

# Laboratório de Física Moderna

## Efeito Fotoelétrico

### Aula 01 - Parte 01

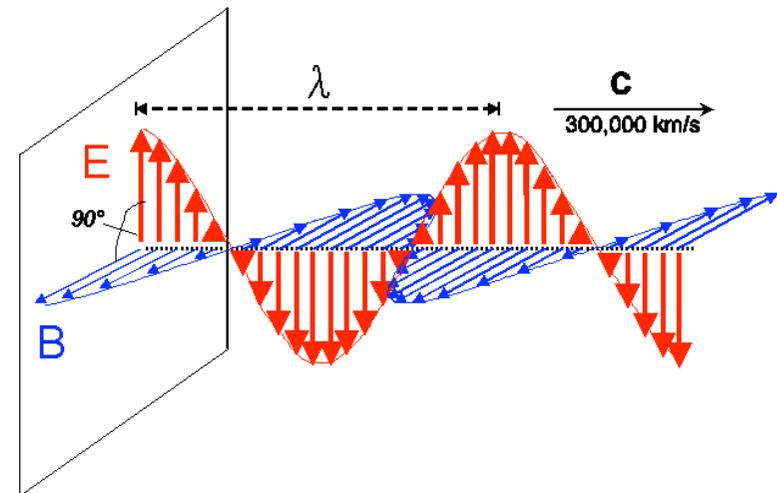
Marcelo Gameiro Munhoz  
[munhoz@if.usp.br](mailto:munhoz@if.usp.br)

# Natureza da luz: onda ou partículas?

- Polêmica que envolveu grandes físicos e durou vários séculos
- Newton acreditava que a luz constituía-se de feixes de corpúsculos que se deslocam no vácuo em linha reta
- Christiaan Huygens era um dos que defendia a idéia de que a luz era uma onda se propagando em algum meio (qual?)
- Somente no século XIX, com experimentos de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz é que a natureza ondulatória prevaleceu

# Ondas eletromagnéticas

- James Clerk Maxwell estuda o efeito de correntes oscilantes em circuitos
- Essas correntes geram campos elétricos e magnéticos que variam com o tempo



🌀 Simulação de ondas eletromagnéticas

# Equações de Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- Unificou efeitos elétricos e magnéticos
- Ondas eletromagnéticas tem o mesmo comportamento que a luz!

# Ondas eletromagnéticas

- Equação das ondas eletromagnéticas:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

- que são equivalentes à equação de uma onda genérica:

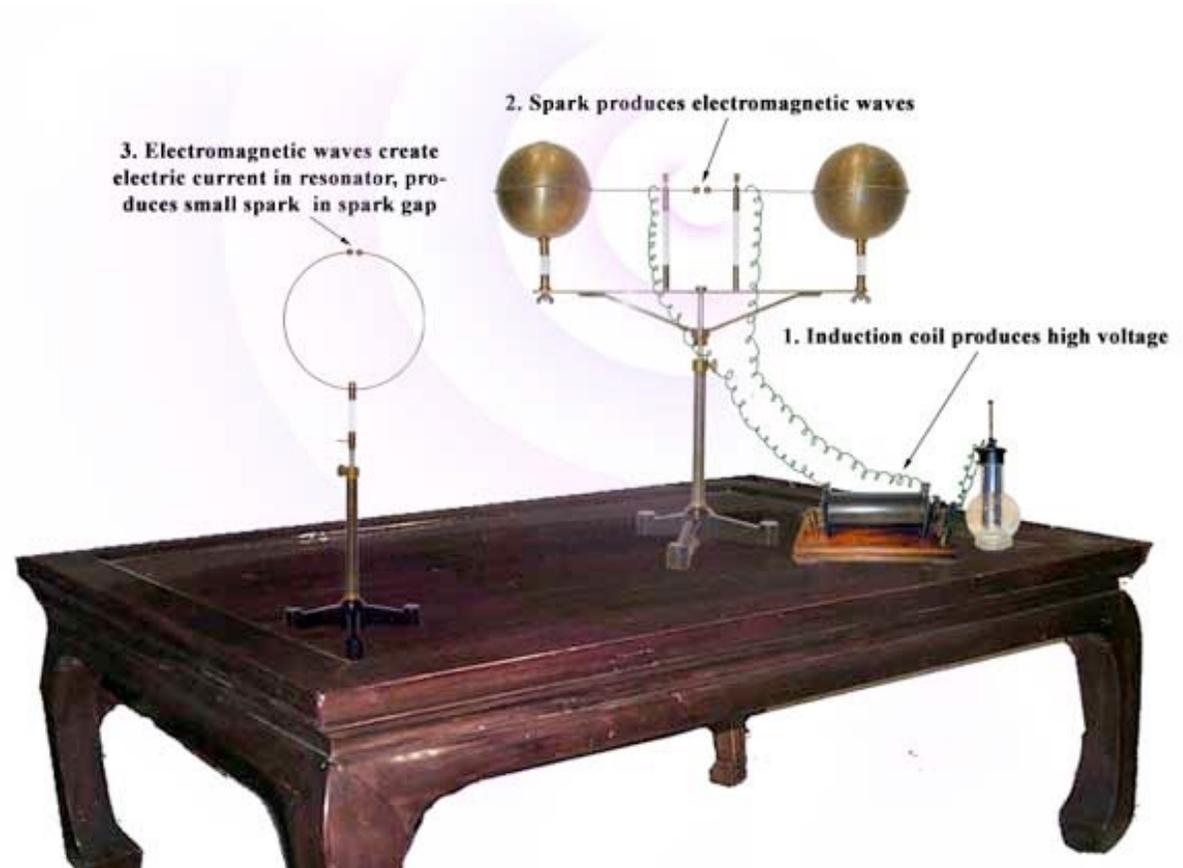
$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

# Ondas eletromagnéticas

- A velocidade das ondas eletromagnéticas é dada por  $v = \sqrt{1/\mu_0\epsilon_0} = c$ , ou seja, a velocidade da luz
- A energia (intensidade) da onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude
- O “princípio da superposição” leva ao fenômeno da interferência

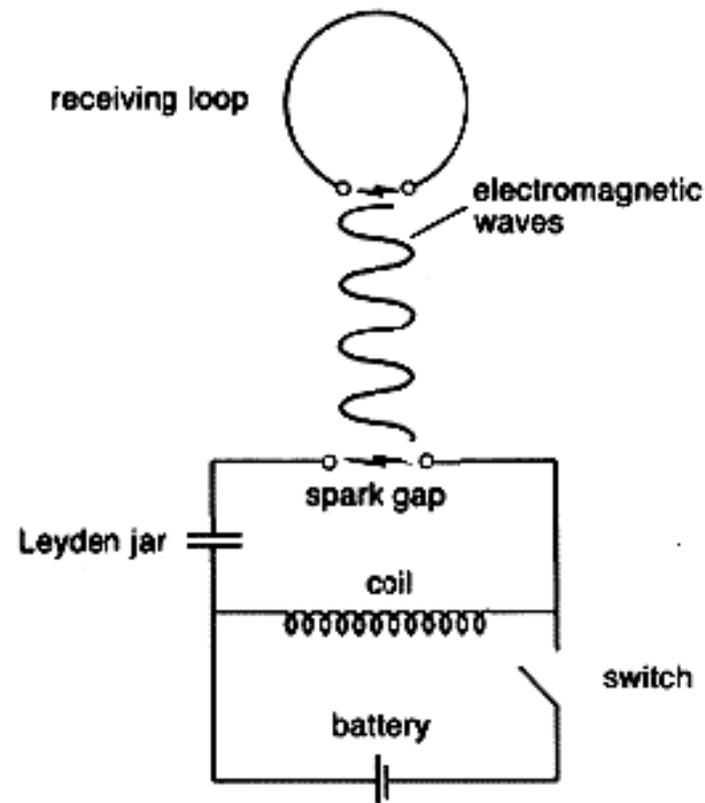
# Essas ondas existem?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



# Essas ondas existem?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



# Radiação Eletromagnética

- Tanto a teoria como os experimentos indicam que a radiação eletromagnética tem uma natureza ondulatória, isto é, são ondas eletromagnéticas
- Porém, esse não é o fim da história!

# Interação da Radiação com a Matéria

- Hertz faz uma observação em seu trabalho que gerou bastante interesse no fenômeno de interação da radiação com a matéria



É essencial que as superfícies dos pólos do arco de faíscas sejam constantemente polidas

# Proposta para o trabalho

- Investigar o fenômeno da interação da luz com a matéria
- Heinrich Rudolf Hertz, *Annalen der Physik* 31, p. 421, 1887
- Augusto Righi, *L'Optica delle Oscillazioni Elettriche*, 1888
- Wilhelm Hallwachs, *Annales de Chimie et Physique* 33; 34, pgs. 301; 731, 1888

# Observações interessantes (Prêmio Nobel de 1905)

- 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
- O que esperar sobre o resultado desse experimento segundo a física clássica?

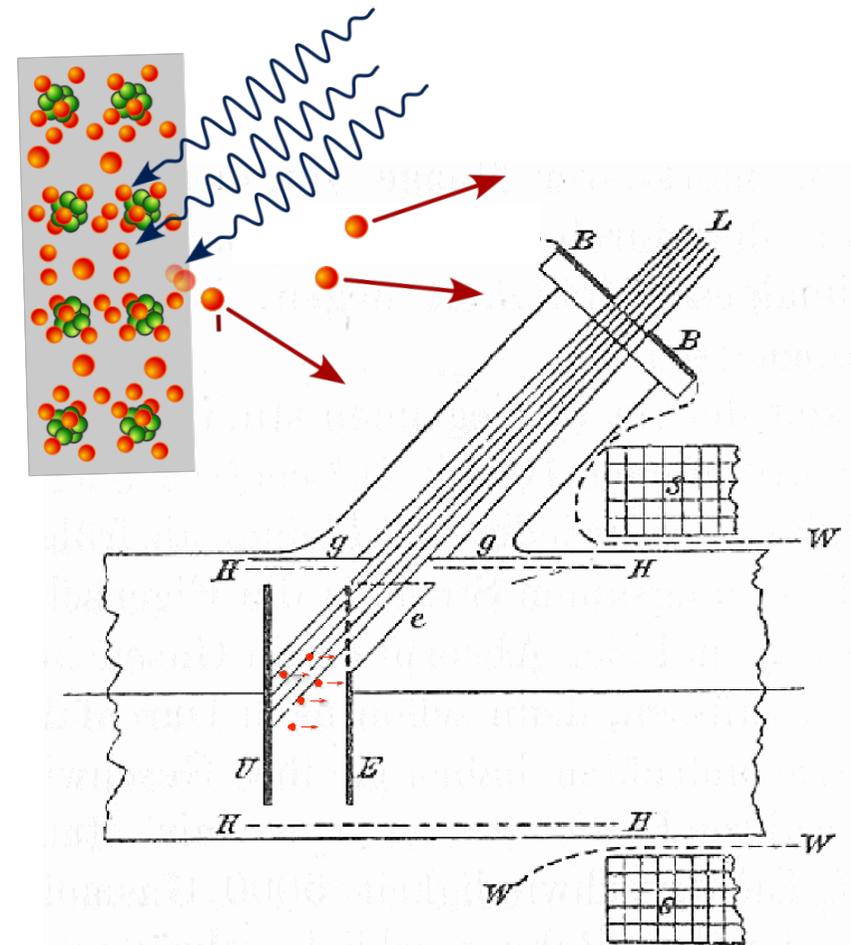
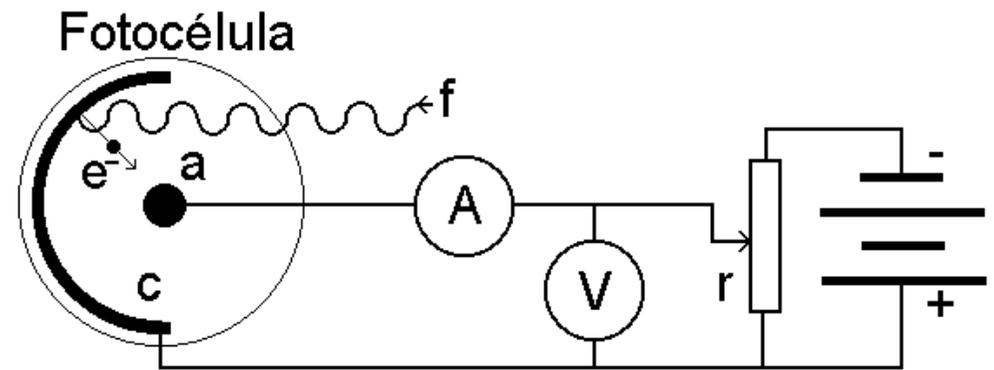


Fig. 1.

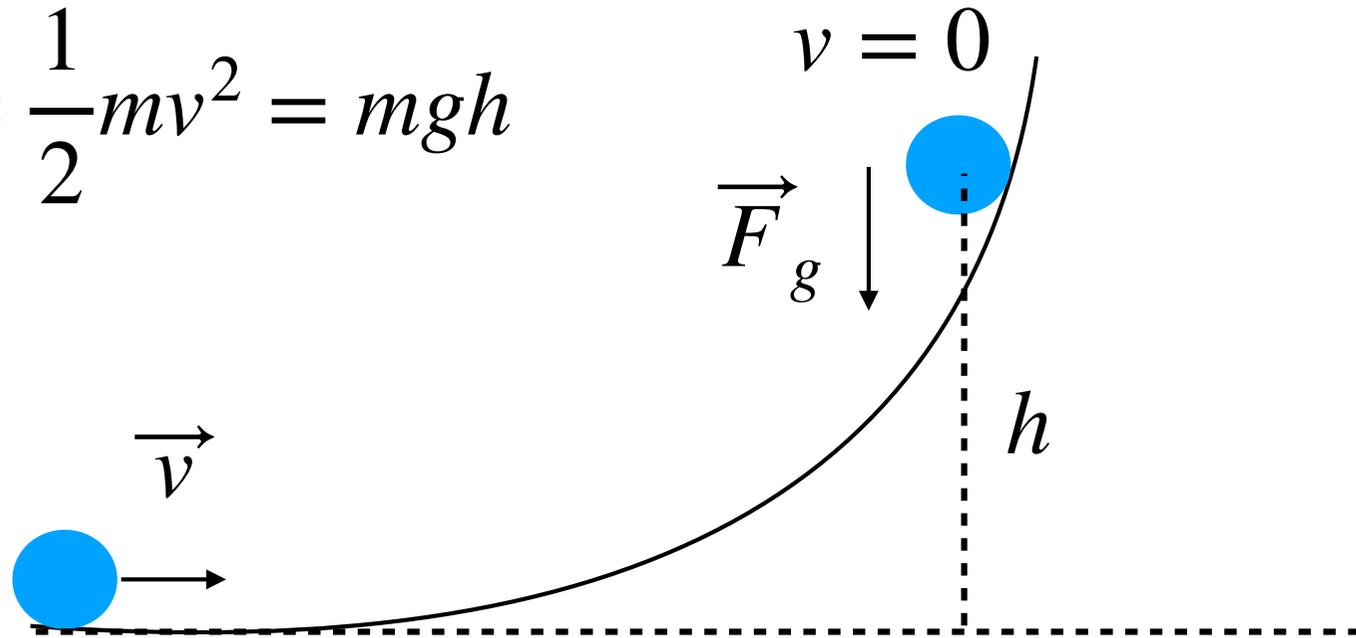
# Medida da Energia Cinética dos elétrons

- Esta é a medida chave do estudo de Lenard
- Como medir  $E_c$  ?
- Aplicar uma tensão no circuito que retarda a velocidade dos elétrons. Quando eles param ( $i = 0$ ), tem-se:  $eV_0 = E_c$

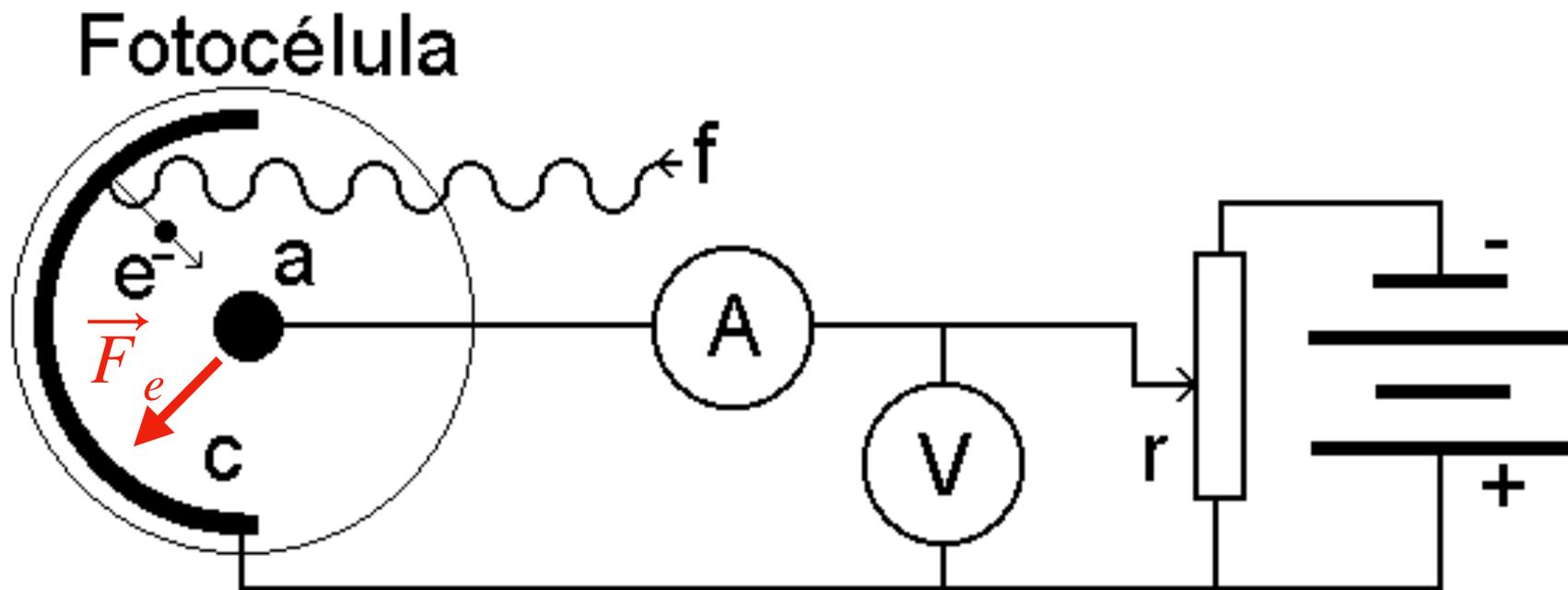


# Medida da Energia Cinética dos elétrons

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



# Medida da Energia Cinética dos elétrons



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

# Previsão da física clássica

- A intensidade da radiação incidente é proporcional à amplitude ao quadrado do campo elétrico:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \Rightarrow I = \langle S \rangle = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2$$

- Como a força sobre um elétron é proporcional à amplitude do campo elétrico:

$$\vec{F} = m \vec{a} = e \vec{E}_0$$

- A energia cinética dos elétrons deve aumentar com a intensidade da luz:

$$v = at \Rightarrow v = \frac{eE_0}{m}t \Rightarrow E_c = \frac{1}{2}m \left( \frac{eE_0}{m}t \right)^2$$

# Previsão da física clássica

- A previsão da física clássica para essas observações são:
  - A energia cinética dos elétrons deve aumentar com a intensidade da luz:

$$v = at \Rightarrow v = \frac{eE_0}{m}t \Rightarrow E_c = \frac{1}{2}m \left( \frac{eE_0}{m}t \right)^2$$

- este efeito deve ocorrer para qualquer frequência de luz, sendo importante apenas a intensidade da mesma
- deve haver um intervalo de tempo finito entre a incidência da luz e o início da emissão de elétrons

# Resultados observados por Lenard

- Phillip von Lenard, *Annales de Physique*, Leipzig 8, p. 149, 1902
  - “o número de elétrons ejetados é proporcional à energia carregada pela luz incidente,
  - enquanto a sua velocidade, isto é, sua energia cinética, é independente do seu número e varia apenas com seu comprimento de onda, aumentando quando este diminui”  
(Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967 )

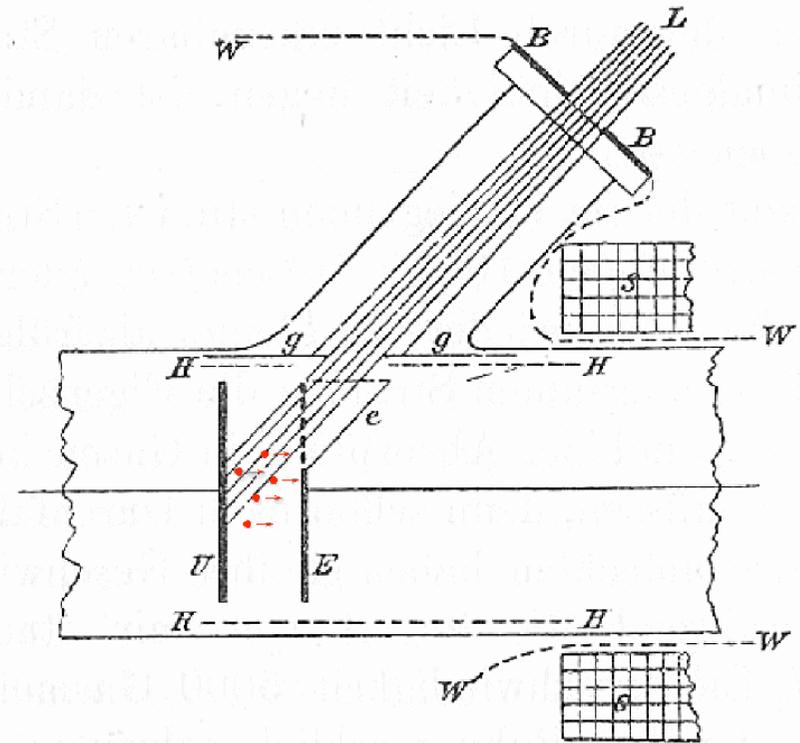


Fig. 1.

# Descrição da física clássica

- A previsão da física clássica para essas observações são:
  - A energia cinética dos elétrons deve aumentar com a intensidade da luz
  - este efeito deve ocorrer para qualquer frequência de luz, sendo importante apenas a intensidade da mesma
  - deve haver um intervalo de tempo finito entre a incidência da luz e o início da emissão de elétrons
- Os observações feitas por Lenard:
  - *“o número de elétrons ejetados é proporcional à energia carregada pela luz incidente,*
  - *enquanto a sua velocidade, isto é, sua energia cinética, é independente do seu número e varia apenas com seu comprimento de onda, aumentando quando este diminui”*
  - *A emissão de elétrons é instantânea*

**As observações contradizem a descrição teórica clássica!**

# Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “... a luz incidente consiste de quanta de energia de magnitude  $E = h\nu$  ...”
- “... um quantum de luz transfere toda sua energia para um único elétron ...”

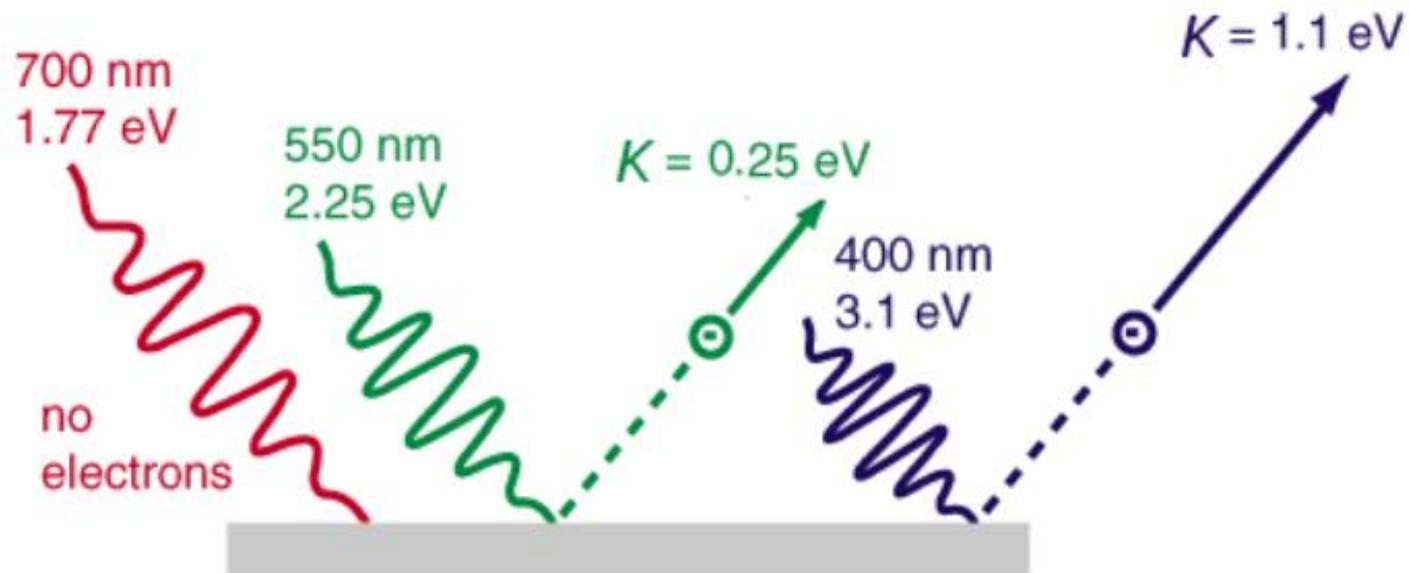
# Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “devemos assumir que ao deixar o metal, cada elétron deve realizar uma quantidade de trabalho  $e\phi$  característico da substância.”
- “A energia cinética desses elétrons é dada por  $E_c = h\nu - e\phi$ ”

# Exemplo para um eletrodo de Potássio

$$E = h\nu$$

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



Para o Potássio,  $e\phi = 2eV$

# Nova e revolucionária descrição teórica!

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “Se um objeto é carregado com um potencial positivo  $V$  e cercado por condutores em um potencial nulo e se  $V$  é alto o suficiente para evitar a perda de eletricidade ( $i = 0$ ) pelo objeto ( $V_0$ ), tem-se que:  
$$eV_0 = h\nu - e\phi$$
”

# Previsão dessa descrição teórica

- Albert Einstein, *Annales de Physique, Leipzig* 17, p. 132, 1905
- “Se a fórmula derivada estiver correta, então  $V_0$ , quando representado em coordenadas cartesianas em função da frequência da luz incidente, deve ser uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza da substância de emissão” ( $V_0 = h/e \cdot \nu - \phi$ )

# 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...

