

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 2017

Página do curso:

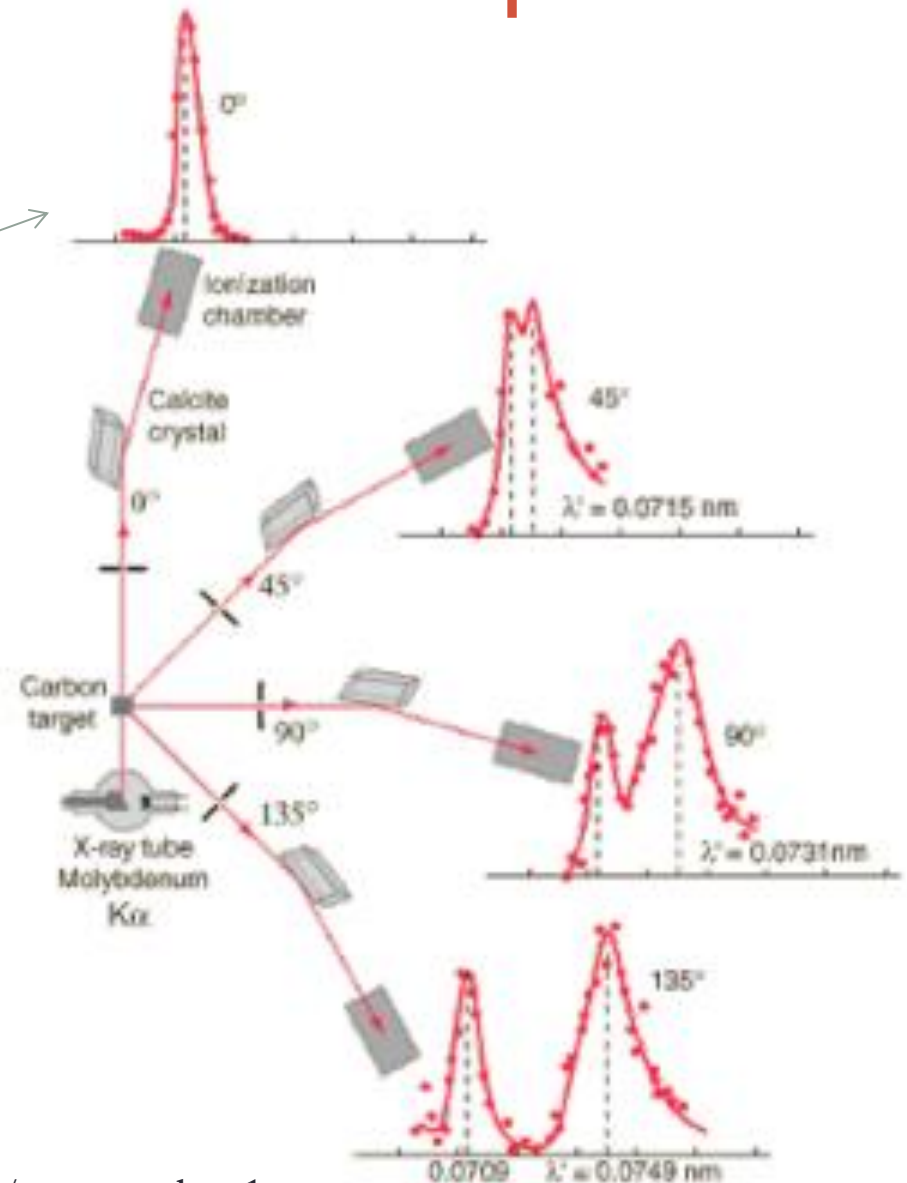
<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=53869>

23/08/2017

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

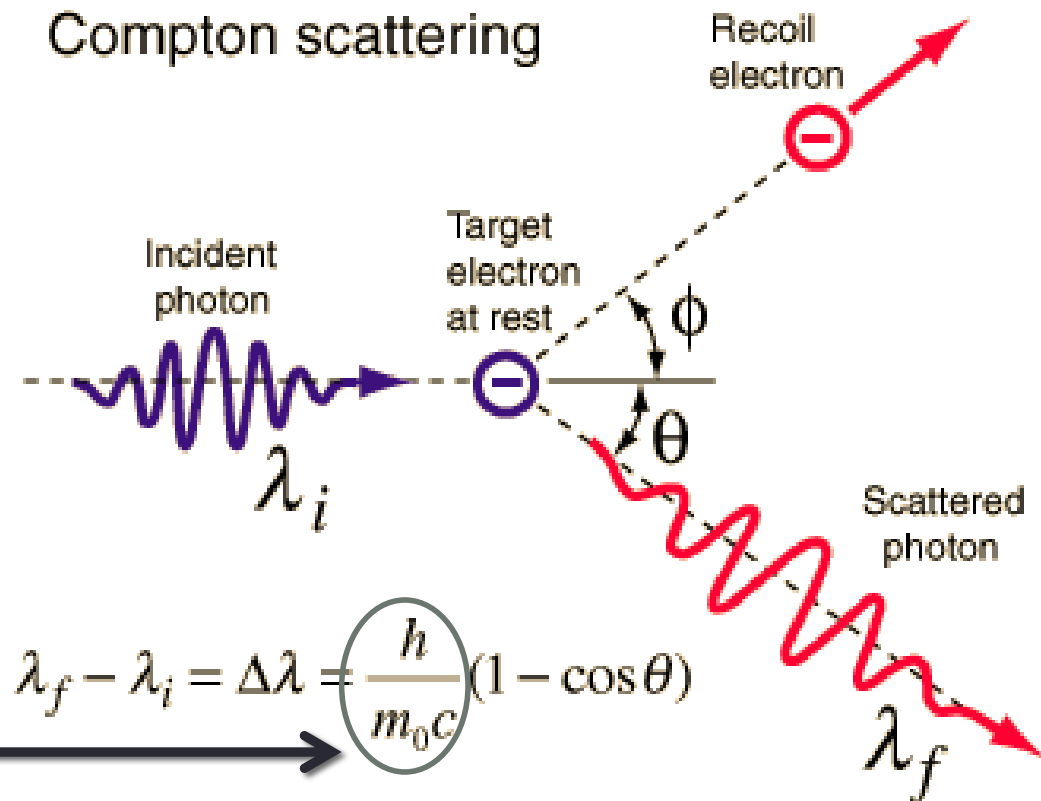
□ Esquemáticamente podemos dizer que o fóton incidente fornece parte de sua energia ao elétron.

□ O elétron sofre um recuo, sendo emitido em um ângulo 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.

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

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



Raios X

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

O QUE ELES SÃO?

COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?

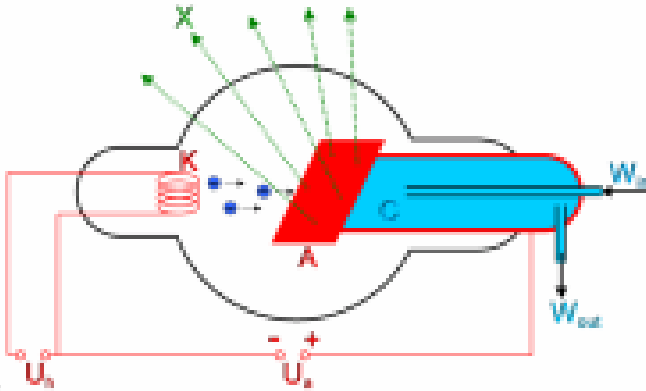
❑ Roentgen descobriu os raios X em 1895 e recebeu o Prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta.

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

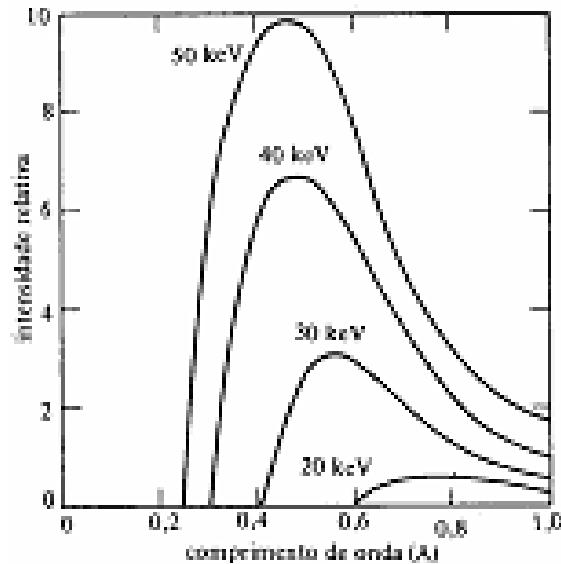
3) Os raios X não sofrem deflexão por campos magnéticos ou elétricos e se propagam em linha reta



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.

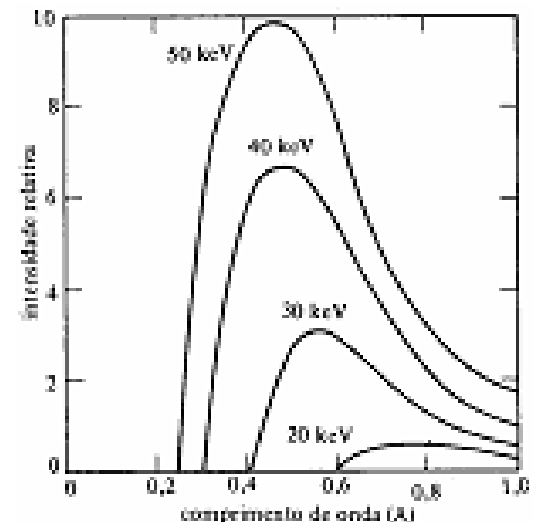
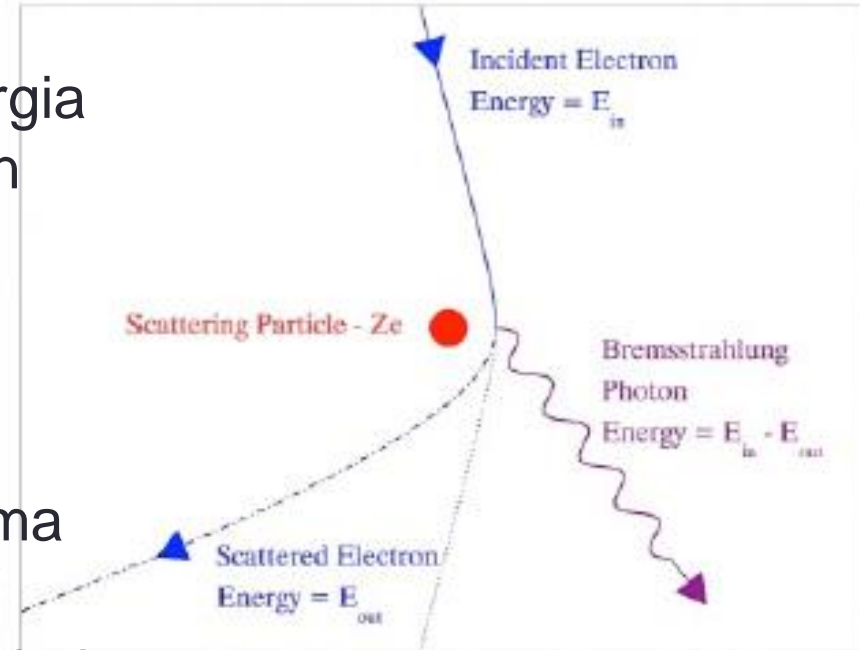
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ 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

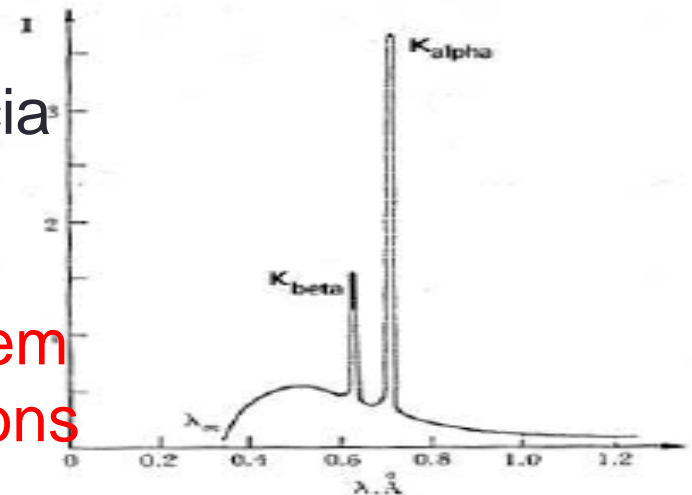
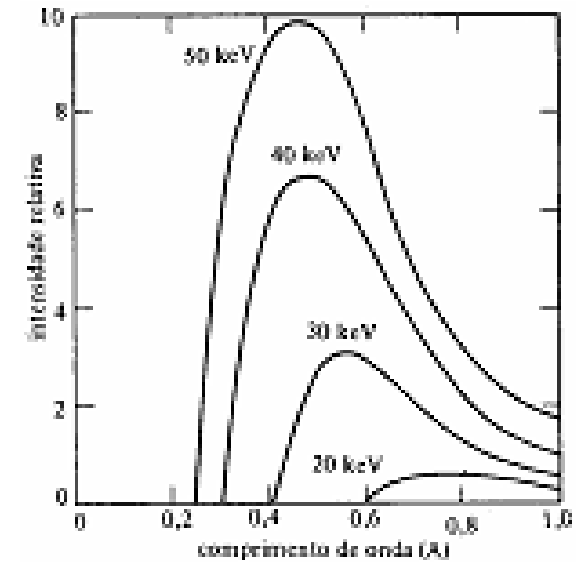
Produção de raios X:

❑ 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???

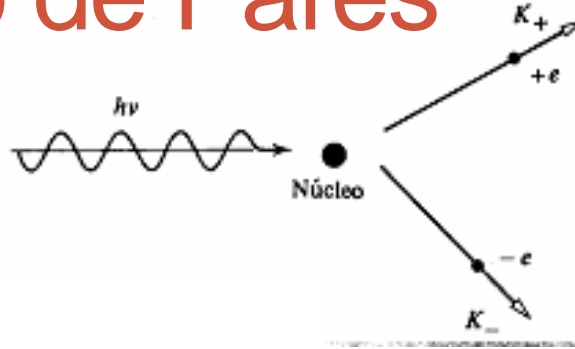
□ Será que é possível fótons produzirem elétrons, da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?

□ 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

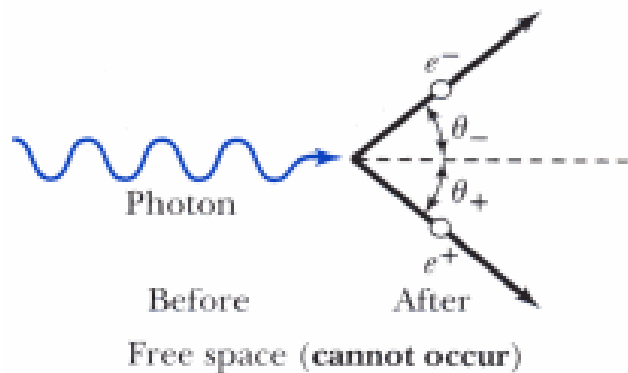
❑ Em 1933 C.D. Anderson observou em elétron de carga positiva (e^+) em uma radiação cósmica – Partícula foi chamada de pósitron e já tinha sido previsto por Dirac

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

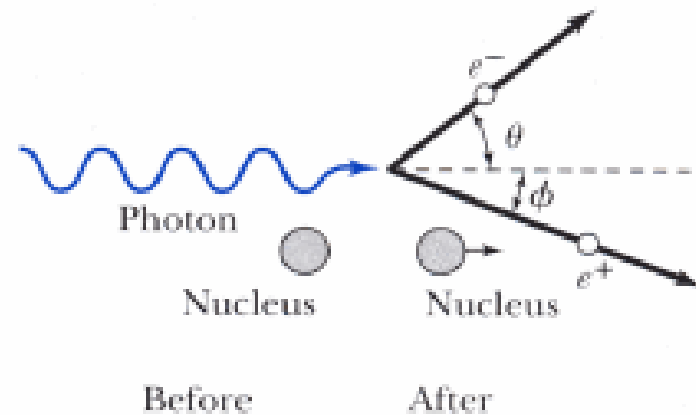
❑ Ele é observado quando raios gamas (fótons) de alta energia passam através da matéria $\gamma \longrightarrow e^+ + e^-$

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)

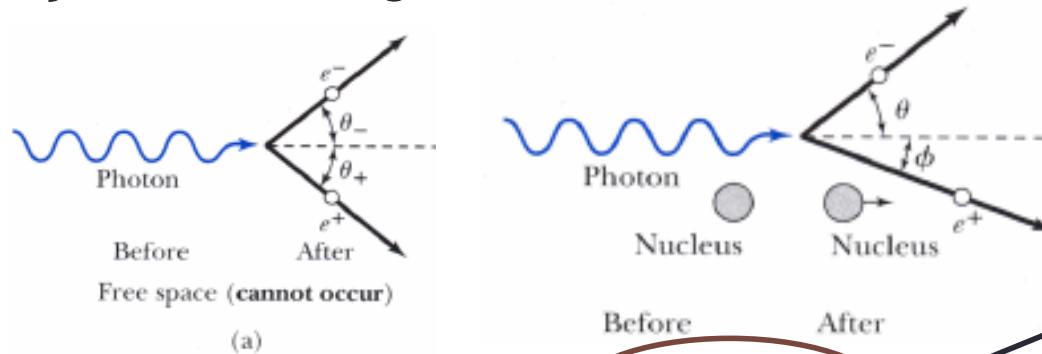


Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

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 :

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

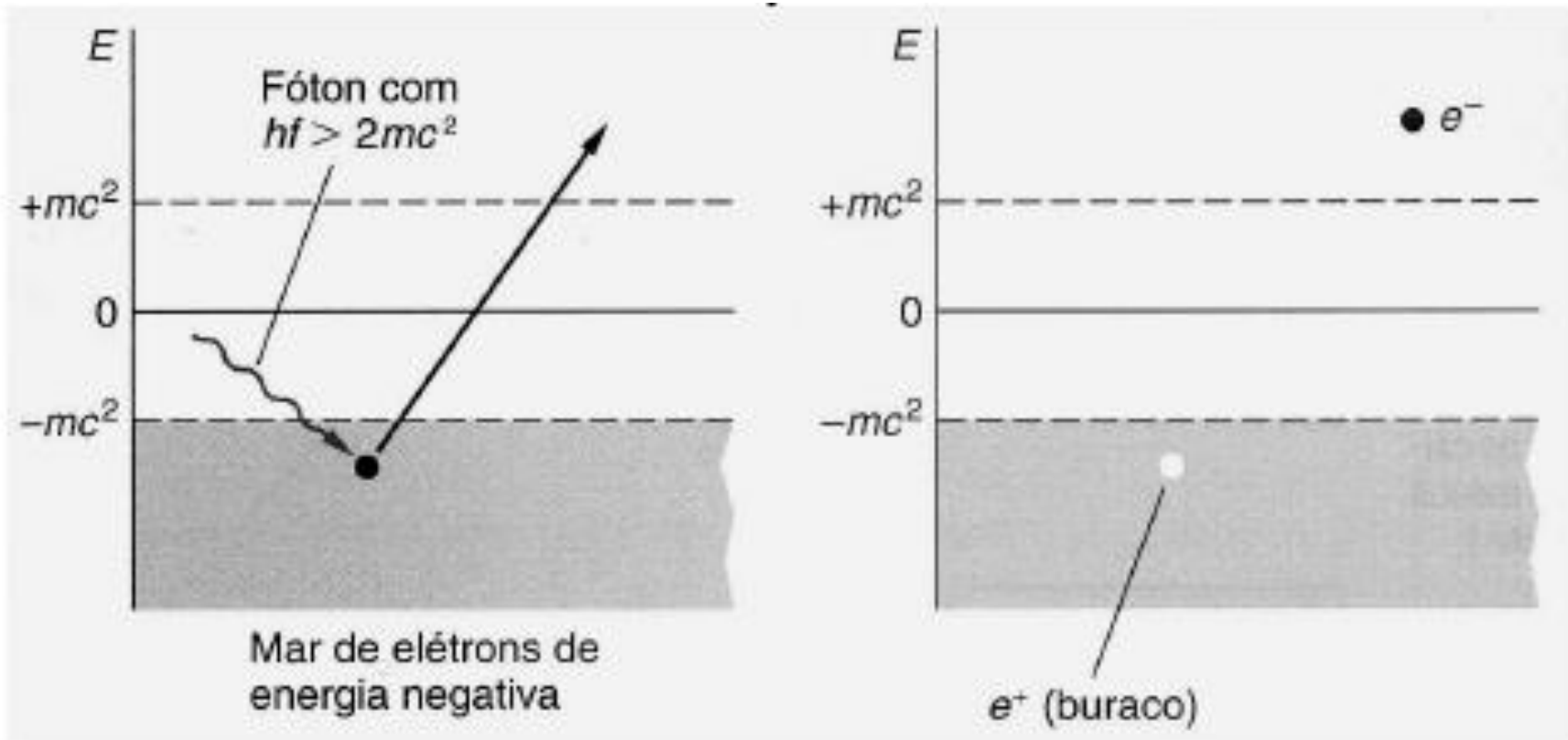
❑ Se um fóton pode criar um elétron, deve-se também criar uma carga positiva para balancear a conservação de carga

❑ A probabilidade de produção de par aumenta drasticamente :

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

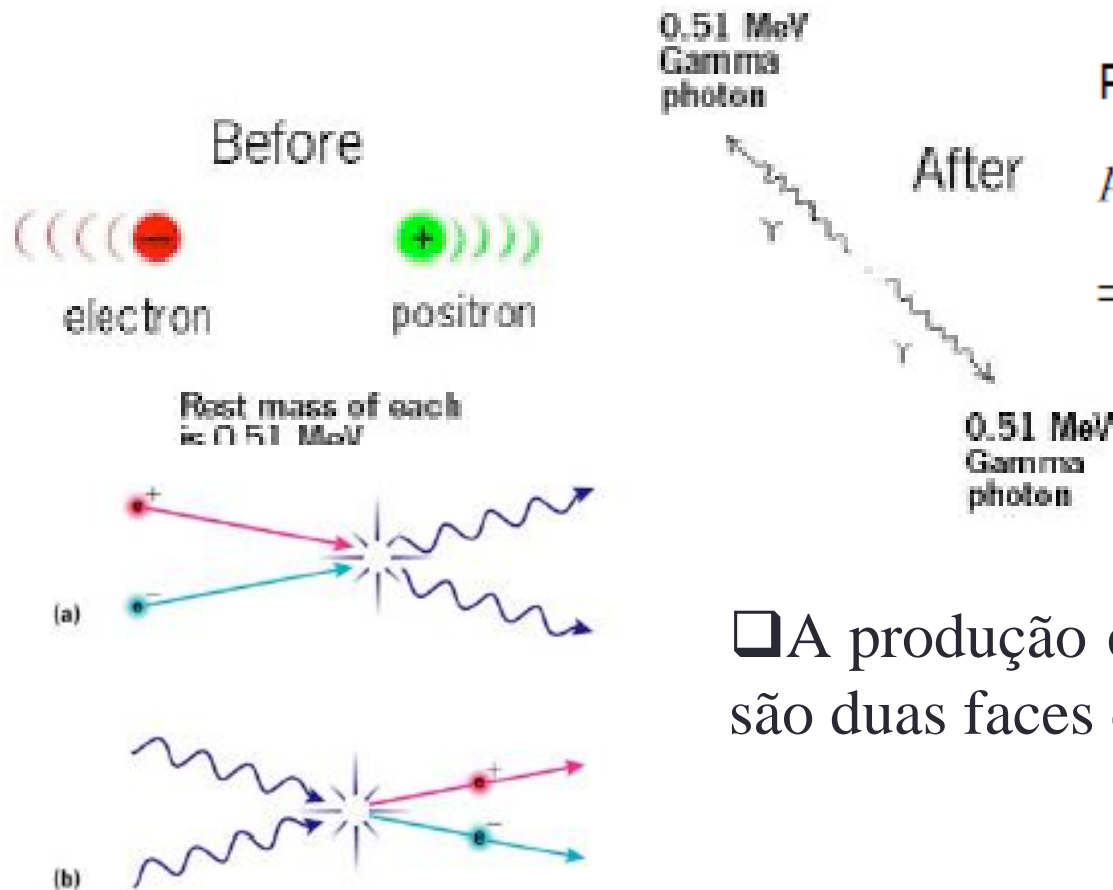
Produção de Pares

□ 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

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

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

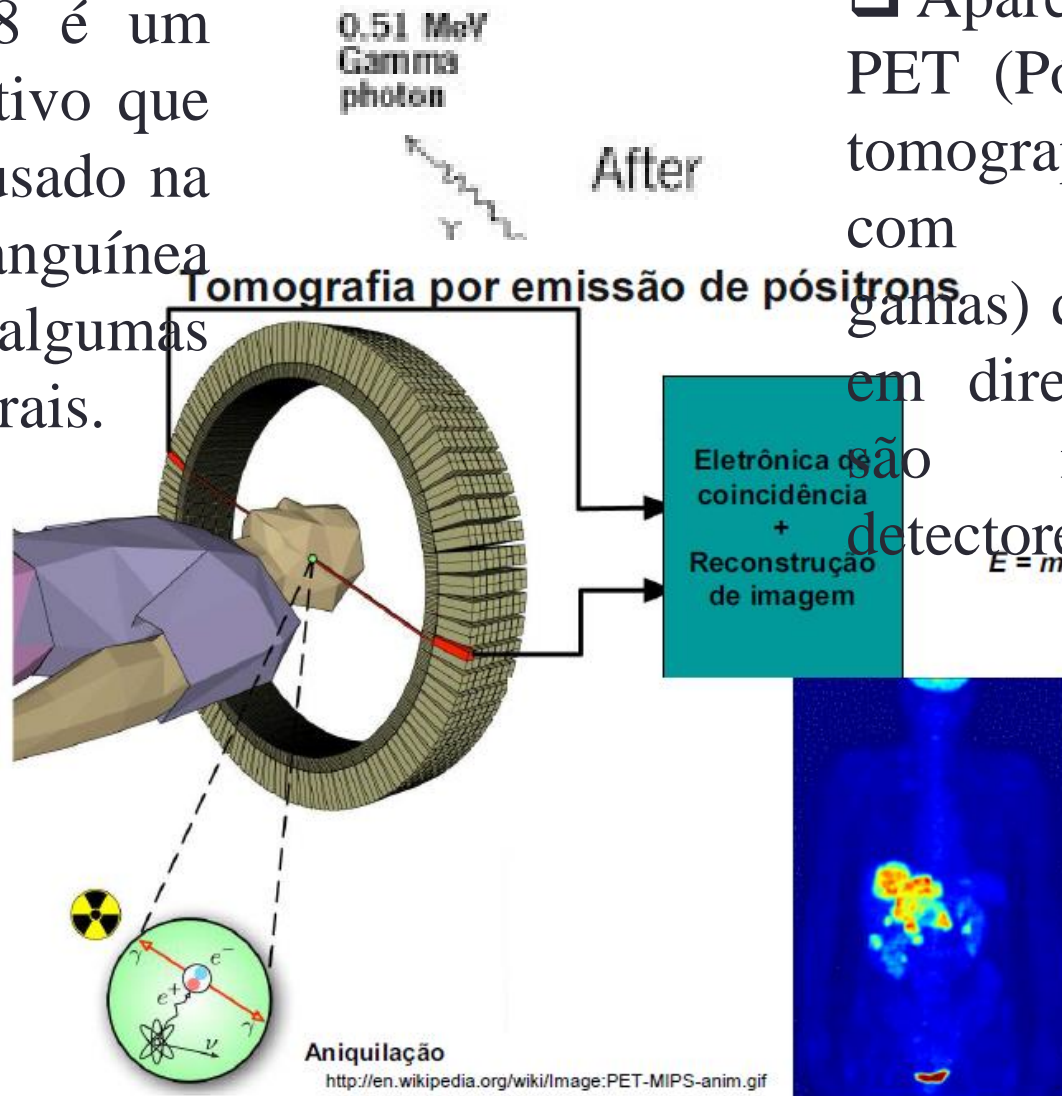
- A produção e a aniquilação de pares são duas faces de um mesmo processo

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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