

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

## FÍSICA MODERNA I

---

### AULA 06

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

**1o. Semestre de 2015**

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

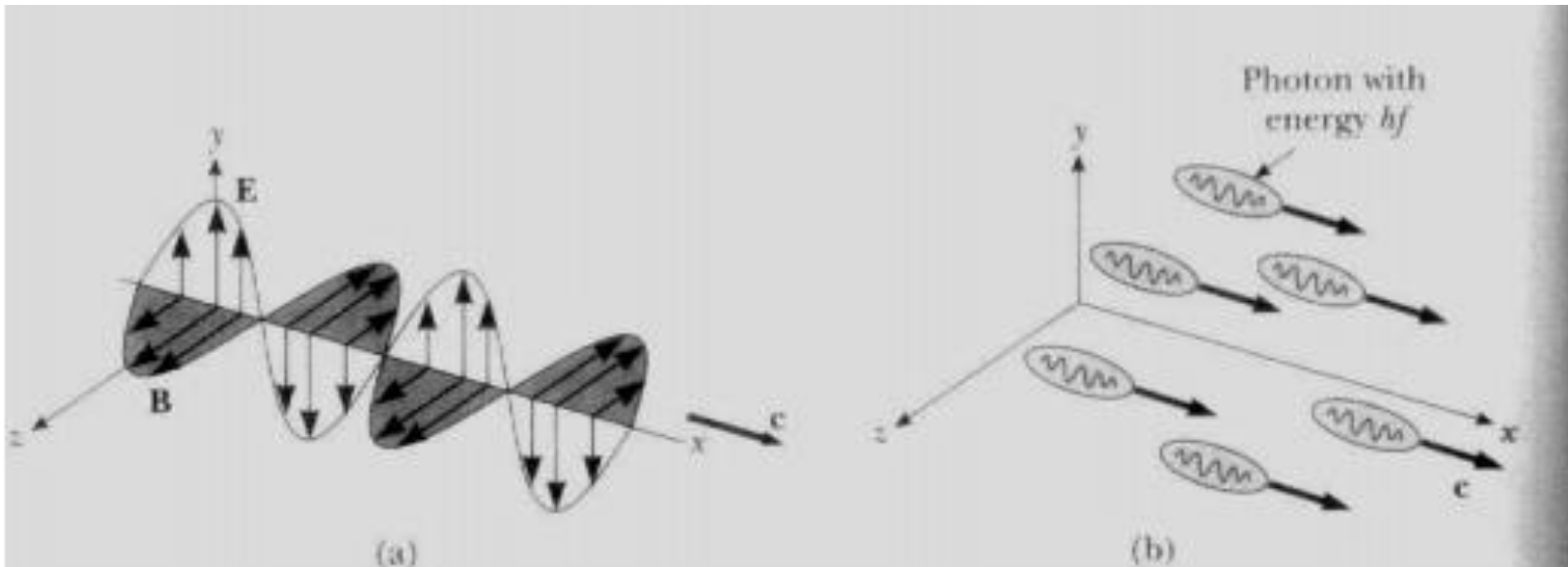
Página do curso:

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=5215>

**13/03/2015**

# 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



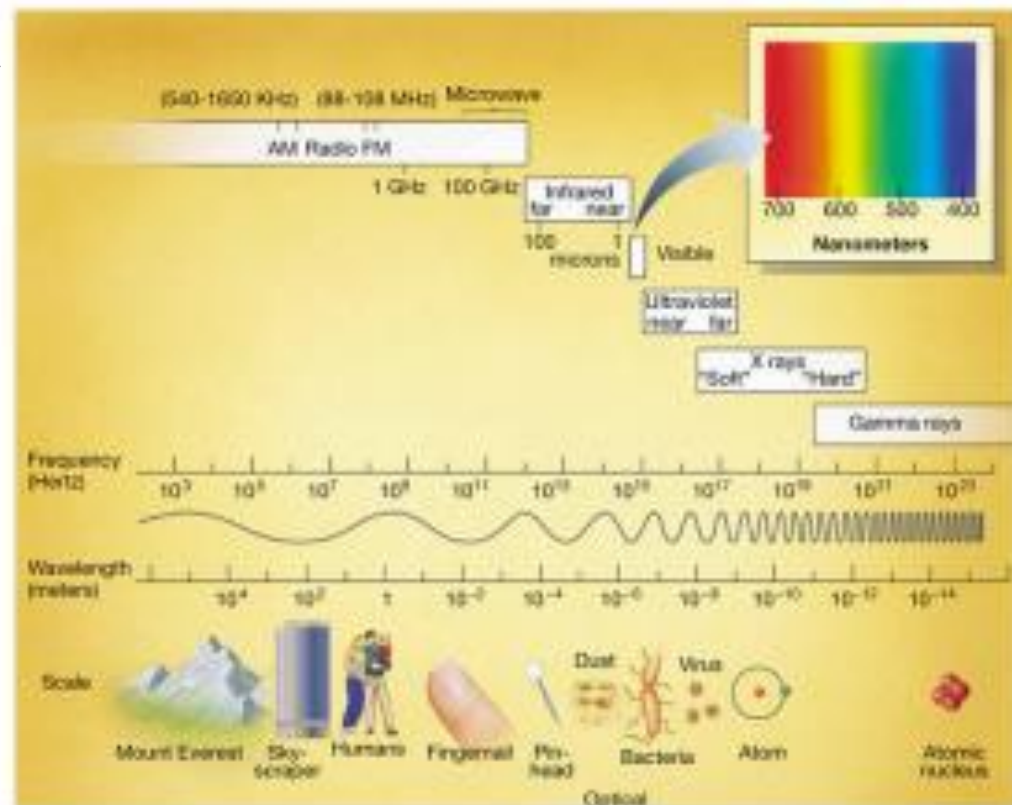
# Dualidade onda-partícula

- ❑ 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.



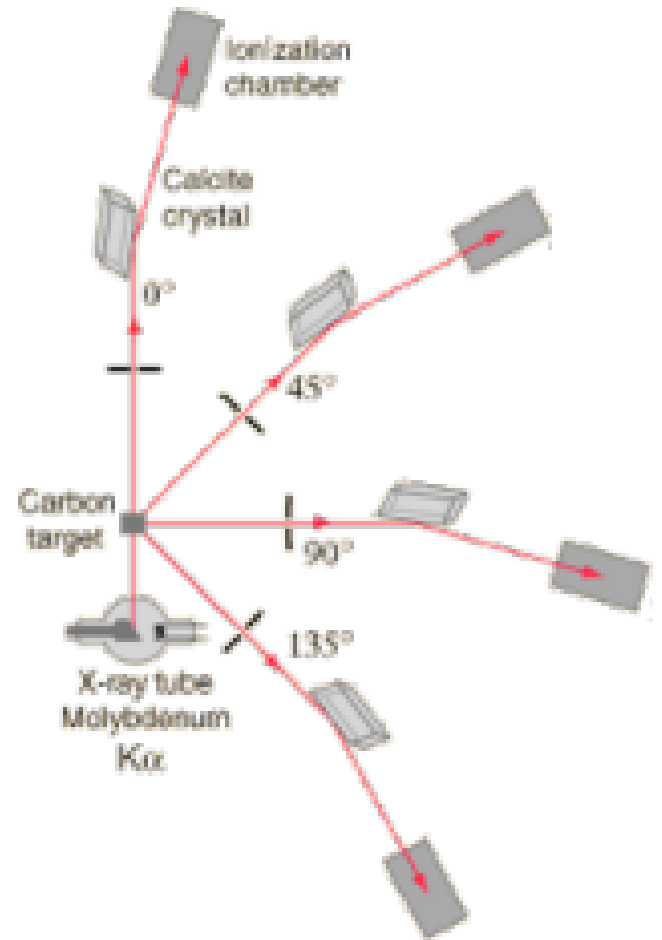
# O experimento de Compton

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

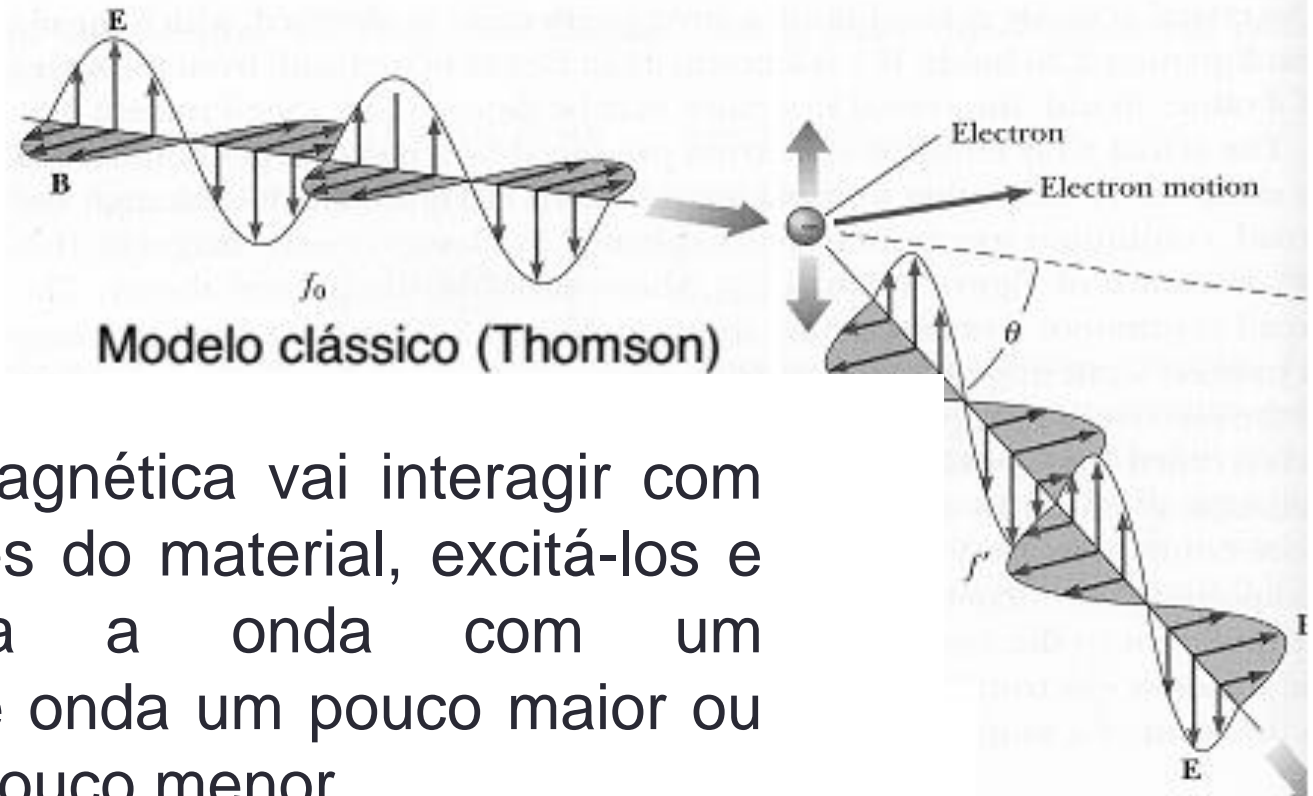
□ Compton fez incidir raios X (proveniente do material molibdênio) sobre uma alvo sólido (carbono) e mediu a intensidade do raios X espalhado.

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

□ Resultados surpreendentes



# O experimento de Compton visto classicamente



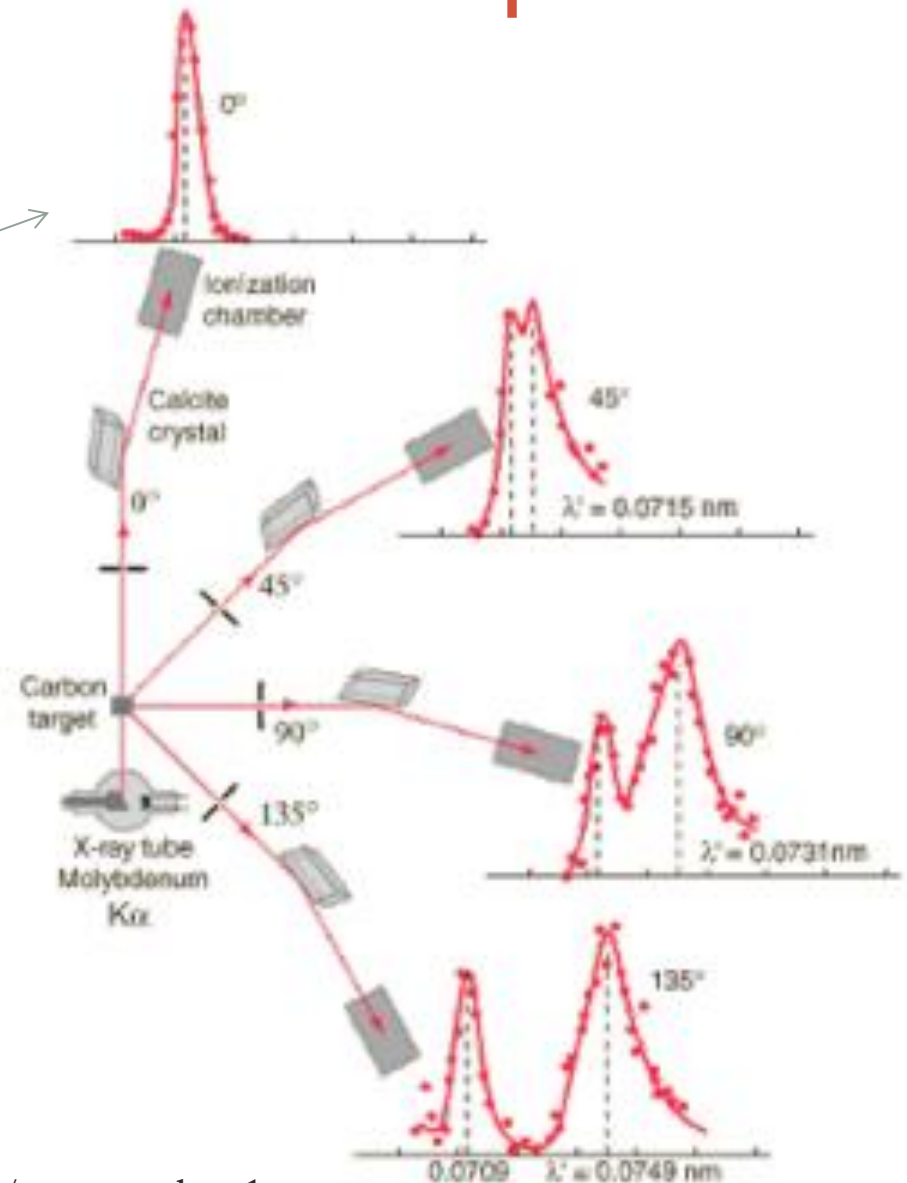
❑ Onda eletromagnética vai interagir com os elétrons livres do material, excitá-los e será reemitida a onda com um comprimento de onda um pouco maior ou frequência um pouco menor.

❑ 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:

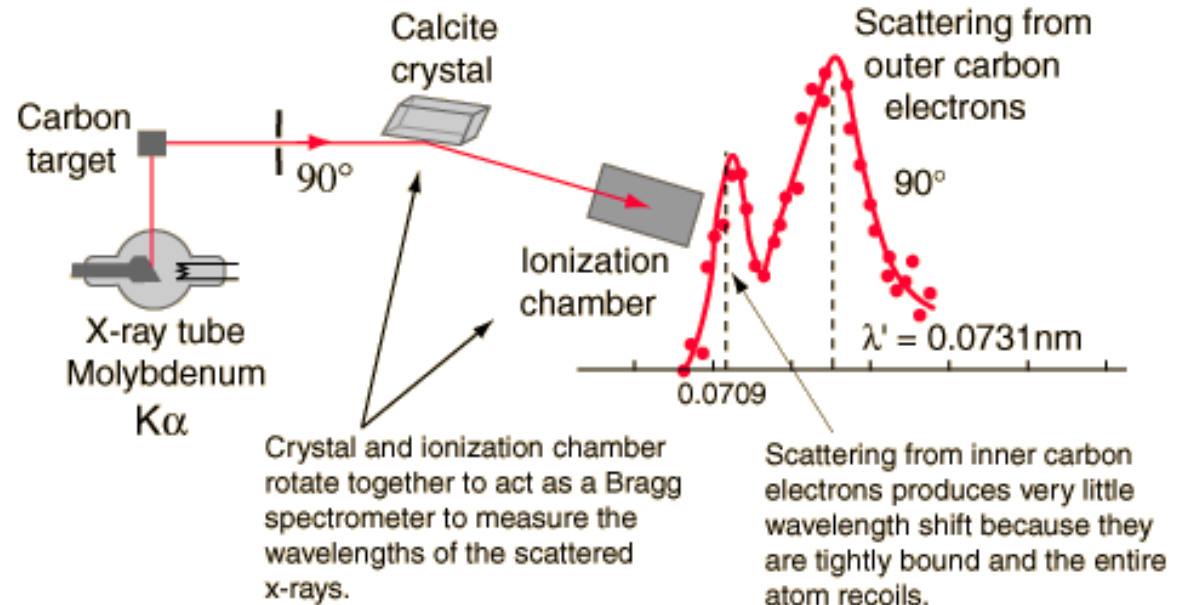
O pico NÃO deslocado é causado pelo espalhamento dos raios X pelo elétron fortemente ligado ao átomo de carbono. A massa do átomo de carbono é 23000 vezes a massa de um elétron



# O experimento de Compton

□ Observou por exemplo em  $90^\circ$  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)

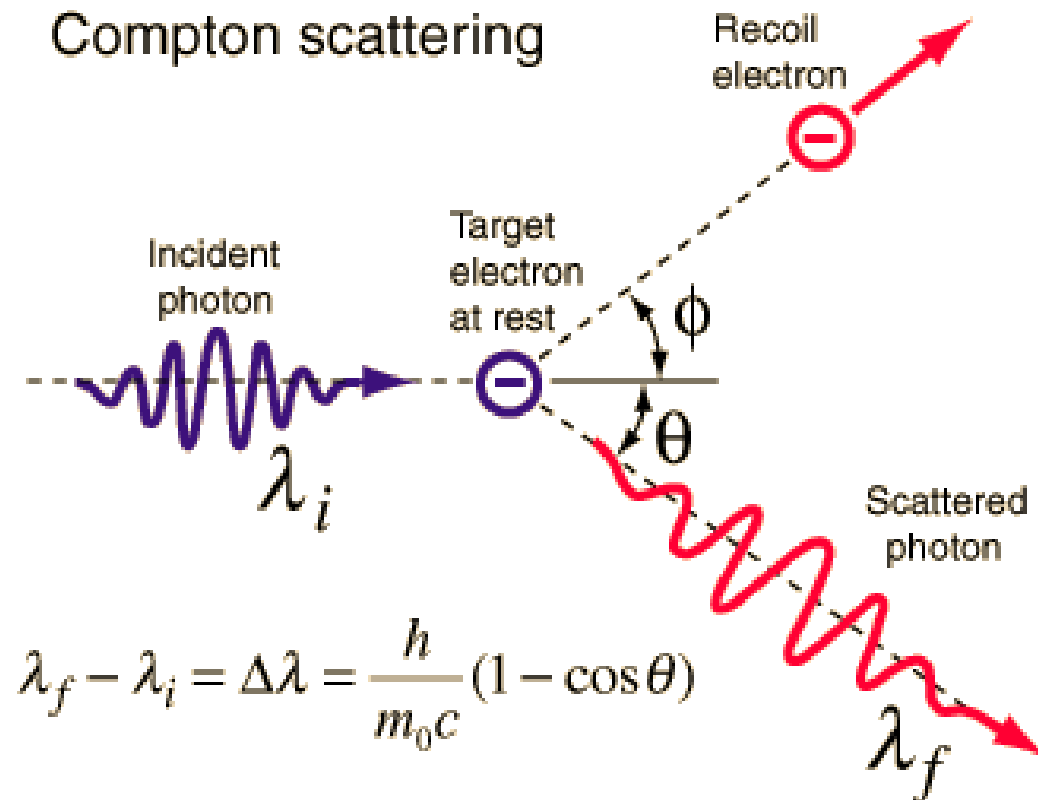


# O experimento de Compton

□ 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  $E'$  (maior 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.

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

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

$$\lambda' - \lambda_0 = 0,00071 \text{ nm}$$

$$\lambda' = 0,200 + 0,00071 = 0,20071 \text{ nm}$$

# 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?**

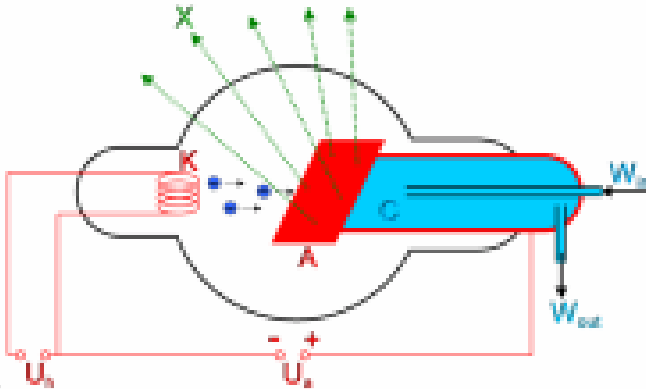
❑ Roentgen descobriu os raios X em 1895 e recebeu o Prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta.

**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

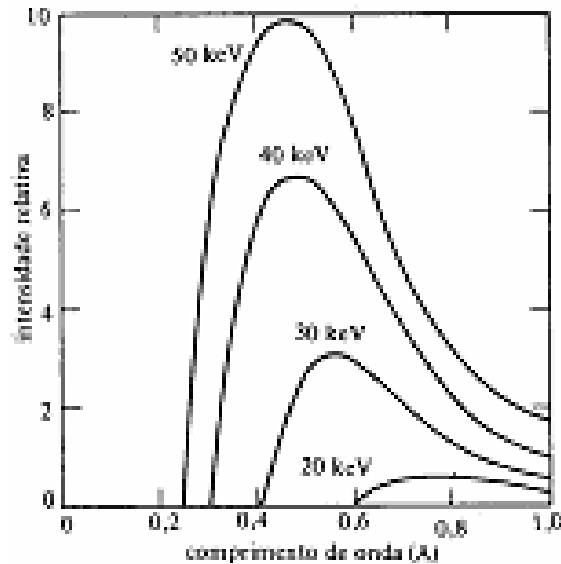
3) Os raios X não sofrem deflexão por campos magnéticos ou elétricos e se propagam em linha reta



# Raios X

## ❑ COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

❑ Classicamente temos que uma carga acelerada emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética



Espectro contínuo emitido pelos raios X de um alvo de tungstênio para 4 valores diferentes de eV (energia dos elétrons incidentes – 20keV, 30keV, 40keV e 50keV)

Ao observarmos este espectro notamos que temos um  $\lambda_{\min}$  para cada valor de energia. Por exemplo para E de 40keV temos um  $\lambda_{\min}$  de 0,311Angstrons.

❑ Não conseguimos explicar classicamente a razão de ter um valor mínimo de comprimento de onda no espectro

# Raios X COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

- Temos que tratar os raios X como partículas.
- Os raios X são produzidos na desaceleração brusca de elétrons ao penetrarem um sólido.
- Os elétrons eram acelerados por uma ddp e freados ao atingir o alvo.
- O elétron acaba perdendo rapidamente sua energia cinética em sucessiva colisões com os núcleos dos átomos emitindo radiação em cada colisão (bremsstrahlung). Ficando com uma energia final  $E_f$
- Radiação (strahlung) de freamento (brems)
- Como o núcleo é muito pesado, podemos desprezar o recuo sofrido por ele.

# Raios X

## COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

□ Postulando que a diferença de energia do elétron é usado para criar um fóton de radiação.

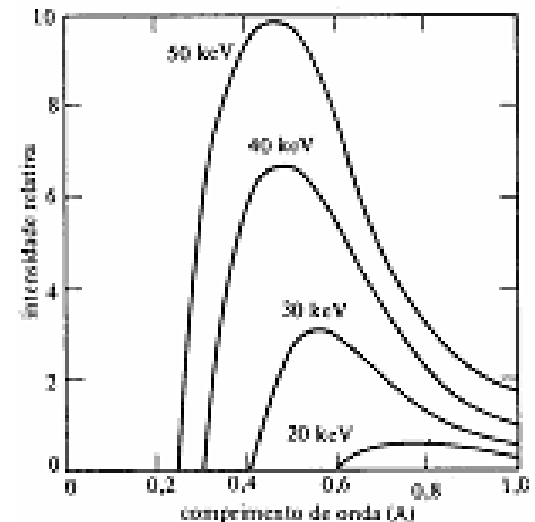
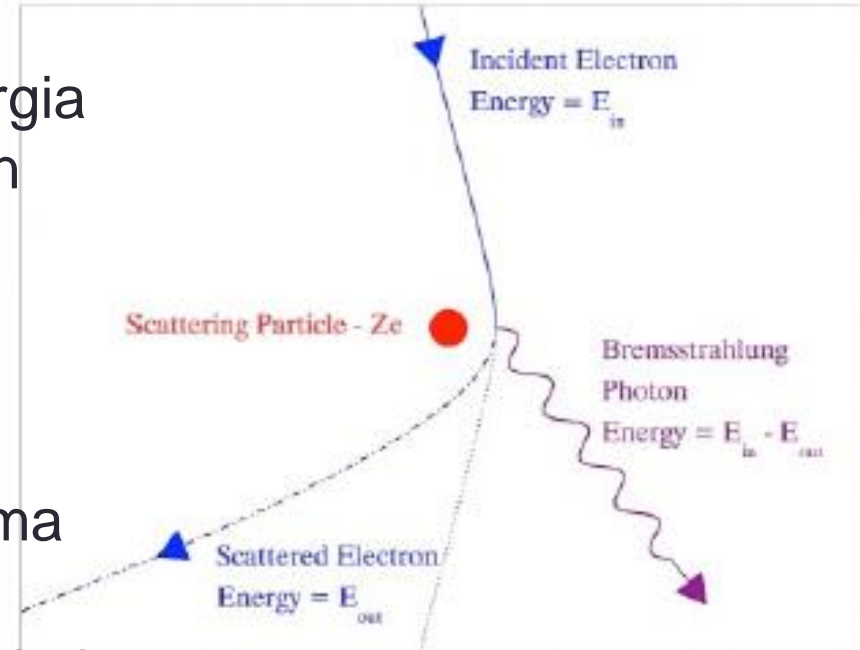
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ Os elétrons eram acelerados por uma ddp e freados ao atingir o alvo.  $E_i = eV$

□ Portanto se o elétron perder toda a sua energia, temos  $E_f = 0$  e ai:

$$E_i - 0 = eV = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$



# Bremsstrahlung e Efeito fotoelétrico

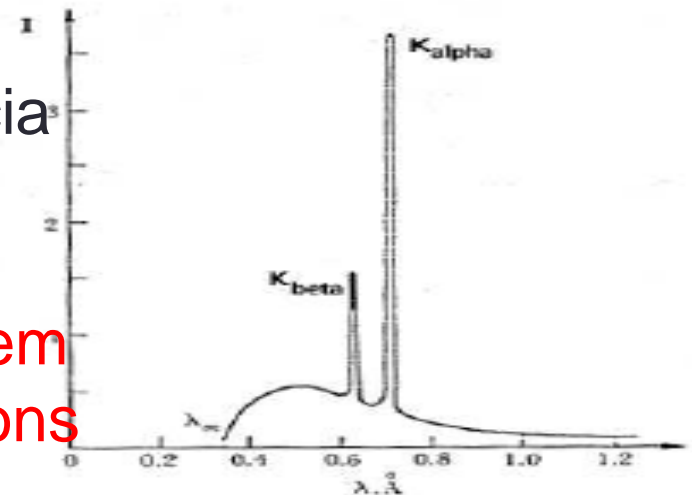
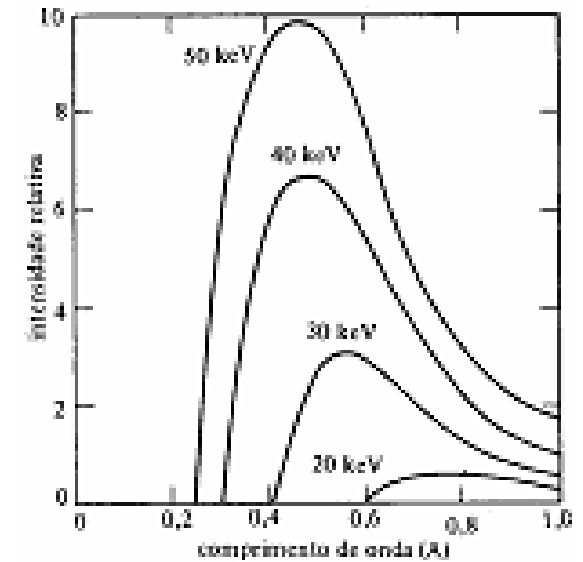
## Produção de raios X:

❑ Elétrons desacelerados na matéria produzem espectro contínuo de radiação

❑ Além do espectro contínuo temos picos (o que são??)

❑ Os elétrons podem se chocar com os elétrons do átomo do material e arrancá-los – por decorrência há emissão de raios X característicos

❑ Será que é possível fótons produzirem elétrons da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?



# Produção de Pares

□ Além dos efeitos fotoelétrico e Compton há um outro processo que os fótons perdem energia devido a **interação com a matéria**.

□ Pode-se converter energia cinética de um fóton em massa de uma partícula e vice-versa???

□ Será que é possível fótons produzirem elétrons, da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?

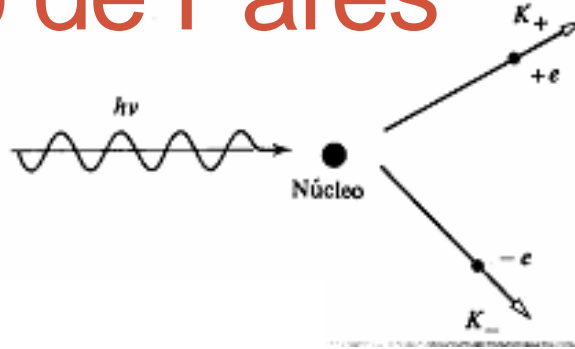
□ Se nenhuma das leis de conservação forem violada



□ Sim, é possível



# Produção de Pares



❑ Este fenômeno é observado e é denominado por produção de pares.

❑ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga

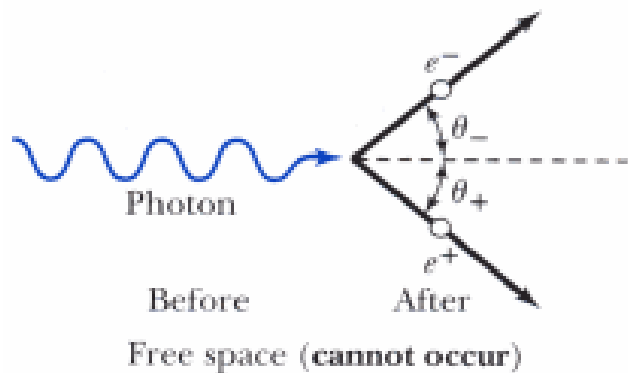
❑ Em 1933 C.D. Anderson observou um elétron de carga positiva ( $e^+$ ) em uma radiação cósmica – Partícula foi chamada de pósitron e já tinha sido previsto por Dirac

❑ O pósitron tem a mesma massa do elétron ( $m=0,511\text{MeV}/c^2$ ), mas carga oposta.

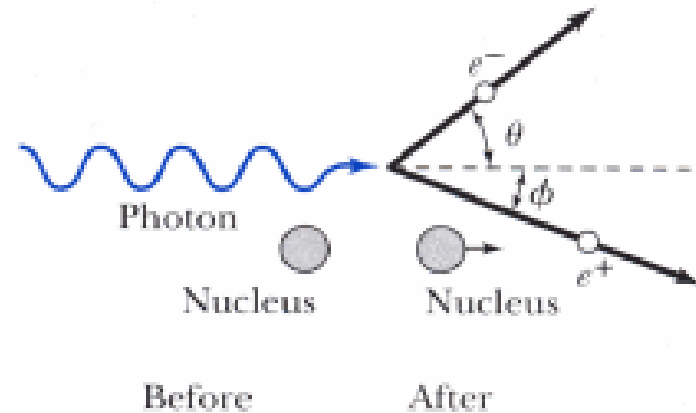
❑ Ele é observado quando raios gamas (fótons) de alta energia passam através da matéria  $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

# Produção de Pares

□ A única maneira desse processo conservar momento e energia é se o núcleo atômico estiver presente no processo de interação e absorver parte da energia e momento do fóton.



(a)



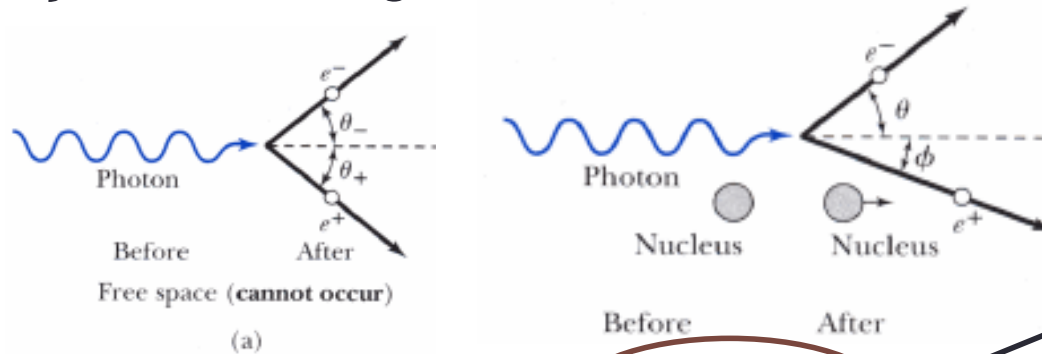
Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

$e^+$  é conhecido como pósitron e é encontrado da na natureza através da detecção de raios cósmicos e em produtos radioativos de vários elementos radioativos

Vivem pouco pois interagem com os  $e^-$

# Produção de Pares

❑ A conservação de energia neste caso:



$$h\nu = E_+ + E_- + KE(\text{núcleo})$$

$$h\nu = (m_0c^2 + K_+) + (m_0c^2 + K_-)$$

$$h\nu = 2m_0c^2 + K_+ + K_-$$

Muito pequena por causa da grande massa do núcleo

Onde K são as energias cinéticas do  $e^-$  e do  $e^+$

❑ A energia do fóton deve ser de no mínimo igual a  $2m_e c^2$  para criar as massas :

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

❑ A probabilidade de produção de par aumenta drasticamente :

- 1) ENERGIA DO FÓTON
- 2) AUMENTO DO NÚMERO ATÔMICO Z DO NÚCLO PRÓXIMO