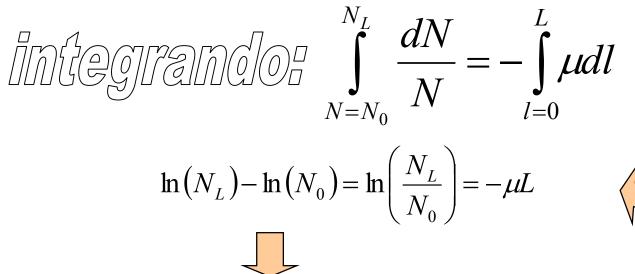
Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Parte 2

Paulo R. Costa

Revisando a aula da semana passada!

Coeficientes de atenuação



Vale no caso ideal (sem espalhamento) ou se há espalhamento, mas este não é contado em N_I

$$N_L = N_0 e^{-\mu L}$$

SUPONDO-SE VÁRIOS PROCESSOS DE INTERAÇÃO (ainda sem espalhamento)

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \cdots$$
 Coeficiente de atenuação linear parcial

$$\frac{N_L}{N_0} = e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \cdots)L} \qquad N_L = N_0 \left(e^{-\mu_1 L} \right) \left(e^{-\mu_2 L} \right) \left(e^{-\mu_3 L} \right) \cdots$$

NÚMERO TOTAL DE INTERÇÕES POR TODOS OS PROCESSOS

NÚMERO PARCIAL DE INTERÇÕES DEVIDO A UM PROCESSO X

Fração de interações pelo processo x

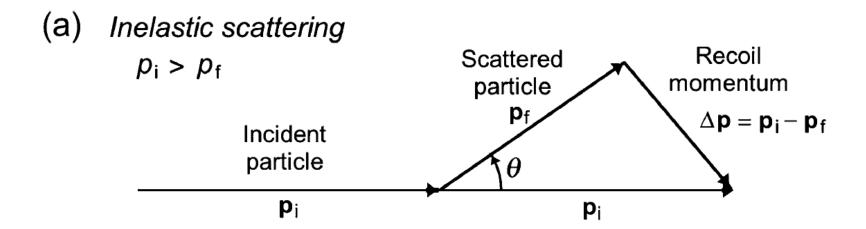
Secção de choque diferencial para interações de espalhamento

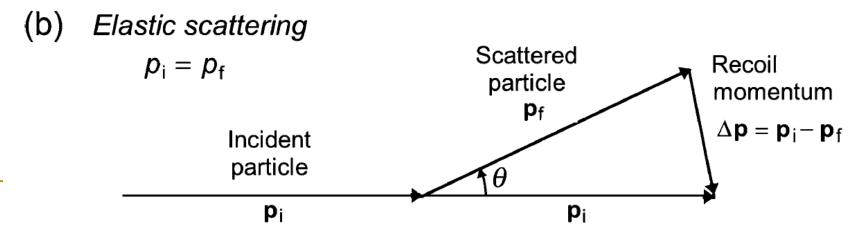
$$rac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = rac{2\pi}{\hbar} \left[\mathbf{M}_\mathrm{if}
ight|^2 \left(\rho\left(E_\mathrm{f}
ight)
ight) \stackrel{\mathrm{Densidade \ def}}{\Longrightarrow} \mathrm{estados \ final inference } \left[\mathbf{M}_\mathrm{if} = \iiint \psi_\mathrm{f}^* V \psi_\mathrm{i} \mathrm{d}\mathcal{V} \right]$$

Calculada usando a aproximação de Born:

- Ocorre somente um evento de espalhamento
- Os estados inicial e final da partícula espalhadora podem ser descritos por ondas planas

Espalhamentos elástico e inelástico



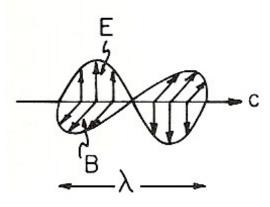


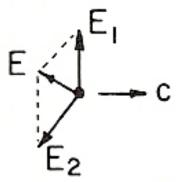
Fonte: Podgorsak, E.B – Radiation Physics for Medical Physicists, 2nd ed.

Espalhamento Inelástico Clássico (Thomson)

- Feixe de fótons (onda eletromagnética) passando perto de um elétron
 - Aceleração e irradiação de parte da energia
 - □ Secção de choque → física clássica
 - Feixe não-polarizado
 - Campos E₁ e E₂
- Utilizando a eletrodinâmica clássica podese demonstrar que

$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(1 + \cos^2 \theta \right)$$



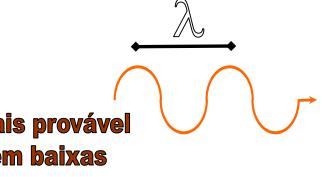


Espalhamento coerente (ou elástico ou Rayleigh)

Fenômeno cooperativo



Envolve todos os elétrons do átomo



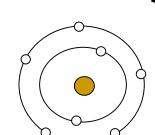
Mais provável em baixas

energias e Z alto

Probabilidades de ocorrência No tecido mole

$$E > 70 \text{ keV} \rightarrow <5\%$$

$$E \approx 30 \text{ keV} \rightarrow \approx 12\%$$



Ângulos de espalhamento pequenos

$$_{a}\sigma_{coer} \propto \left(\frac{Z}{h\nu}\right)^{2}$$

$$\frac{d\sigma_{coer}}{d\theta} = \frac{r_0^2}{2} \left(1 + \cos^2\theta \left(F(x, Z)\right)^2 2\pi sen\theta\right)$$
Fator de

$$x = \frac{sen\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda}$$
forma atômico

Fator de

Transferência de momen

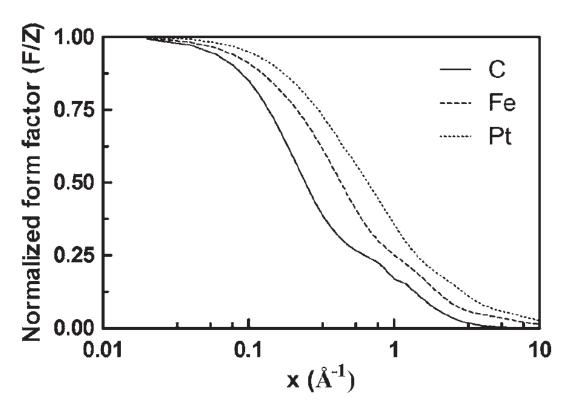


FIG. 2.3. Variation of the normalized form factor F/Z for coherent scattering with the momentum transfer parameter x. Values are shown for carbon (C), iron (Fe) and platinum (Pt) (data from Ref. [2.1]).

Espalhamento Compton

 Aplicando-se os princípios de conservação de momento e energia pode-se demonstrar que

$$E = h v \frac{\alpha(1 - \cos \theta)}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

$$hv$$

$$hv' = \frac{hv}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

$$hv$$

$$P = hv/c$$

$$hv' = \frac{hv}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

onde
$$\alpha = \frac{hv}{m_0c^2} = \frac{hv(\text{em keV})}{511}$$
 $\cot \phi = (1+\alpha)tg\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Espalhamento Compton

- Secção de choque para o espalhamento Compton
 - Equação de Klein-Nishina (1928) [cm² sr-¹/elétron]
 - Aplicação da teoria quântica relativística de Dirac (1927)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \frac{r_e^2}{2} \frac{1 + \cos^2\theta}{\left[1 + \alpha(1 - \cos\theta)\right]^2} \left\{1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{\left(1 + \cos^2\theta\right)\left[1 + \alpha(1 - \cos\theta)\right]}\right\}$$

$$\frac{\alpha \to 0}{h v' \approx h v}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \to \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Th} \to \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2\theta)$$

$$\frac{\theta \to 0}{h v' \approx h v}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \rightarrow r_e^2$$

Efeito Fotoelétrico Prêmio Nobel 1921 fóton elétron $h\nu = K + K_{at} + B \cong K + B$ $\vec{p}_{foton} = \vec{p} + \vec{p}_{at}$

Radiação característica

- •Toda a energia incidente é transferida
- ·lonização do átomo
 - ·Vacância de um elétron da camada interna
 - •Ocorre uma cascata de elétrons para preencher a vacância e retornar ao equilíbrio
 - •Emissão de raios X característicos ou elétrons Auger

fóton

Um elétron livre não pode absorver um fóton Vão há conservação de moment

Não há conservação de momento e energia simultaneamente

elétron

Energia de ligação do elétron orbital

$$h \nu \geq E_b$$

$$T = h \nu - E_b$$

$$\sigma_{fotoel\acute{e}tr\acute{c}o} = \tau \Longrightarrow h \, \nu \cong E_b$$
 máxima

Radiação característica

Processo dominante em baixas energias

< 50 keV para Al e < 500 keV para Pb Depende do Z do material

$$E_b^K \approx Ry(Z-1)^2 \text{ [eV]}$$

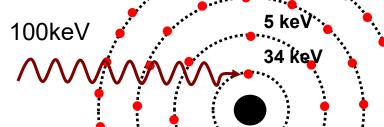
$$E_b^L \approx \frac{1}{4}Ry(Z-5)^2 \text{ [eV]}$$

$$E_b^M = \frac{1}{4}Ry(Z-12)^2 \text{ [eV]}$$

$$E_b^M \approx \frac{1}{9} Ry(Z - 13)^2 \quad [eV]$$

$$\sim 0$$

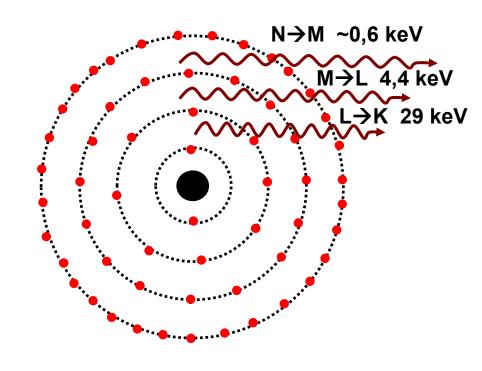
$$0.6 \text{ keV}$$



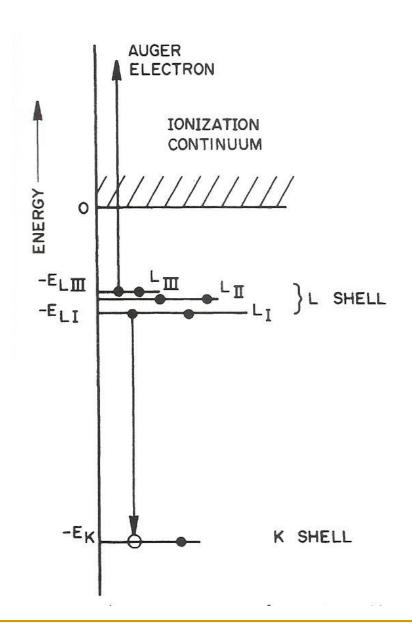


$$Z = 53$$

$$T = h v - E_b$$
$$= 100 - 34 = 66keV$$



- Em materiais de baixo Z pode ocorrer emissão de elétrons Auger
- Compete com a emissão de raios X característicos



- Probabilidade de ocorrência
 - Não há expressão analítica para a seção de choque
 - Como
 - Cada átomo tem Z elétrons
 - Número de elétrons/grama é ± independente de Z

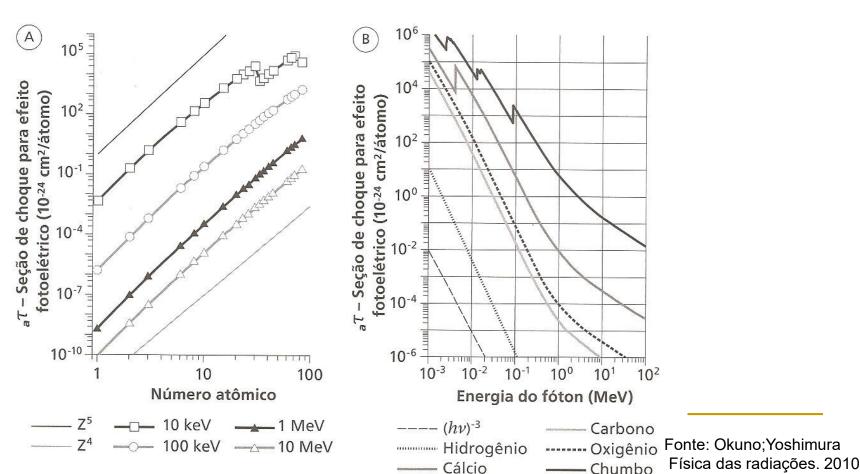
- Para uma dada energia
 - Cálcio: Z=20
 - lodo: Z=53
 - Probabilidade: (53/20)³ = 18,6
- A probabilidade de interação fotoelétrica com o iodo é 18,6 vezes maior que com o cálcio em uma mesma energia

$$\tau \propto \frac{Z^n}{(h\nu)^{3.5}} \qquad 4 \leq n \leq 5$$

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right) \propto \frac{Z^{n-1}}{(h\nu)^{3,5}}$$

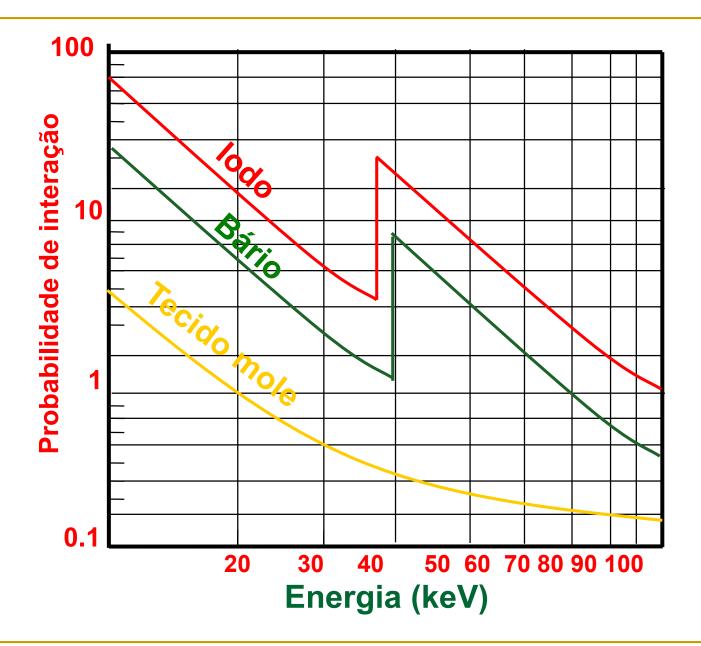
LITERATURA
$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right) \propto \frac{Z^3}{(h v)^3}$$

Forte dependência com o número atômico e com a energia incidente



- Chumbo

- Descontinuidades nas curvas
 - Aumento da probabilidade de absorção nas energias correspondentes às energias de ligação dos elétrons
 - Mais pronunciada → borda K
 - Responsável por cerca de 4/5 dos eventos fotoelétricos em átomos de Z alto
 - Efeito quase ressonante entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron
 - Aplicação
 - Contraste radiográfico



- Responsável pelo contraste nas imagens
 - Mais intenso em baixas energias
 - Se dobramos a energia incidente, a probabilidade de ocorrência cai ~8 vezes → (1/2)³ = 1/8
 - Efeito da interação com elétrons da camada-K
 - Tecido mole (H,C,N,O)
 - < 1keV</p>
 - Meios de contraste
 - \Box I (Z=53) \rightarrow 34 keV
 - □ Ba (Z=56) → 37 keV





