

Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

AULA 05 - AULA 2

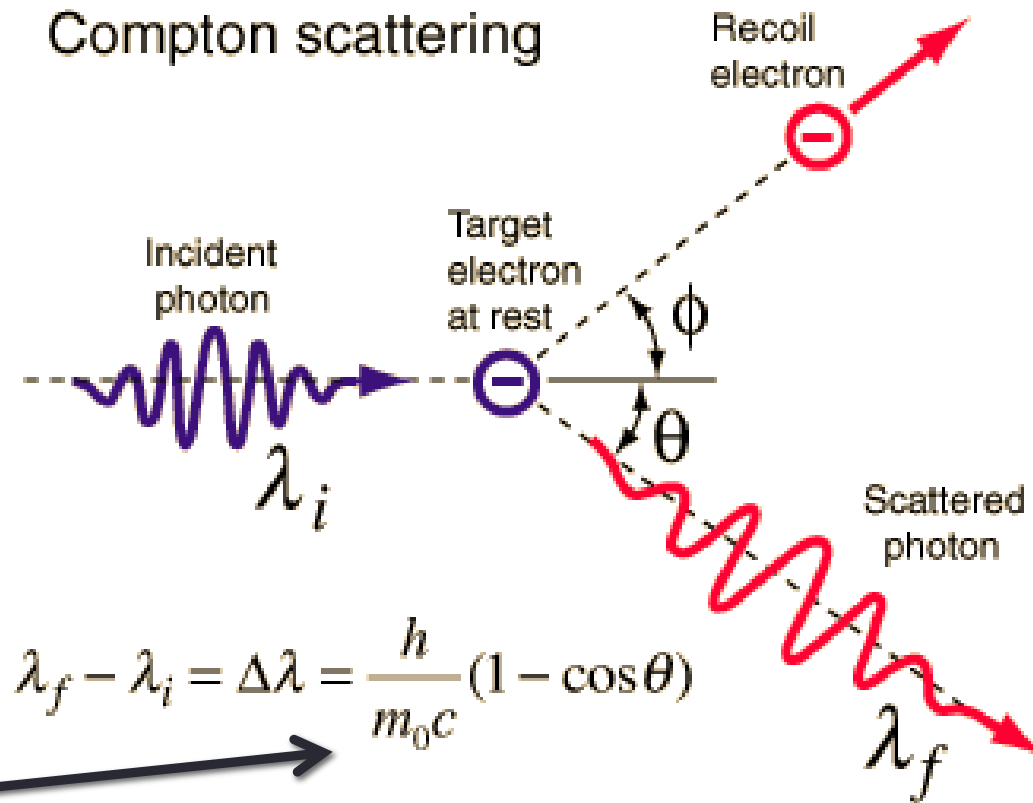
Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br
rodrigo.fernandes.me@gmail.com

2º. Semestre de 2023

Monitores: Rodrigo Fernandes de Almeida
Samuel Pizzol

O experimento de Compton

□ Usando apenas a ideia da dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética e os princípios de conservação de energia e momento, podemos reproduzir os resultados obtidos por Compton



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

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

$\Delta\lambda$ (chamado de deslocamento de Compton)

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.
- ❑ Seja um elétron de energia cinética E_i incidindo sobre o átomo de um material
- ❑ O elétron interage com o núcleo do átomo e transfere parte de sua energia para ele, ficando com uma energia final E_f
- ❑ 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.

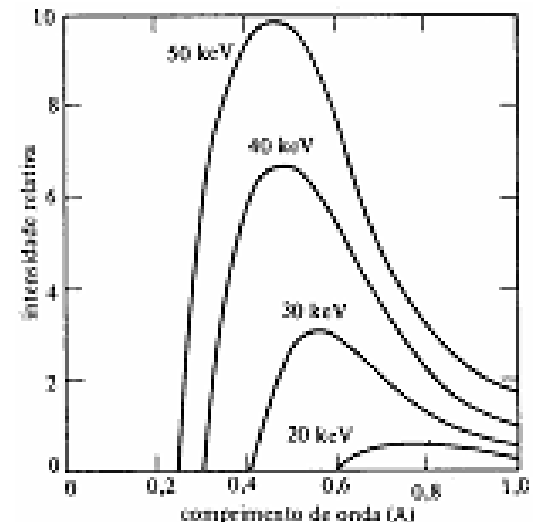
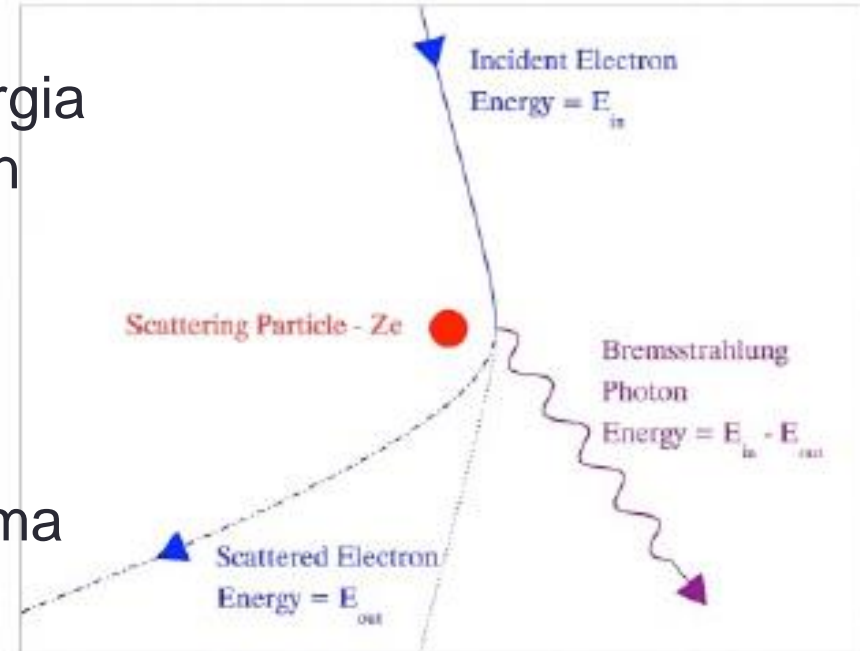
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ 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

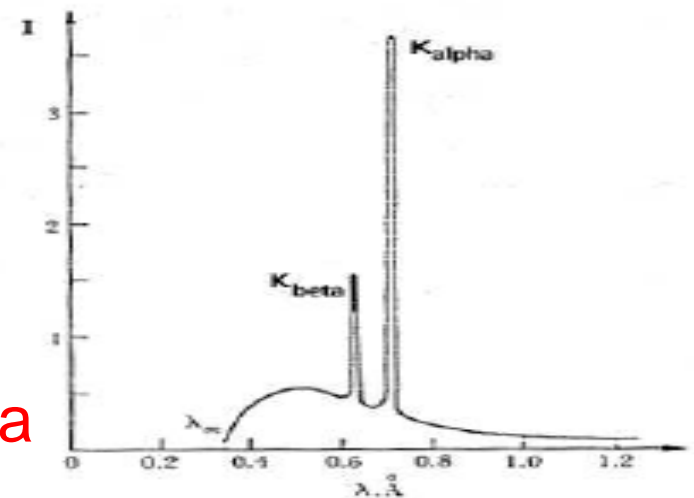
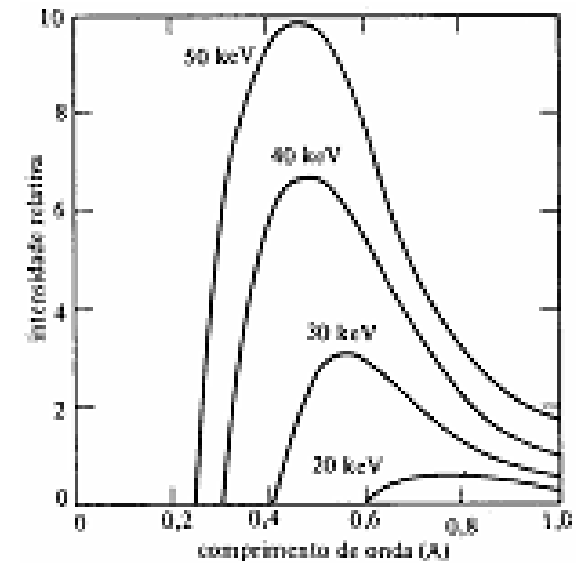
Produção de raios X:

❑ 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 ocorre efeito fotoelétrico – 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 ?

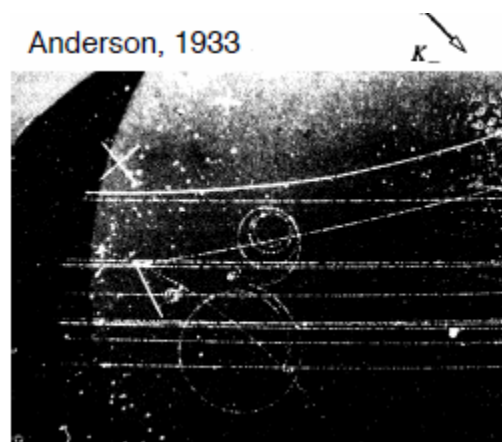
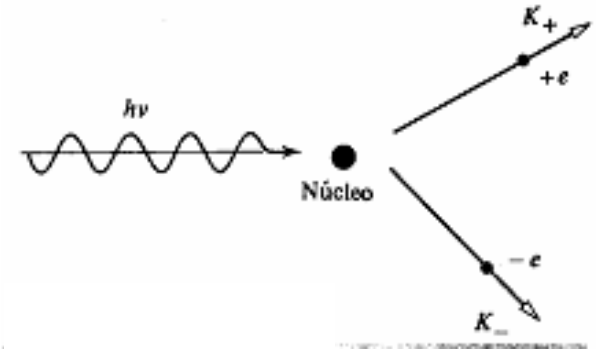
□ Se nenhuma das leis de conservação forem violada



□ Sim, é possível

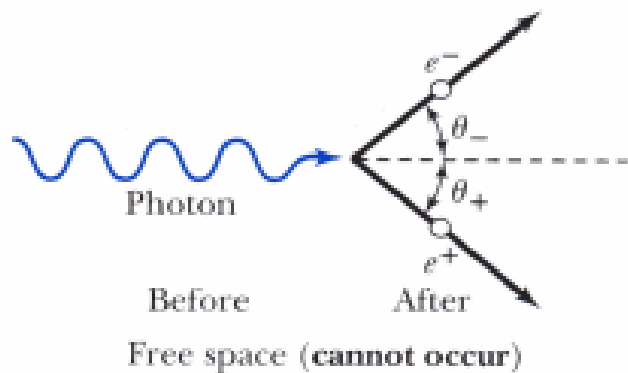
Produção de Pares

- ❑ 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
- ❑ Fótons produzem um par elétron-pósitron (conservação de carga) a partir da sua interação com o núcleo atômico (conservação de momento e energia)
- ❑ 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
- ❑ $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

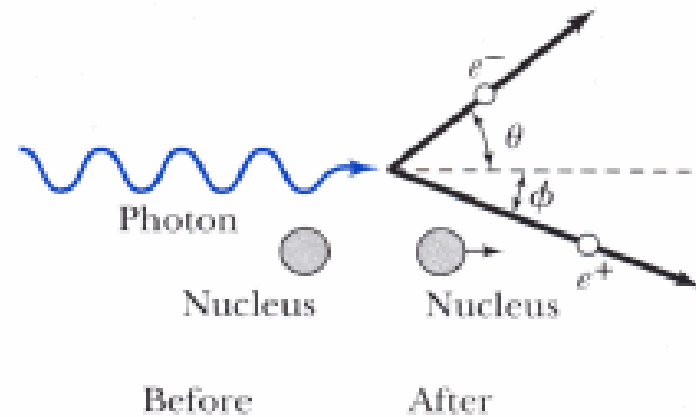


Produção de Pares

□ 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)

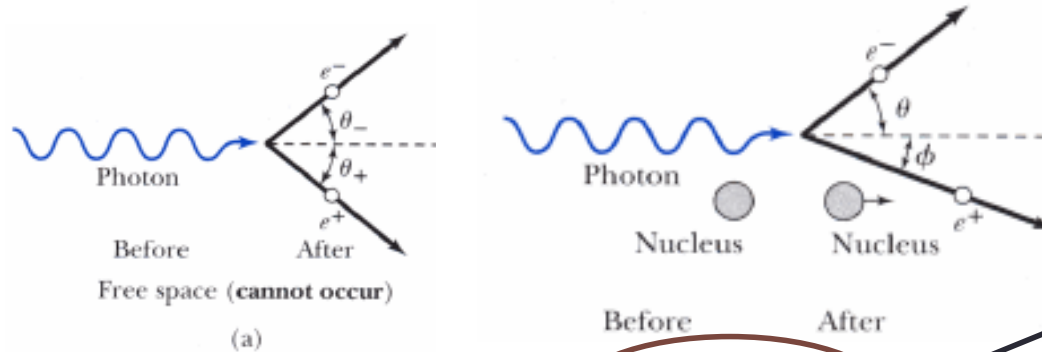


Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

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 :

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

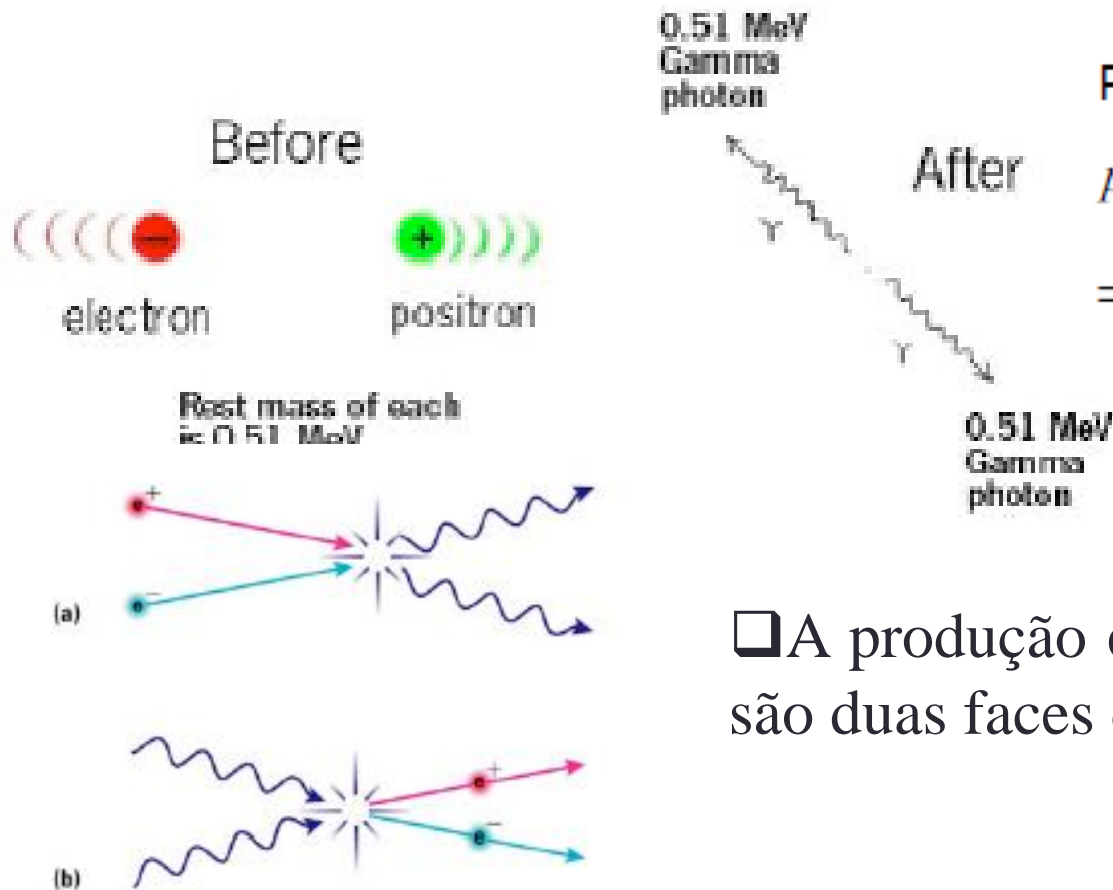
❑ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga

❑ A probabilidade de produção de par aumenta drasticamente :

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

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

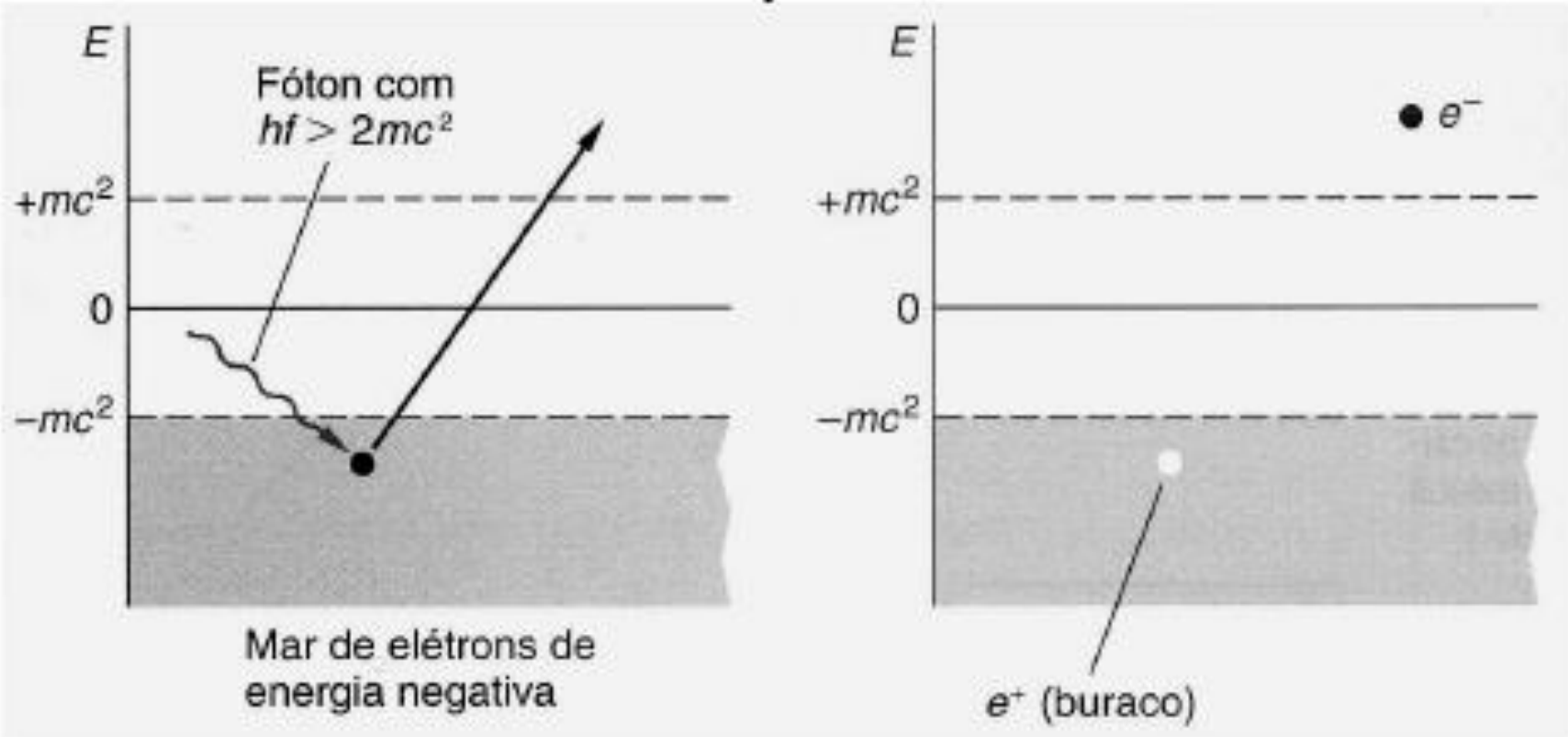
$$P_{\text{inicial}} = P_{\text{final}} = 0 \Rightarrow \frac{hv_1}{c} = \frac{hv_2}{c}$$

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

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

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 – uma perturbação (fóton de alta energia) pode trazer um elétron para um estado de energia total positiva

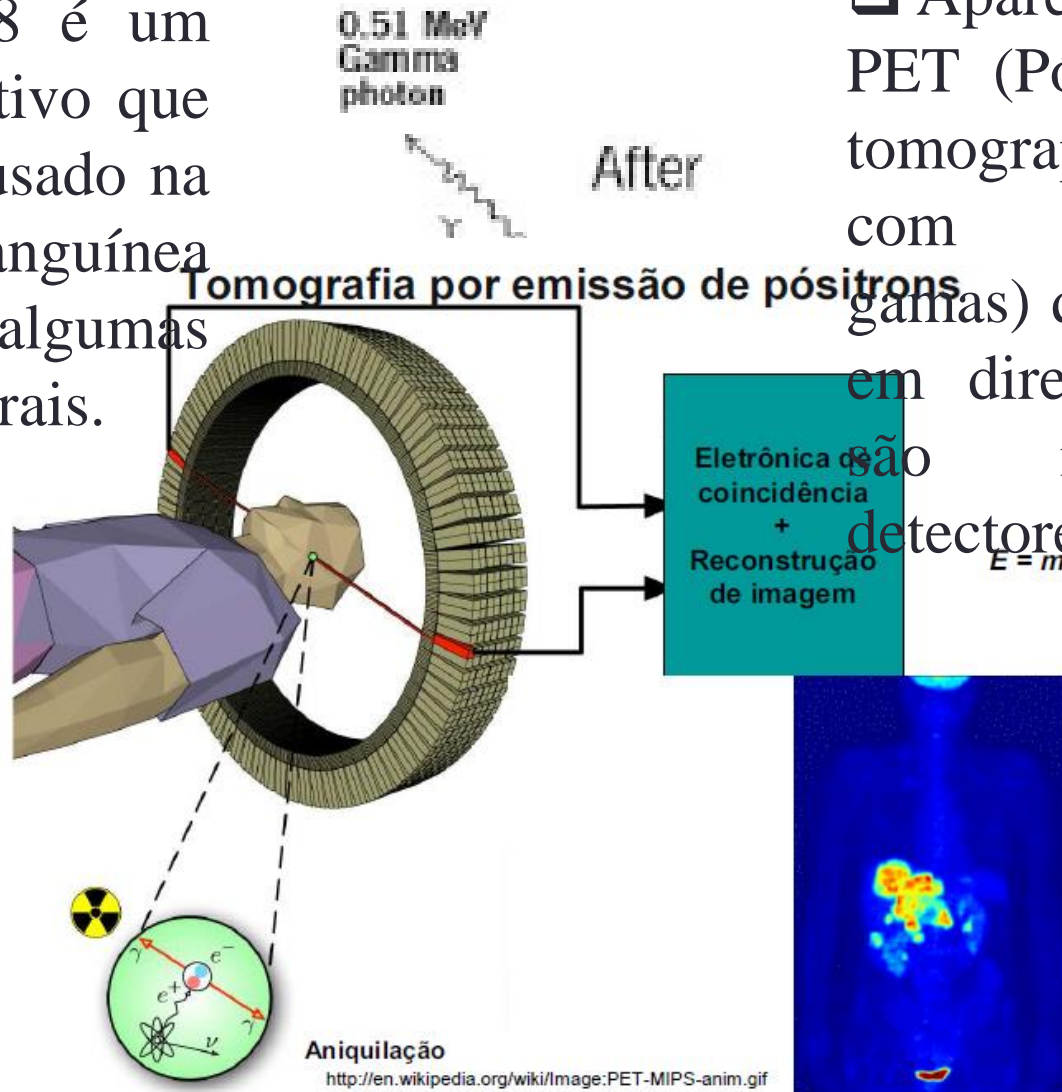


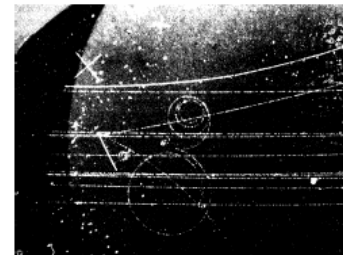
Aniquilação de Pares

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





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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Exercício

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

$$E_-^2 = (1,5)^2 + (0,51)^2 MeV^2$$

$$E_- = 1,6 MeV$$

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

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

❑ O comprimento de onda do fóton era:

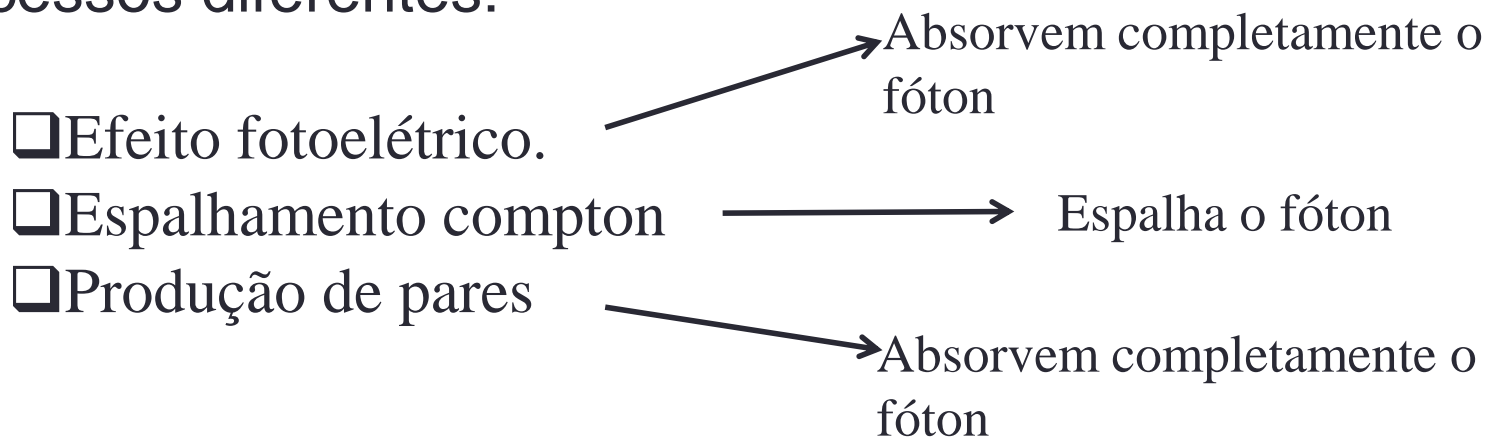
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

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

$$\lambda = 3,9 \times 10^{-13} m$$

Interação de fótons com a matéria

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



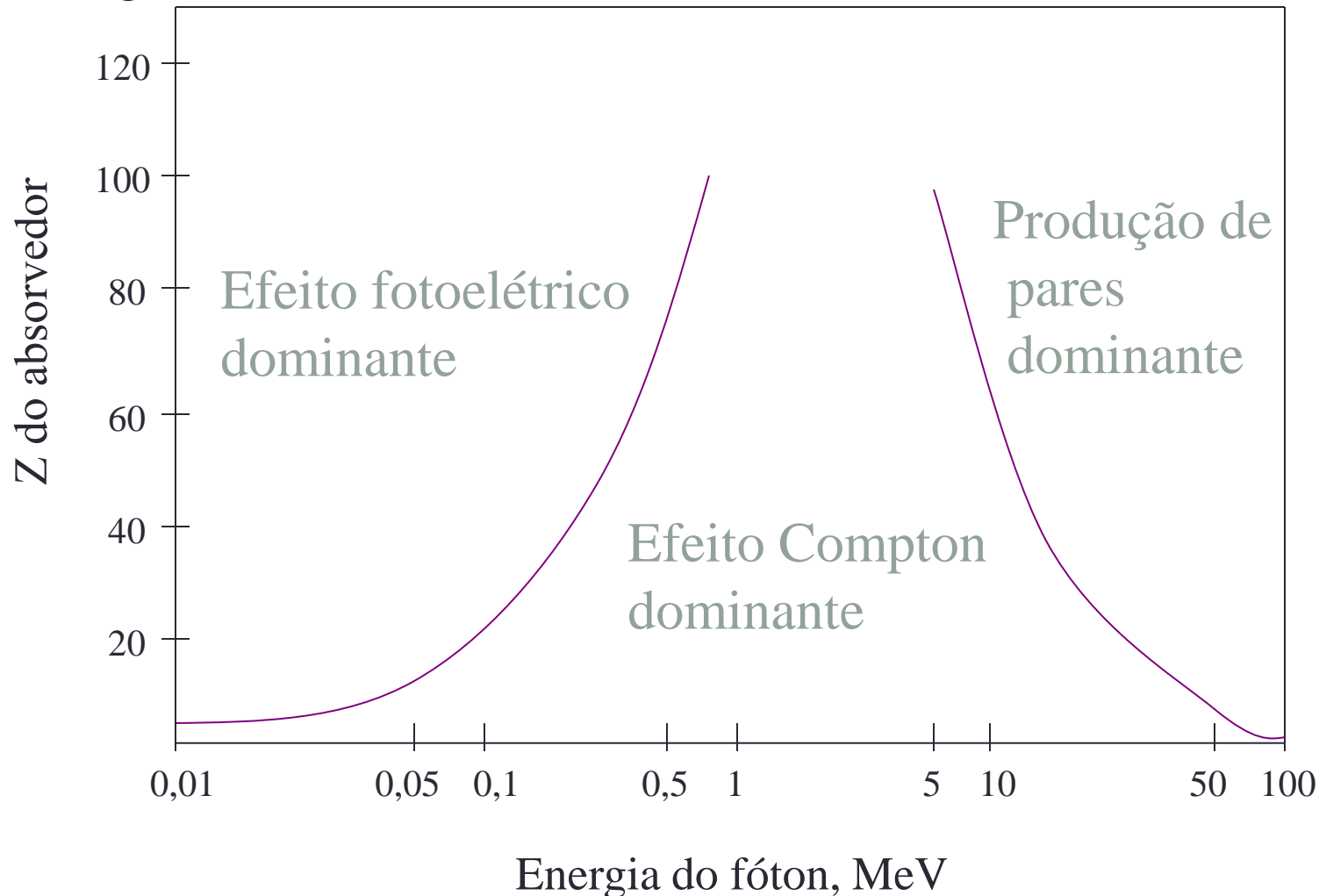
❑ Quais as probabilidades de ocorrência de cada processo?

❑ 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**

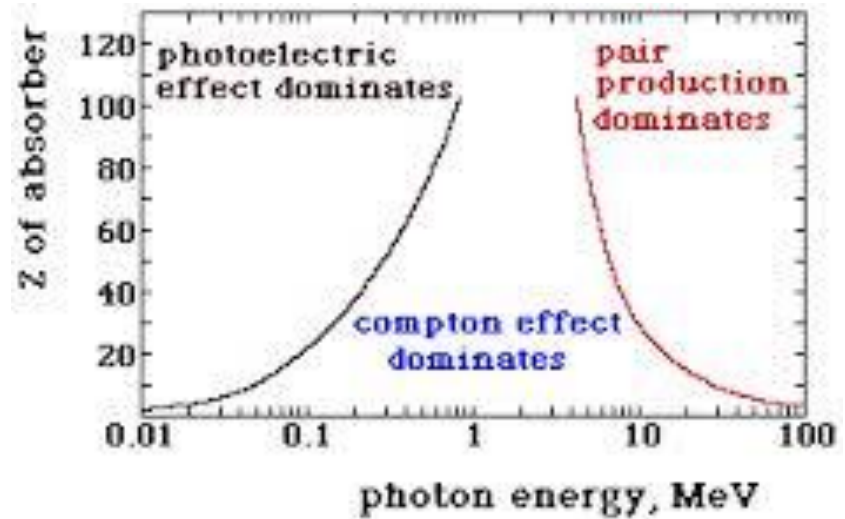
Energia do fóton nos processos competitivos

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



Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

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



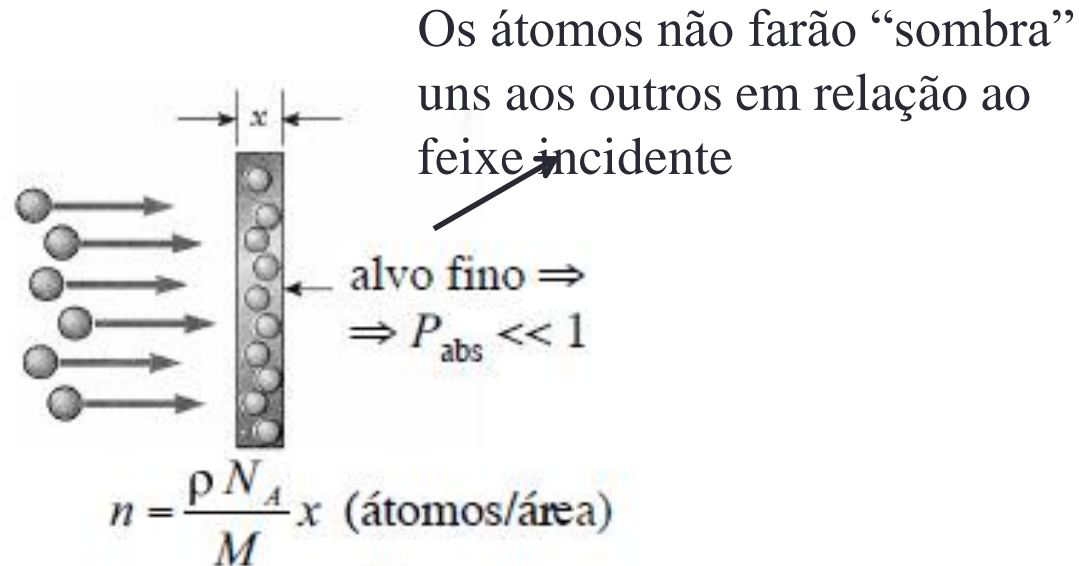
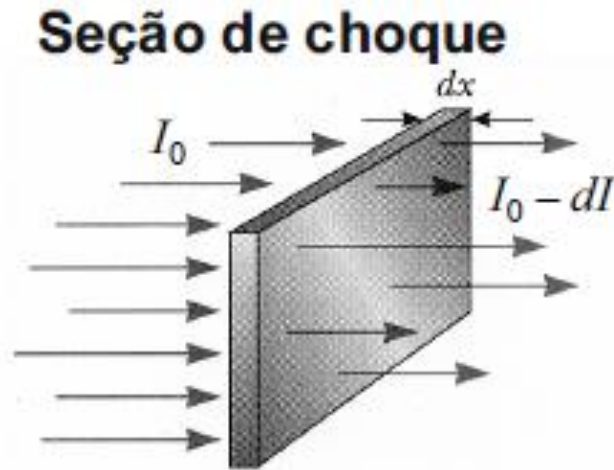
□ O efeito fotoelétrico é dominante para baixas energias. O efeito Compton só se torna dominante para energias maiores que 500 keV.

□ 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

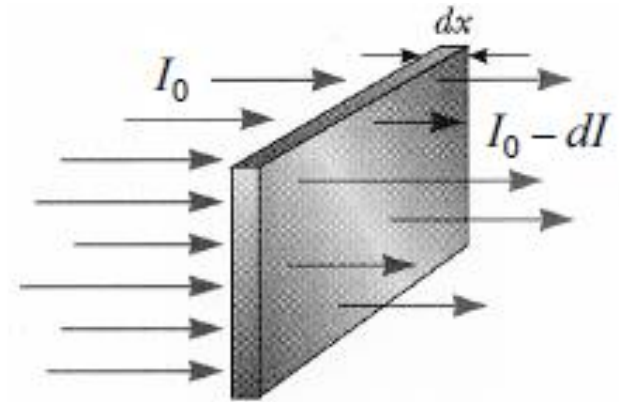
σ_{Fe} → É a seção de choque: probabilidade de um certo tipo de átomo sofrer uma certo tipo de interação (no caso fotoelétrica)

n → 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)

Absorção de fótons

❑ 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.

absorção de fótons na matéria

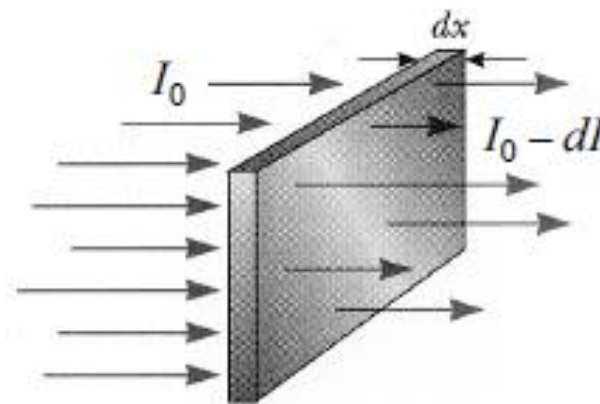
À medida que a espessura do atenuador aumenta, a quantidade de interações no material aumenta e a intensidade do sinal no detector diminui. Assim, considerando I_0 a intensidade do sinal sem absorvedor e $I(x)$ a intensidade do sinal com uma espessura x de material entre a fonte e o detector, pode-se determinar esta variação de intensidade do sinal considerando uma camada infinitesimal dx que irá reduzir o feixe de uma quantidade infinitesimal dI . Assim, a razão $-dI/I$ será proporcional à espessura infinitesimal dx e a constante de proporcionalidade será o coeficiente de atenuação linear μ :

$$dI = -I_0 \mu dx$$

Coeficiente de absorção linear

Decréscimo do número de fótons .

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \Rightarrow \int_{I_0}^{I(x)} \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx$$



$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 é a intensidade do feixe inicial (número de fótons por segundo),

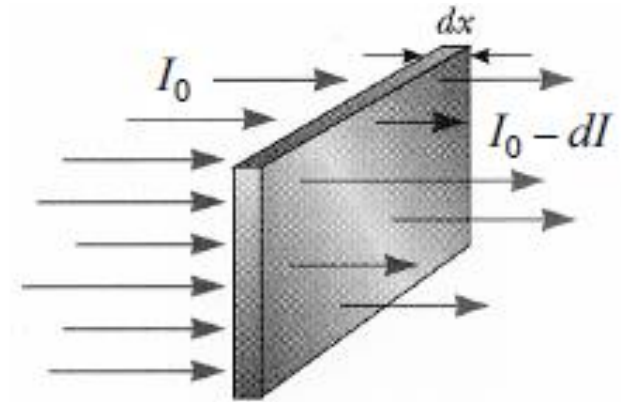
$I(x)$ é a intensidade do feixe depois de atravessada uma distância x ,

μ é o coeficiente de atenuação linear total (soma de todos os processos de interação)

Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

Decréscimo do número de fóton .

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$



❑ após atravessar uma espessura x de um absorvedor o feixe o intensidade inicial cai exponencialmente para I .

❑ Como a absorção do feixe é causada pelos três processos de interação. O coeficiente de absorção pode ser decomposto em três termos:

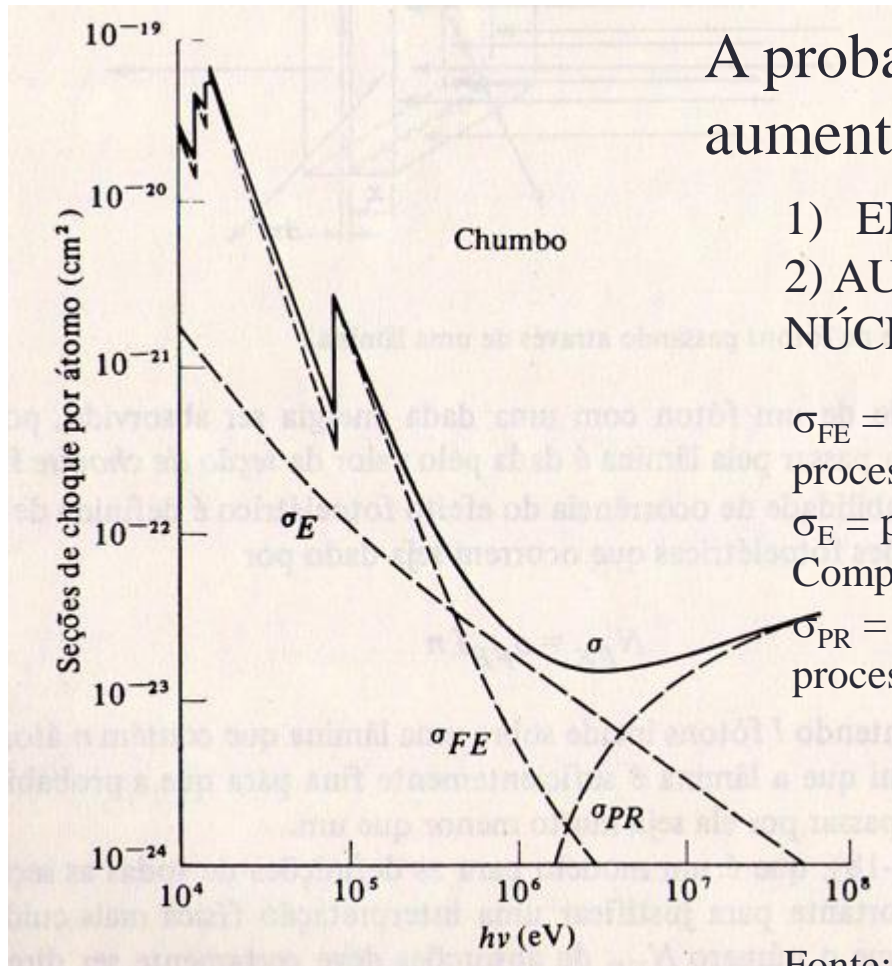
$$\mu = \mu_E + \mu_C + \mu_P$$

❑ nos cálculos é comum utilizarmos o coeficiente de absorção de massa definido como

$$\frac{\mu}{\rho} \quad I(x) = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)x}$$

Seção de Choque de absorção de fótons na matéria

☐ Pode-se medir qual a seção de choque em função da energia dos fótons para cada processos ocorrer.



A probabilidade de produção de pares aumenta drasticamente

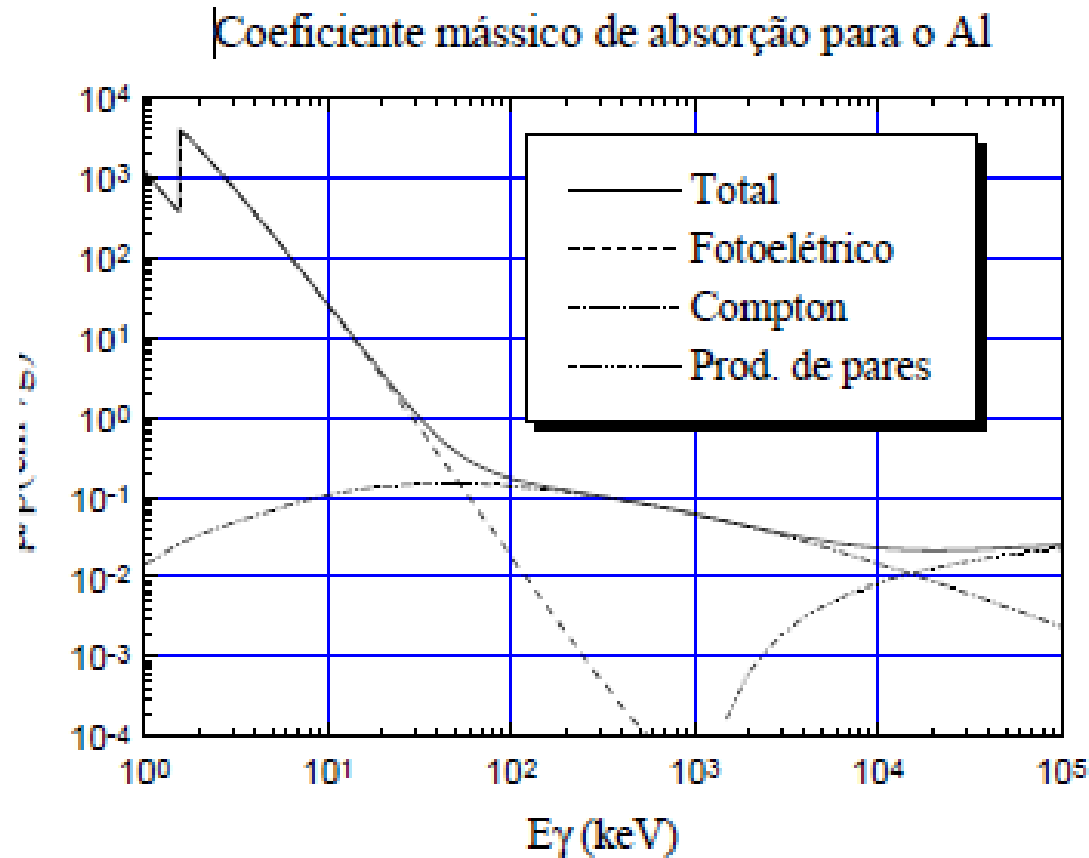
- 1) ENERGIA DO FÓTON
- 2) AUMENTO DO NÚMERO ATÔMICO Z DO NÚCLEO PRÓXIMO

σ_{FE} = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo fotoelétrico

σ_E = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo Compton

σ_{PR} = probabilidade do espalhamento ocorrer pelo processo de produção de pares

Figura apresenta os coeficientes de atenuação mássicos para o Al através dos principais processos de interação da radiação. A obtenção dos coeficientes de atenuação linear é dada pela multiplicação desses valores pela densidade do material.



Outra grandeza de interesse é a **camada semi-redutora** de um material $d_{1/2}$, para uma determinada energia. Essa grandeza é definida como a espessura necessária do material para reduzir a intensidade da radiação incidente pela metade.

Essa grandeza é definida como:

$$I(d_{1/2}) = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu d_{1/2}}$$

Deste modo, esta grandeza é definida como: $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$

Distância semi-redutora em função da energia do raio gama

