



Universidade de São Paulo Instituto de Física

FÍSICA MODERNA I

AULA 06

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br

2o. Semestre de 2017

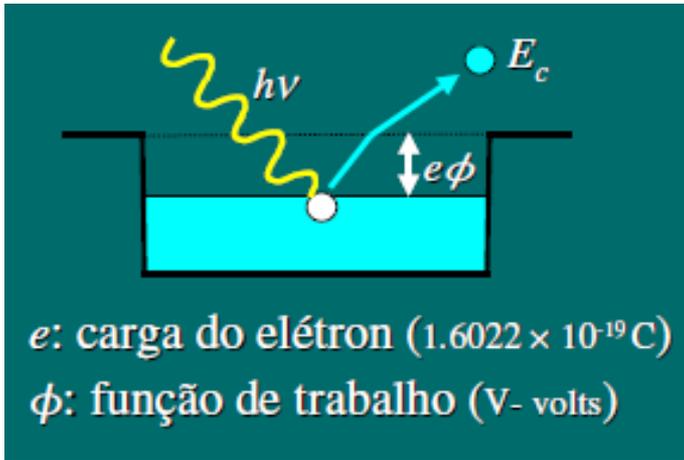
Página do curso:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=53869>

21/08/2017

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 fotoelétrica), mas a energia máxima de cada elétron é a mesma

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

frequência de corte



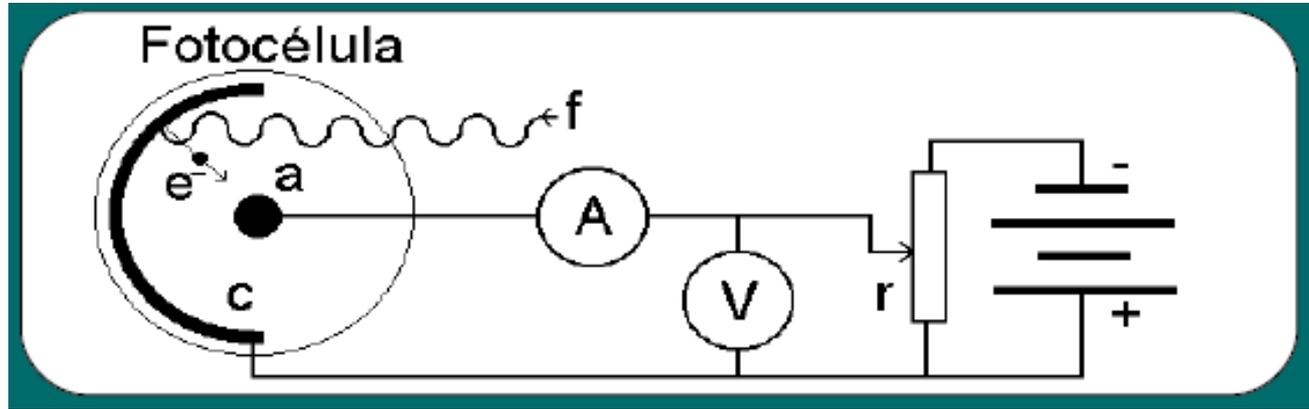
$$\nu_0 = \frac{e\phi}{h}$$

$$h\nu < e\phi$$

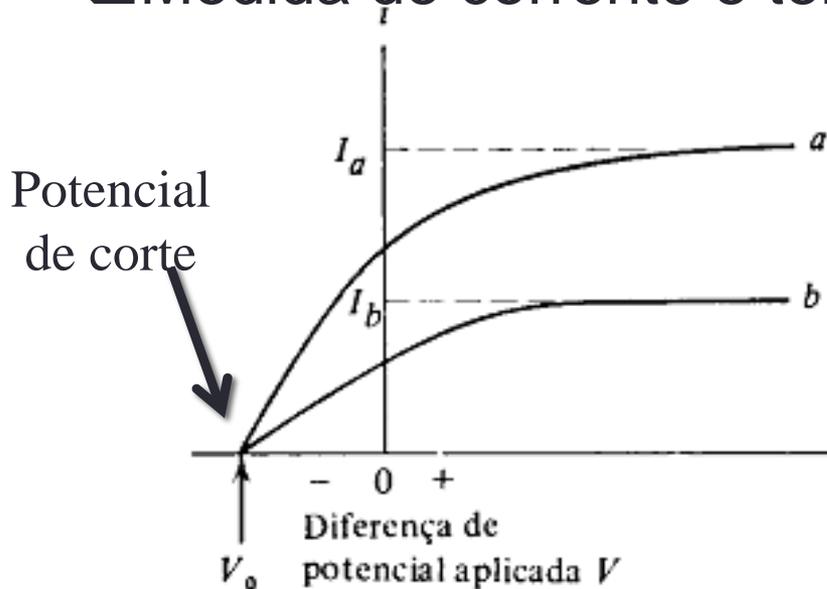
□ Não há atrasos na emissão dos fotoelétrons, mesmo baixa I (há fótons incidente) ejetando elétrons, o elétron não fica acumulando energia para depois escapar.

- 1) ✓
- 2) ✓
- 3) ✓

Arranjo Experimental



☐ Medida de corrente e tensão



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

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

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

$$I_b < I_a$$

☐ 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

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

Exercício

☐ Qual 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)

Exercício

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

- A energia do fóton
- O potencial de corte V_0
- Qual a frequência de luz necessária para produzir elétrons de energia cinética de 3eV do Lítio iluminado

$$a) E = h\nu$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{400\text{nm}}$$

$$E = 3,10\text{eV}$$

$$b) E_{\text{max}} = h\nu - \phi$$

$$eV_0 = 3,10 - 2,93$$

$$eV_0 = 0,17\text{eV}$$

$$V_0 = 0,17\text{V}$$

$$c) E_{\text{max}} = h\nu - \phi$$

$$h\nu = eV_0 + \phi$$

$$h\nu = 3,0 + 2,93$$

$$h\nu = 5,93\text{eV} = E$$

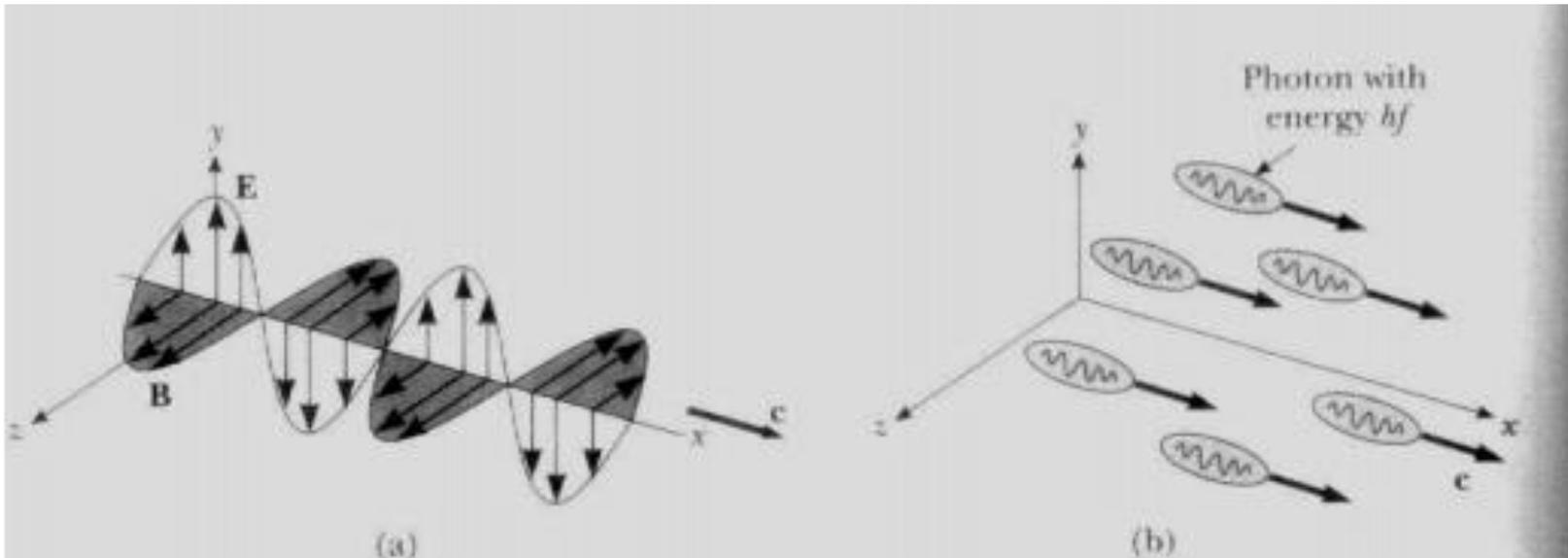
$$\nu = \frac{5,93\text{eV}}{h} = \frac{5,93\text{eV}}{4,136 \times 10^{-15}\text{eV}\cdot\text{s}}$$

$$\nu = 1,43 \times 10^{15}\text{ Hz}$$

Menor que o ultravioleta

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

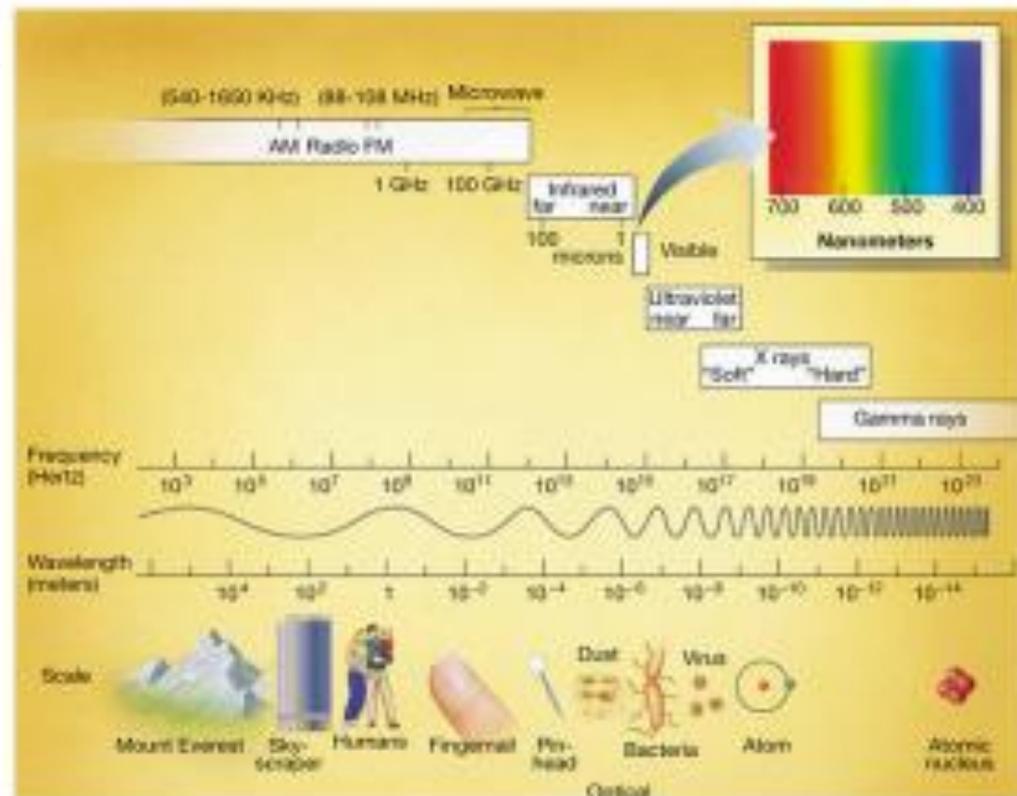
❑ Os experimentos de Lenard e as explicações de Einstein se referiam a luz visível, UV, IV.

❑ 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.



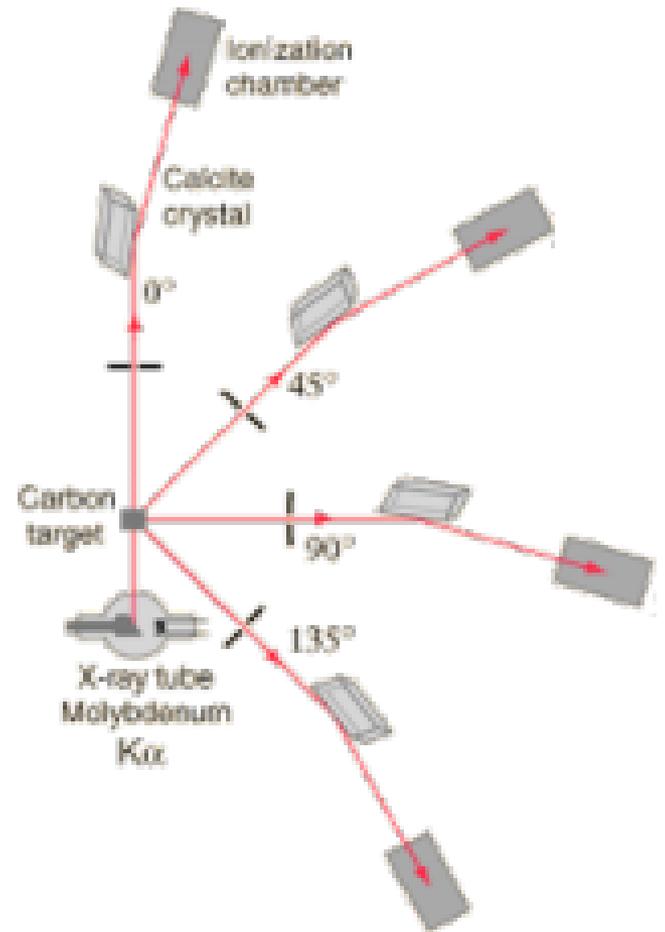
O experimento de Compton

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

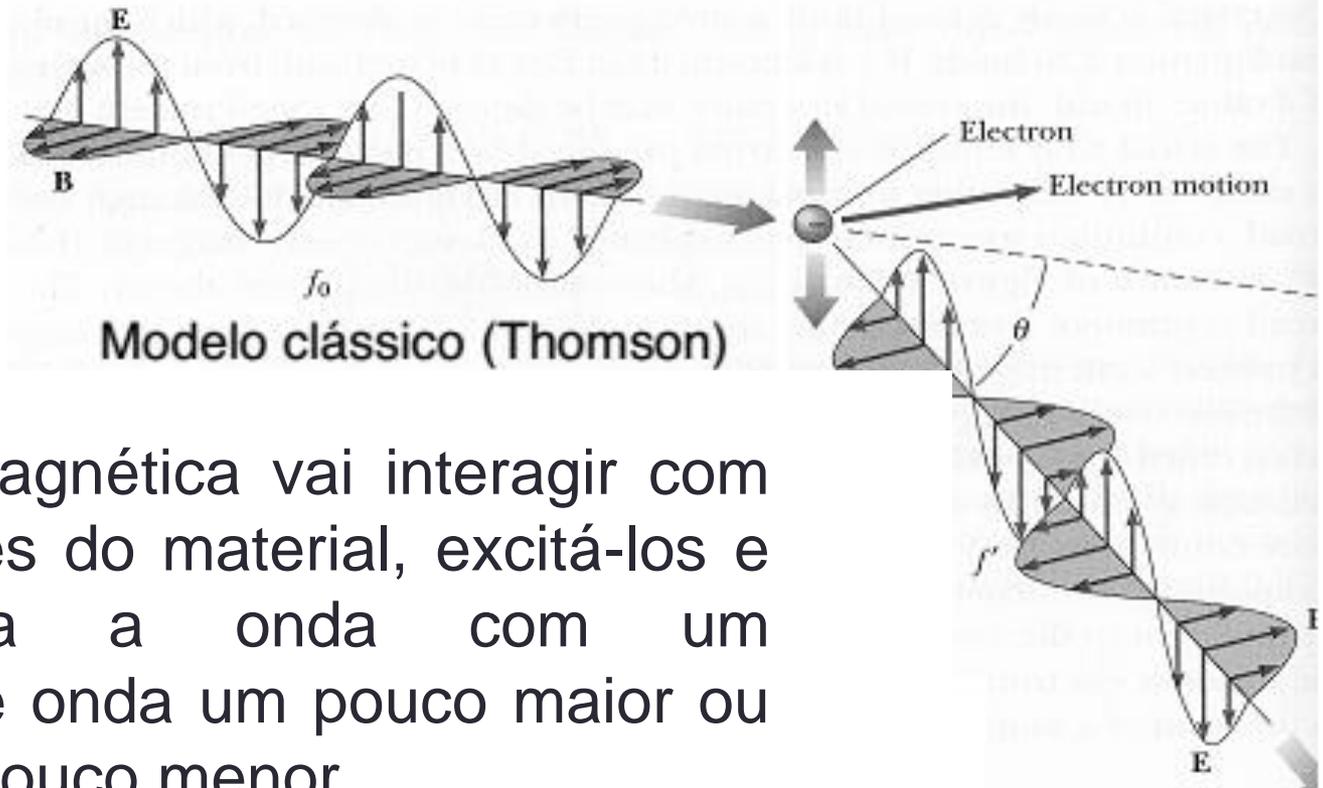
□ Compton fez incidir raios X (proveniente do material molibdênio) ($\lambda=0.0709\text{nm}$) sobre uma alvo sólido (carbono) e mediu a intensidade do raios X espalhado.

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

□ Resultados surpreendentes



O experimento de Compton visto classicamente



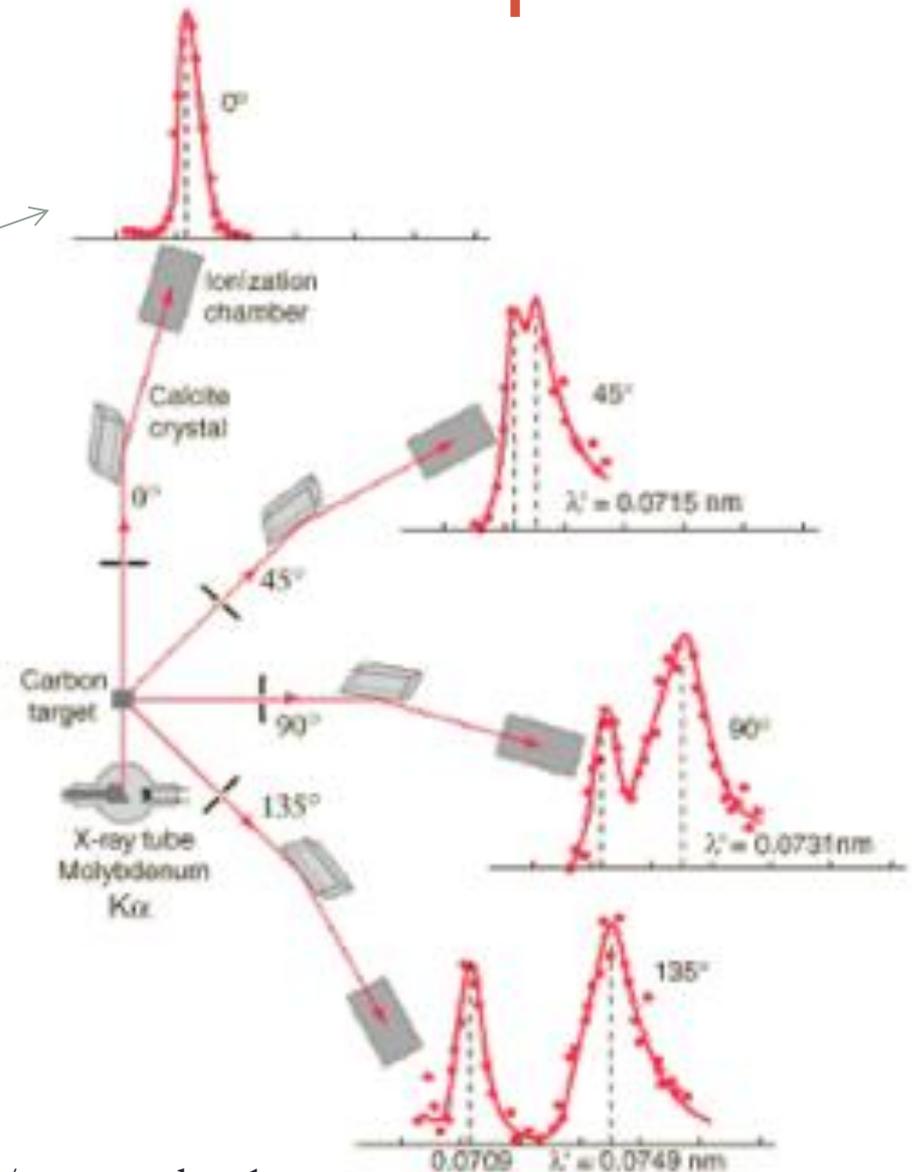
□ Onda eletromagnética vai interagir com os elétrons livres do material, excitá-los e será reemitida a onda com um comprimento de onda um pouco maior ou frequência um pouco menor.

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

O experimento de Compton

□ O espalhamento Compton para os diferentes ângulos:

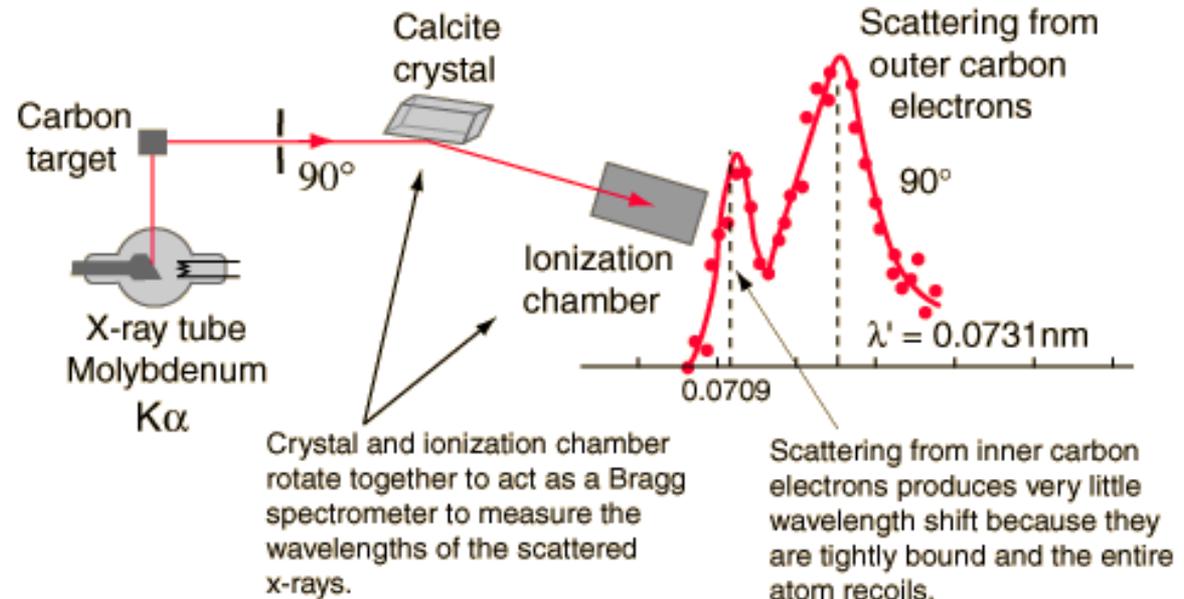
O pico NÃO deslocado é causado pelo espalhamento dos raios X pelo elétron fortemente ligado ao átomo de carbono. A massa do átomo de carbono é 23000 vezes a massa de um elétron



O experimento de Compton

□ Observou por exemplo em 90° 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 λ' é maior que λ por uma quantidade $\Delta\lambda$ (chamado de deslocamento de Compton)

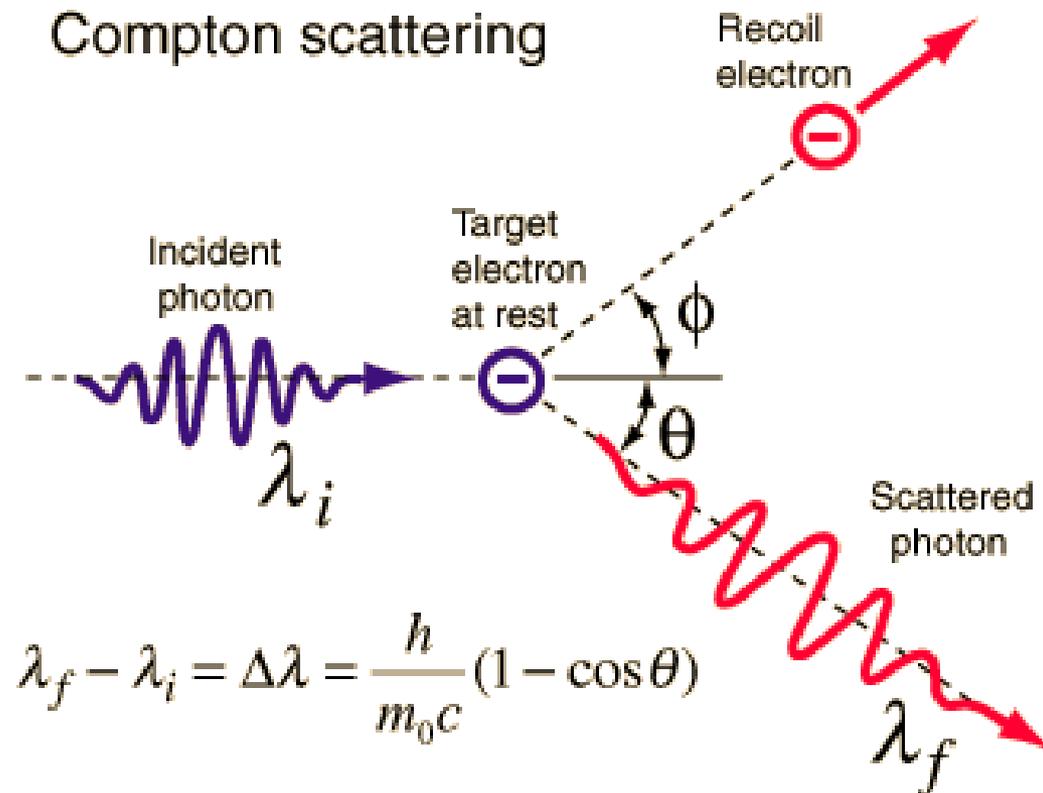


O experimento de Compton

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

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

□ O fóton é espalhado em um ângulo θ com menor energia E' (maior comprimento de onda λ') 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° em relação ao feixe incidente. Calcule o aumento do comprimento de onda dos raios X espalhados neste ângulo.

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

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

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

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

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.

Raios X

❑ Temos falado sobre os raios X, mas fica a pergunta:

O QUE ELES SÃO?

COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

❑ Roentgen descobriu os raios X em 1895 e recebeu o Prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta.

W. Roentgen observou:

1) As substâncias são mais ou menos transparentes aos raios X. Observou fluorescência mesmo através de: Livro de 100 páginas, madeira (2-3cm), 15mm de alumínio.

2) Alguns materiais são fluorescentes sob a ação do RX: fósforo, compostos de cálcio, sal de rochas

3) Os raios X não sofrem deflexão por campos magnéticos ou elétricos e se propagam em linha reta

