a intensidade da luz)
- Fococélula (Centron 1P39)
- Pico amperímetro/fonte de tensão (Keithley 6487)



# Aparato Experimental:



# Espectro da Lâmpada de Mercúrio (Hg):



| Cor      | Comprimento de onda (nm)    |
|----------|-----------------------------|
| U.V.     | 365,016                     |
| Violeta  | 404,656                     |
| Azul     | 435.835                     |
| Verde    | 546.075                     |
| Amarelo  | 576.9610, 578.969 (dubleto) |
| Vermelho | 614,950                     |

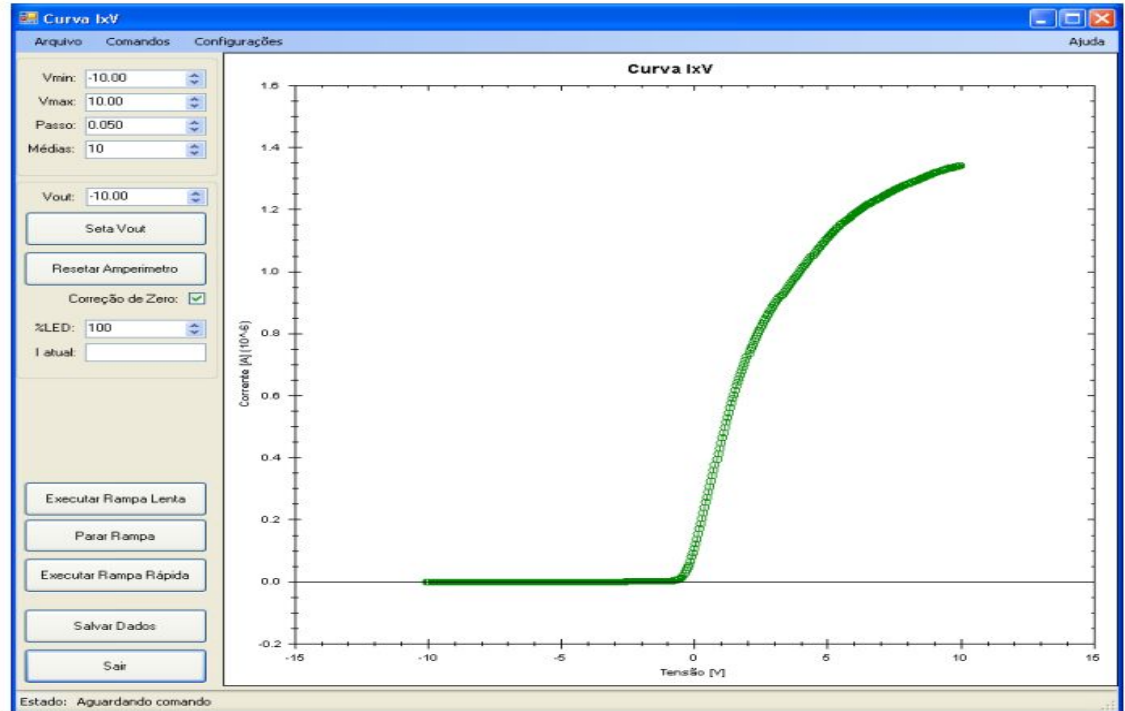
# Procedimentos:

- 1) Ligue todos os equipamentos (pico amperímetro, gerador de funções, computador) e abra o programa de aquisição do pico amperímetro / fonte de tensão (ProKeithley).
- 2) Resete o pico-amperímetro: com a iluminação desligada, ajuste a tensão  $V_{out} = 0$ , pressione o botão “Seta  $V_{out}$ ” e após isto pressione o botão “Reset Pico-amperímetro”.
- 3) Ajuste a posição da rede de difração e a abertura da fenda de modo a obter as linhas espectrais com mais intensidade e maior nitidez na fenda fotocélula.
- 4) Alinhe a fenda da fotocélula com linha espectral associada ao ultravioleta; levante as curvas  $I \times V$  para os filtros de 100%, 80%, 60%, 40% e 20%. Utilize a resolução de tensão no programa ProKeithley de 0,1V ou 0.05V (aquela que vocês julgarem melhor).
- 5) Repita o procedimento para as demais linhas (violeta, azul, verde e amarelo). Para as cores verde e amarelo, utilize os respectivos filtros.
- 6) Adquira a curva  $I \times V$  com a lâmpada desligado, e outra curva com a fenda da fotocélula totalmente tampada.

Essa corrente medida é comparável com a corrente de fundo obtida com a lâmpada ligada?

# Procedimentos:

Um detalhe: Confirmar se as “configurações regionais” do Windows está setada para “Inglês dos Estados Unidos”.



# Métodos de Análise dos Dados:

No experimento veremos que

- 1) A corrente não vai a zero para potenciais menores que o potencial de parada. Porquê?
- 2) A corrente medida com a lâmpada desligada é da mesma ordem de grandeza que essa “corrente de fundo”?
- 3) Mesmo que subtrairmos o efeito da corrente de fundo, a corrente da fotocélula não diminui abruptamente. Porquê?

# Métodos de Análise dos Dados:

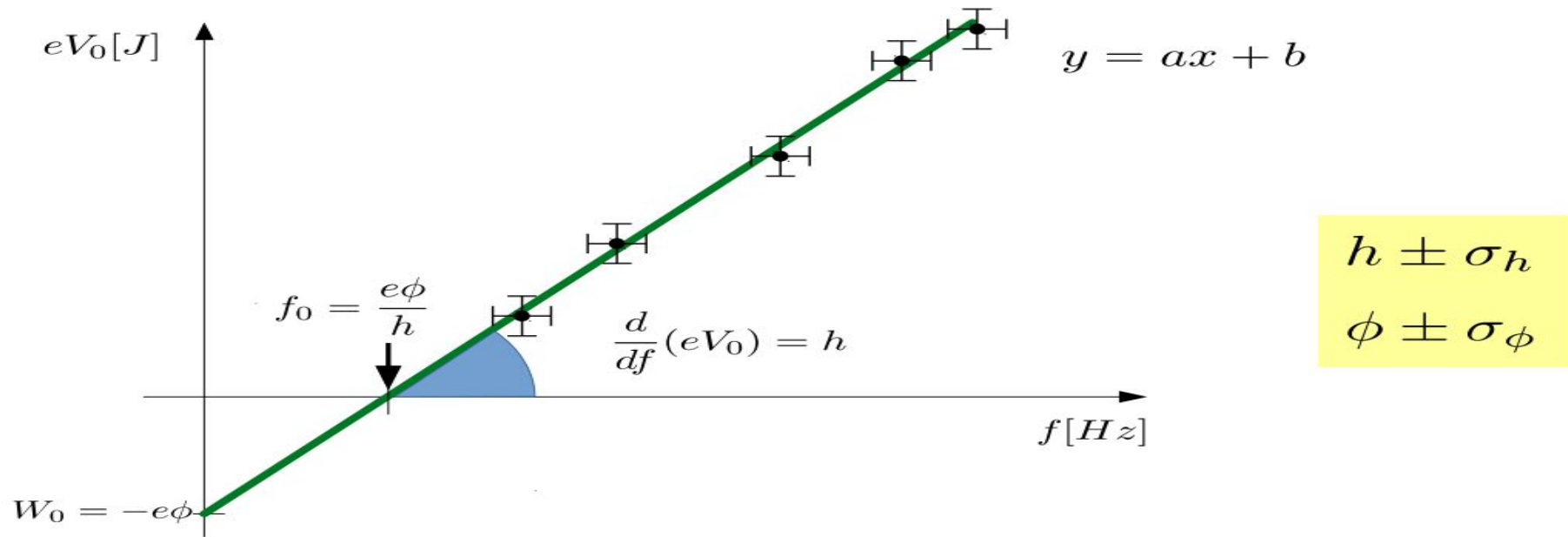
No experimento veremos que

- 1) A corrente não vai a zero para potenciais menores que o potencial de parada. Porquê?
- 2) A corrente medida com a lâmpada desligada é da mesma ordem de grandeza que essa “corrente de fundo”?
- 3) Mesmo que subtrairmos o efeito da corrente de fundo, a corrente da fotocélula não diminui abruptamente. Porquê?



# Métodos de Análise dos Dados:

## **Não esqueçam: propagar as incertezas no ajuste**



Quais são as unidades de medida naturais deste experimento?  
Os resultados são compatíveis com os valores da literatura?

## Método para determinação de $V_0$ :

$$I(V_{aplicada}) = func(\lambda, V) + aV + b$$

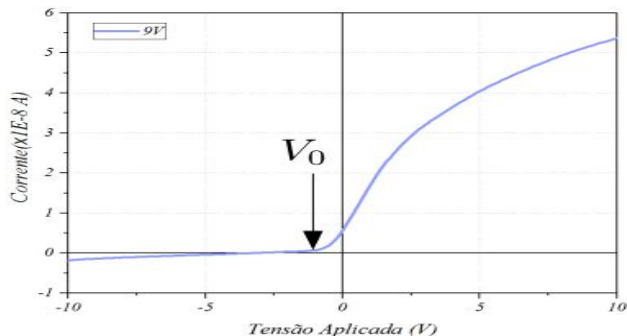
$$\frac{dI(V_{aplicada})}{dV} = \frac{dfunc(\lambda, V)}{dV} + a$$

$$\frac{d^2 I(V_{aplicada})}{dV^2} = \frac{d^2 func(\lambda, V)}{dV^2}$$

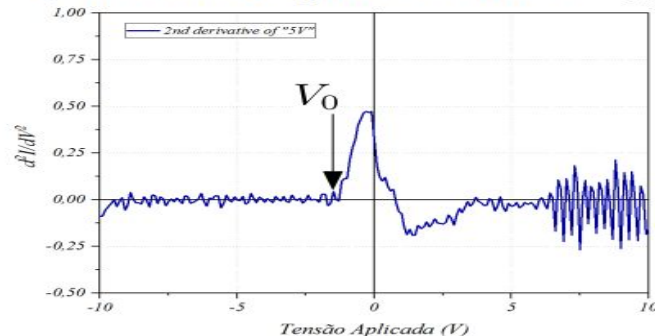
Corrente de fundo

Eliminamos a parcela da corrente relativa à corrente de fundo.

Fazemos isso numericamente, utilizando o Origin:

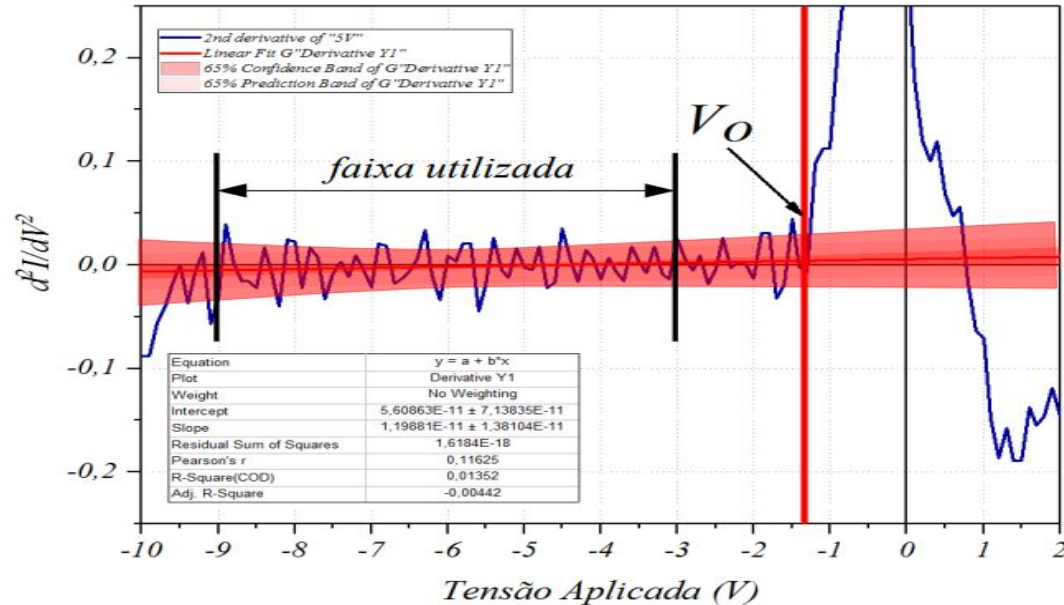


Qual o critério para escolher o  $V_0$  ??



# Métodos de Análise dos Dados:

$V_0$  é o primeiro ponto fora da reta ajustada:



- Ajustamos uma reta na região entre -9 e -3 Volts.
- Incluímos no Ajuste o intervalo de confiança de 68%.
- Consideramos o  $V_0$  como o primeiro ponto fora da zona de confiança da reta.

Usando o Origin podemos fazer o procedimento de forma simples

# Métodos de Análise dos Dados:

## Exemplo de $V_0$ para $\lambda = 4046(\text{\AA})$

- O  $V_0$  considerado vai ser a média dos  $V_0$  encontrados para as curvas obtidas com intensidades diferentes.

$$\sigma_f^2 = \left( \frac{df}{d\lambda} \right)^2 \sigma_\lambda^2 \longrightarrow \sigma_f = \frac{c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

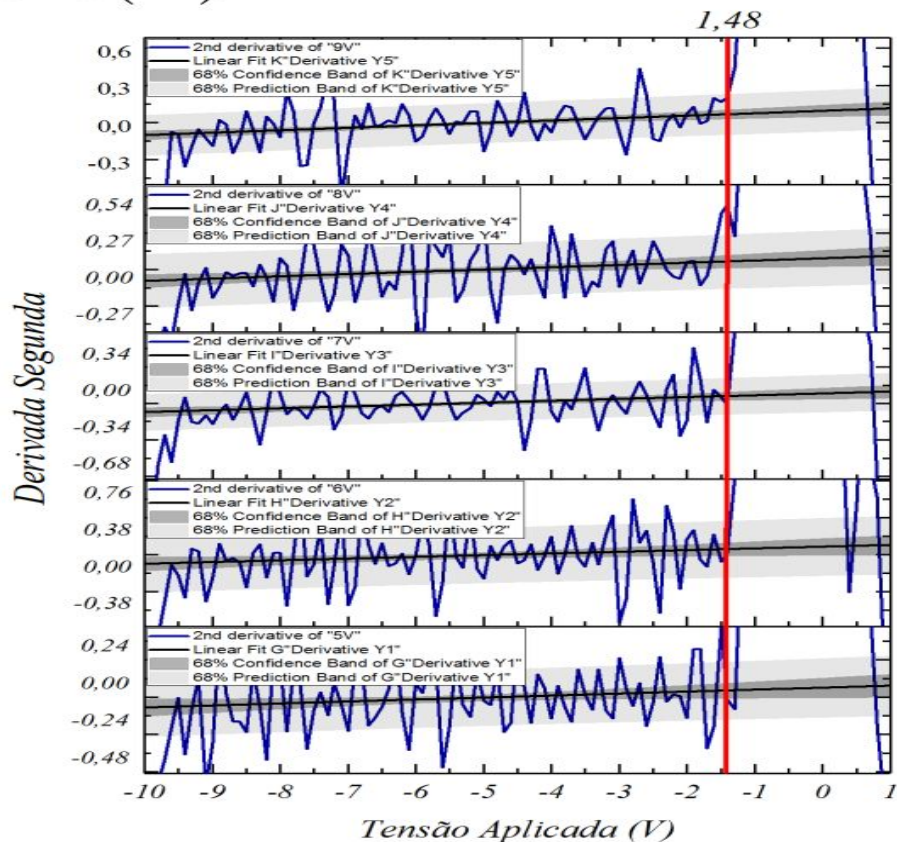
$$\sigma_{V_0}^2 = \sigma_{estat}^2 + \sigma_{instr}^2$$

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

Valores de referência



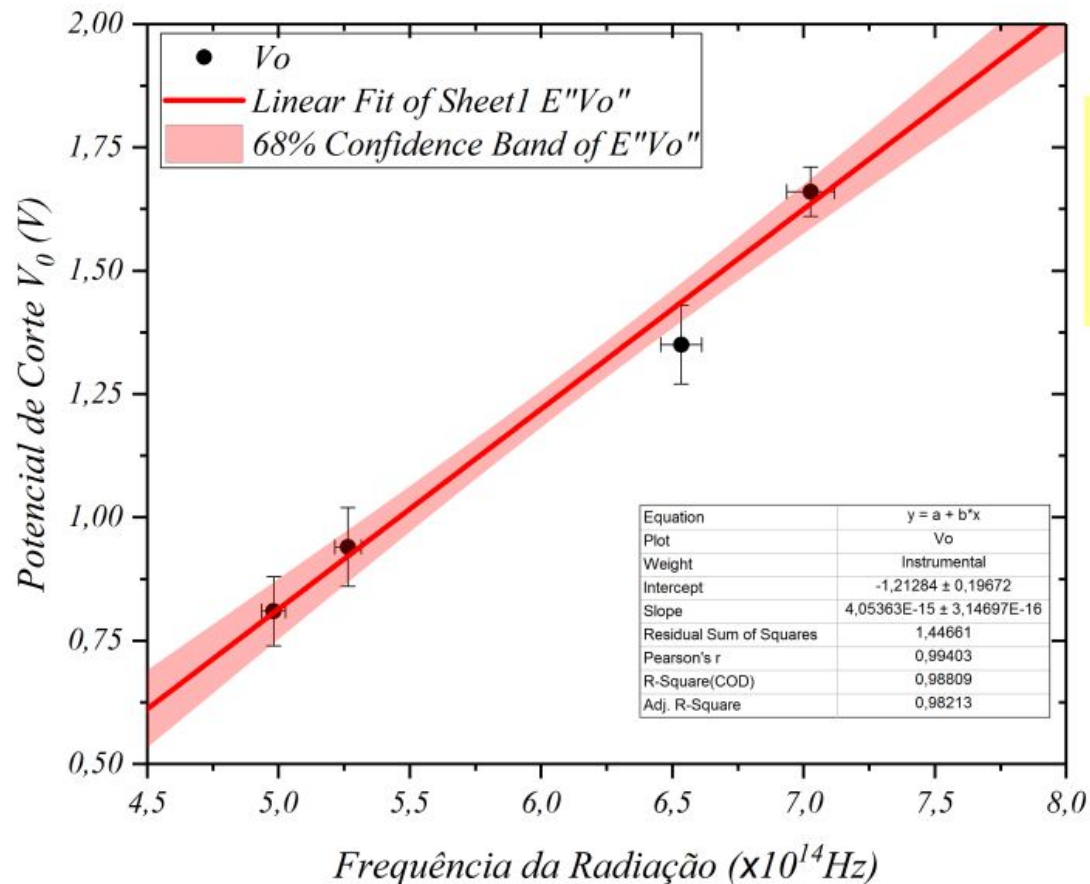
| $\lambda$ | $freq$  | $\sigma_f$ | $V_0$ | $\sigma_{V_0}$ |
|-----------|---------|------------|-------|----------------|
| 3650      | 8,22E14 | 9,1E12     | 1,66  | 0,05           |
| 4046      | 7,41E14 | 7,9E12     | 1,48  | 0,08           |
| 4358      | 6,88E14 | 5,0E12     | 0,94  | 0,08           |
| 5461      | 5,49E14 | 4,5E12     | 0,81  | 0,07           |
| 5779      | 5,19E14 | 3,2E12     | 0,67  | 0,05           |
| 6149      | 4,88E14 | 3,1E12     | ----- | -----          |



## Métodos de Análise dos Dados:

- 1) Agrupe seus dados de todas as intensidades para cada comprimento de onda em worksheet separados (um workbook para cada comprimento de onda).
- 2) Utilize a ferramenta : Analysis → Mathematics → Differentiate ( Order 2 ).
- 3) Plote gráficos do tipo Stack para todas as derivadas.
- 4) Ajuste as escalas horizontal (-10V, +1V) e vertical (analise o seu caso).
- 5) Ajuste uma reta no intervalo: -9 à -3 volts (incluindo banda de confiança e predição para um nível de confiança de 68% - use Spam to Full Axis).
- 6) Escolha o  $V_0$  como sendo o primeiro ponto que está fora da banda de confiança.
- 7) Repita o procedimento para todos os comprimentos de onda.

# Análise dos Dados:



$$h = (4,05 \pm 0,31) \times 10^{-15} (eV \cdot s)$$

$$\phi = (-1,21 \pm 0,19) (eV)$$

Valores esperados:

$$h = 4,13 \times 10^{-15} (eV \cdot s)$$

$$\phi = -1,36 (eV)$$

## Sobre o Relatório:

- **A avaliação do experimento será feita por meio de um relatório científico a ser entregue em formato pdf no dia do experimento para o endereço de e-mail:**

**[gilson.goveia@usp.br](mailto:gilson.goveia@usp.br)**

- **Os dados experimentais obtidos no laboratório devem ser enviados para os mesmos endereços, junto com o relatório.**
- **O relatório deve seguir o modelo no site da disciplina, principalmente a forma com que o arquivo deve ser salvo.**

# Ao Trabalho!

