

# Universidade de São Paulo Instituto de Física

## FÍSICA MODERNA I

---

### AULA 06

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**  
**Pelletron – sala 114**  
**rizzutto@if.usp.br**

**1o. Semestre de 2014**

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

Página do curso:

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=2905>

**12/03/2014**

# Raios X

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

**O QUE ELES SÃO?**

**COMO PODEMOS PRODUZI-LOS?**

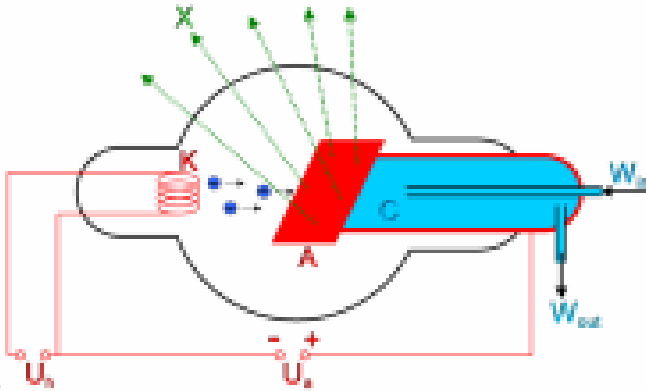
❑ Roentgen descobriu os raios X em 1895 e recebeu o Prêmio Nobel em 1901 por esta descoberta.

**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

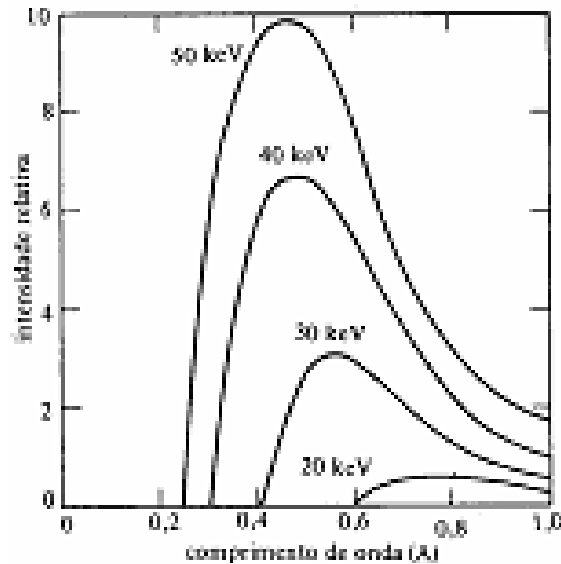
3) Os raios X não sofrem deflexão por campos magnéticos ou elétricos e se propagam em linha reta



# 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 0,311Angstroms.

❑ 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.

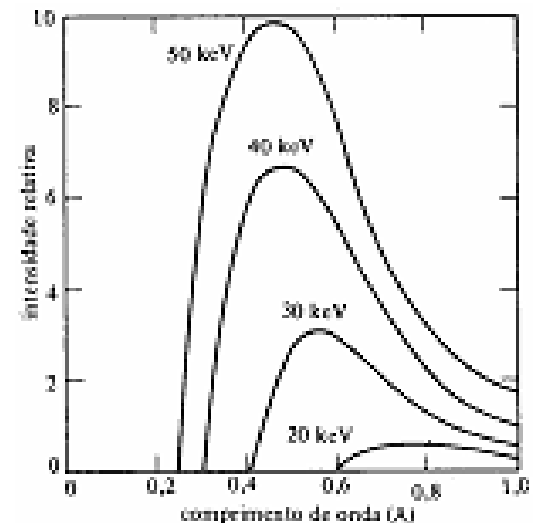
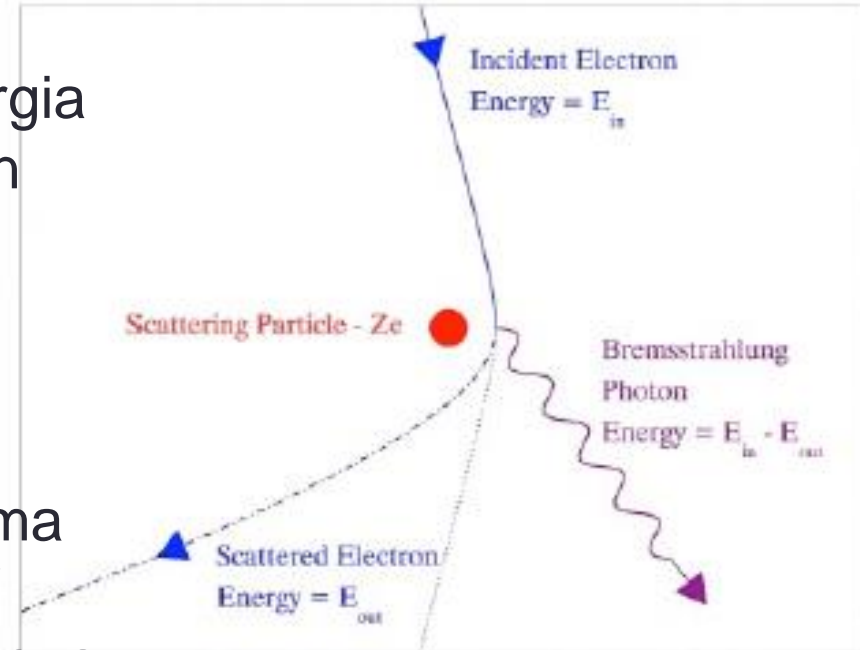
$$E_i - E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

□ 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

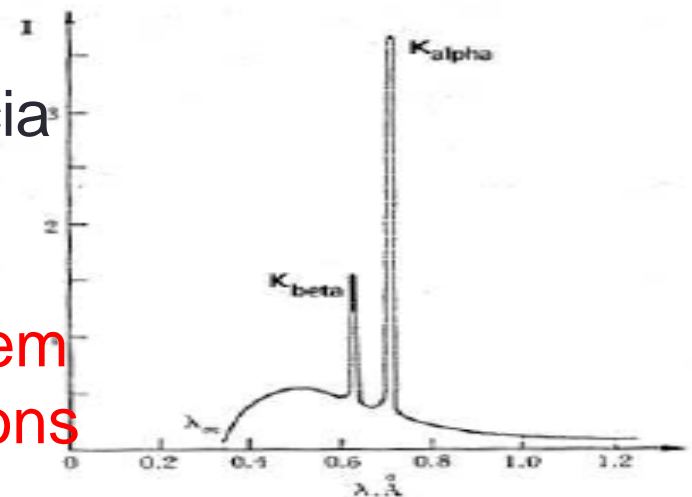
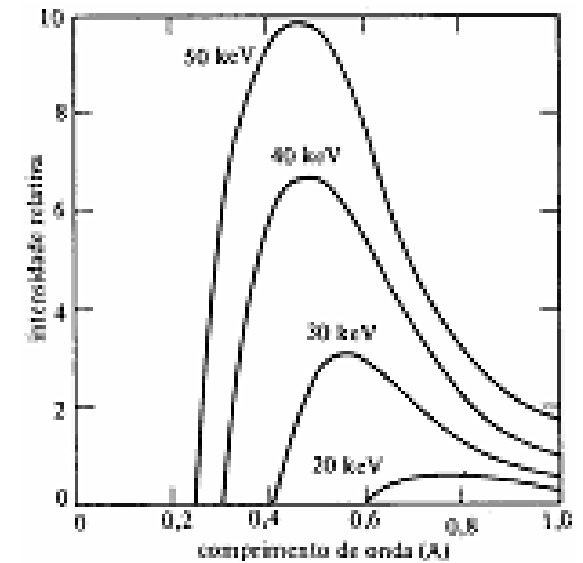
## Produção de raios X:

❑ 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???

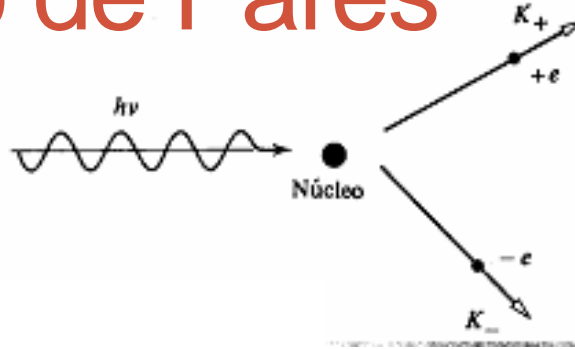
□ Será que é possível fótons produzirem elétrons, da mesma maneira que elétrons produzem fótons ?

□ 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

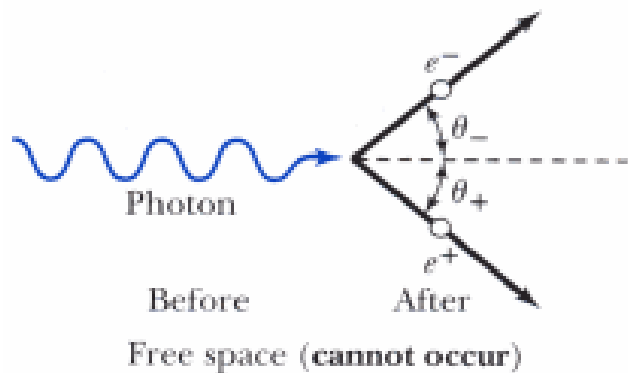
❑ O pósitron tem a mesma massa do elétron ( $m=0,511\text{MeV}/c^2$ ), mas carga oposta.

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

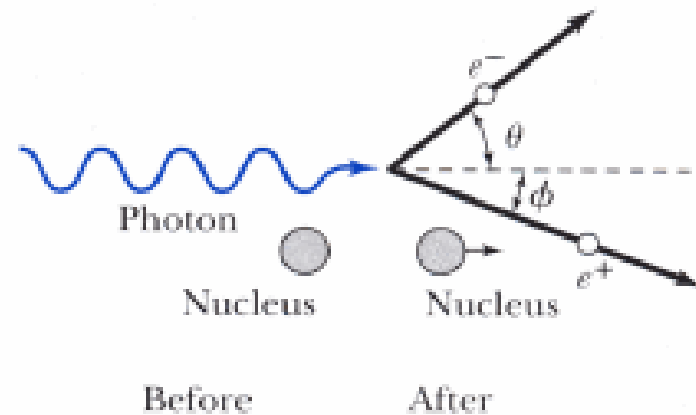


# Produção de Pares

□ 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)



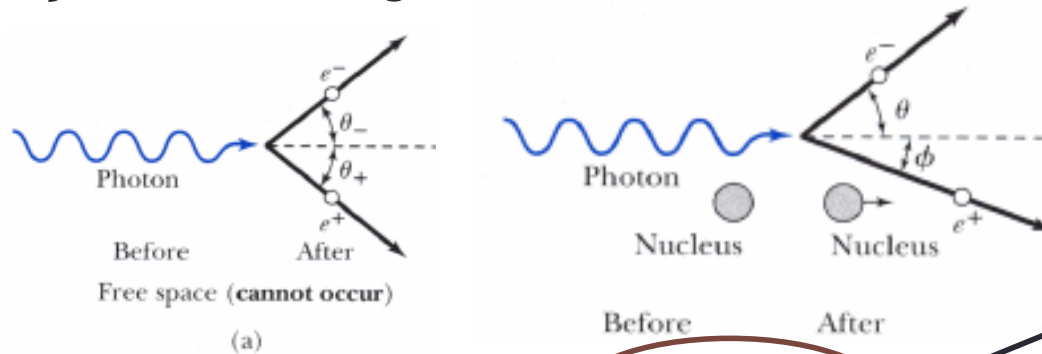
Se um núcleo está próximo, o núcleo pode absorver momento linear suficiente para permitir que o processo ocorra.

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

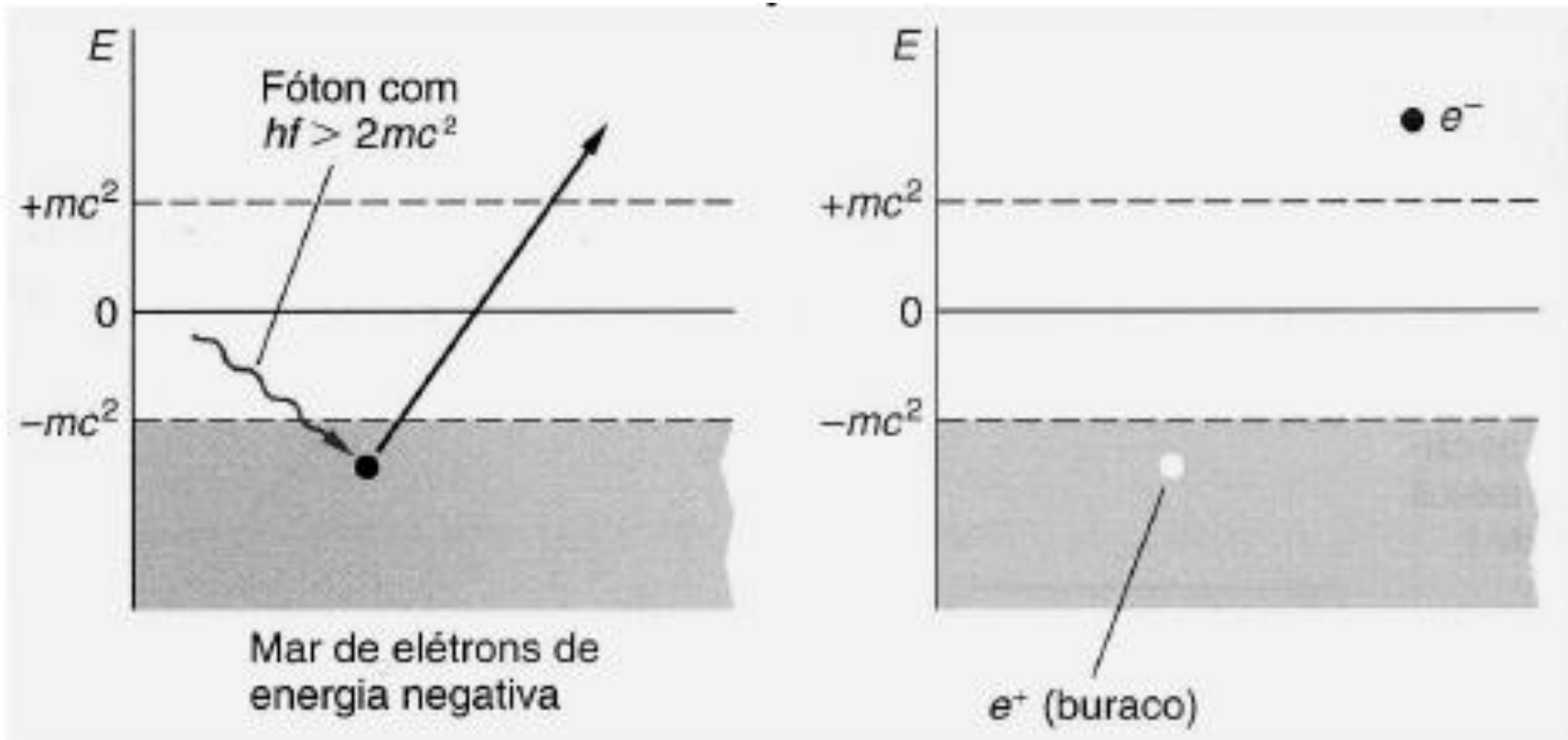
$$h\nu > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

❑ A probabilidade de produção de par aumenta drasticamente :

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

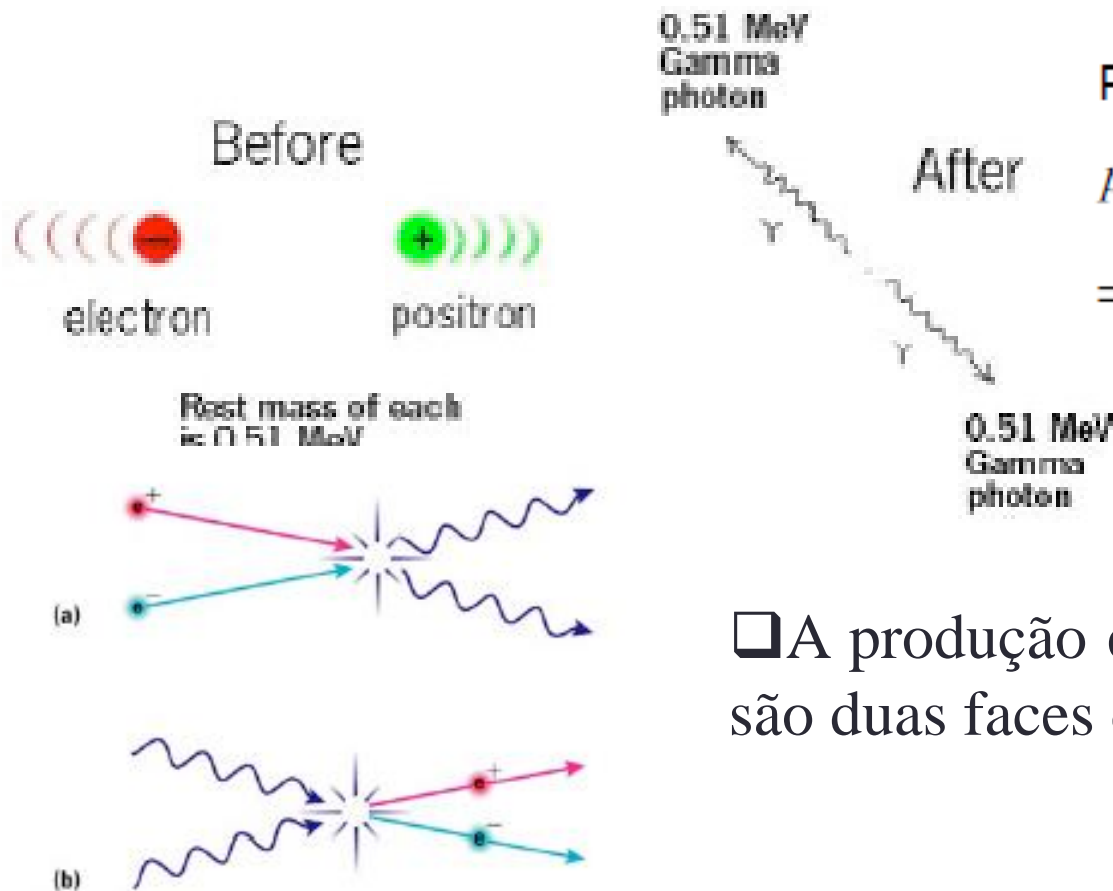
# Produção de Pares

□ Interpretação de Paul Dirac: Existe um “mar de elétrons” que pode ser “excitado” e criam 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

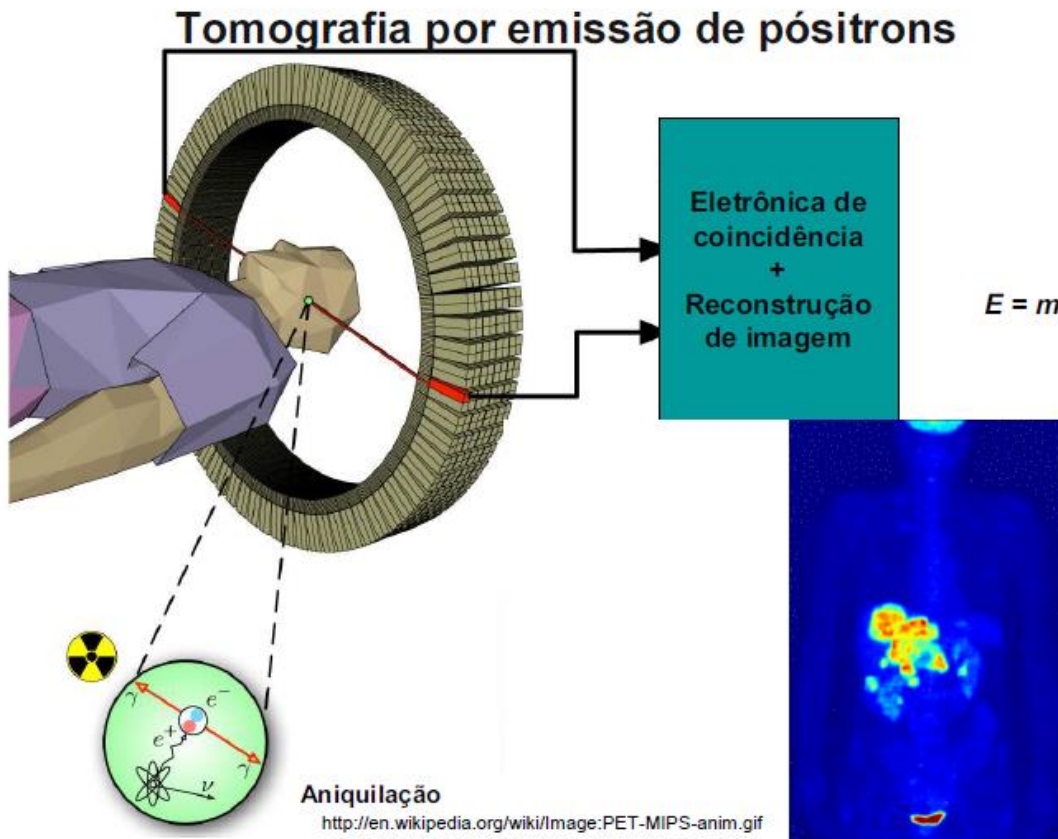
Na aniquilação são produzidos fótons de direção opostas

O Flúor 18 é um núcleo radioativo que emite  $e^+$  e é usado na corrente para estudar doenças cere

0.51 MeV  
Gamma  
photon

After

Aparelho chamado PET (Pósitron emission tomography) trabalha fótons (raios  $\gamma$ ) são emitidos em direções opostas e detectados por 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  $B=0,20\text{Weber/m}^2$ , 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:  $E^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$