

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física**

FÍSICA MODERNA I

AULA 07

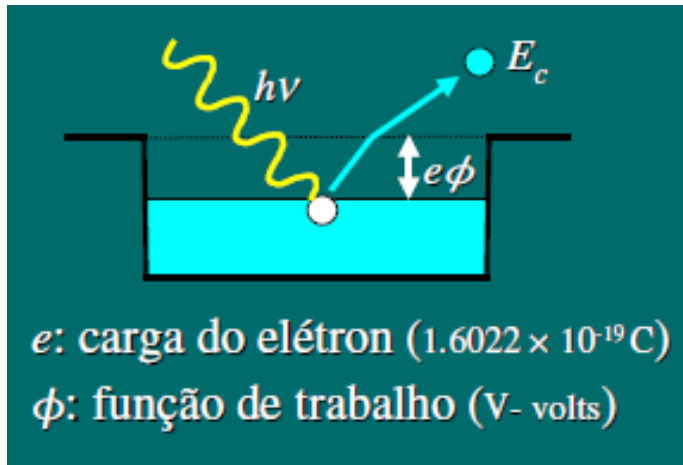
**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br**

**2o. Semestre de 2018
Monitor: Felipe Prado**

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=64495>

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:



$$E_c^{máx} = h\nu - e\phi$$

□ 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) ✓

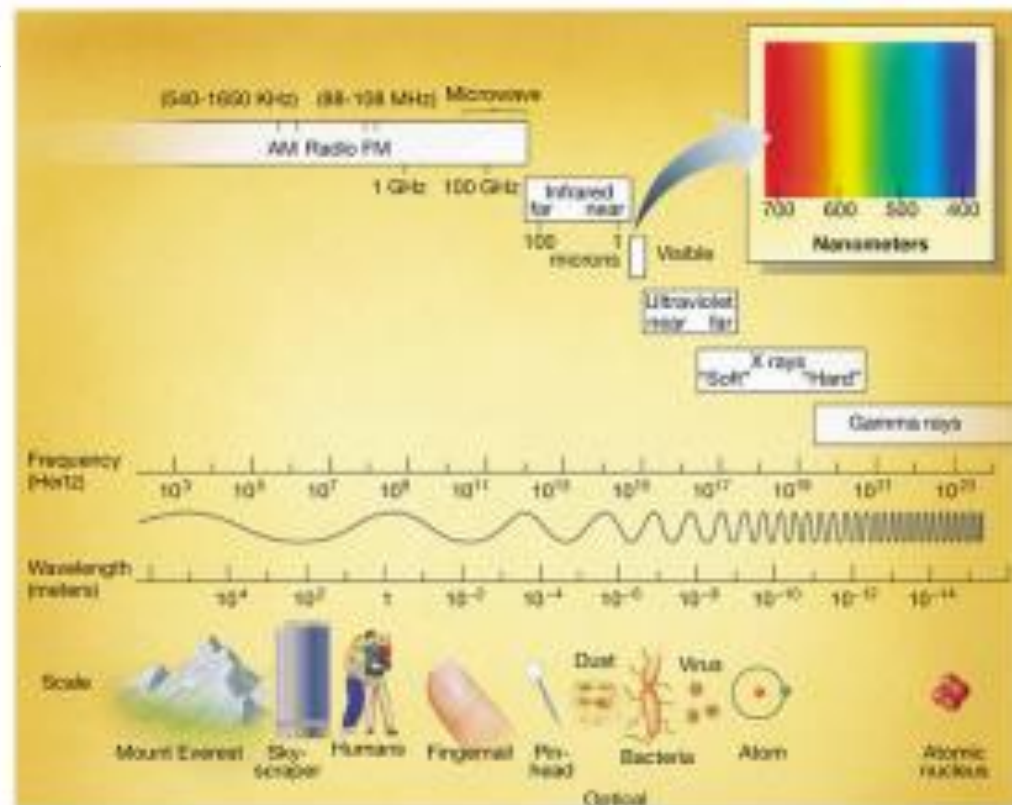
Dualidade onda-partícula

- ❑ 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.



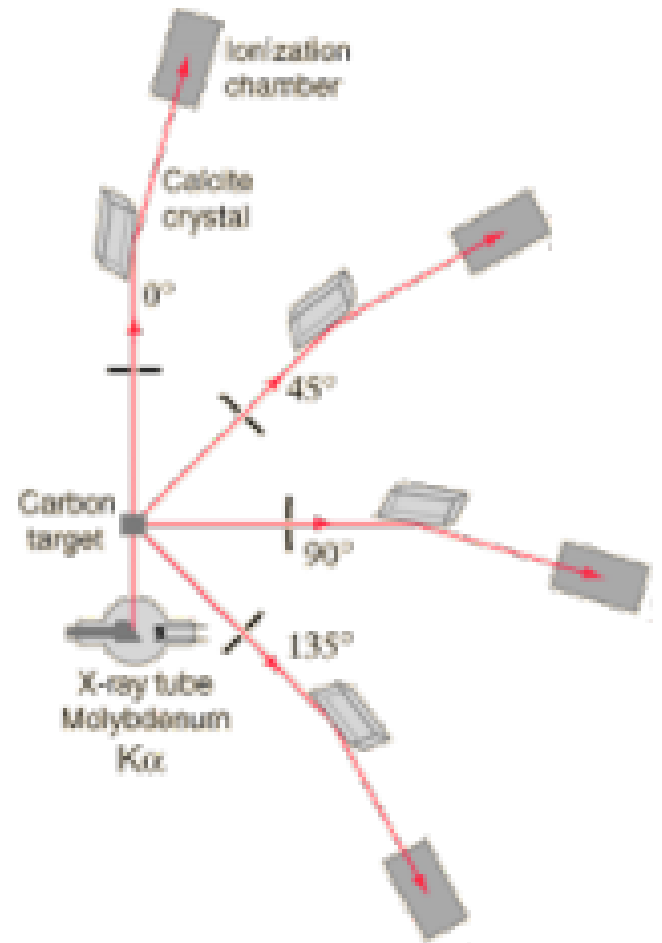
O experimento de Compton

□ 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.

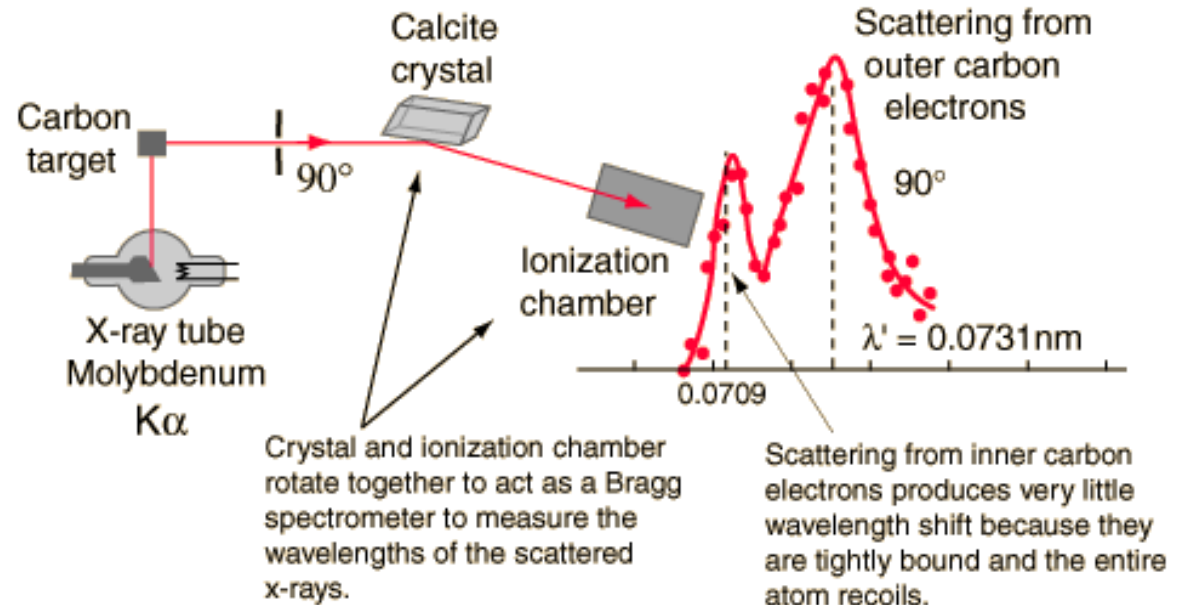
□ Resultados surpreendentes



O experimento de Compton

□ 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)



Espalhamento Compton

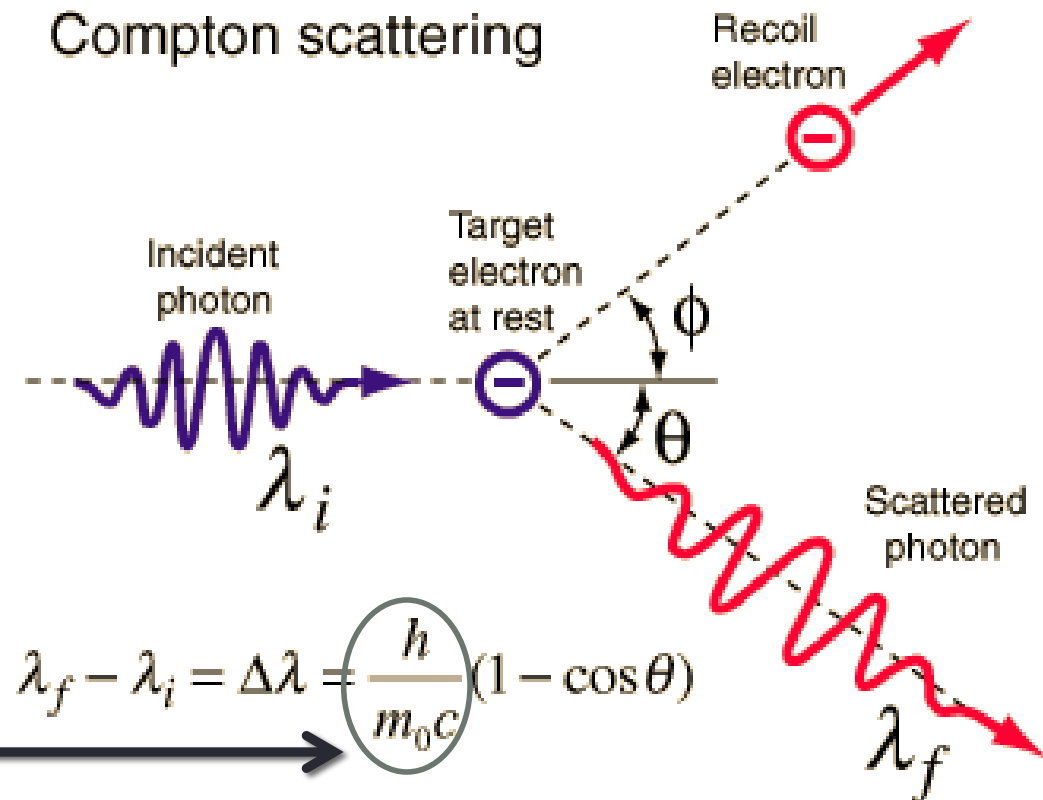
□ Esquemáticamente podemos dizer que o fóton incidente fornece parte de sua energia ao elétron.

□ 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.

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

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



Considerações

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta)$$

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

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

É conhecido como comprimento de onda Compton para o elétron

- Para fótons de energia mais baixa que o raios X (UV e visível) o espalhamento Compton fica cada vez mais IMPROVÁVEL
- A interpretação de Compton para este efeito foi o espalhamento. Na realidade sendo o fóton uma entidade “elementar” é difícil explicar como ele pode mudar de comprimento de onda em uma colisão.
- INTERPRETAÇÃO CORRETA (DE ACORDO COM A TEORIA QUANTICA ATUAL) O QUE TEMOS É ABSORÇÃO INICIAL DO FÓTON PELO ELÉTRON NA COLISÃO. POSTERIORMENTE HÁ EMISSÃO DE OUTRO FÓTON DE COMPRIMENTO DE ONDA MAIOR QUE O ABSORVIDO.

Raios X

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

O QUE ELES SÃO?

COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

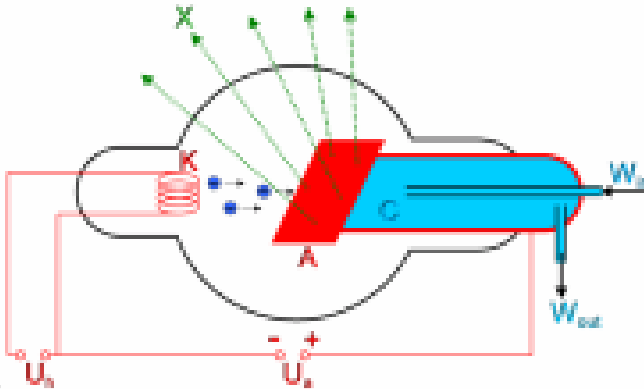
❑ Roentgen descobriu os raios X em 1895 e recebeu o Prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta.

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

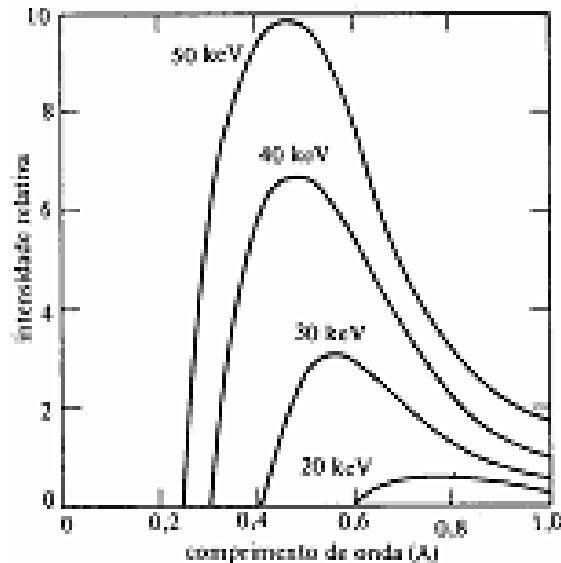
3) Os raios X não sofrem deflexão por campos magnéticos ou elétricos e se propagam em linha reta



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 λ_{\min} para cada valor de energia. Por exemplo para E de 40keV temos um λ_{\min} de 0,311Angstroms.

❑ 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.

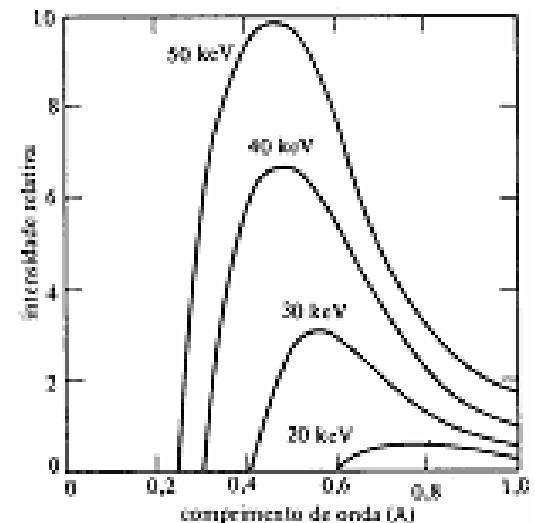
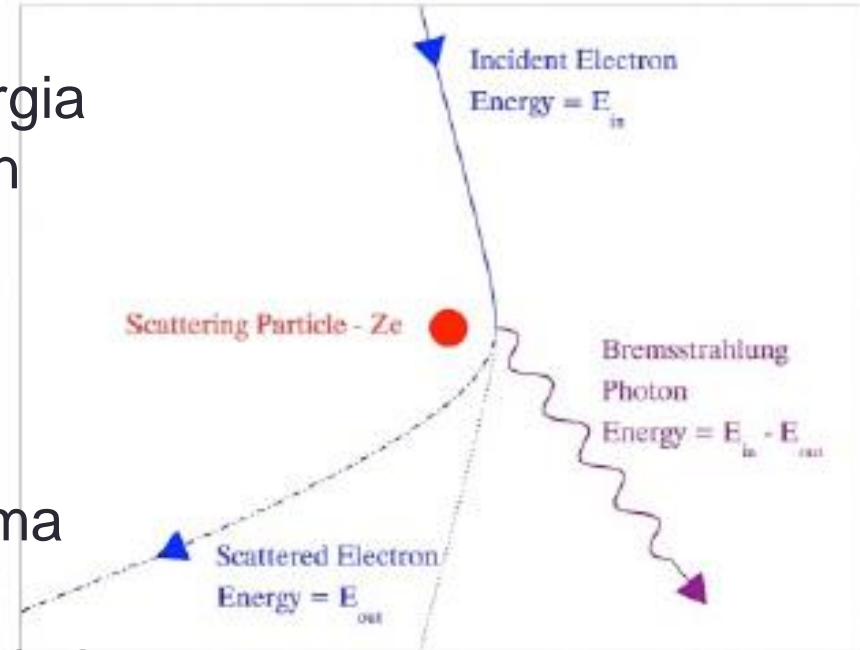
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ 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

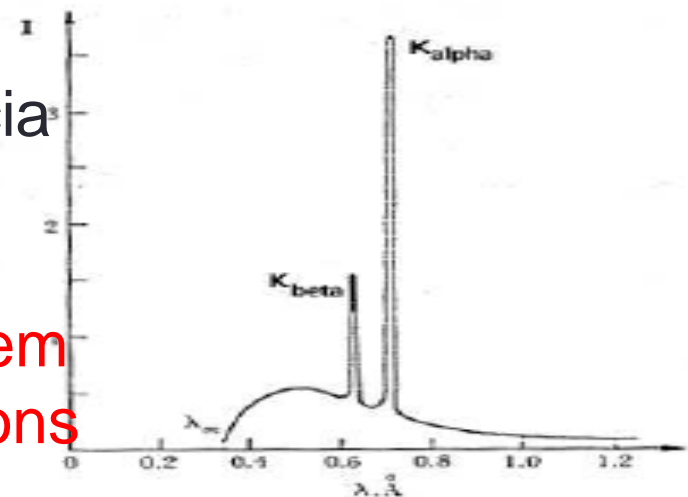
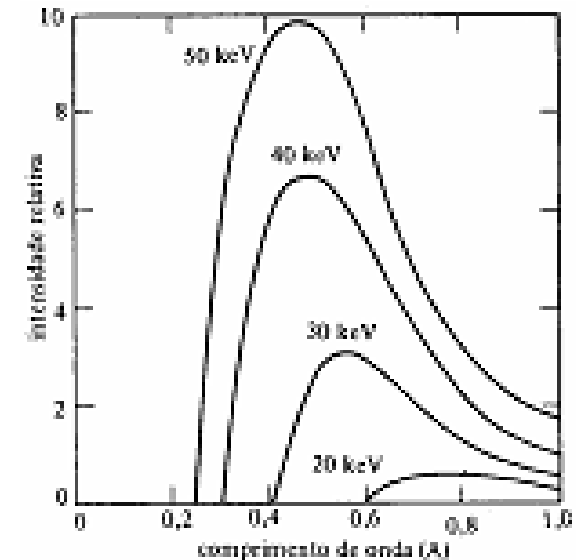
Produção de raios X:

❑ 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???

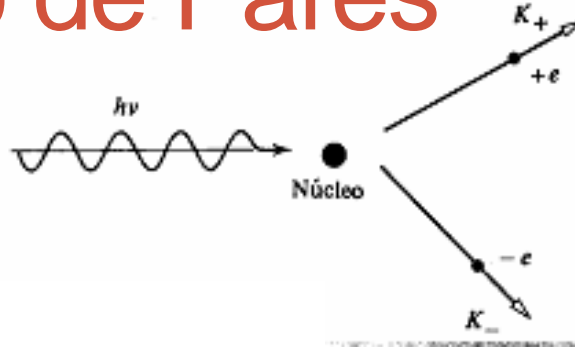
□ Será que é possível fótons produzirem elétrons, da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?

□ 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

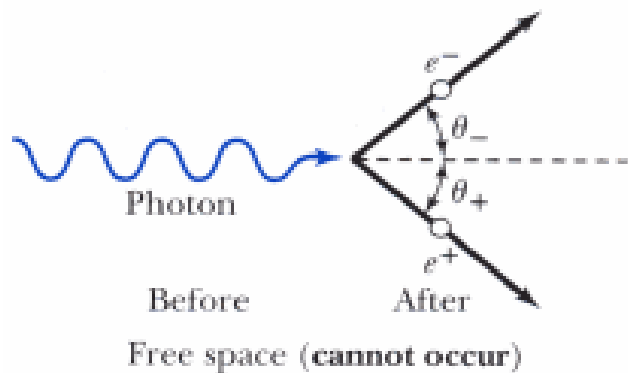
❑ Em 1933 C.D. Anderson observou um elétron de carga positiva (e^+) em uma radiação cósmica – Partícula foi chamada de pósitron e já tinha sido previsto por Dirac

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

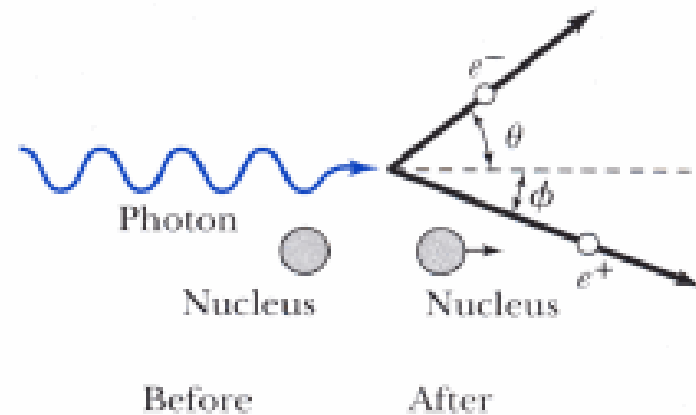
❑ Ele é observado quando raios gamas (fótons) de alta energia passam através da matéria $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

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)

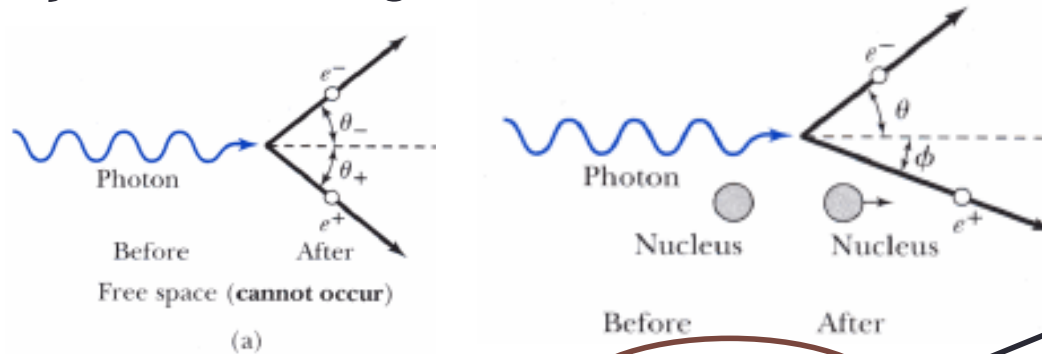


Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

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

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad \gamma \longrightarrow e^+ + e^-$$

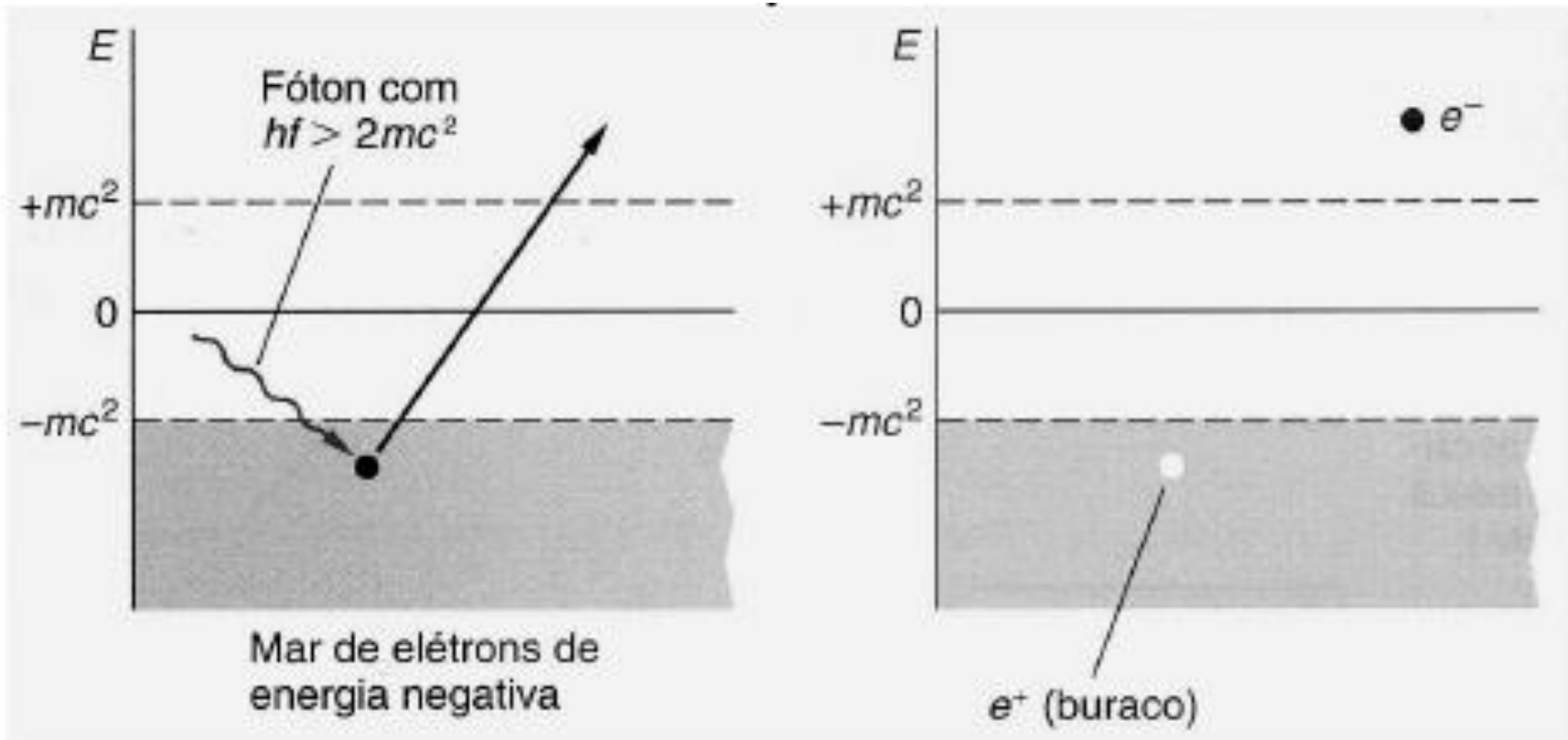
❑ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga

❑ A probabilidade de produção de par aumenta drasticamente :

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

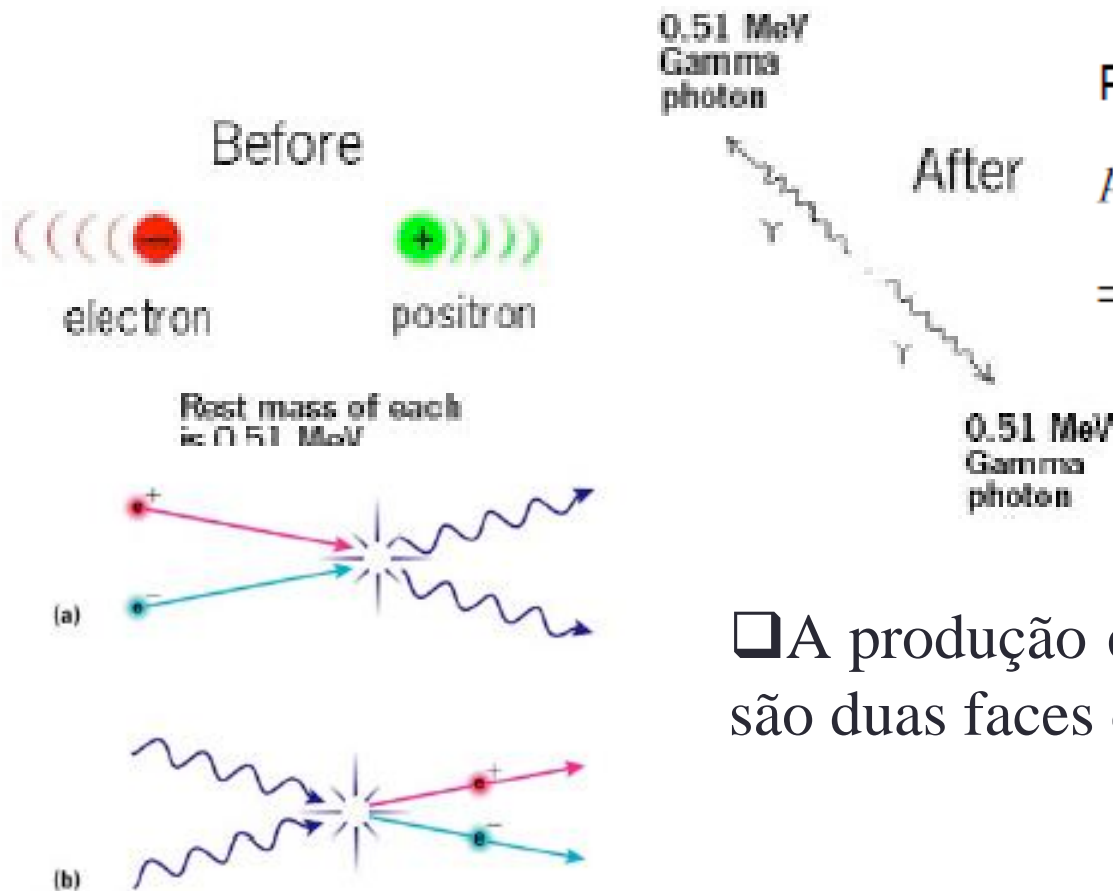
Produção de Pares

□ Interpretação de Paul Dirac: Existe um “mar de elétrons” que pode ser “excitado” e criar um elétron deixando um “buraco” que é o pósitron



Aniquilação de Pares

- Da mesma maneira que podemos criar um par elétron-pósitron o processo inverso pode acontecer:
- Um elétron e um pósitron se aproximam por pouco tempo (10^{-10} s) e podem se aniquilar e produzir fótons



Par e^+ , e^- em repouso \Rightarrow

$$P_{\text{inicial}} = P_{\text{final}} = 0 \Rightarrow \frac{h\nu_1}{c} = \frac{h\nu_2}{c}$$

$$\Rightarrow E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = m_0c^2$$

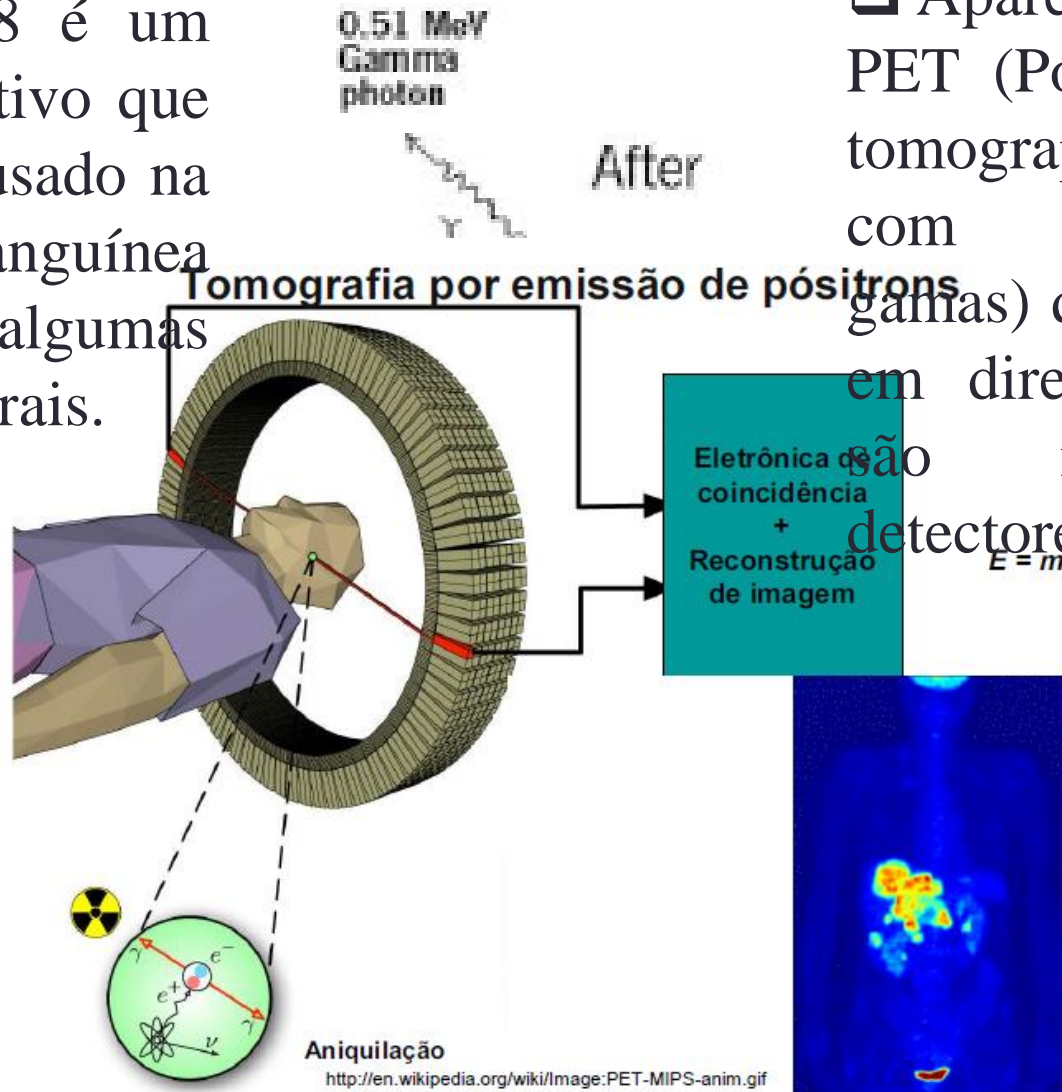
- A produção e a aniquilação de pares são duas faces de um mesmo processo

Aniquilação de Pares

Na aniquilação são produzidos fótons de direção opostas

O Flúor 18 é um núcleo radioativo que emite e^+ e é usado na corrente sanguínea para estudar algumas doenças cerebrais.

Aparelho chamado PET (Pósitron emission tomography) trabalha com fótons (raios gama) que são emitidos em direções opostas e são medidos por detectores cintiladores



Aniquilação

<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PET-MIPS-anim.gif>

Exercício

❑ A análise de uma fotografia de câmara de bolha mostra a criação de um par elétron-pósitron quando fótons atravessam a matéria. As trajetórias do elétron e do pósitron têm curvaturas opostas no campo magnético uniforme $B=0,20\text{Weber/m}^2$, ($\text{Wb}=\text{Tm}^2$) sendo seus raios (r) ambos iguais a $2,5 \times 10^{-2}\text{m}$.

❑ Qual a energia e o comprimento de onda do fóton que produziu o par?

❑ O momento p do elétron é dado por: $p = eBr$

❑ A energia relativística é dado por:

$$p = 1,6 \times 10^{-19} \times 0,20 \times 2,5 \times 10^{-2} \text{ CTm}$$

$$E_-^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$$

$$p = 8,0 \times 10^{-22} \text{ As} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{ A}} \text{ m}$$

$$pc = 8 \times 10^{-22} \times 3 \times 10^8 \frac{\text{kgm}}{\text{s}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$p = 8,0 \times 10^{-22} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ m}$$

$$pc = 2,4 \times 10^{-13} \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2}$$

$$pc = 2,4 \times 10^{-13} \text{ J} = 2,4 \times 10^{-13} \times 6,242 \times 10^{18} \text{ eV}$$

$$pc = 1,5 \times 10^6 \text{ eV} = 1,5 \text{ MeV}$$

Exercício

❑ Logo a energia é dado por: $E_-^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$

$$E_-^2 = (1,5)^2 + (0,51)^2 \text{ MeV}^2$$

$$E_- = 1,6 \text{ MeV}$$

❑ A energia relativística do pósitron tem o mesmo valor de energia do elétron: $E_+ = 1,6 \text{ MeV}$

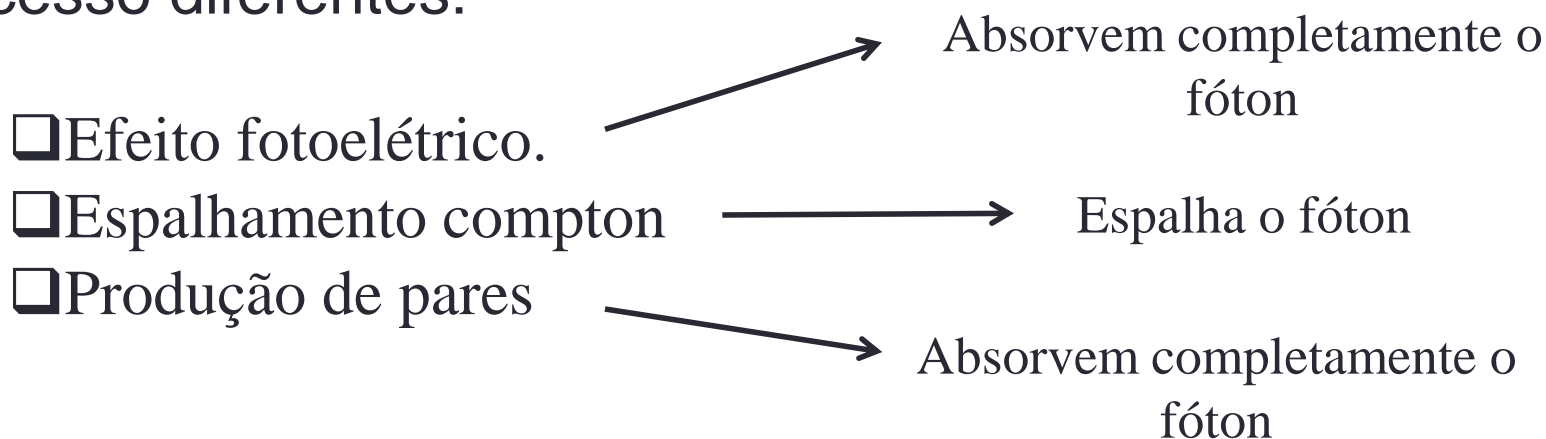
❑ A energia do fóton era: $h\nu = 1,6 + 1,6 = 3,2 \text{ MeV}$

❑ O comprimento de onda do fóton era: $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{3,2 \times 10^6 \text{ eV}} = 3,9 \times 10^{-4} \text{ nm}$$
$$\lambda = 3,9 \times 10^{-13} \text{ m}$$

Interação de fótons com a matéria

❑ Como vimos os fótons podem interagir com a matéria por três processos diferentes:



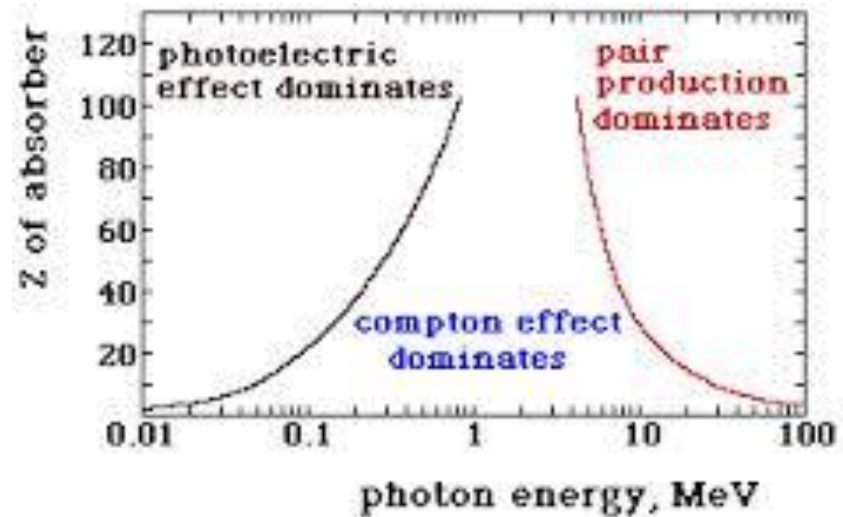
❑ Quais as probabilidades de ocorrência de cada processo?

❑ Estas informações são importantes para equipamentos de blindagens de reatores, aceleradores, e aparelhos de RX.

❑ A probabilidade de um fóton ser absorvido, por exemplo, por efeito fotoelétrico, espalhamento Compton ou produção de pares, ao passar por uma lâmina fina, é dado pela **seção de choque**

Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

□ a probabilidade de ocorrência dos três processos em função da energia:



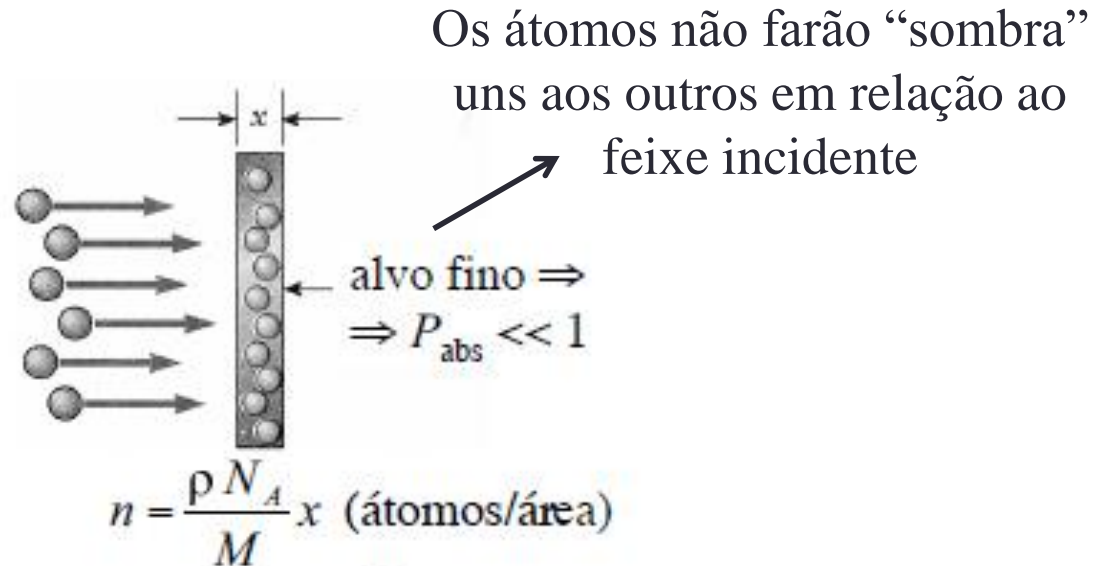
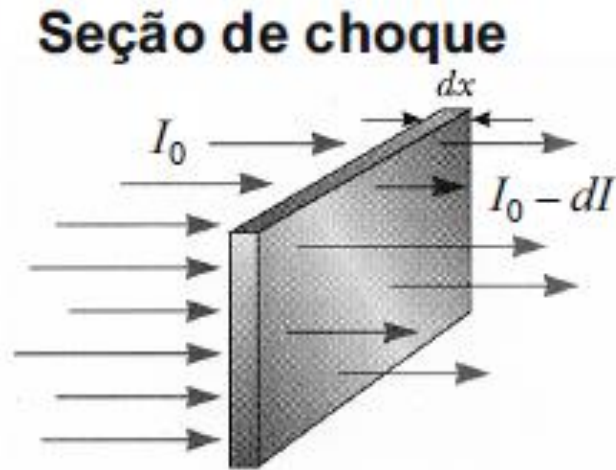
□ O efeito fotoelétrico é dominante para baixas energias. O efeito Compton só se torna dominante para energias maiores que 500 keV.

□ A produção de pares só ocorre para energias superiores a 1 MeV e é dominante para energias altas (~20 MeV)

□ Em resumo podemos dizer que as probabilidades desses processos dependem da energia do fóton e da densidade do material que está envolvido de interação da radiação.

Seção de Choque

Seção de choque define a probabilidade de interação do fóton com um material por algum processo.



O número de absorções fotoelétricas N_{Fe} que ocorrem:

$$N_{Fe} = \sigma_{Fe} \cdot I_0 \cdot n$$

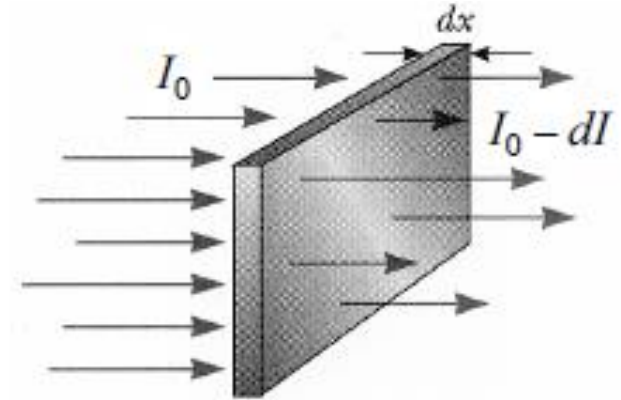
Feixe com I_0 fótons

n átomos por unidade de área

É a seção de choque: probabilidade de um certo tipo de átomo sofrer uma certo tipo de interação (no caso fotoelétrica)

Seção de Choque

❑ O feixe de fótons ao atravessar o material (espessura x) terá sua intensidade diminuída pela remoção de uma parte desses fótons do feixe pelos três processos.



❑ Fótons de baixa energia (luz visível): bastam espessuras pequenas (poucos mm de material) para que todos os fótons tenham interagido ocorrendo absorção total da radiação.

❑ Fótons com energia mais altas (raios X e raios gamas) pouco interagem e podem atravessar grandes cm de material sem sofrer nenhuma interação.

❑ A quantidade dI de fótons absorvidos em uma espessura dx de material, deve ser proporcional ao número de fótons I_0 e a espessura x

$$dI = A I_0 dx$$

→ A é a constante de proporcionalidade e depende da probabilidade de interação de um dos três processos.