

**Universidade de São Paulo  
Instituto de Física**

# **FÍSICA MODERNA I**

---

## **AULA 05**

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto  
Pelletron – sala 114  
rizzutto@if.usp.br**

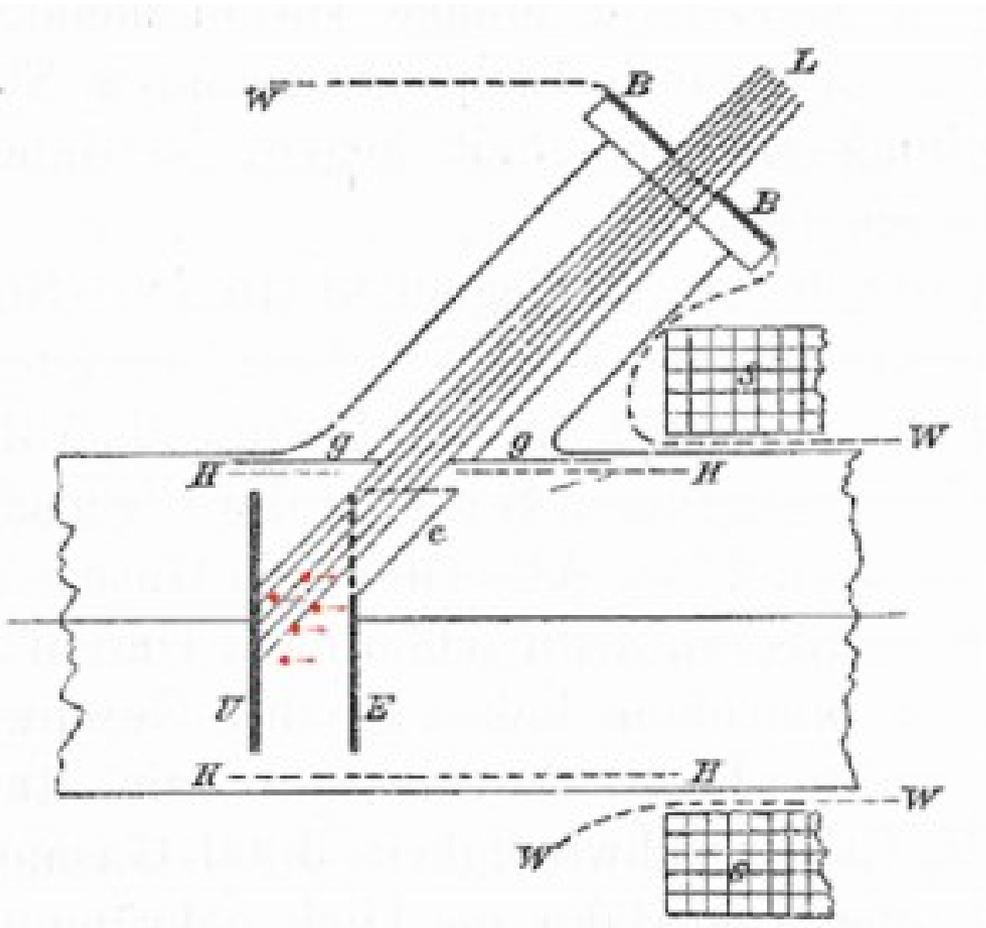
**1o. Semestre de 2014**

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

Página do curso: <http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=2905>

# Efeito fotoelétrico

- O Experimento de Lenard, Annales de Physique, Leipzig 8, 1902 pp149,

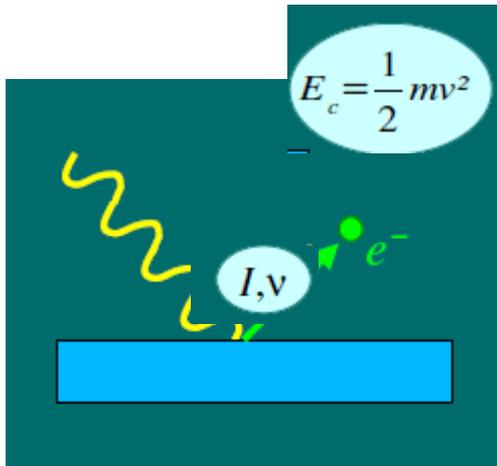


No experimento mede a corrente gerada entre os eletrodos e a energia cinética dos elétrons (recém descobertos - 1897)



- O que podemos esperar deste experimento – física clássica explica?

# 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  $\implies E_c \sim \nu$
- ✓ Existe uma frequência de corte para a radiação eletromagnética, abaixo desta ( $\nu < \nu_0$ ) não ocorre efeito foto-elétrico  $\implies$  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



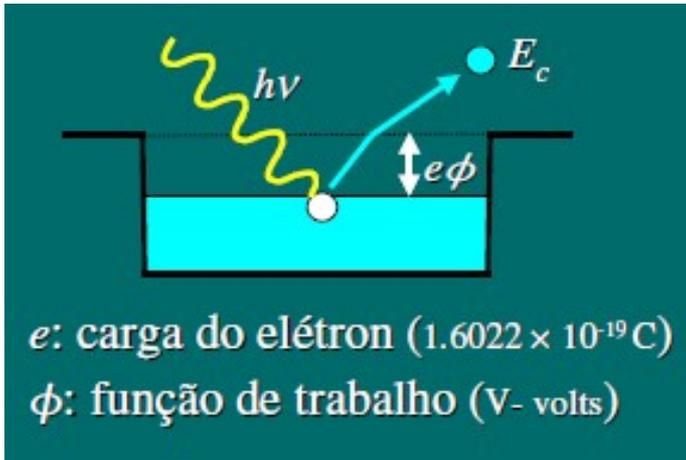
- Propôs que a radiação eletromagnética é composto de “pacotes” de energia ou “fótons”. A energia  $E$  de cada fóton é proporcional a frequência  $\nu$  da radiação:

$$E_f = h\nu$$

- 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 foto-elétrica), mas a energia máxima de cada elétron é a mesma

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

freqüência de corte



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

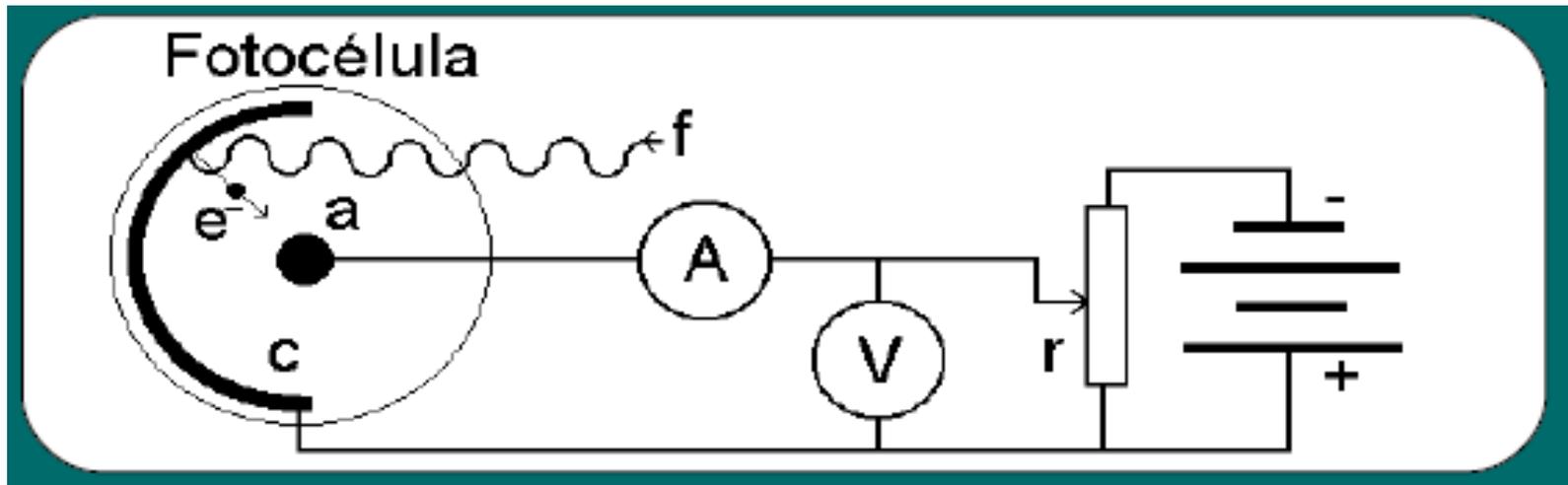
$$h\nu < e\phi$$

❑ 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) ✓

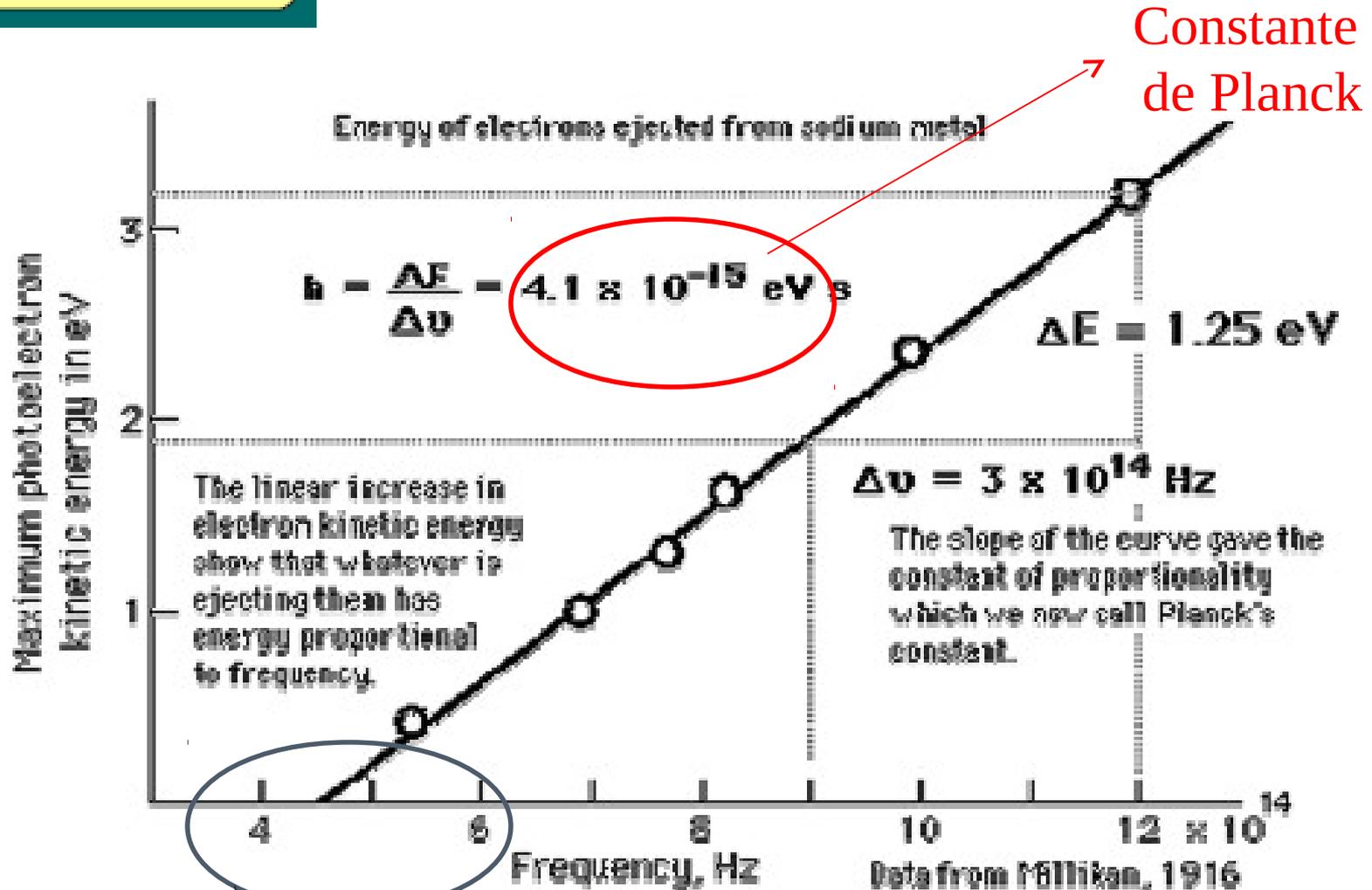
# Arranjo Experimental

- 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 e 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,  $V_0=0$

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

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

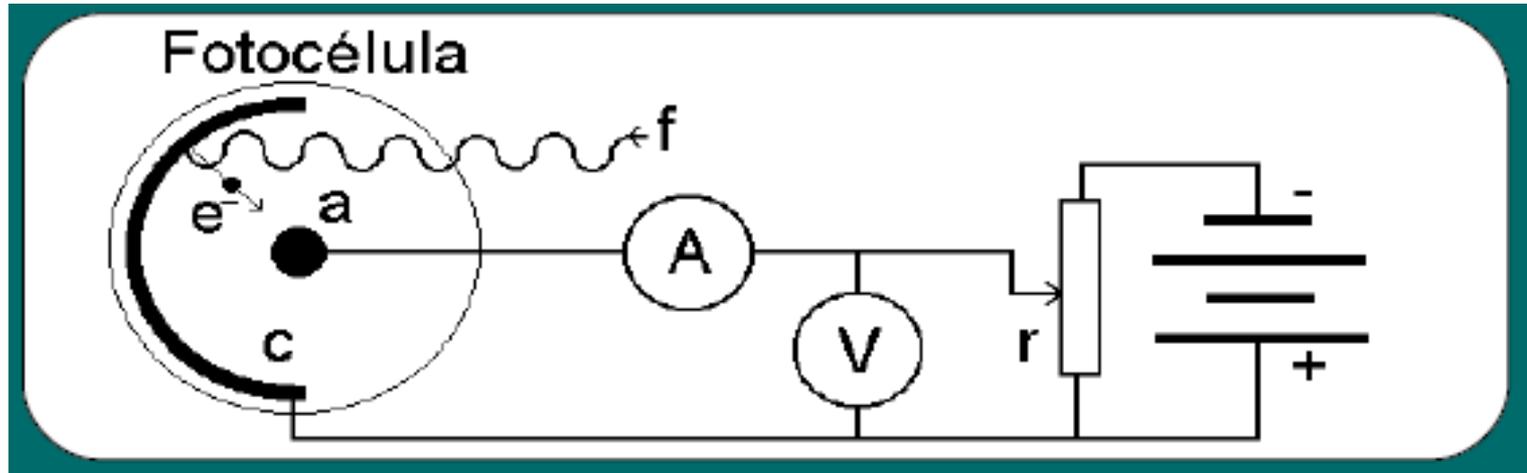
$$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

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

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

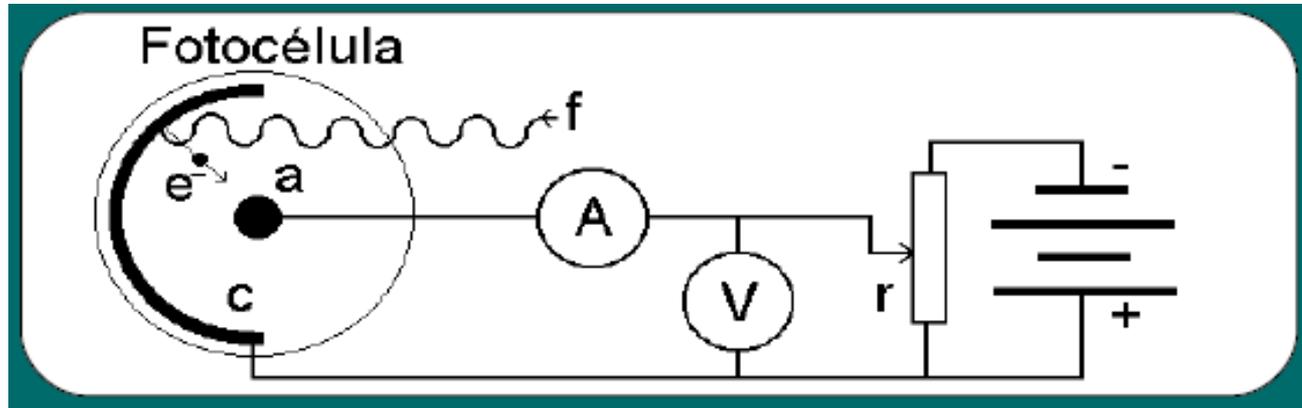
elemento	$\Phi$ (ev)
Na	2,28
Cd	4,07
Al	4,08
Pt	6,35
Ni	5,01
Pb	4,14

# Arranjo Experimental

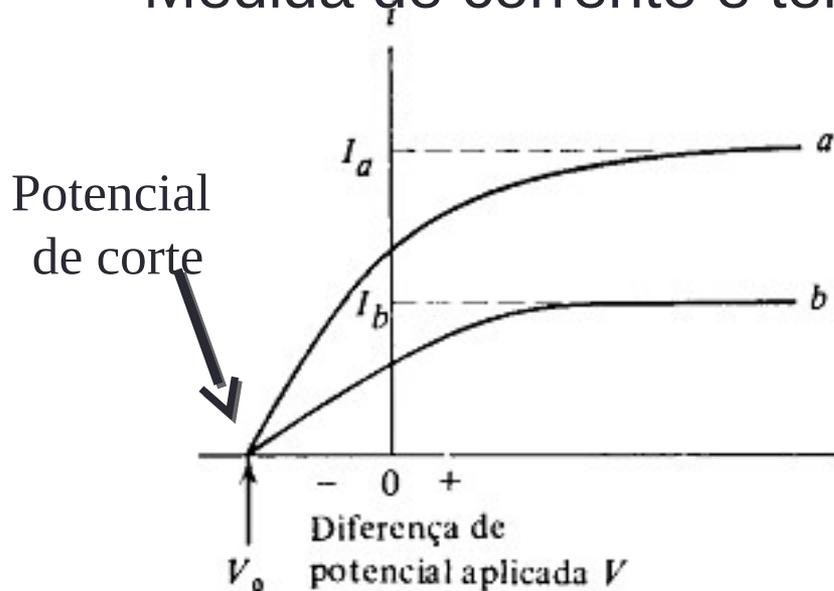


- ❑ Pico-amperímetro (A)
- ❑ Voltímetro (V)
- ❑ Fonte de tensão variável
- ❑ Na fotocélula temos:
  - ❑ Catodo feito de metal de baixa função trabalho
  - ❑ Ânodo com metal de alta função trabalho
- ❑ Fonte de luz monocromática (iluminar o catodo), visível, Infravermelho

# Arranjo Experimental



□ Medida de corrente e tensão



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

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

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

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

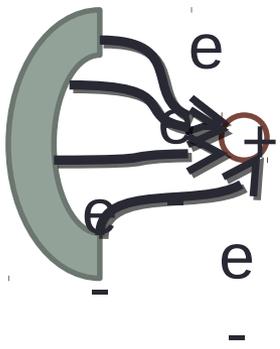
□ Este valor de  $V_0$ , multiplicado pela carga, mede a energia

cinética  $K_{\max}$  do mais rápido fotoelétron emitido

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

# Arranjo Experimental

Medida de corrente e tensão

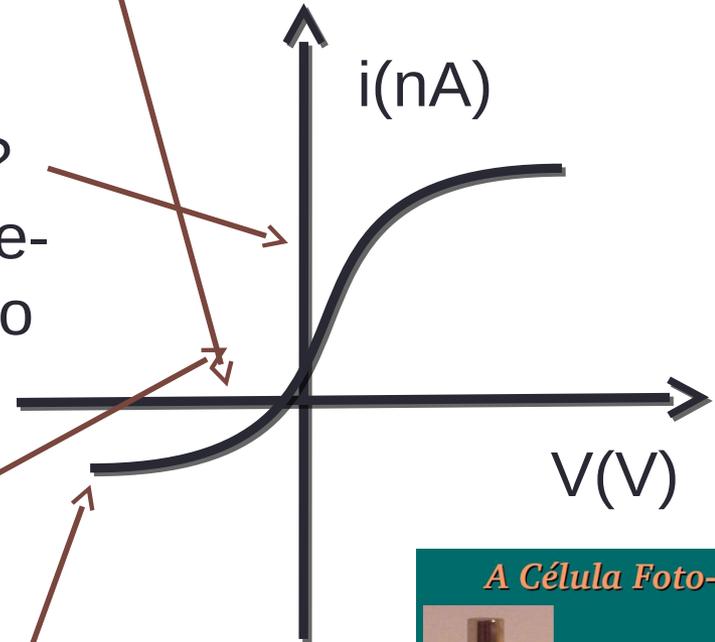


Tensão = 0  
Tenho corrente?  
Naturalmente os e-  
chegam ao ânodo

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

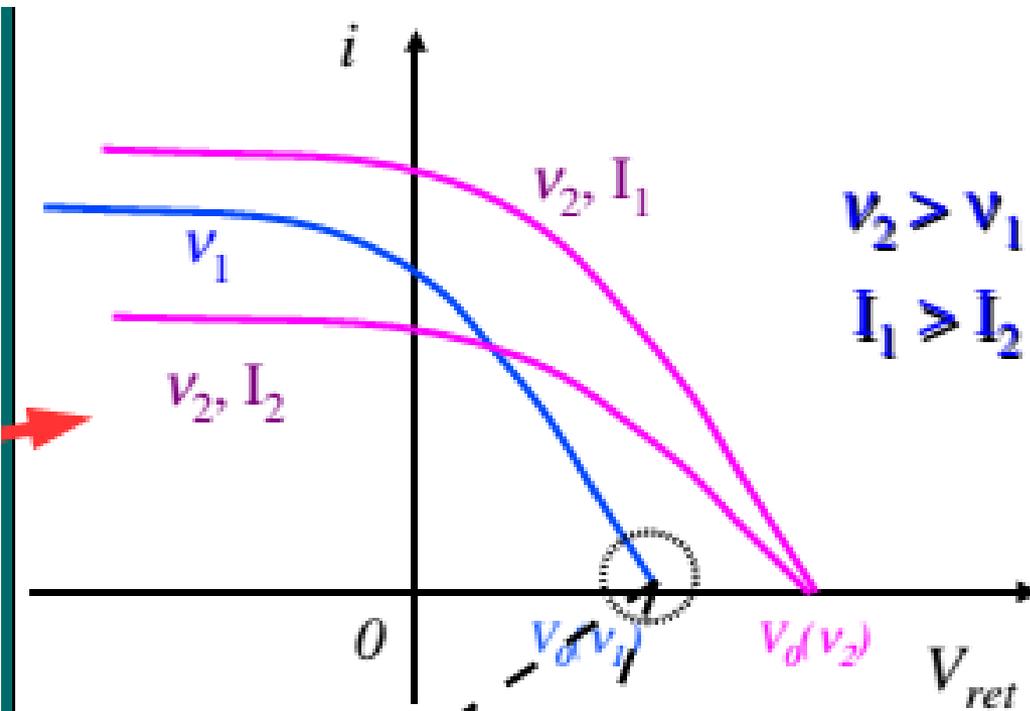
corrente fotoelétrica é negativa devido a  
simetria cilíndrica da fotocélula, catodo é  
irradiado ao mesmo tempo

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

$$\square hc = 1240\text{eV}\cdot\text{nm}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$eV_o = 3,1 - 2,22 = 0,88\text{eV}$$

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

Logo  $V_o = 0,88\text{V}$

# 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  $\lambda = 10\text{cm}$

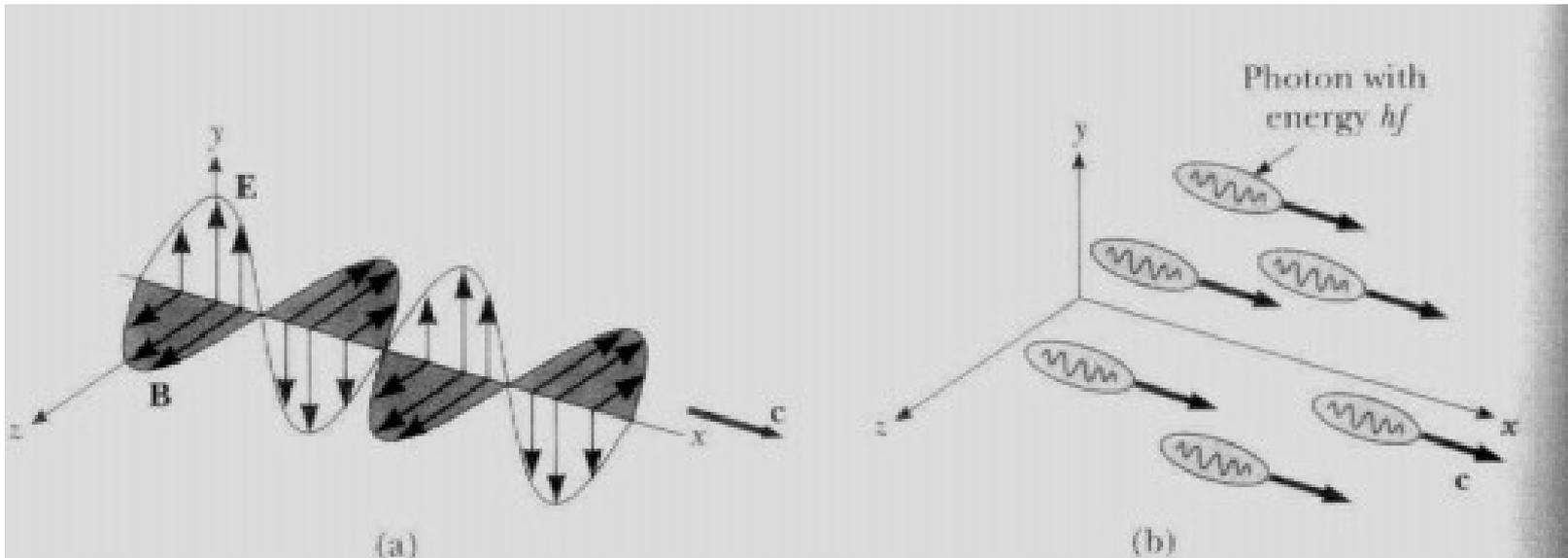
$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{10 \times 10^{-2}\text{m}} = 124 \times 10^2 \times 10^{-9}\text{eV}$$

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

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

# Dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética

- Em 1921 Einstein recebe o Prêmio Nobel por ter previsto teoricamente o efeito fotoelétrico
- A luz é uma onda eletromagnética e uma partícula (fóton) ao mesmo tempo
- A luz se propaga como onda e interage como partícula



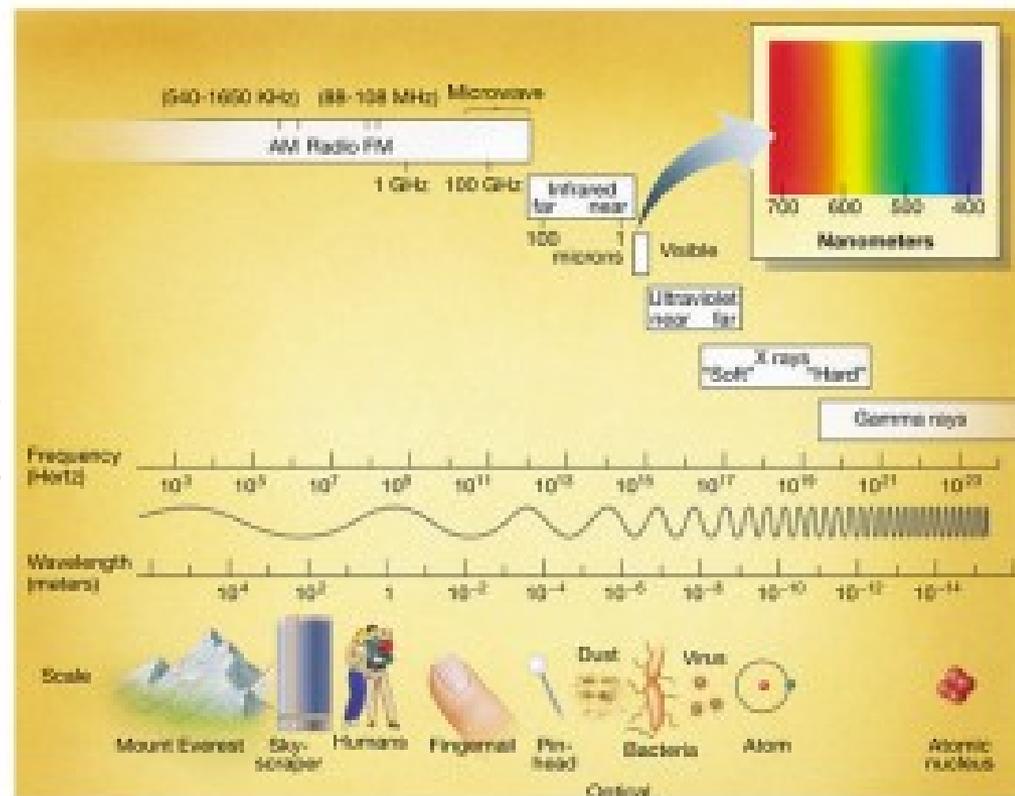
# Dualidade onda-partícula

- ❑ Os experimentos de Lenard e as explicações de Einstein se referiam a luz visível, UV, IV.
- ❑ Podemos perguntar se este comportamento onda-partícula é característico de todo o espectro eletromagnético?

❑ Os raios X (descoberto por Roentgen (1895) tem este mesmo comportamento?

❑ Todas a radiação eletromagnética se comporta da mesma forma, ora partícula ora onda?

❑ Em 1922 Compton respondeu esta questão.



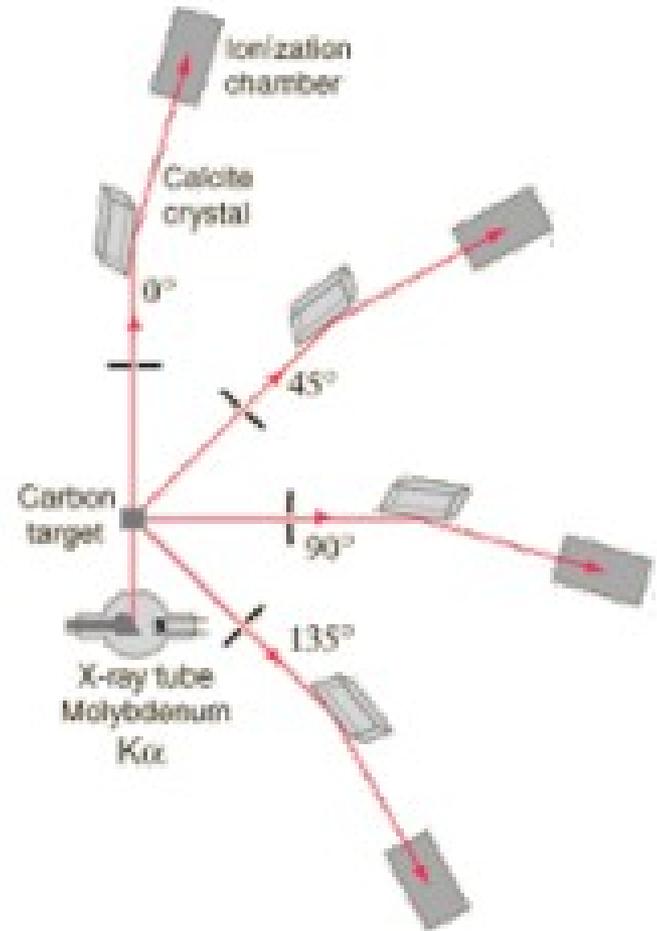
# O experimento de Compton

□ Arthur H. Compton (1923) publicou seus trabalhos realizados desde 1918: Phys. Rev. 21, 483; 22,409 (1923)

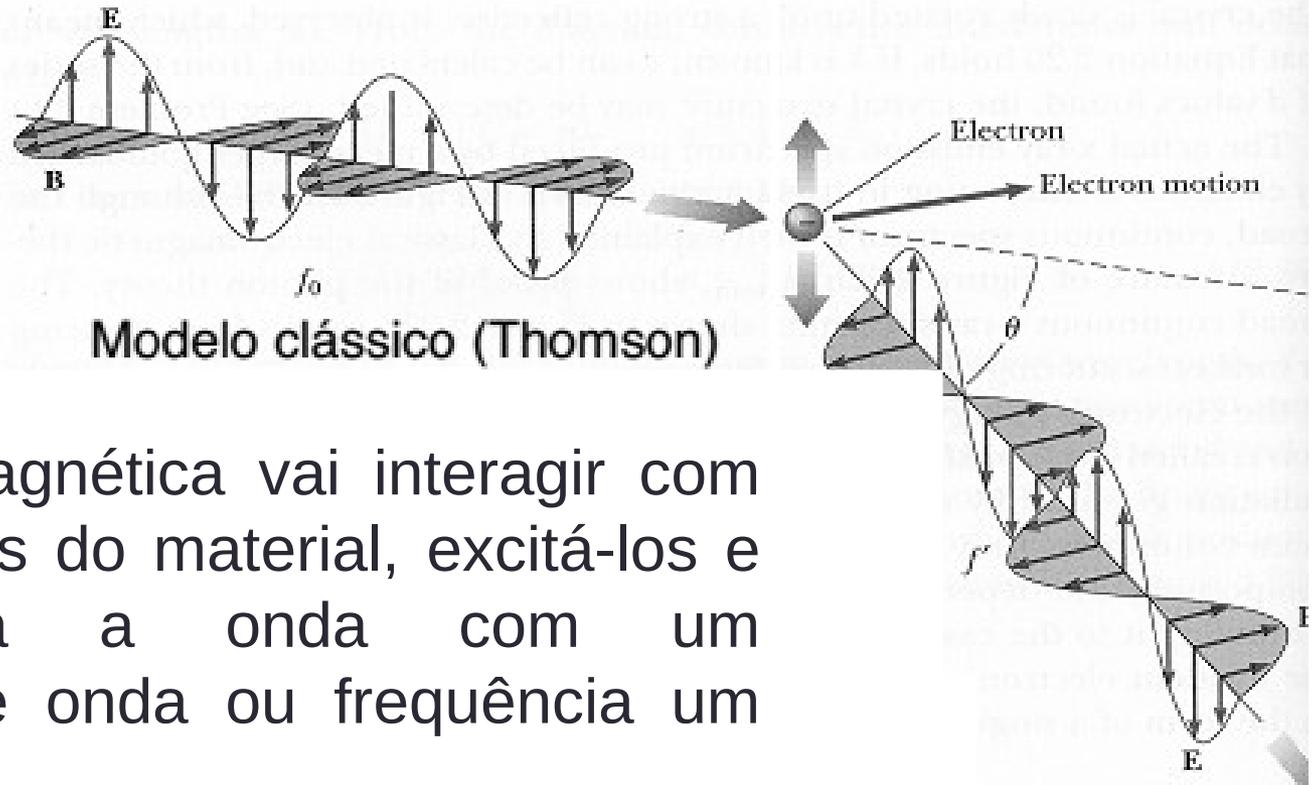
□ Compton fez incidir raios X (proveniente do material molibdênio) sobre uma alvo sólido (carbono) e mediu a intensidade do raios X espalhado.

□ Usando um cristal, ele mediu o comprimento de onda dos raios-X em ângulos diferentes.

□ Resultados surpreendentes



# O experimento de Compton visto classicamente



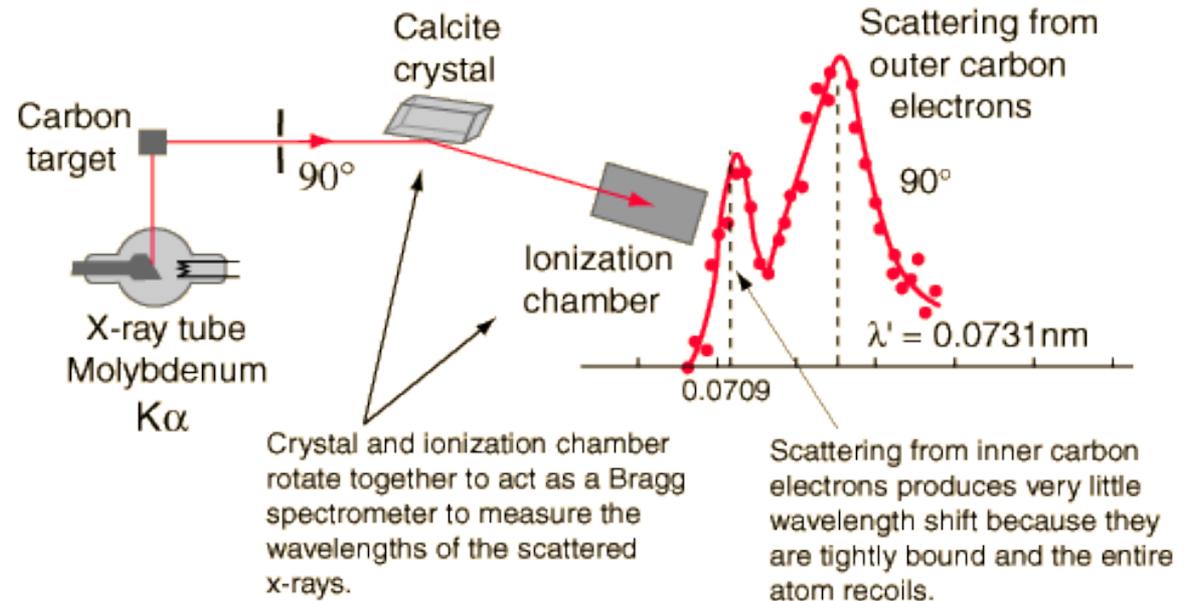
□ Onda eletromagnética vai interagir com os elétrons livres do material, excitá-los e será reemitida a onda com um comprimento de onda ou frequência um pouco menor.

□ O comprimento de onda deveria depender da intensidade da radiação incidente e do tempo de exposição

# O experimento de Compton

□ Observou por exemplo em  $90^\circ$  que os raios X espalhados têm máximos de intensidade em dois comprimentos de onda:

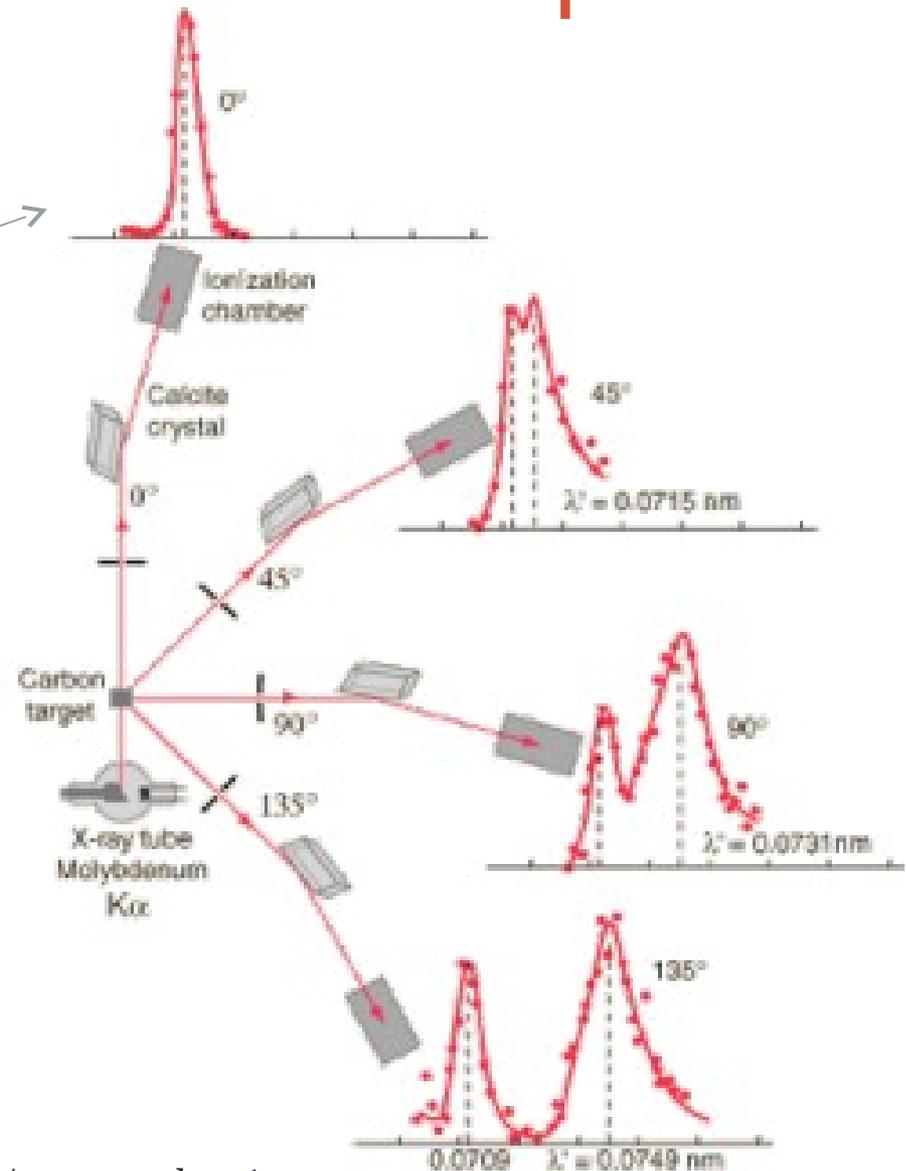
Um deles é o mesmo que o comprimento de onda incidente ( $\lambda=0.0709\text{nm}$ ) e o outro  $\lambda'$  é maior que  $\lambda$  por uma quantidade  $\Delta\lambda$  (chamado de deslocamento de Compton)



# O experimento de Compton

□ O espalhamento Compton para os diferentes ângulos:

O pico não deslocado é causado pelo espalhamento dos raios X pelo elétron fortemente ligado ao átomo de carbono. A massa do átomo de carbono é 23000 vezes a massa de um elétron

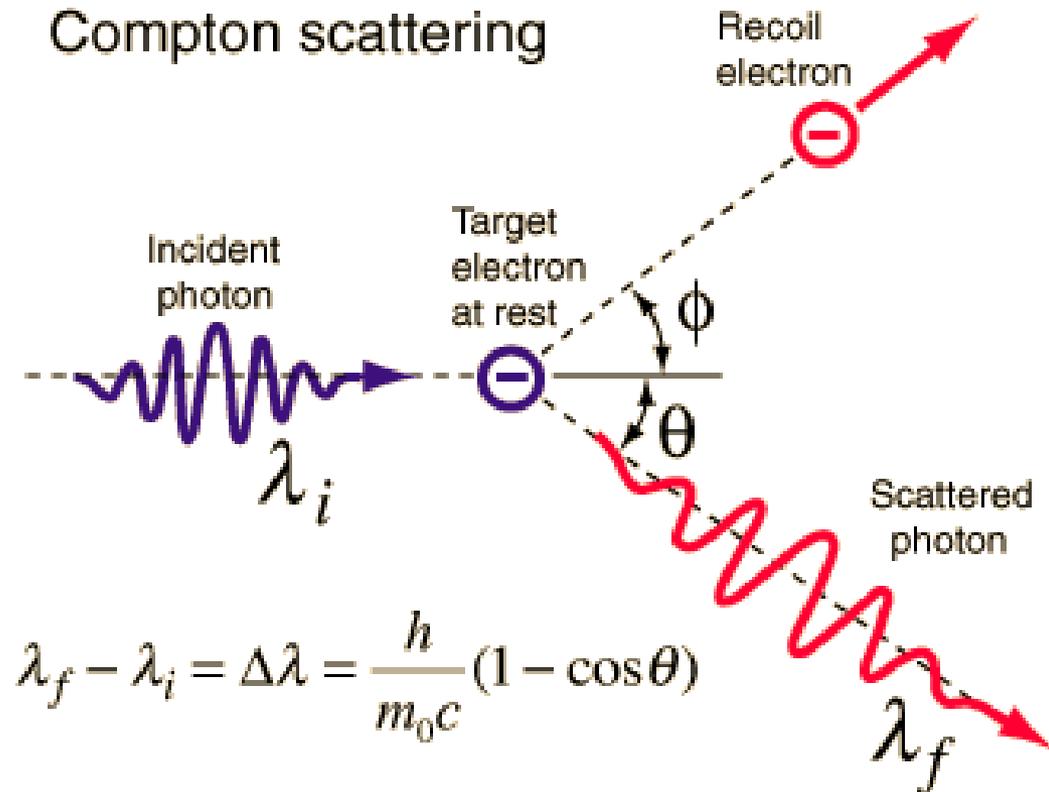


# O experimento de Compton

□ Esquemáticamente podemos dizer que o fóton incidente fornece parte de sua energia ao elétron.

□ O elétron sofre um recuo, sendo emitido em um ângulo  $\Phi$  com energia  $E_e$  e momento  $p_e$

□ O fóton é espalhado em um ângulo  $\theta$  com menor energia  $E'$  (menor comprimento de onda  $\lambda'$ ) que o fóton incidente.



# O experimento de Compton

□ O termo

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

□ É conhecido como comprimento de onda de Compton do elétron.

$$\frac{h}{m_e c} = \frac{hc}{m_e c^2} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0,511 \text{ MeV}} = 2,426 \times 10^3 \times 10^{-6} \text{ nm}$$

$$\frac{h}{m_e c} = 0,00243 \text{ nm}$$

□ O comprimento de onda dos raios X é  $\lambda = 0,200 \text{ nm}$  e incide sobre um bloco de carbono. Os raios X espalhados são observados no ângulo de  $45^\circ$  em relação ao feixe incidente. Calcule o aumento do comprimento de onda dos raios X espalhados neste ângulo.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = \frac{hc}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)$$

$$\Delta\lambda = \frac{1240}{511} (1 - \cos 45) = 0,00243 (1 - 0,707)$$

$$\lambda' - \lambda_0 = 0,000711 \text{ nm}$$

$$\lambda' = 0,200 + 0,000711 = 0,200711 \text{ nm}$$

# Exercício

□ Raios X de comprimento de onda 0,050nm incidem sobre um alvo de Au. Pode-se ter um espalhamento Compton de um elétron ligado por uma energia de 62keV?

$$E_{RX} = h\nu$$

$$E_{RX} = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1240eV.nm}{0.050nm}$$

$$E_{RX} = 24.800eV = 24keV$$

Não será possível ocorrer o espalhamento Compton do elétron ligado pois a energia do raio X não é suficiente para deslocar este elétron ligado.

# Exercício

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

a) A energia do fóton

b) O potencial de corte  $V_0$

c) 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