

Instituto de Física USP

Física Moderna I Aula 14

Professora: Mazé Bechara

AVISO importante

1. Guia ao TÓPICO III: *Modelos atômicos, as primeiras regras de quantização e o caráter dual da matéria: partícula-onda.*
2. Conferência de Bohr na cerimônia do prêmio Nobel de Física que recebeu.

NA PÁGINA DA DISCIPLINA

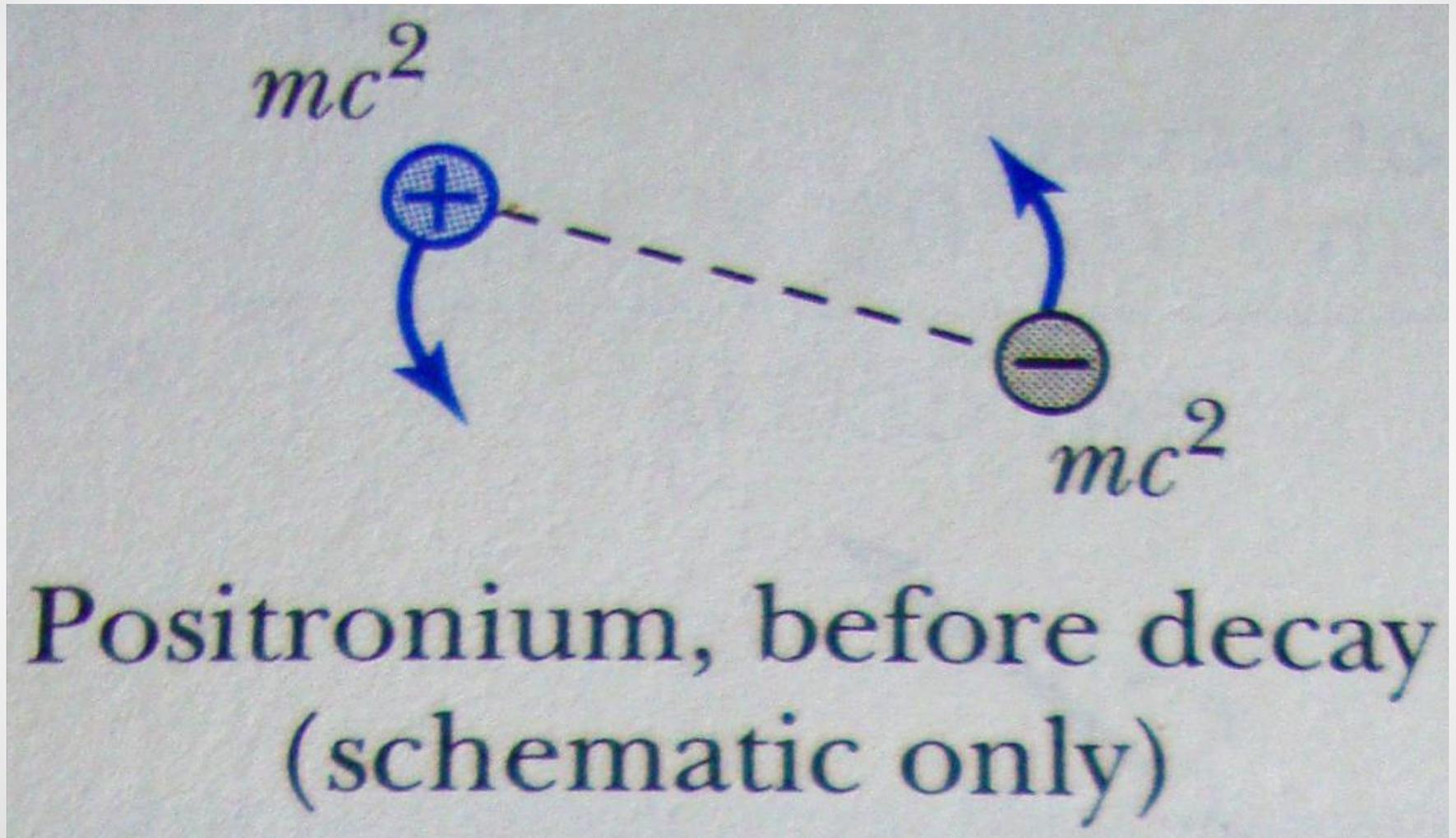
Aula 14 – Aniquilação de matéria. Competição entre os processos da interação do fóton com partículas da matéria. Evidências de estrutura atômica

1. O processo de **aniquilação de matéria**, ou melhor, **de um par partícula e sua anti-partícula**, com a criação de pelo menos dois fótons. **O funcionamento do PET. Aplicação.**
2. **A competição entre vários processos dos que mais ocorrem na interação da radiação eletromagnética, raios-X e raios- γ , com a matéria.** A compatibilidade entre as visões ondulatória e fotônica.

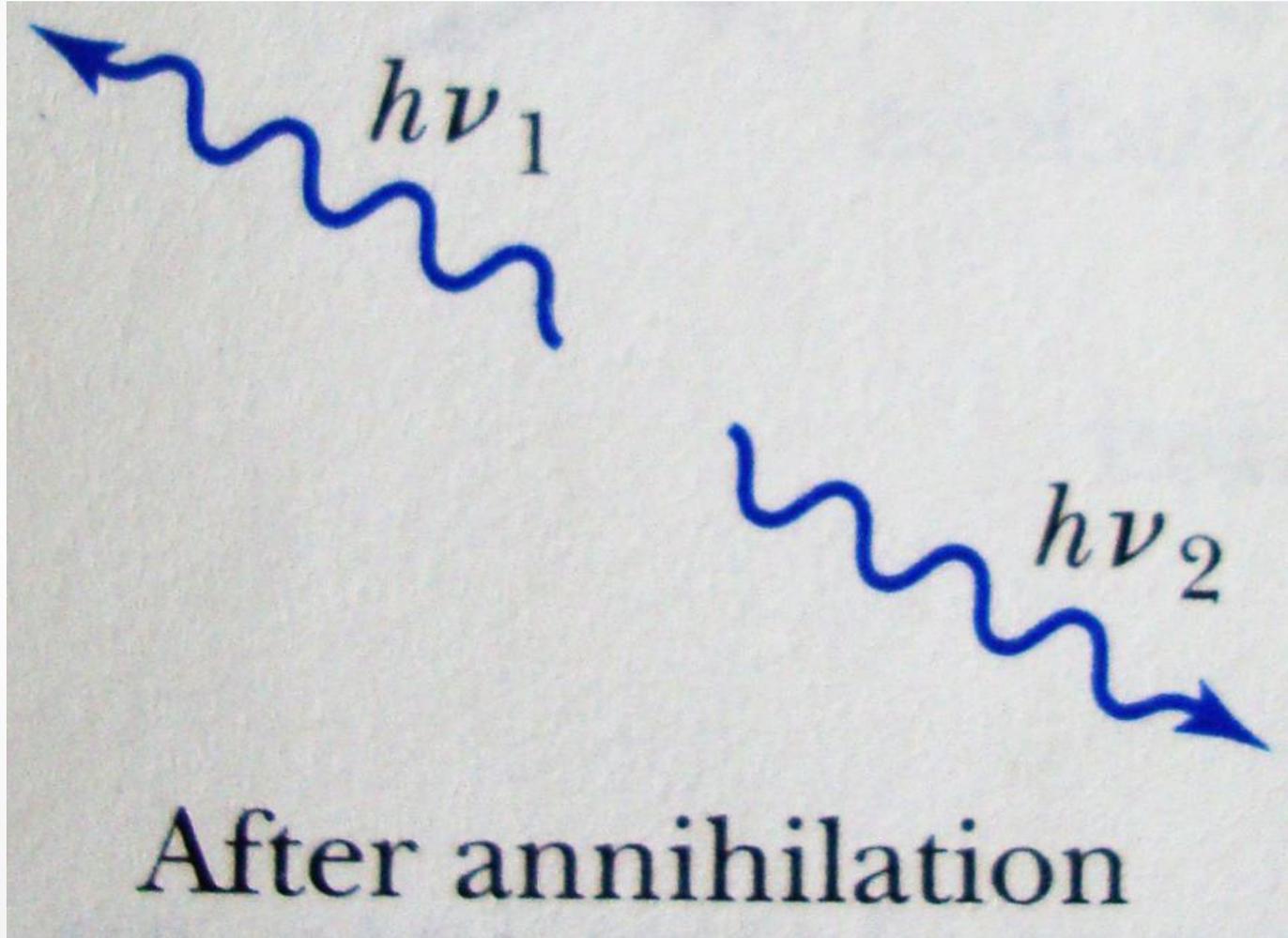
A aniquilação da matéria – com a consequente criação de radiação eletromagnética

1. **Sempre** que uma antipartícula **interage** com a sua respectiva partícula ocorre **o aniquilação das duas com emissão de fótons – pelo menos dois deles** (radiação eletromagnética) para haver conservação de energia e momento linear no processo. **Nesse caso não há intermediários na interação.**
2. **Interagir** significa “ficarem muito próximos”, ou ainda melhor: ter uma **energia potencial de interação.**
3. No caso do par elétron-pósitron esta distância é da ordem de 1 angstrom; a **interação entre as partículas é coulombiana atrativa, como nos átomos**, e por isto o sistema é chamado de **átomo positrônico**. A **energia de ligação é de $-6,8\text{eV}$** . Mas, **diferentemente do átomo de H o átomo positrônico é instável: ele decai (expressão técnica) espontaneamente em um elétron e um pósitron com meia vida de 10^{-10}s** . **A meia vida é o tempo para metade dos** átomos positrônicos decaírem, ou seja, haver aniquilação do par com criação de dois fótons.
4. **A aniquilação do par com a formação de três fótons ou mais pode ocorrer, mas a probabilidade é muito menor** do que o decaimento com formação de dois fótons.

O átomo positrônico – estado ligado



Decaimento do átomo: aniquilação do par elétron-pósitron com emissão de dois fótons



Perguntar não ofende...

1. Por que parte ou todo o universo físico “não desaparece ou desapareceu” pela interação de matéria com a antimatéria virando radiação eletromagnética?

- Ref. Leandro de Paula e Miriam Gandelman; *Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro*; CIÊNCIA HOJE • v o l . 25 • n ° 148. Na página da disciplina.

Aniquilação de matéria - Aplicação

Um par elétron-pósitron forma o chamado átomo positrônico. Este átomo é instável e desaparece decaindo em dois fótons.

- Determine a(s) direção(ões) entre os dois fótons criados; a energia e o comprimento de onda de cada um dos fótons, no referencial do centro de massa do átomo positrônico.
- Este átomo poderia decair **em um único fóton** segundo este sistema de referência? E **em três**? Justifique.
- Se este **átomo estiver em movimento** com o momento linear constante em relação a um laboratório, **sua resposta ao item (b) seria diferente?** Justifique.
- No caso do item c) os comprimentos de onda seriam os mesmos? E a direção entre os dois fótons criados? Justifique.

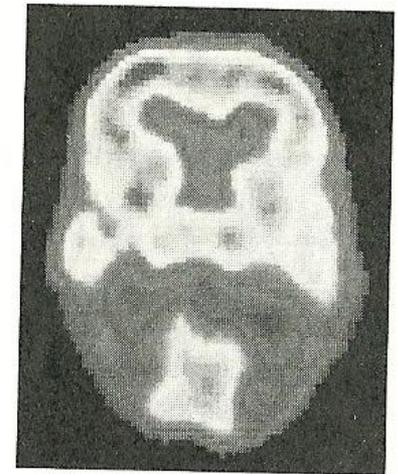
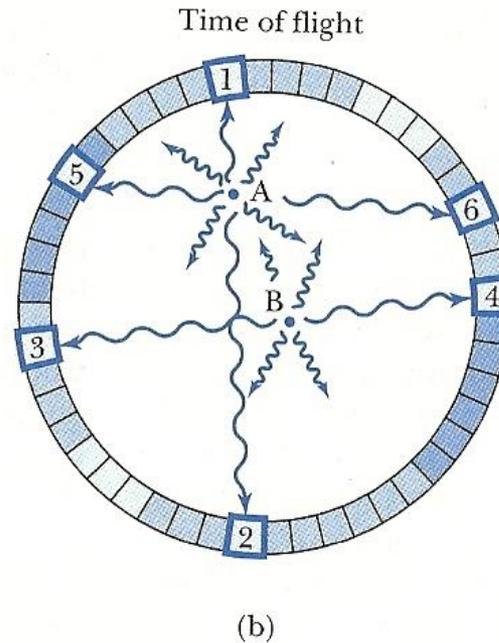
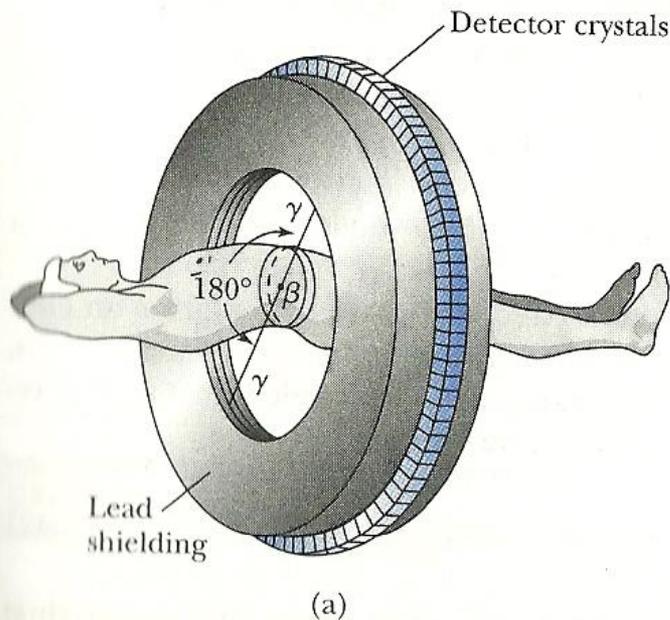
Funcionamento do PET

- Póstrons emitidos naturalmente de radioisótopos (núcleos instáveis) como os elementos: ^{15}O , ^{11}C , ^{13}N e ^{18}F são injetados no corpo do paciente junto com glicose.
- As células cancerígenas, que têm reprodução muitíssimo rápida, absorvem muito mais calorías que as normais. Assim elas ao absorverem mais glicose que as células normais, ficam com muito mais póstrons da glicose do que as normais, e portanto formam muitos mais pares de fótons de $\sim 0,511\text{MeV}$, na aniquilação de um par, depois de formar átomos positrônicos com os elétrons do corpo humano.
- É possível identificar tumores milimétricos porque os póstrons andam fração de milímetros antes de se juntar ao elétron e decair em dois fótons, o que possibilita a sua localização com precisão.

A aniquilação de um par à serviço da saúde humana: PET (Positron Emitter Tomography)

Fig. Modern Physics for Scientists and Engineers – S. Thornton, A. Rex

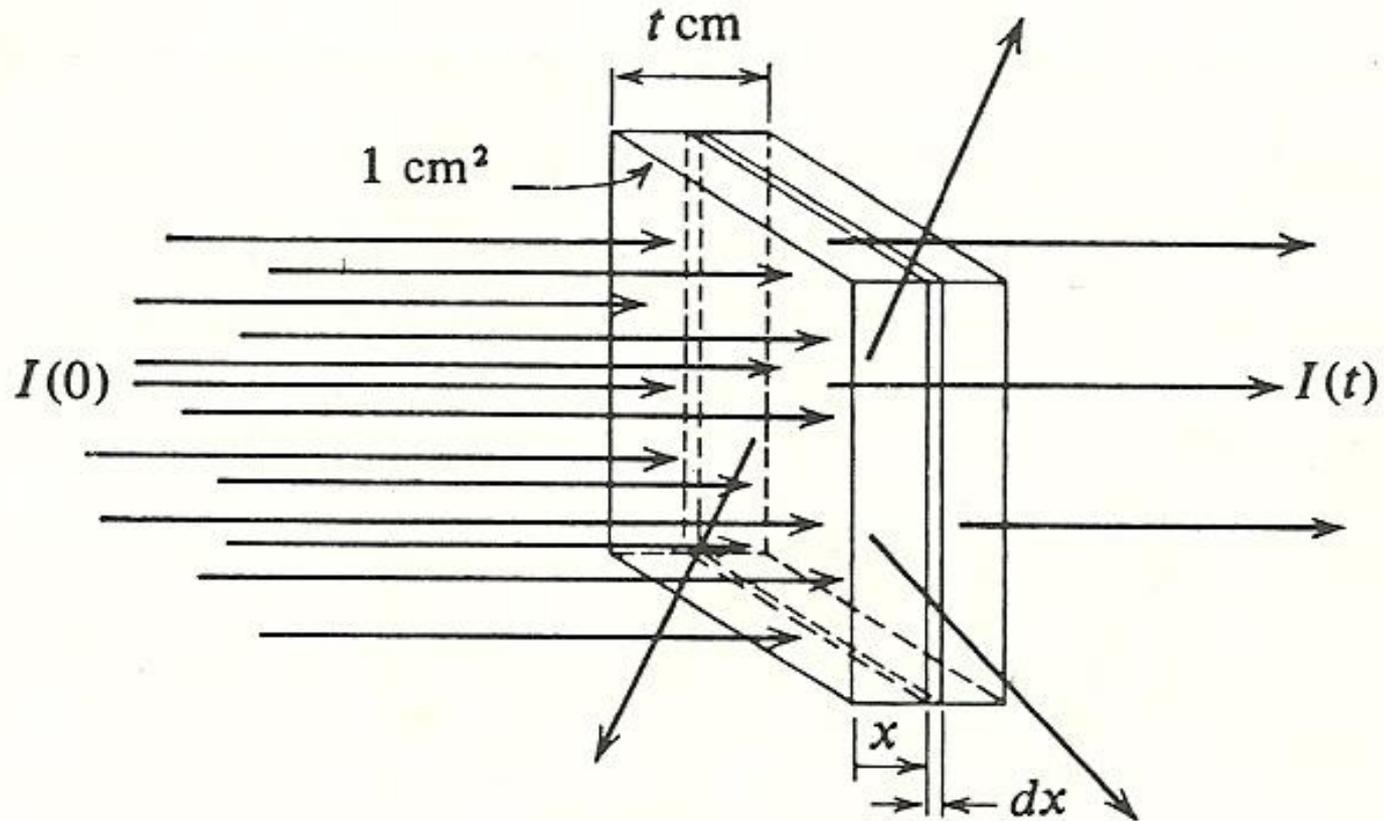
Summary 113



(a) Corpo posicionado depois de receber apropriado radiofármaco para se concentrar, por processos fisiológicos, na região a ser examinada: (b) O pósitron caminha poucos milímetros até se aniquilar depois de formar o par, emitindo dois fótons que detectados permitirão a localização da posição do pósitron; (c) A tomografia de um cérebro normal.

Questão 46 do guia ao tópico II

- Fig. do Eisberg - Resnick



Um feixe de fótons passando através de uma lâmina.

Tudo o que não é transmitido, ou é desviado (espalhado – que inclui a reflexão ou espalhamento a 180°), ou é absorvido.

A intensidade da radiação atravessando a matéria

- **Resultado experimental da intensidade da radiação na posição x no interior da matéria, quando o feixe incide na direção x :**

$$I(x) = I(0)e^{-\Lambda(w)x}$$

Λ é chamado de **comprimento de atenuação** do feixe. Sua unidade é de inverso de comprimento.

$$\Lambda = \rho\sigma_T$$

ρ é a densidade volumétrica da matéria, ou seja, número de constituintes por unidade de volume, e σ_T é a seção de choque total (que tem dimensão de área) para "roubar" intensidade do feixe incidente.

Eletromagnetismo clássico – os campos das ondas (dispersivas) na matéria

- Onda propagando na direção do eixo x no interior de matéria, ou **onda transmitida**:

$$\vec{E}(x,t) = \vec{E}_0 e^{-\frac{\Lambda(\omega)x}{2}} \cos(k(\omega)x - \omega t)$$

$$\vec{B}(x,t) = e^{-\frac{\Lambda(\omega)x}{2}} \vec{B}_0 \cos(k(\omega)x - \omega t + \delta)$$

$$\vec{B}_0 = \frac{\sqrt{k^2(\omega) + \frac{\Lambda^2(\omega)}{4}}}{\omega} \vec{i} \times \vec{E}_0$$

As ondas na matéria

- A amplitude cai no interior da matéria.
- O número de onda k e o fator de decaimento Λ dependem da frequência ω .
- A dependência citada acima é diferente na matéria condutora e isolante.

A velocidade da onda dispersiva:
 $v = d\omega/dk < c$

Conservação da energia do feixe

$$I_{\text{inc}} = I_{\text{transm}} + I_{\text{absorv}} + I_{\text{esp}}$$

- **Intensidade transmitida** = Intensidade da radiação que não interagiu; ou “espalhada” a zero graus.
- **Intensidade absorvida** = Intensidade dos fótons absorvidos por **elétrons ligados** fazendo o efeito fotoelétrico (EF) + **os absorvidos por núcleos e que produziram pares de partículas (PR)**.
- **É Intensidade de Espalhamento (E)** = intensidade dos fótons que se desviaram da direção incidente (inclusive a 180 graus ou refletidos) ou **que fizeram os espalhamento Thomson (com mesmo comprimento de onda) e Compton (com comprimento de onda maior)**.

A intensidade da radiação atravessando a matéria

$$I(x) = I(0)e^{-\Lambda x}$$

Λ é chamado de **comprimento de atenuação** do feixe. Sua unidade é de inverso de comprimento.

$$\Lambda = \rho\sigma_T = \rho(\sigma_{FE} + \sigma_E + \sigma_{PR})$$

Aqui foram considerados os processos mais prováveis (de maior seção de choque): efeito fotoelétrico (EF), espalhamento com mesmo ou diferente comprimento de onda (E), e a **produção de pares (PR)**.

O que não é desviado e nem absorvido por interação com a matéria é o feixe transmitido.

O número de fótons através da matéria

- O pequeno número de fótons $dN_f(x)$ que “desaparecem” do total $N_f(x)$ de fótons do feixe na posição entre x e $x+dx$ no interior matéria, depende da densidade de matéria ρ e da seção de choque total σ_T relacionada à probabilidade de ocorrerem os processos que “roubam” (sinal -) os fótons do feixe por interação de fótons com a matéria:

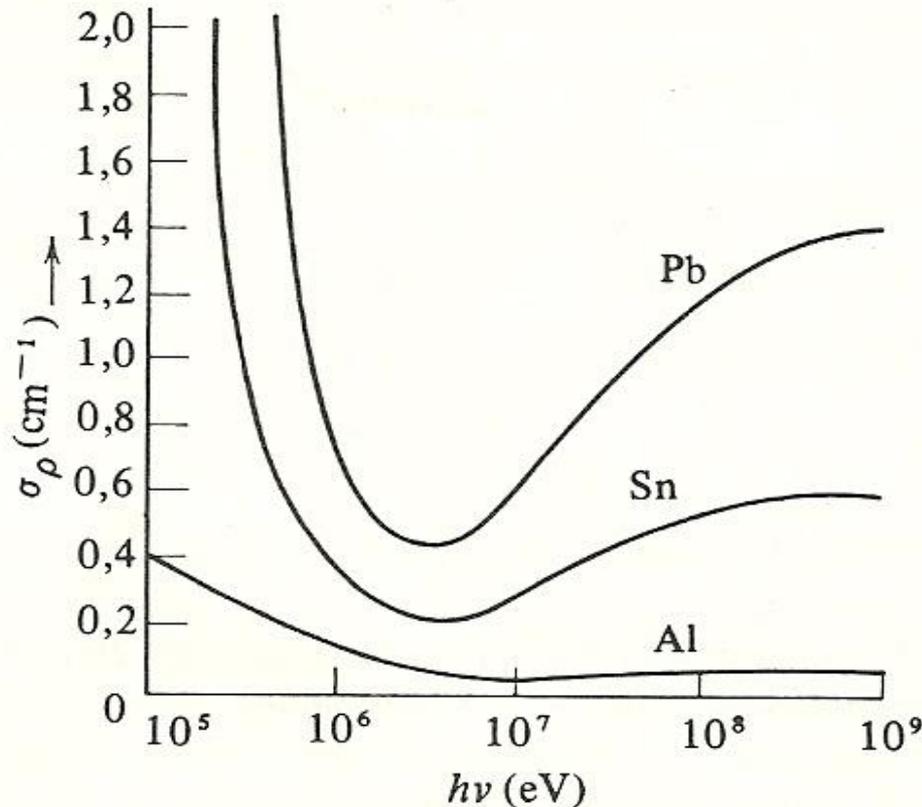
$$dN_f(x) = -N_f(x)\rho\sigma_T dx$$

$$N_f(x) = N_f(0)e^{-\rho\sigma_T x} = N_f(0)e^{-\rho(\sigma_{EF} + \sigma_E + \sigma_{PR})x}$$

- Os processos com maiores probabilidades (seções de choque) são os aqui considerados: efeito fotoelétrico (EF), espalhamento Thomson e Compton (E) e a produção de pares (PR)
- **Compatível com eletromagnetismo e experimentos**

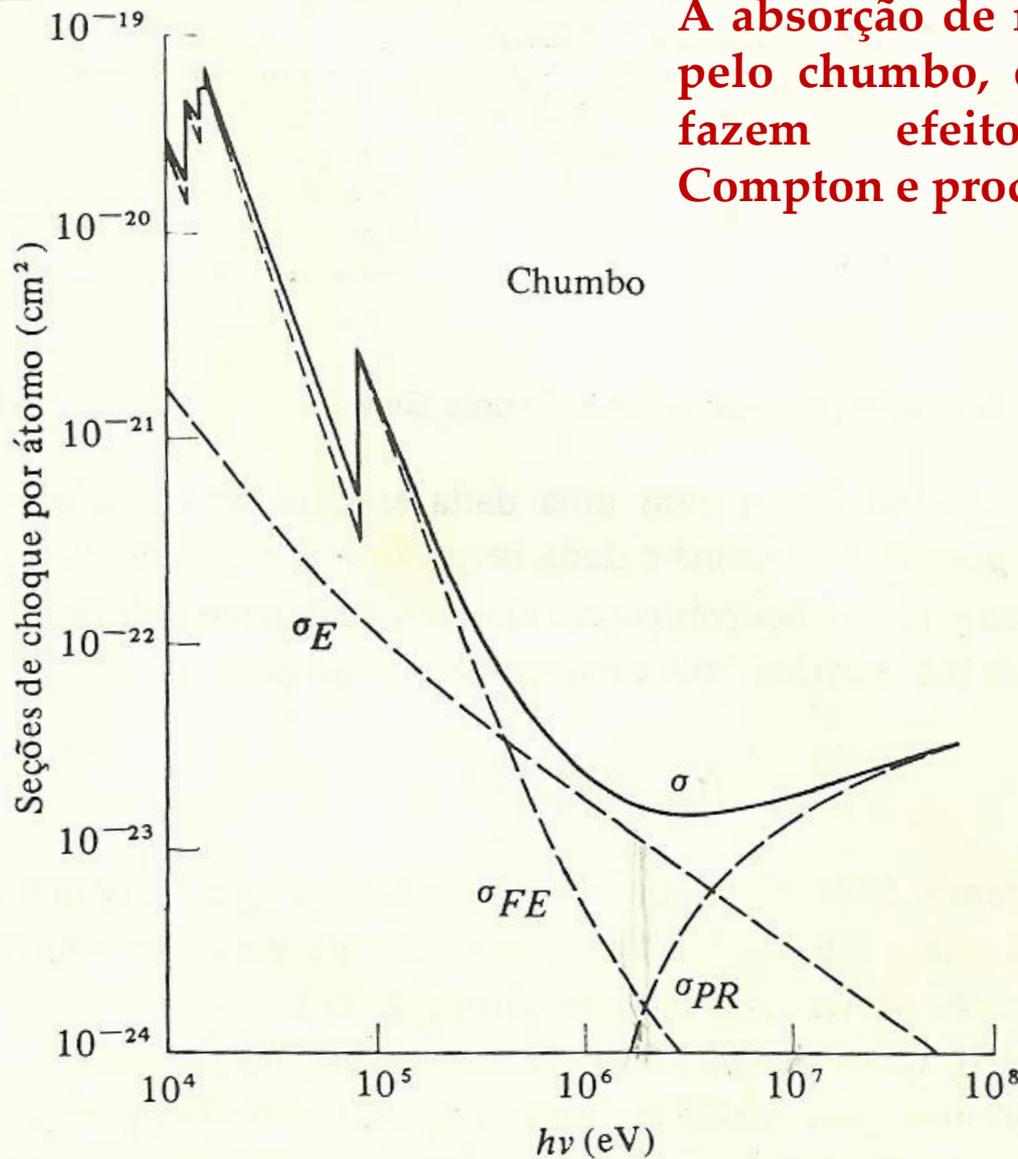
Coeficientes de atenuação da radiação com raios-X e raios- γ

Há um efeito da densidade mas há outros da estrutura da matéria – as curvas não tem formas idênticas



Os coeficientes de atenuação para vários átomos num dado intervalo de energia dos fótons.

A absorção de raios-X e raios- γ pelo chumbo, ou seja, os que fazem efeito fotoelétrico, Compton e produção de pares.



As seções de choque de espalhamento, fotoelétrica, de produção de pares, e total para um átomo de chumbo.

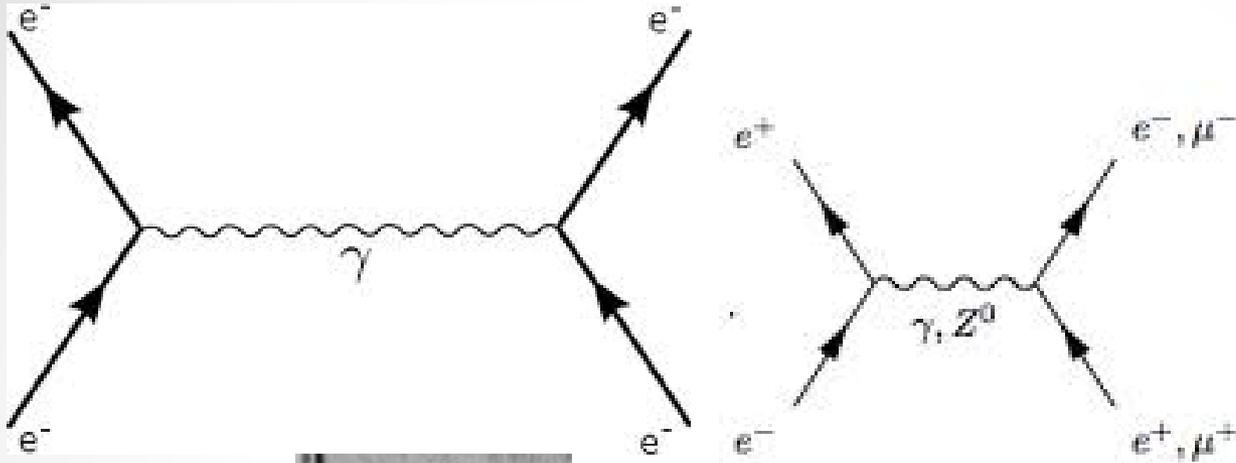
Aplicação

- **A partir dos dados mostrados explique, com argumentos qualitativos, porque o avental de proteção dos radiologistas é de chumbo e não de alumínio.**
- **Usando as informações dadas determine a espessura do avental de chumbo e de alumínio para atenuar de um fator 100 os raios-X de 0,124 Angstroms.**
- **Informações adicionais:**
 - $\rho_{\text{Pb}} (A=208) = 11,34 \text{g/cm}^3$
 - $\rho_{\text{Al}} (A=27) = 2,70 \text{g/cm}^3$

A teoria da interação do fóton com as partículas da matéria

- Para tratar teoricamente os processos relativos à interação de fótons com a matéria, seja de espalhamento, seja de absorção, seja a criação e aniquilação deles, é preciso uma teoria que permita a existência de fótons, de partículas na matéria, e que o número fóton, como o de partículas na matéria, não se conservem.
- Esta teoria é a **eletrodinâmica quântica (QED - Quantum ElectroDynamics do nome em inglês)**. Iniciada por **Dirac** (Nobel de Física com Schroedinger em 1933) na **década de 20**, depois desenvolvida por **Schwinger** e por **Feynman (na década e 1950)**, este último viabilizando os cálculos com seus famosos diagramas, o **que deu a estes dois últimos e ao Tomonaga, o prêmio Nobel de Física em 1965.**

QED - prêmio Nobel de Física – 1965: Schwinger , Feynman e Tomonaga



Acima: Diagramas de Feynman, e o próprio na década de 1970

Ao lado: Schwinger, Tomonaga e Feynman em 1965

Abaixo: A equação básica da QED (só para impressionar!!!)

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} ,$$

