

Laboratório de Física Moderna

Efeito Fotoelétrico

Aula 01 - Parte 01

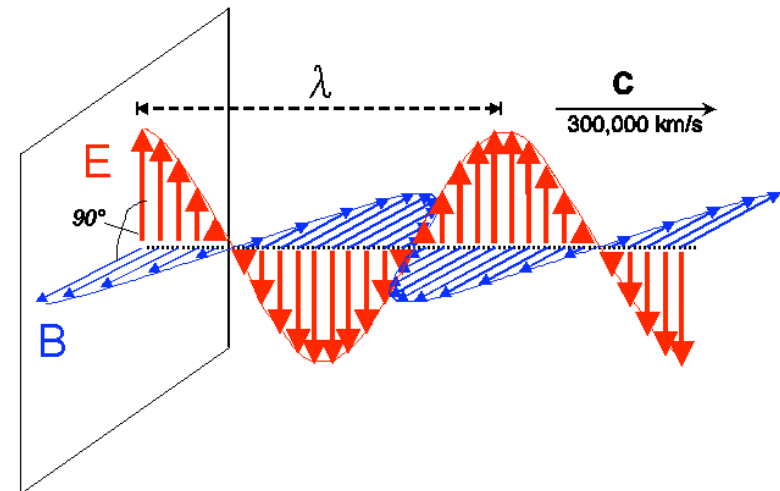
Marcelo Gameiro Munhoz
munhoz@if.usp.br

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:

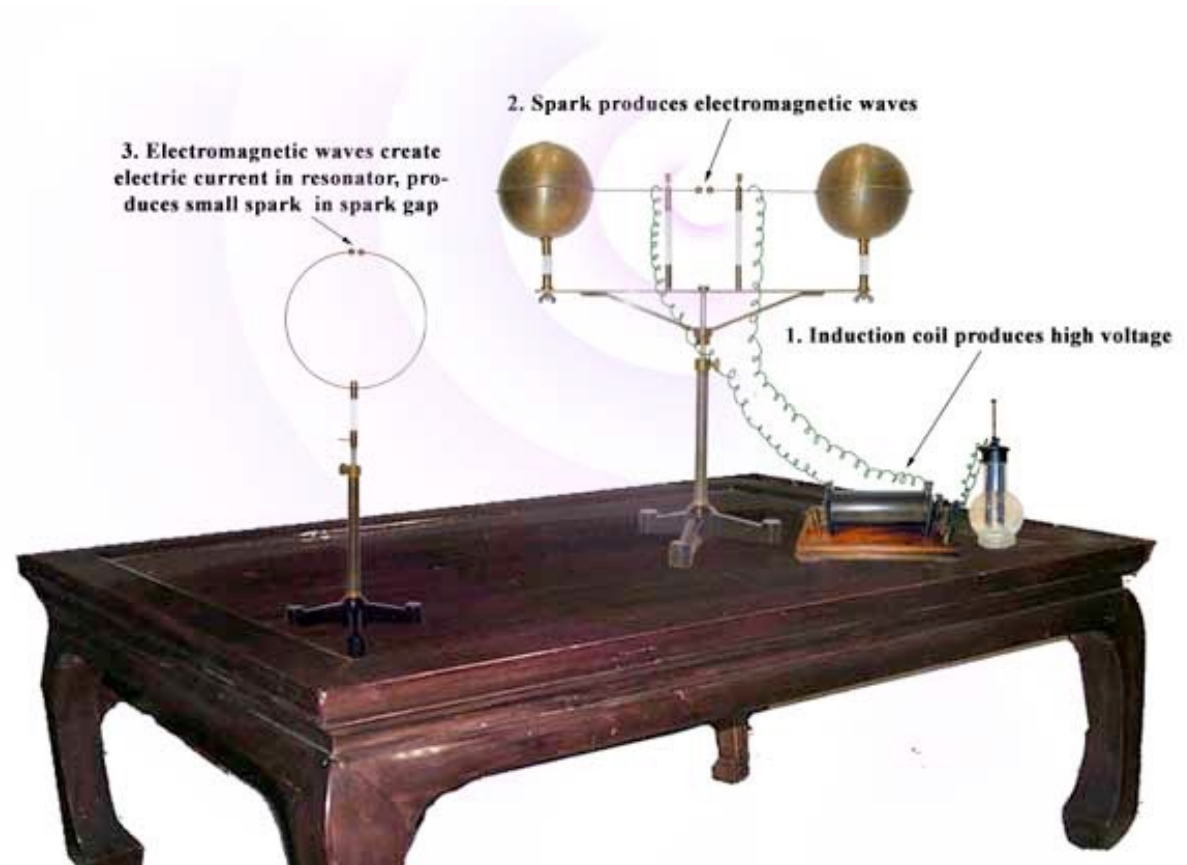
$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

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

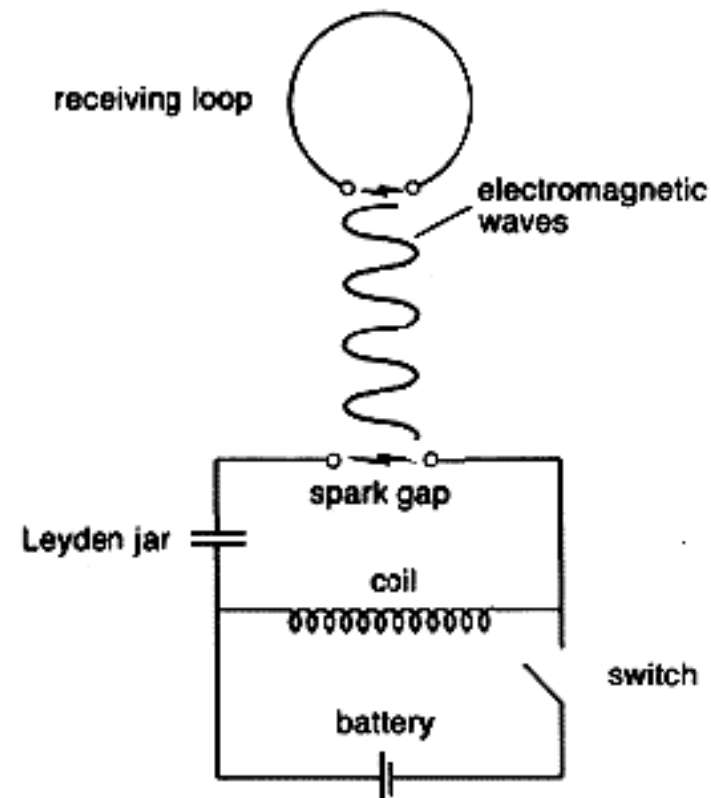
Essas ondas existem?

- 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?

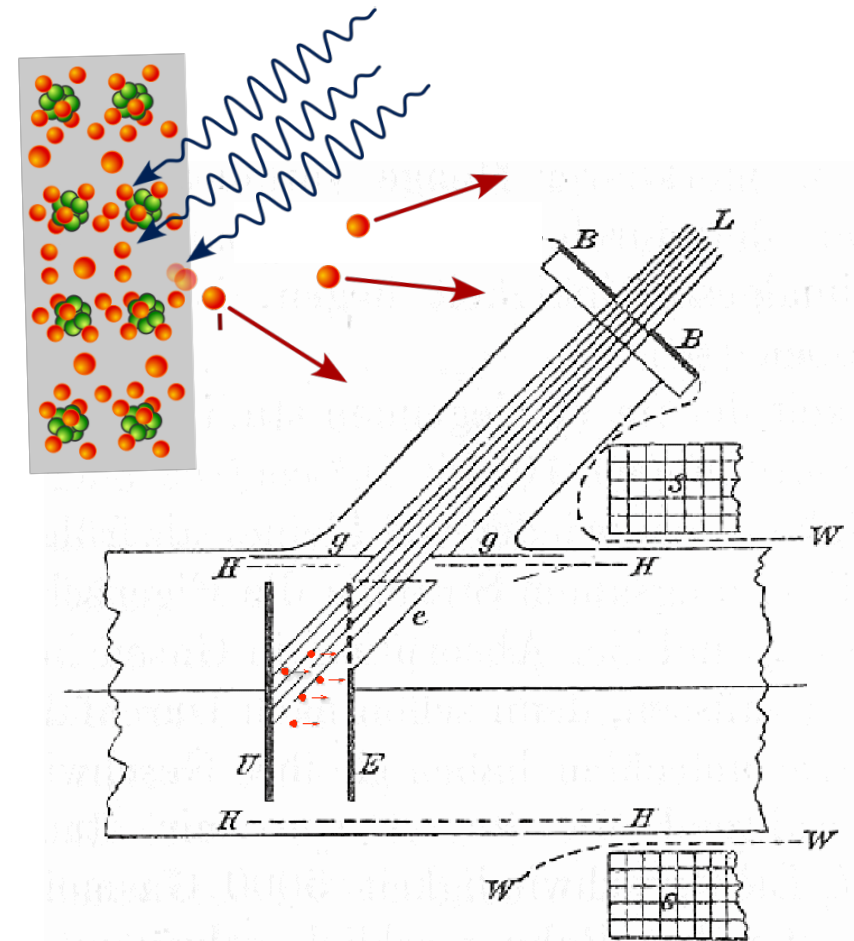
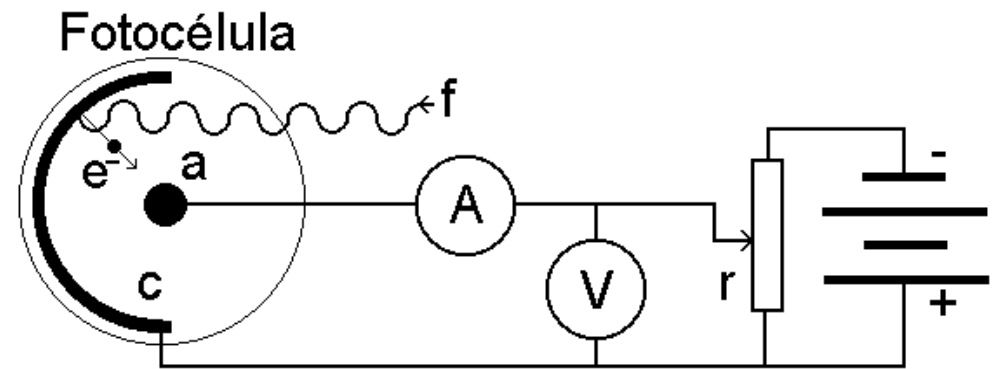


Fig. 1.

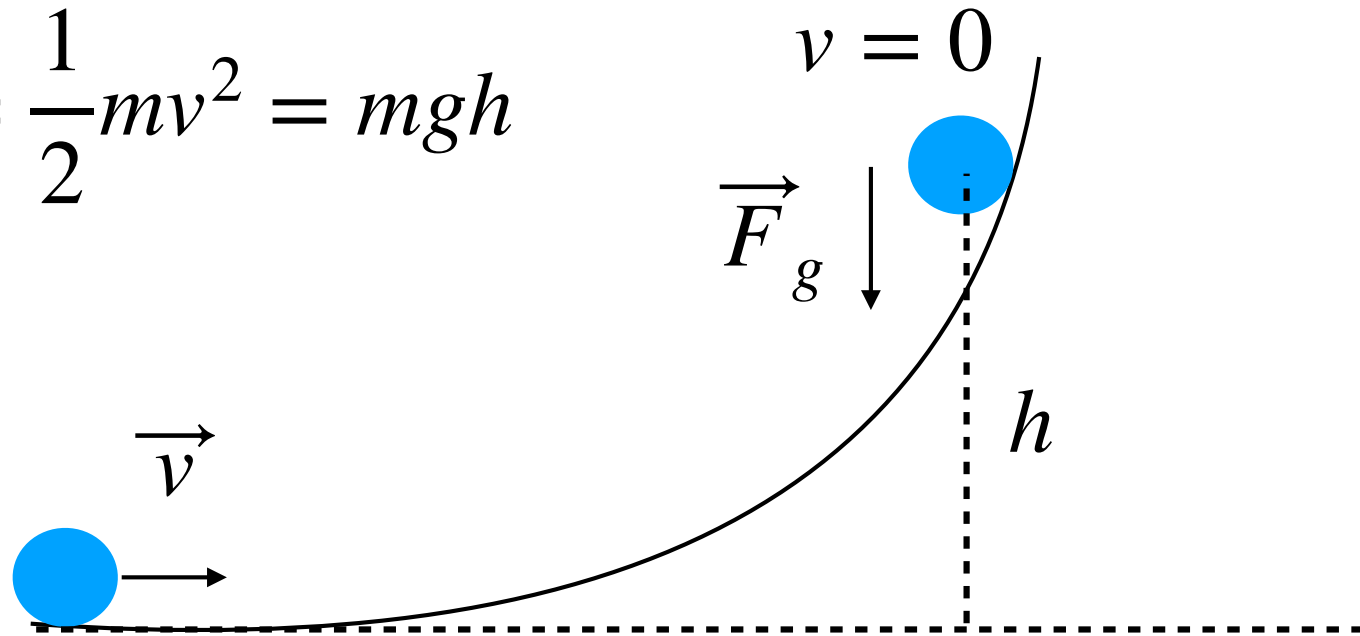
Medida da Energia Cinética dos elétrons

- 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: $eV_0 = E_c$

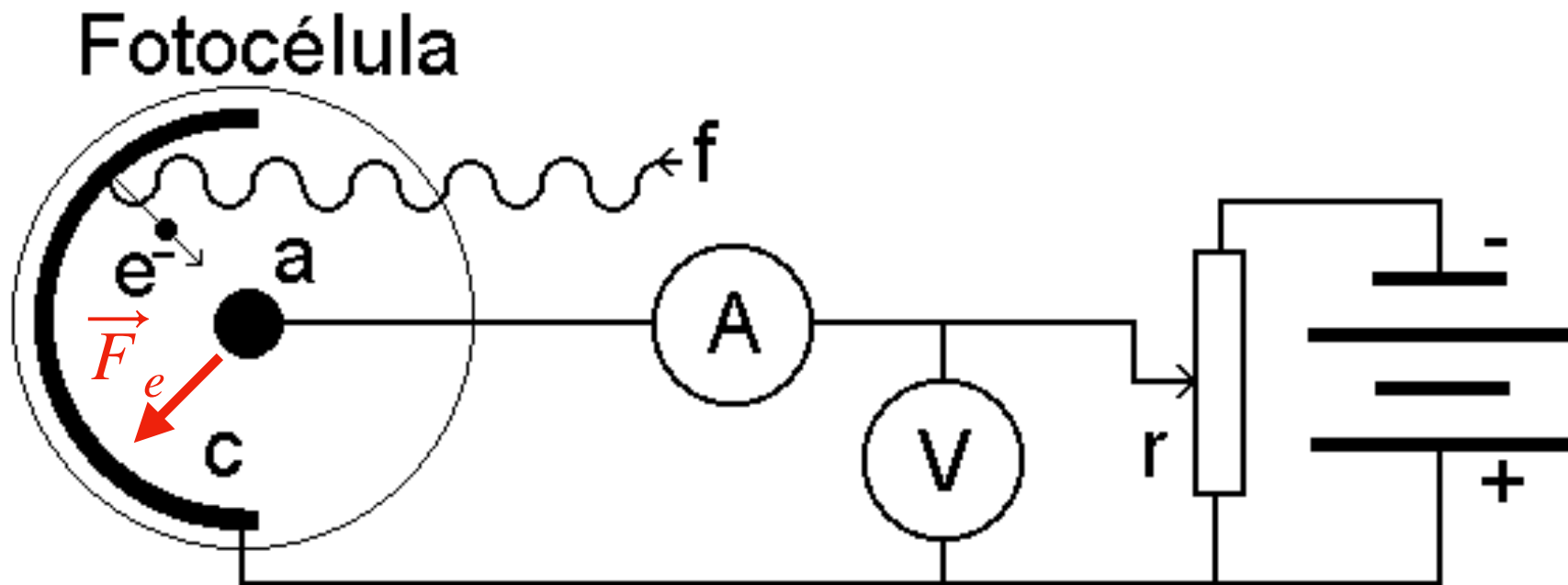


Medida da Energia Cinética dos elétrons

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



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

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 ...”

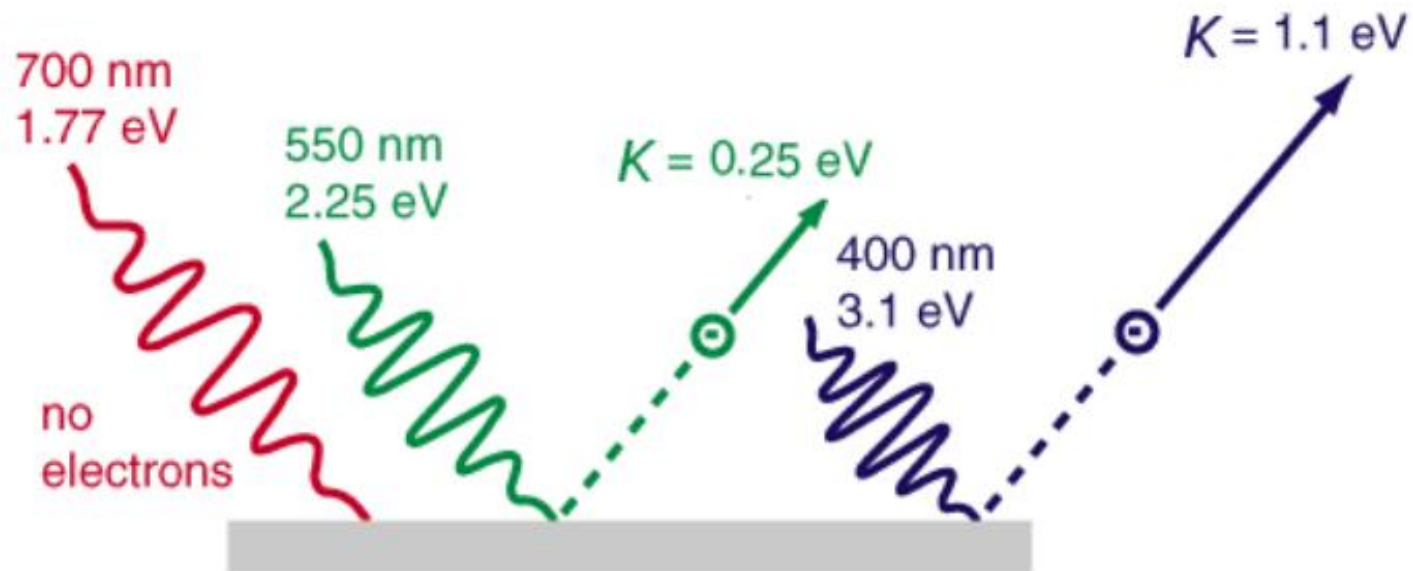
Nova e revolucionária descrição teórica!

- 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, $e\phi = 2\text{ eV}$

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...

