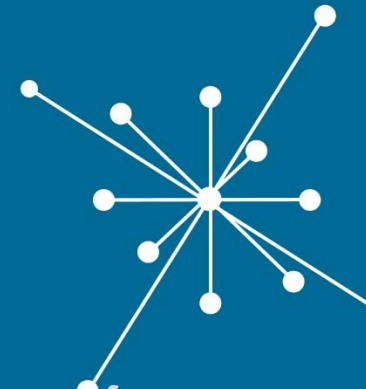


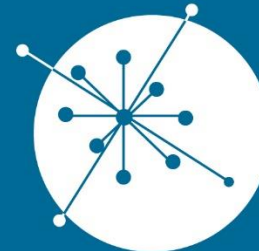


Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Parte 1

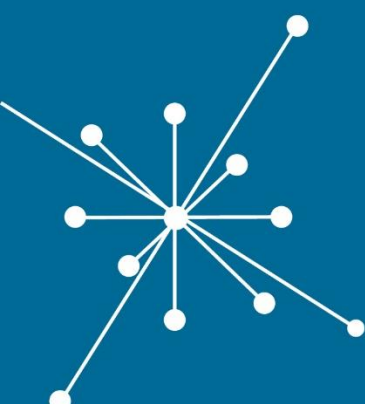
FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa



GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP



FÍSICA DAS RADIAÇÕES I (4300437) 1º semestre/2017

IPO DE
SIMETRIA
S RADIAÇÕES
SICA MÉDICA

de Física da USP

Terças	Aula	Temas/Provas/Recessos	Sextas	Aula	Temas/Provas/Recessos
06/03	1	Apresentação/Radiação	10/03	2	Raios X
13/03	3	Raios X	17/03	4	Radioisótopos
20/03	5	Desintegração	24/03	6	Decaimentos
27/03	7	Interação-partíc. carregadas	31/03	8	Interação-partíc. carregadas
03/04	9	Interação-partíc. carregadas	07/04	10	Dose absorvida
10/04		Semana santa. Não haverá aulas	14/04		Semana santa. Não haverá aulas
17/04		P1	21/04		FERIADO
24/04	11	Interação-part. sem carga	28/04	12	Interação-part. sem carga
01/05	16	FERIADO	05/05	13	Interação-part. sem carga
08/05	14	Interação-part. sem carga	12/05	15	Grandezas e Unidades
15/05	16	Grandezas e Unidades/Efeitos Biológicos	19/05	17	Efeitos Biológicos
22/05		Não Haverá Aula (Viagem do Professor)	26/05		Não Haverá Aula (Viagem do Professor)
29/05		Não Haverá Aula (Viagem do Professor)	02/06		P2
05/06	18	Dose absorvida e teoria de Bragg-Gray	09/06	19	Dose absorvida e teoria de Bragg-Gray
12/06	20	Método Monte Carlo	16/06		FERIADO
19/06	21	Detectors de radiação	23/06	22	Proteção radiológica/ Blindagens
26/06		P3	30/06		SUB



**QUAIS OS PRINCIPAIS MECANISMOS
DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA ?**

**COMO ESSES MECANISMOS SE
COMPORTAM EM FUNÇÃO DA ENERGIA
INCIDENTE E DO NÚMERO ATÔMICO DO MATERIAL ?**



**RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA**

NÃO-IONIZANTE

$E < 12,42 \text{ eV}$

- UV A, B e C
- Visível
- Infra-vermelho
- Microondas
- Ondas de rádio
- etc.

IONIZANTE

$E \geq 12,42 \text{ eV}$

- Raios X
- Radiação gama

Conceitos básicos

Lei do inverso do quadrado
da distância (fonte puntual)



$$\Phi \propto \frac{1}{r^2}$$

Secção
de choque



P.I. de
Heisenberg



Probabilidade
de interação



$$\frac{d\sigma(E, \Omega)}{d\Omega}$$



$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$

Leis de
conservação



Energia



$$E_{\text{repouso}} + T = \text{constante}$$



Momento

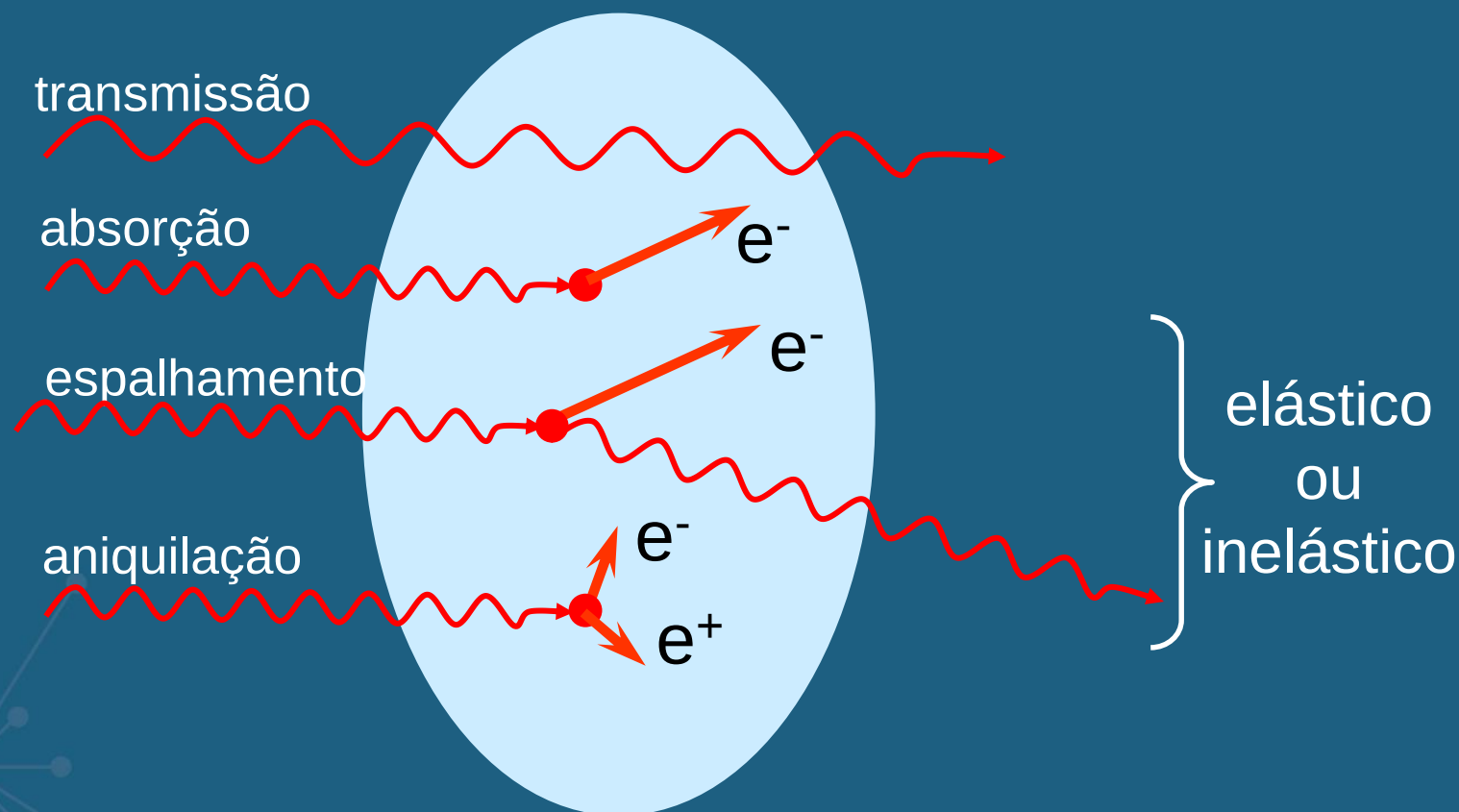


$$\sum \vec{p}_{\text{inicial}} = \sum \vec{p}_{\text{final}}$$

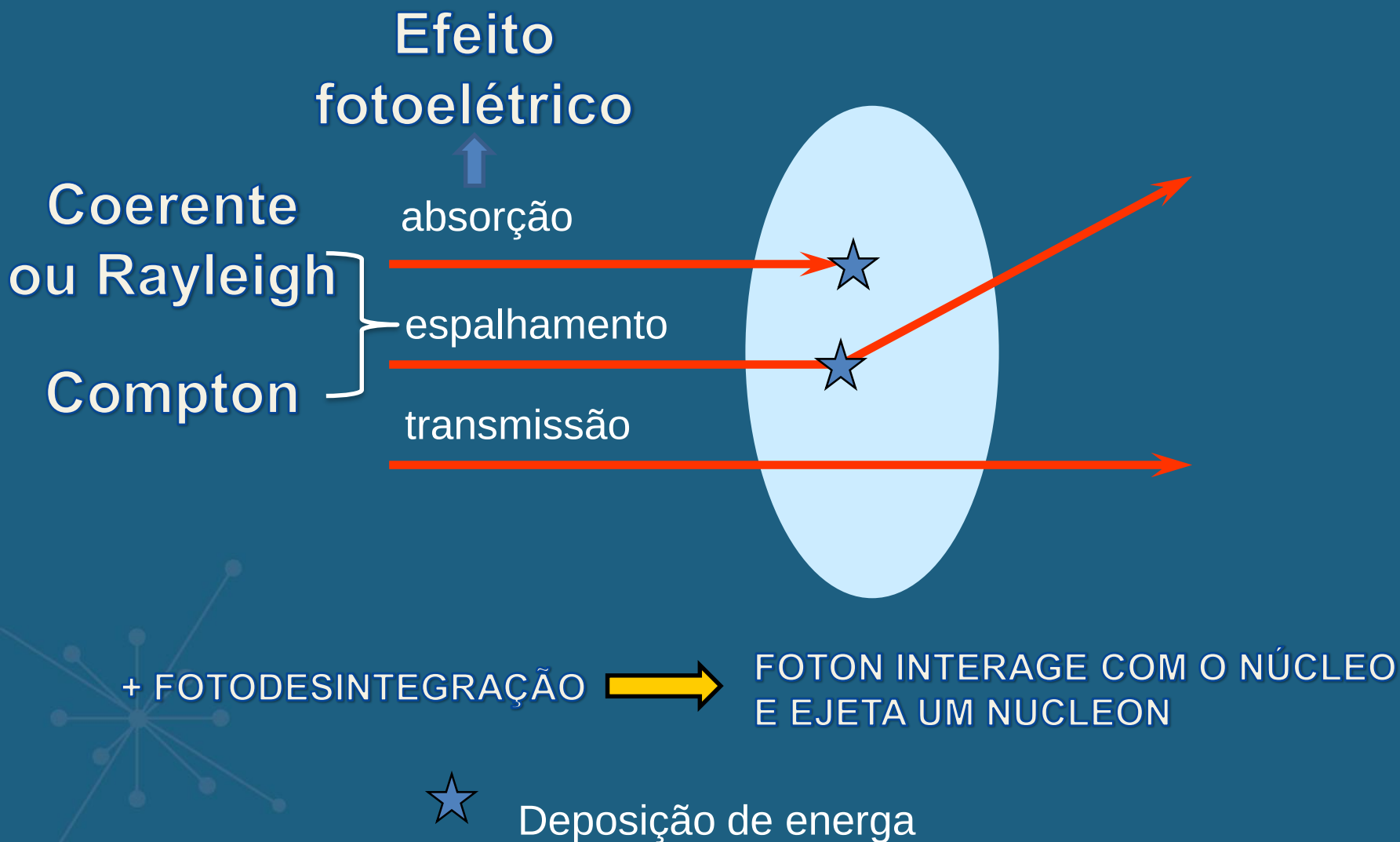


Carga

Interação de fótons com a matéria



Radiação indiretamente ionizante: fótons



Interação de fótons com a matéria

- Penetração de fótons na matéria
 - Atenuação
 - Remoção de fótons de um feixe de radiação
 - Absorção
 - Espalhamento
 - Coeficiente de atenuação linear
 - Fração dos fótons de uma dada energia removidos de um feixe de radiação x ou γ por unidade de espessura do material (μ) – $[\text{cm}^{-1}]$
 - Probabilidade de interação do fóton
 - $\mu \rightarrow$ Secção de choque macroscópica

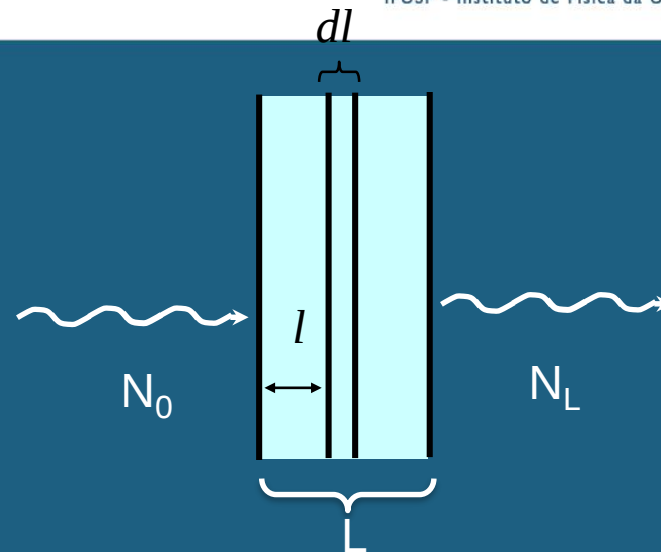
Coeficientes de atenuação

N_0 muito grande

Caso ideal sem espalhamento

μ – probabilidade de interação
por unidade de espessura

μdl – probabilidade de interação
na espessura infinitesimal dl



Para N partículas incidentes:

$$dN = -\mu N dl$$

Variação fracional de N
devido à absorção em dl :

$$\frac{dN}{N} = -\mu dl$$

Coeficientes de atenuação

integrando:

$$\int_{N=N_0}^{N_L} \frac{dN}{N} = - \int_{l=0}^L \mu dl$$

$$\ln(N_L) - \ln(N_0) = \ln\left(\frac{N_L}{N_0}\right) = -\mu L$$

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

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

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

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots$$

Coeficiente de atenuação linear parcial

$$\frac{N_L}{N_0} = e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots)L}$$

$$N_L = N_0 \left(e^{-\mu_1 L} \right) \left(e^{-\mu_2 L} \right) \left(e^{-\mu_3 L} \right) \dots$$

NÚMERO TOTAL
DE INTERÇÕES
POR TODOS OS
PROCESSOS

$$\Rightarrow \Delta N = N_0 - N_L = N_0 - N_0 e^{-\mu L} = N_0 (1 - e^{-\mu L})$$

NÚMERO PARCIAL
DE INTERÇÕES
DEVIDO A UM
PROCESSO x

$$\Rightarrow \Delta N_x = (N_0 - N_L) \frac{\mu_x}{\mu} = N_0 (1 - e^{-\mu L}) \frac{\mu_x}{\mu}$$

Fração de interações
pelos processo x

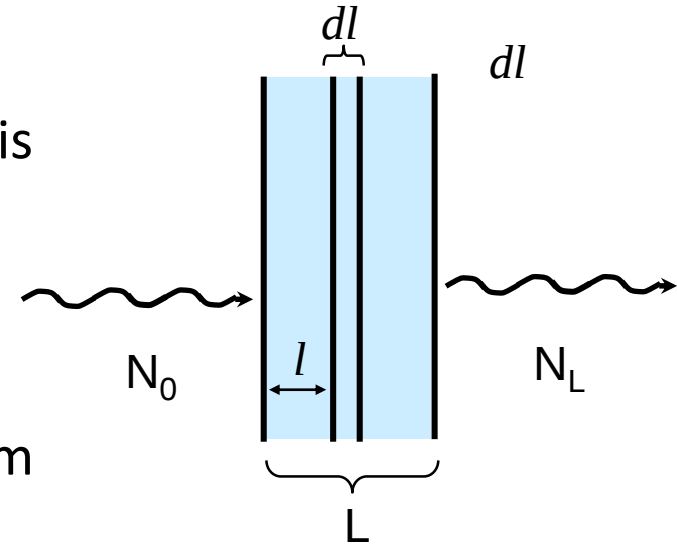
- Exemplo

- Coeficientes de atenuação parciais de dois processos

- $\mu_1 = 0,02 \text{ cm}^{-1}$ e $\mu_2 = 0,04 \text{ cm}^{-1}$

- $L = 5 \text{ cm}$ e $N_0 = 10^6$ fótons

- $N_L = ?$ e quantos fótons são absorvidos em cada processo?



$$N_L = N_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2)L} = 10^6 \times e^{-(0,02 + 0,04)5} = 7.408 \times 10^5$$

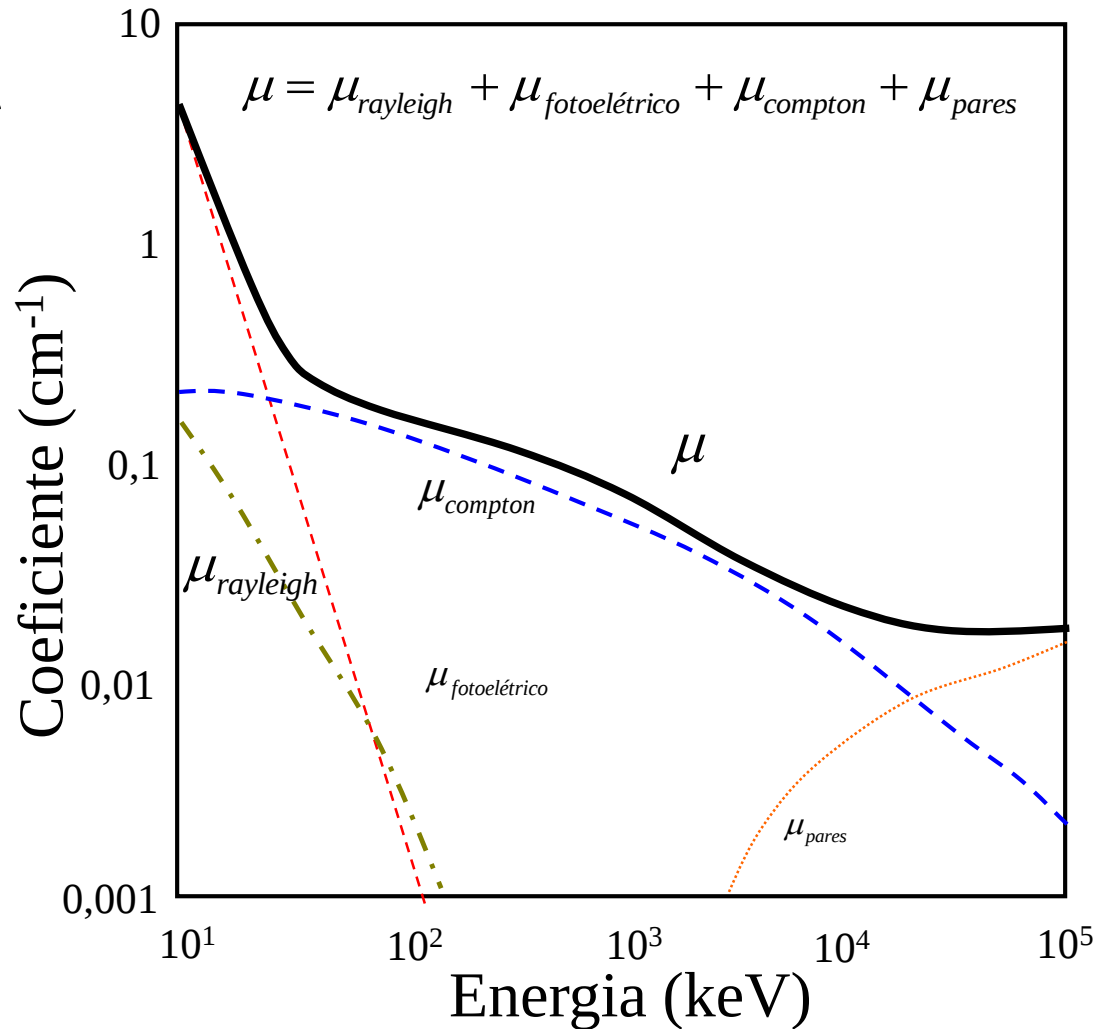
$$N_0 - N_L = (10^6 - 7,408 \times 10^5) = 2,592 \times 10^5$$

$$\Delta N_1 = (N_L - N_0) \frac{\mu_1}{\mu} = 2,592 \times 10^5 \times \frac{0,02}{0,06} = 8,64 \times 10^4$$

$$\Delta N_2 = (N_L - N_0) \frac{\mu_2}{\mu} = 2,592 \times 10^5 \times \frac{0,04}{0,06} = 1,73 \times 10^5$$

Coeficientes de interação

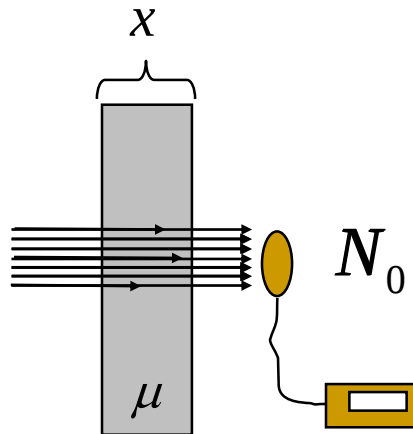
para a
água



Fonte: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>

Coeficientes de interação

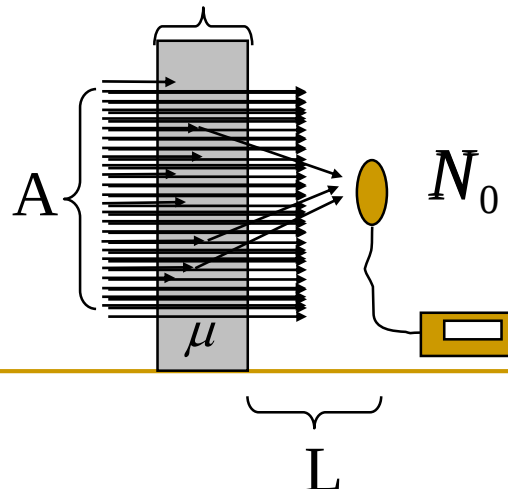
Feixe estreito
(boa geometria)



$$N_e = N_0 e^{-\mu x}$$

$$N_l > N_e$$

Feixe largo
(má geometria)



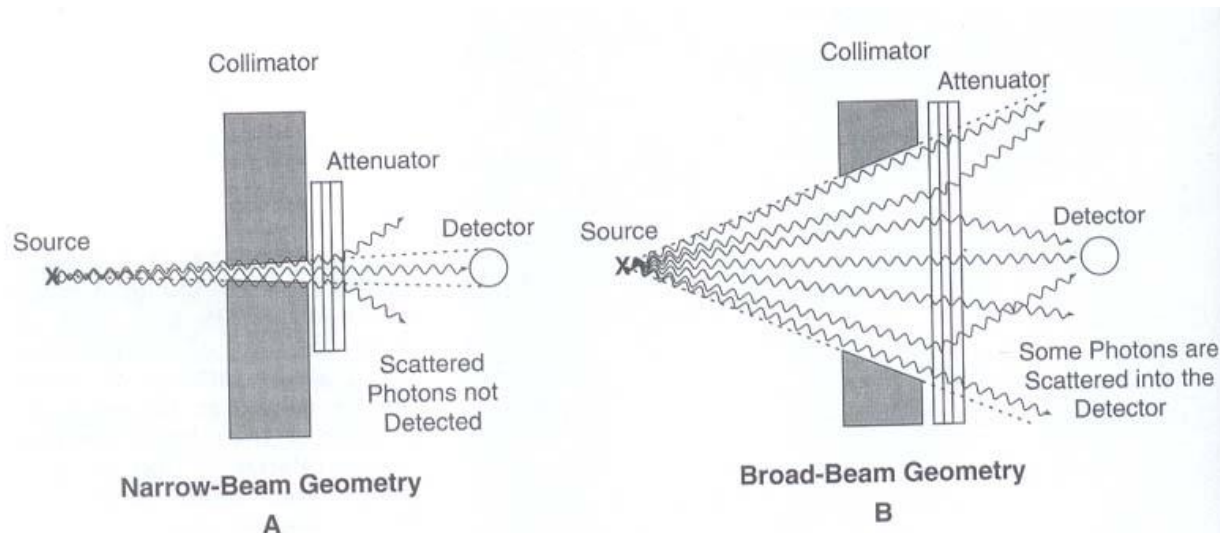
$$N_l = B N_0 e^{-\mu x}$$



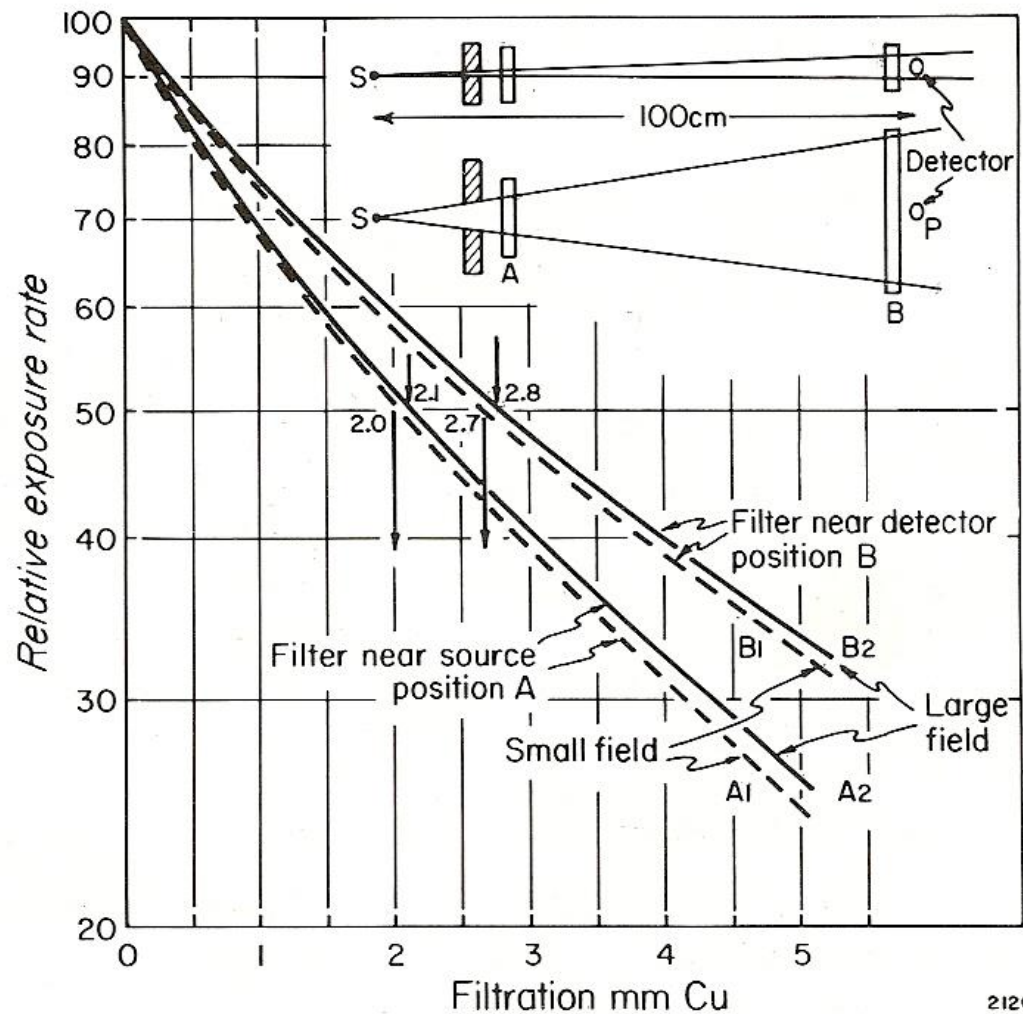
$$f(x, h\nu, A, L)$$

Camada semi-redutora

- Espessura de material necessária para reduzir a intensidade do feixe à metade
 - Medida indireta da qualidade do feixe
 - Medidas realizadas em feixe estreito



Camada semi-redutora



2126

Camada semi-redutora

- Para fótons monoenergéticos sob condições de feixe estreito
 - Probabilidade de atenuação é a mesma para cada HVL adicionado

$$redução = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

n = número de HVL's adicionados

- Exemplo: transmissão através de 5 HVL's de material
 - $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = (\frac{1}{2})^5 = 0,031$ ou 3,1%
 - Ou seja, 97% dos fótons são atenuados

Camada semi-redutora

■ Energia efetiva

- Em radiologia – feixes polienergéticos
- HVL – maneira de determinar a qualidade do feixe
- E_{ef} de um feixe polienergético é a energia que teria um feixe monoenergético com mesmo HVL

$$HVL = \frac{0,693}{\mu(E_{ef})}$$

HVL (mm Al)	Effective Energy (keV)
0.26	14
0.39	16
0.55	18
0.75	20
0.98	22
1.25	24
1.54	26
1.90	28
2.27	30
3.34	35
4.52	40
5.76	45
6.97	50
9.24	60
11.15	70
12.73	80
14.01	90
15.06	100

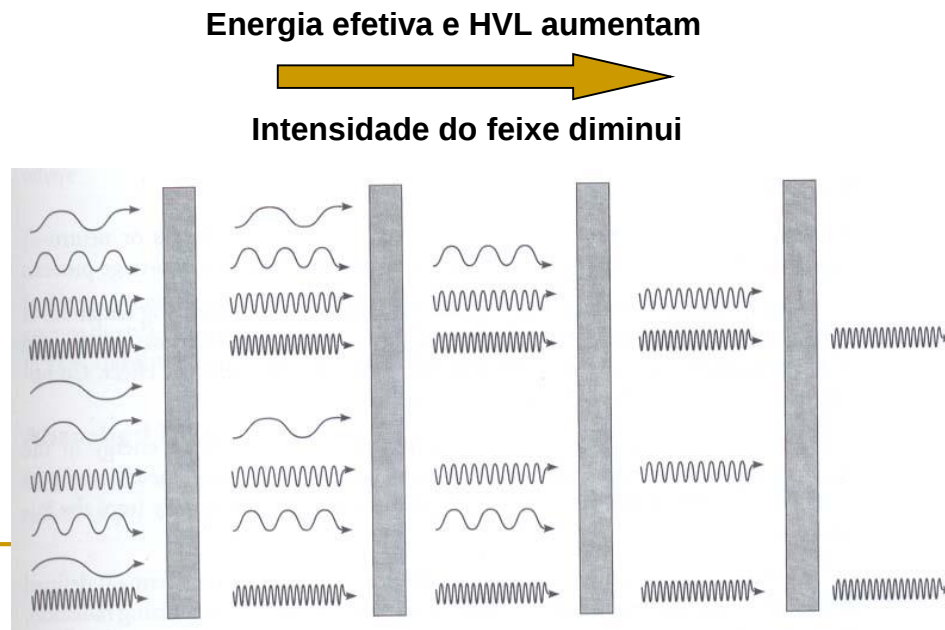
Al, aluminum.

Camada semi-redutora

■ Endurecimento do feixe

- ❑ Fótons de baixa energia em um feixe polienergético têm maior probabilidade de interação que fótons de alta energia
- ❑ Coeficiente de homogeneidade

$$CH = \frac{1o.HVL}{2o.HVL}$$



Seções de Choque

Probabilidade de ocorrência
de uma reação ou interação

Seção de
Choque ou
Seção
Eficaz

Tem dimensões de área

Área que cada átomo/núcleo/elétron
apresenta ao feixe

Seção de
Choque
Total por
Átomo

$$\frac{a\sigma}{\text{área total do alvo atingida pelo feixe}}$$

Número
Total de
Interações

$$\Delta N = a\sigma \frac{N_{\text{feixe}}}{A_{\text{feixe}}} N_{\text{alvo}}$$

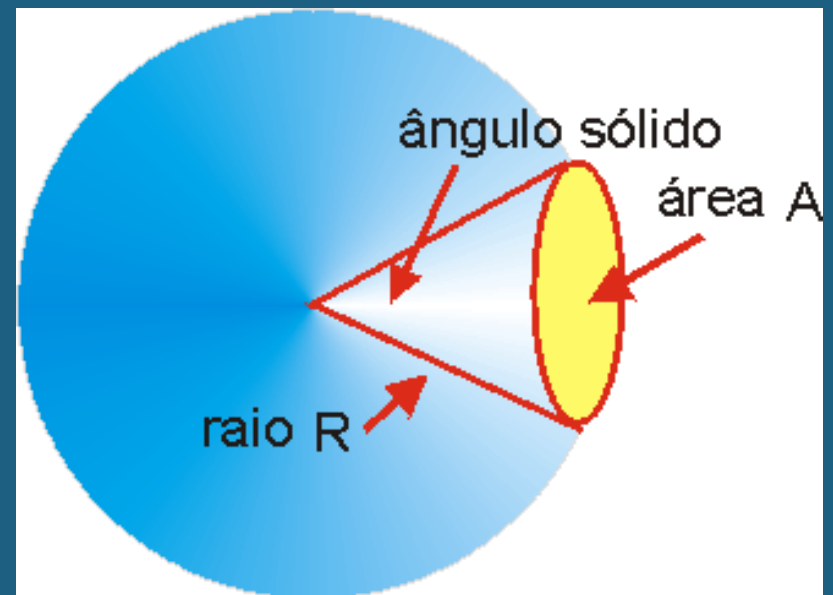
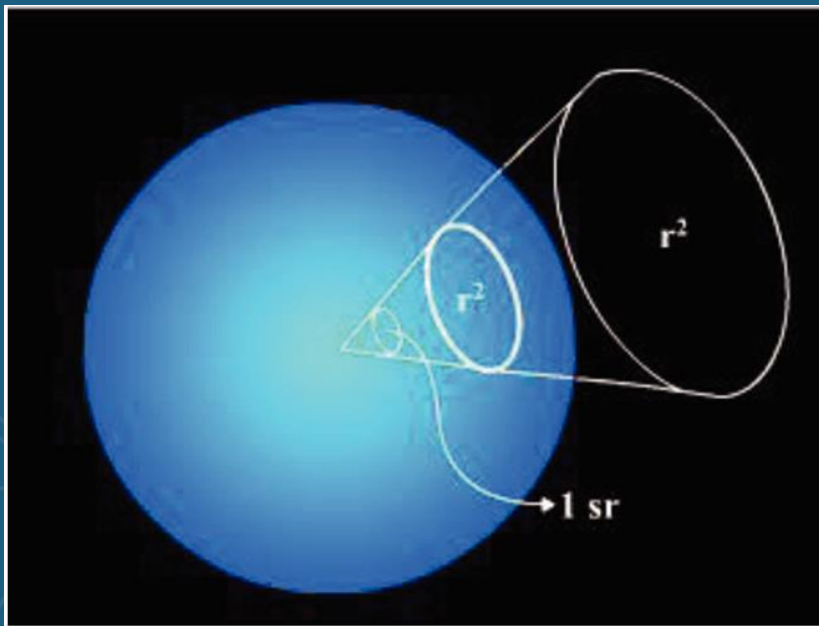
Número de partículas no feixe

Número de átomos no alvo
Coberto pela área do feixe

Ângulo sólido

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad \text{Sr – esferorradiano ou esterradiano}$$

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$$



Seções de Choque

$$1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

**Seção de
Choque
Diferencial
em ângulo**

$$\frac{d {}_a\sigma_{\Omega}}{d\Omega} = \frac{\text{número de partículas espalhadas
ou emitidas no intervalo de
ângulo sólido } [\Omega, \Omega + d\Omega]}{N_{\text{feixe}} N_{\text{alvo}}}$$

**Seção de
Choque
Diferencial
em energia**

$$\frac{d {}_a\sigma_E}{dE} = \frac{\text{número de partículas espalhadas
ou emitidas no intervalo de
energias entre } [E, E + dE]}{N_{\text{feixe}} N_{\text{alvo}}}$$

$${}_a\sigma = \iint \frac{d {}_a\sigma_{\Omega}}{d\Omega} \sin\theta d\theta d\phi$$

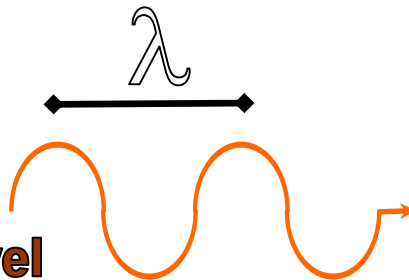
$${}_a\sigma = \int \frac{d {}_a\sigma_E}{dE} dE$$

Espalhamento coerente (ou elástico ou Rayleigh)

Fenômeno cooperativo



Envolve todos os elétrons do átomo



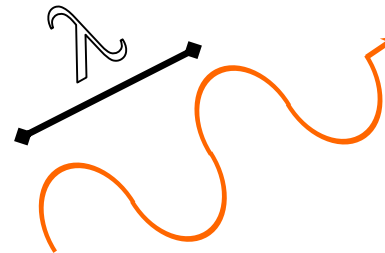
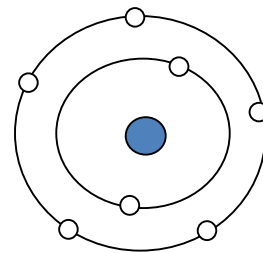
Mais provável em baixas energias e Z alto

Probabilidades de ocorrência

No tecido mole

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

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



Ângulos de espalhamento pequenos

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

$$\frac{d\sigma_{coer}}{d\theta} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) [F(x, Z)]^2 2\pi \sin \theta$$

Fator de forma atômico



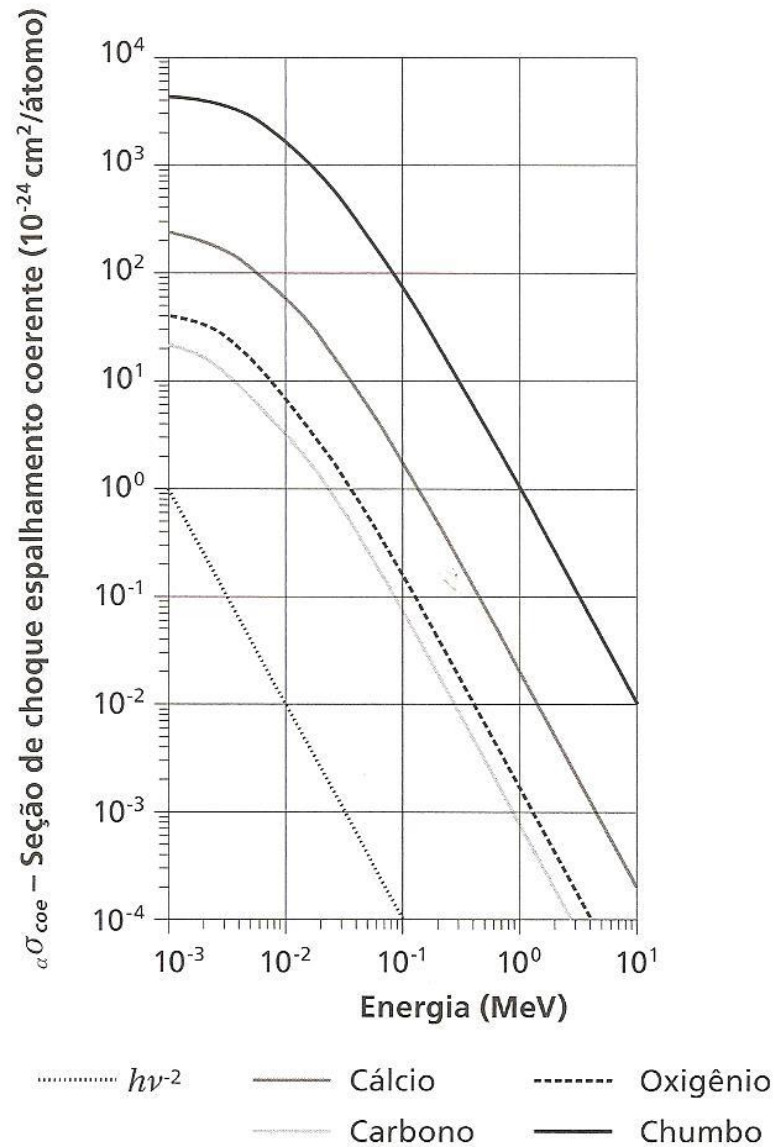
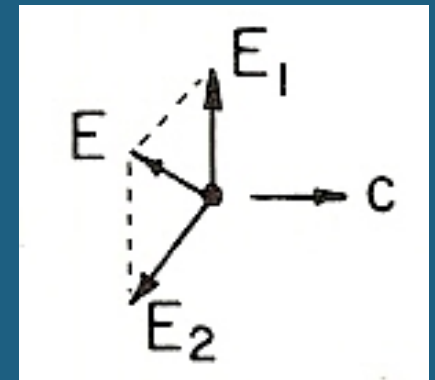
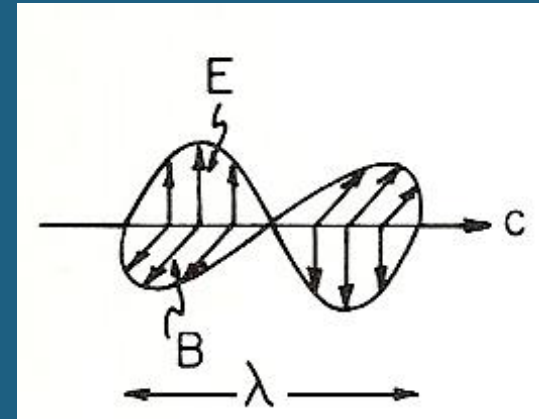


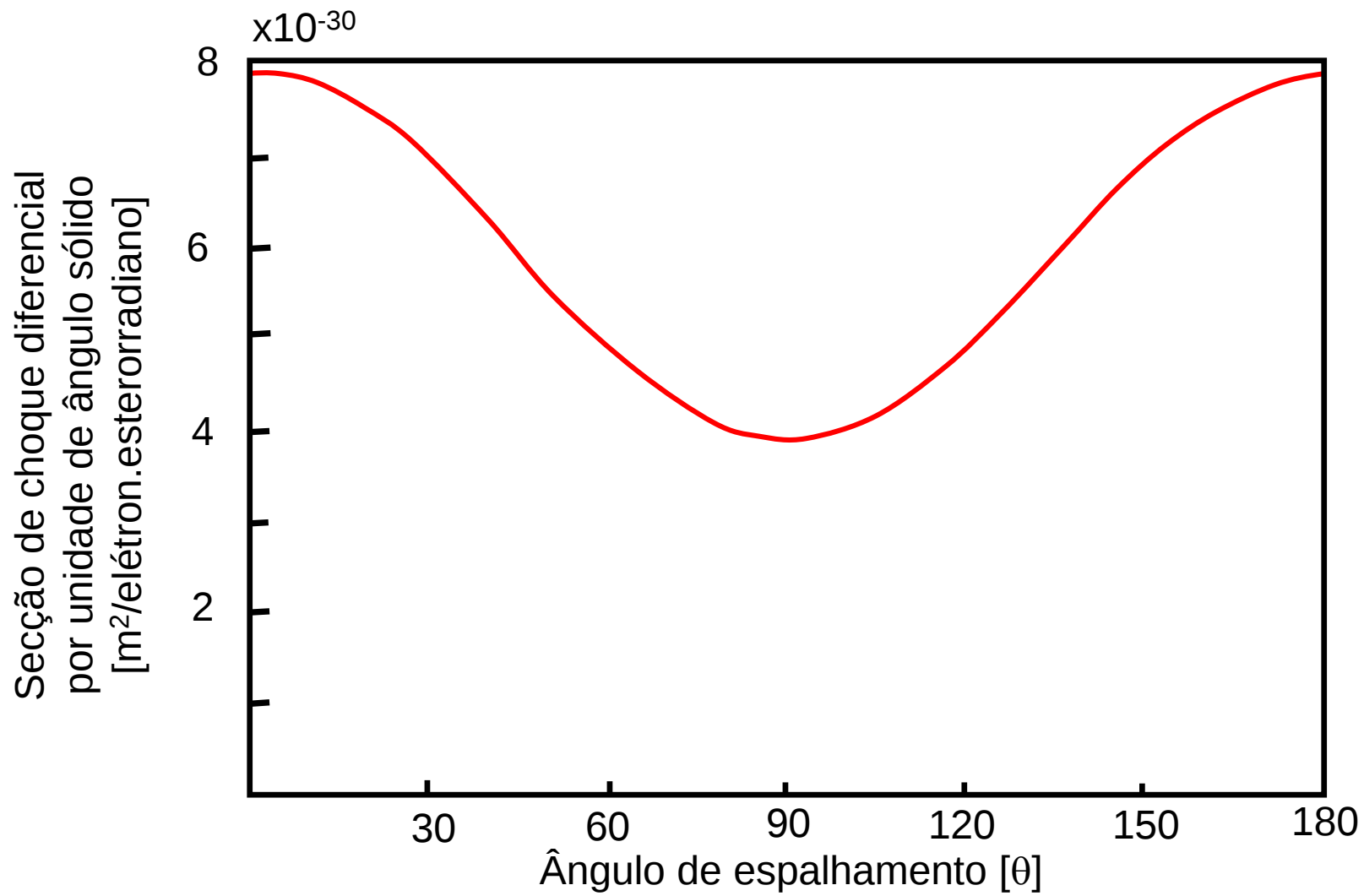
Fig. 8.1 Seção de choque para espalhamento coerente para alguns átomos. A reta em linha pontilhada indica variação com potência (-2) de $h\nu$. Valores obtidos a partir da base de dados XCOM (Berger et al., 2010b)

Espalhamento Inelástico Clássico (Thomson)

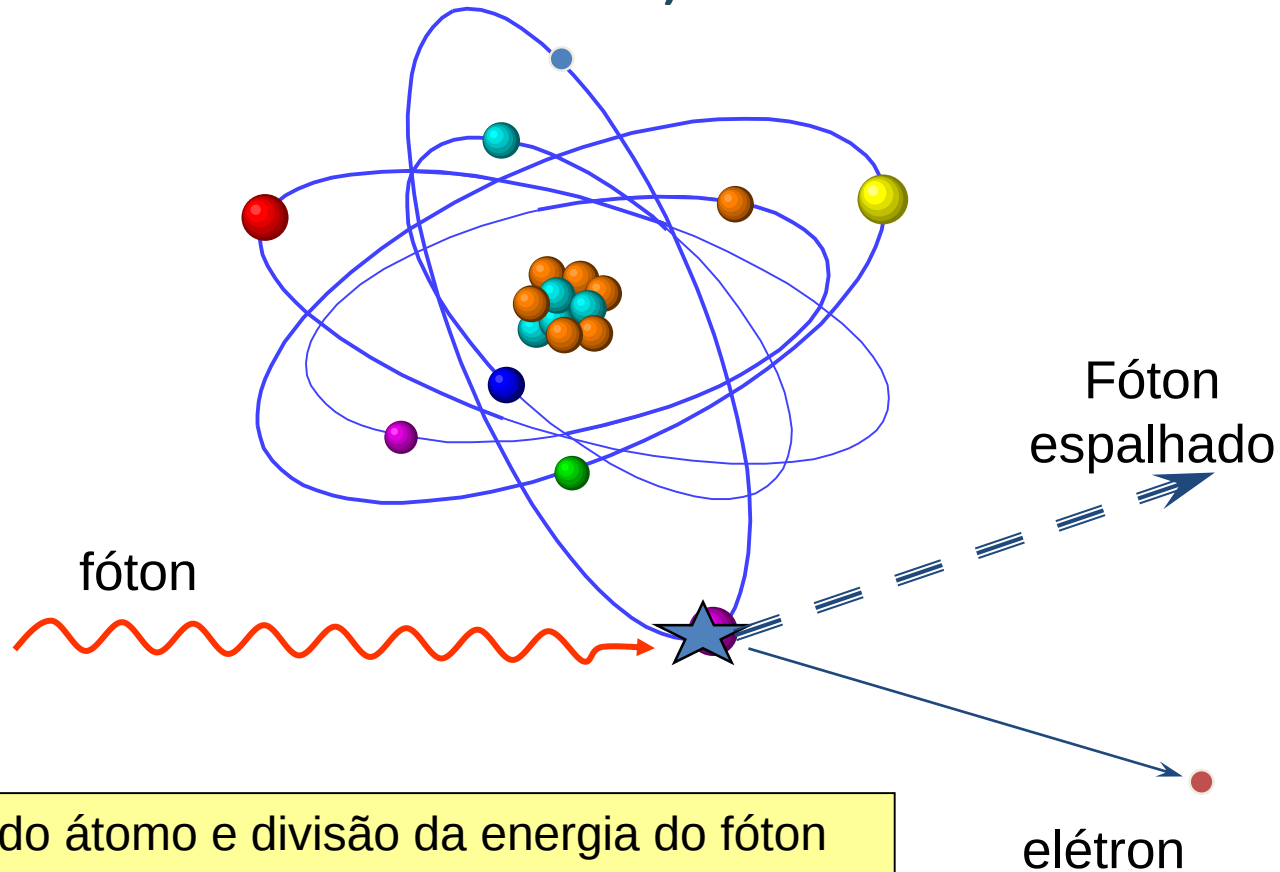
- Feixe de fótons (onda eletromagnética) passando perto de um elétron
 - Aceleração e irradiação de parte da energia
 - Secção de choque → física clássica
 - Feixe não-polarizado
 - Campos E_1 e E_2
- Utilizando a eletrodinâmica clássica pode-se demonstrar que

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





Efeito Compton (inelástico ou incoerente)



Ionização do átomo e divisão da energia do fóton incidente

Elétron ejetado inicialmente em repouso

Fóton espalhado

Há transferência de energia para o elétron

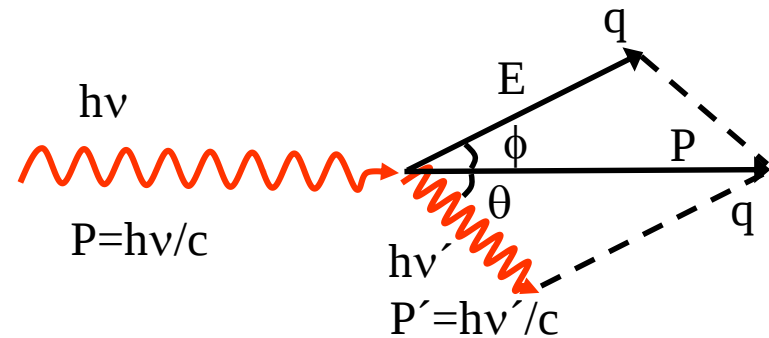
Elétron livre ou fracamente ligado ($h\nu \gg Be$)

Espalhamento Compton

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

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

$$\text{onde } \alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2} = \frac{h\nu(\text{em keV})}{511}$$



$$\cot \phi = (1 + \alpha) \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

Espalhamento Compton

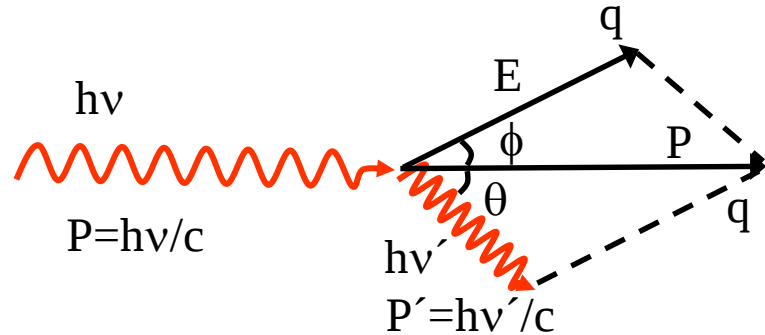
– Exercício

– Choque frontal

$$\theta \approx 180^\circ \quad \phi \approx$$

$$E_{\text{max}} \approx$$

$$h\nu'_{\text{min}} \approx$$



– Choque leve

$$\theta \approx 0 \quad \phi \approx$$

$$E \approx$$

$$h\nu' \approx$$

distribuição angular

$$0 \leq \theta \leq 180^\circ$$

$$.... \leq \phi \leq$$

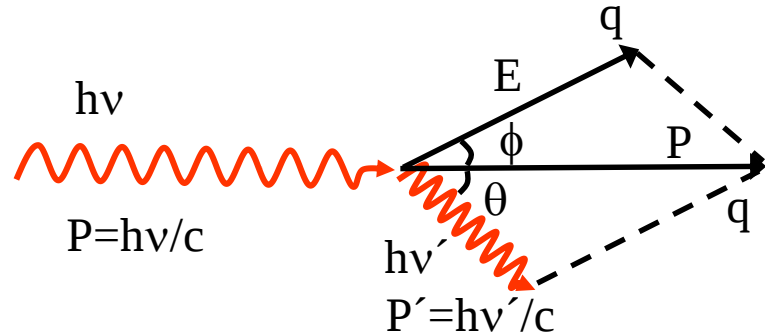
Espalhamento Compton

– Choque frontal

$$\theta \approx 180^\circ \quad \phi \approx 0$$

$$E_{\max} \approx h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$$

$$h\nu'_{\min} \approx h\nu \frac{1}{1+2\alpha}$$



– Choque leve

$$\theta \approx 0 \quad \phi \approx 90^\circ$$

$$E \approx 0$$

$$h\nu' \approx h\nu$$

distribuição angular

$$0 \leq \theta \leq 180^\circ$$

$$0 \leq \phi \leq 90^\circ$$

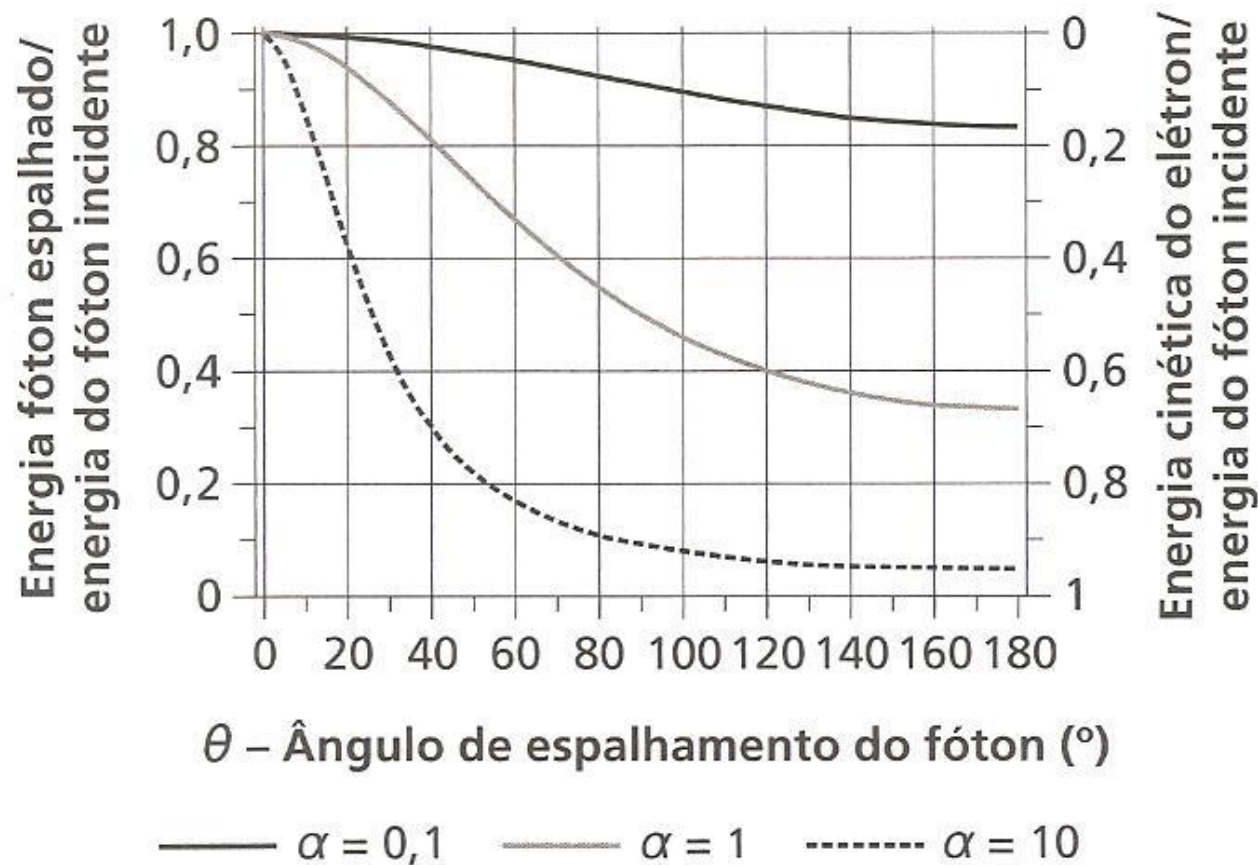


Fig. 8.3 Razão entre a energia do fóton espalhado por efeito Compton e a do fóton incidente, em função do ângulo de espalhamento, para três energias de fótons (51,1 keV, 511 keV e 5,11 MeV). Na escala à direita estão os valores da fração da energia do fóton que é transferida como energia cinética ao elétron

Espalhamento Compton

- Secção de choque para o espalhamento Compton
 - Equação de Klein-Nishina (1928) [$\text{cm}^2 \text{sr}^{-1}/\text{elétron}$]
 - Aplicação da teoria quântica relativística de Dirac (1927)

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

$$\alpha \rightarrow 0$$
$$h\nu' \approx h\nu$$



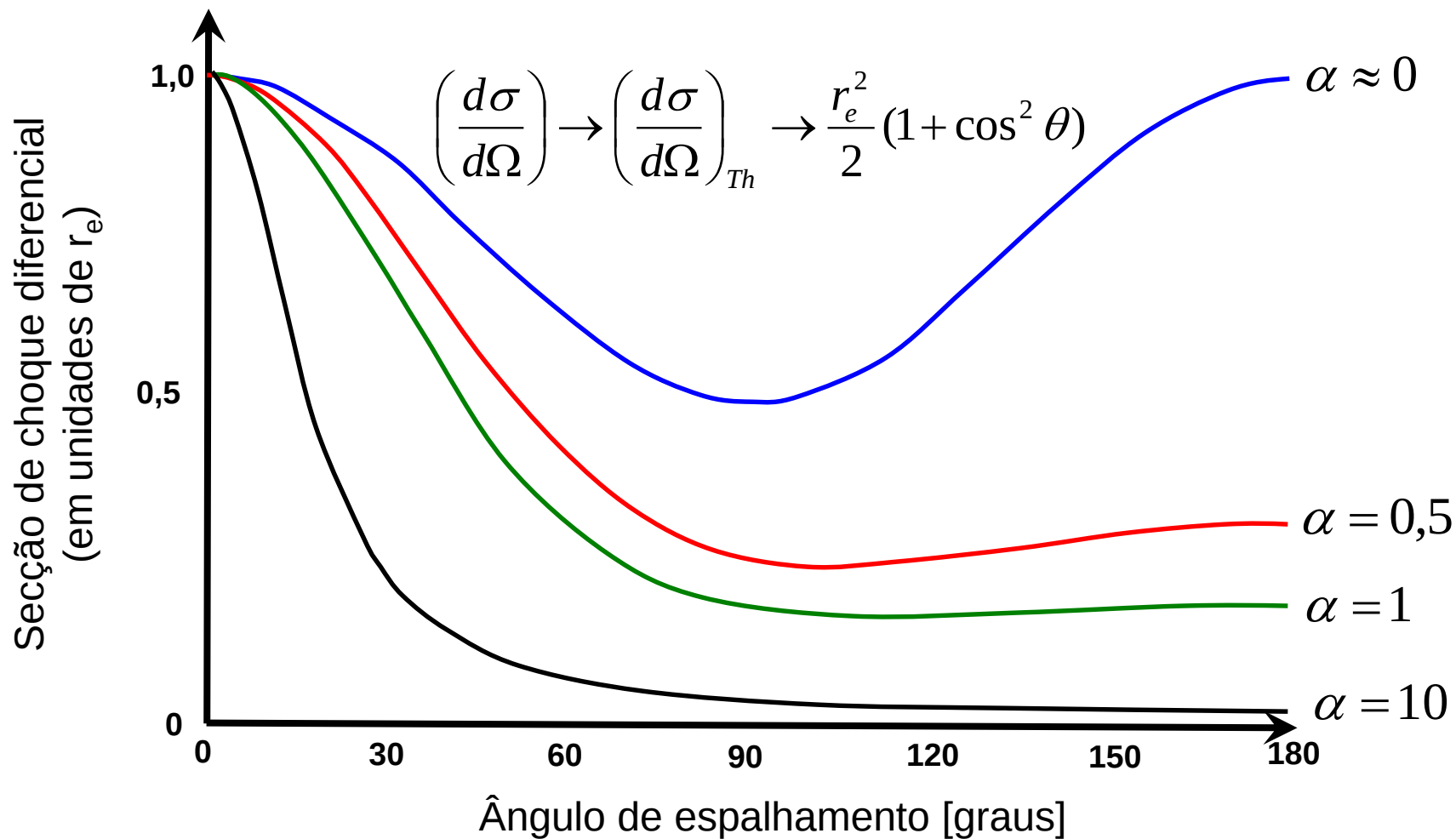
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \rightarrow \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Th} \rightarrow \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2 \theta)$$

$$\theta \rightarrow 0$$
$$h\nu' \approx h\nu$$

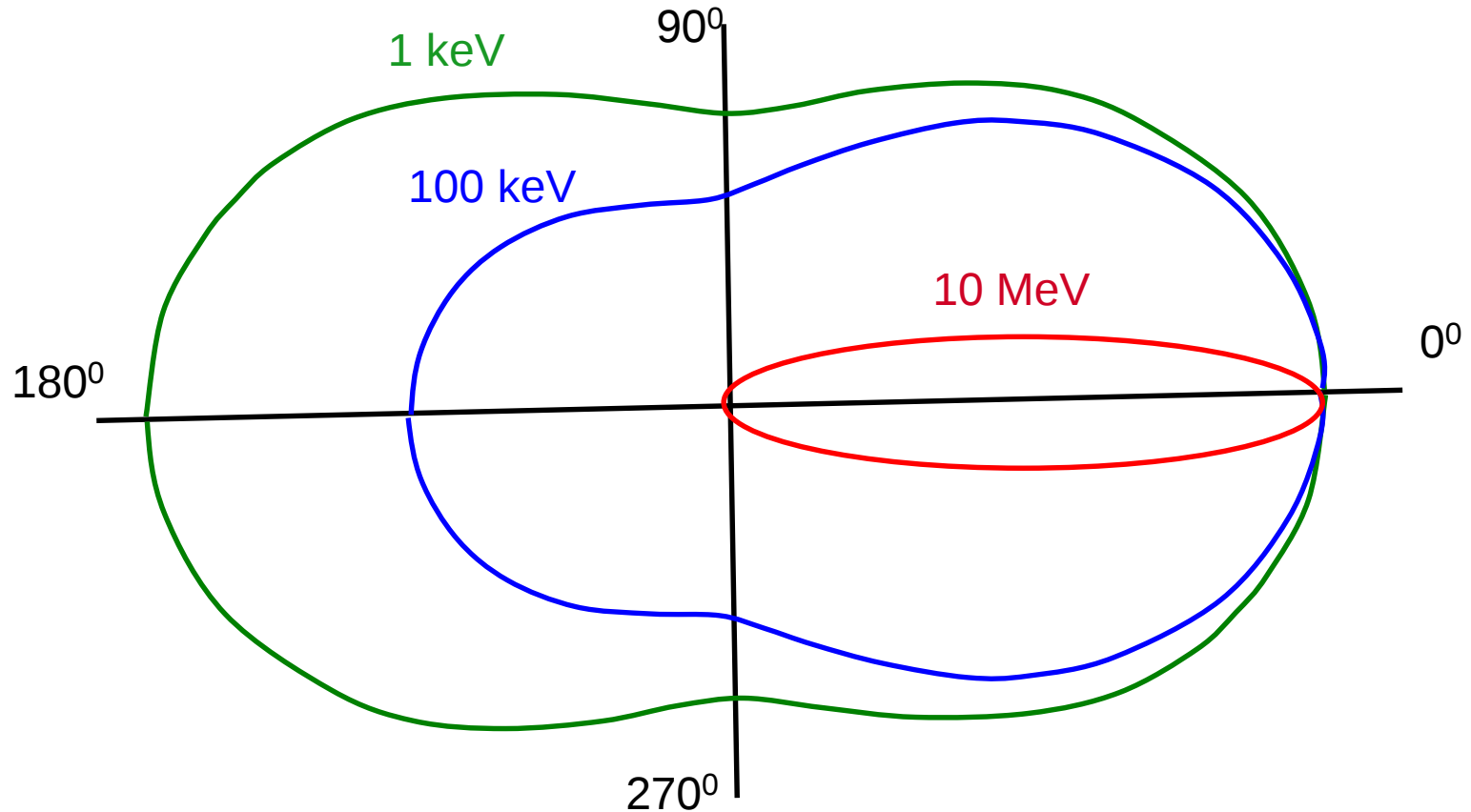


$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) \rightarrow r_e^2$$

Espalhamento Compton



Espalhamento Compton



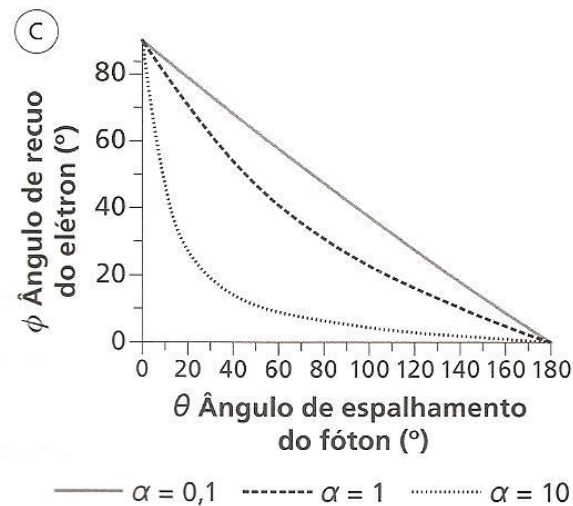
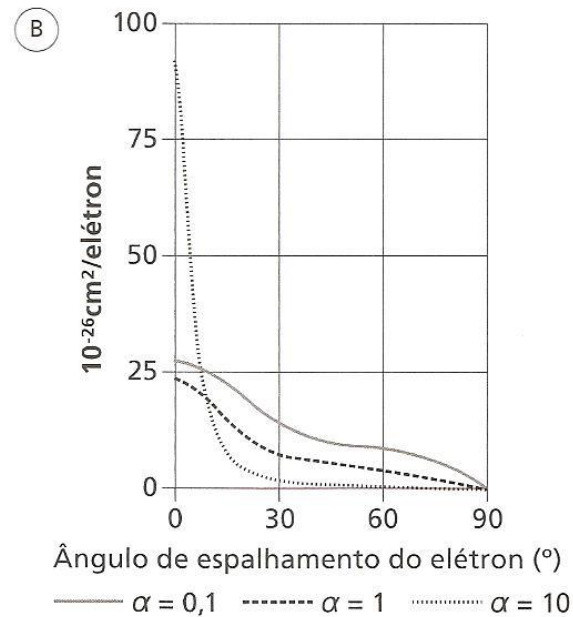
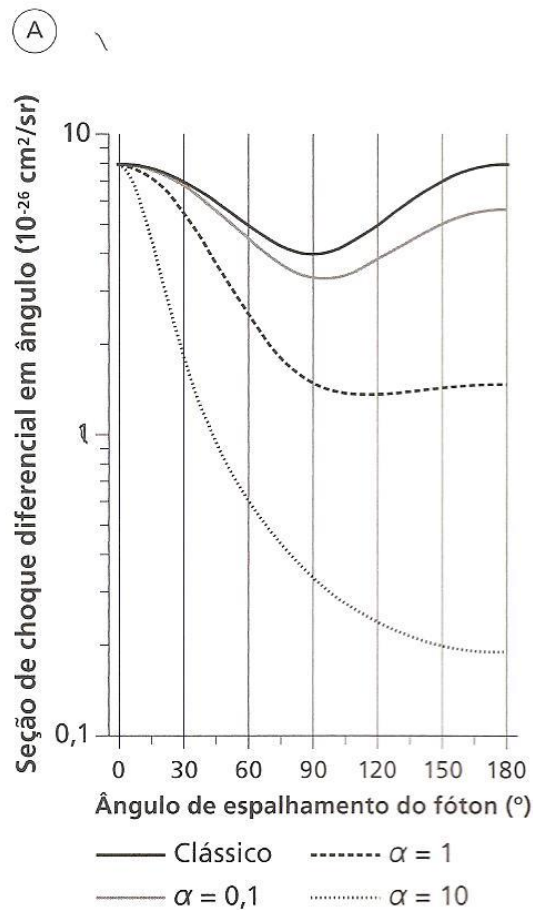
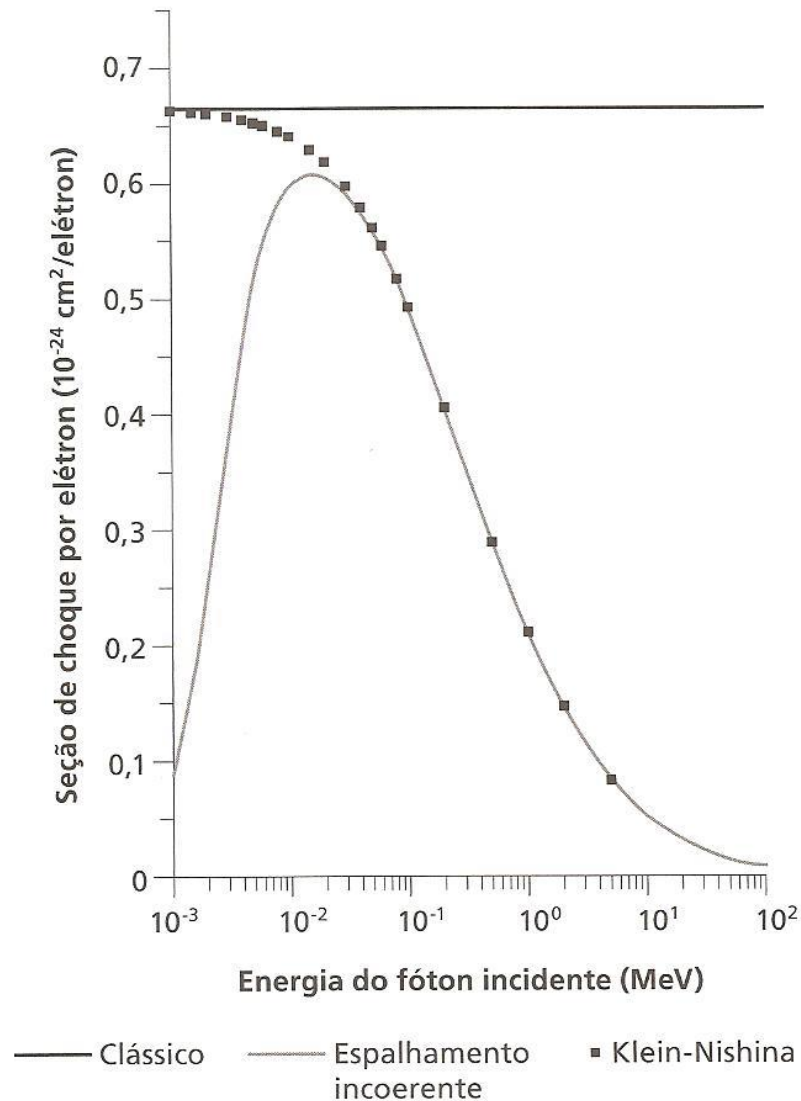


Fig. 8.4 (A) Seção de choque diferencial em ângulo de espalhamento do fóton, segundo Klein e Nishina; (B) distribuição angular dos elétrons de recuo; (C) gráfico da Eq. (8.8), relacionando θ e ϕ . Todos os gráficos são para fótons incidentes de energia 51 keV (linha cinza), 511 keV (linha tracejada) e 5,11 MeV (linha pontilhada)

Seção de choque total por elétron



Distribuição de energia dos elétrons

Probabilidade, por elétron, em uma interação Compton do fóton fornecer ao elétron uma energia cinética entre K e $K+dK$

$$\frac{d_e \sigma}{dK} = \frac{d_e \sigma}{d\Omega_\theta \frac{dK}{d\theta}}$$

Para $\alpha \gg 1$

Uma fração considerável dos elétrons recebe energias próximas à máxima

$$K_{max} = h\nu - h\nu_{min}$$

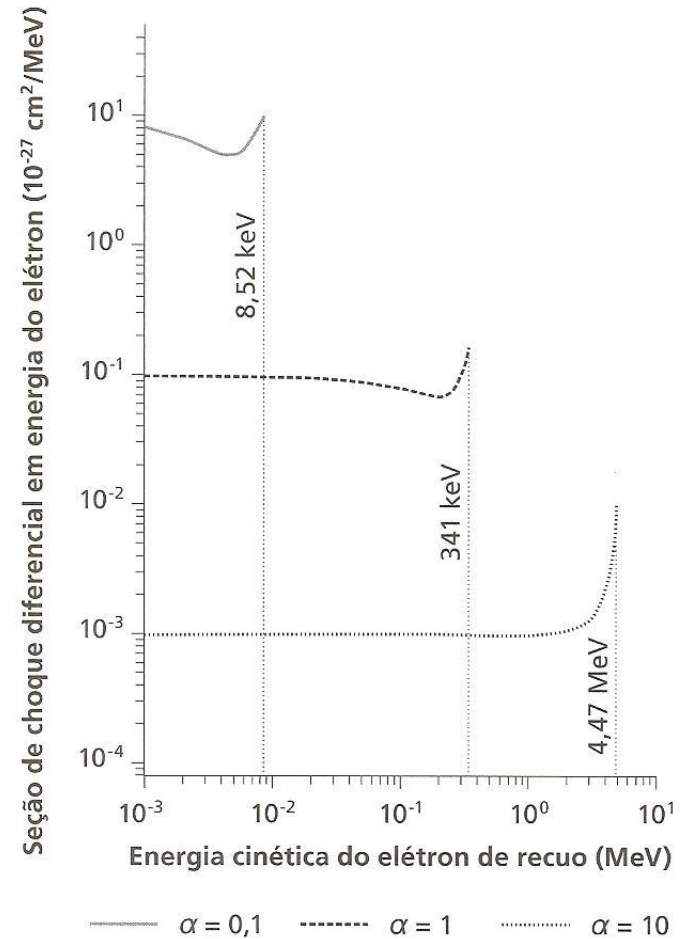
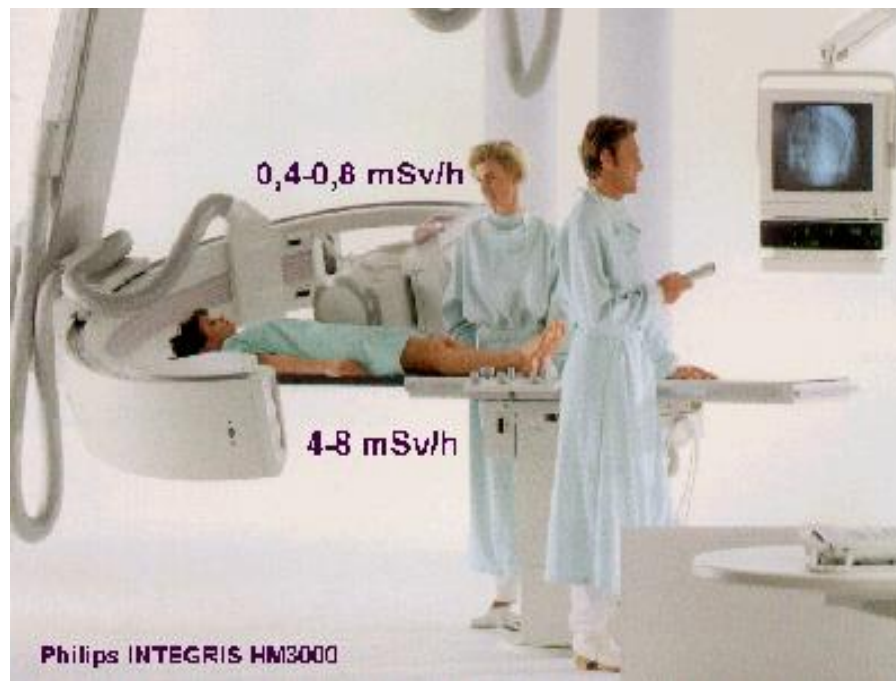
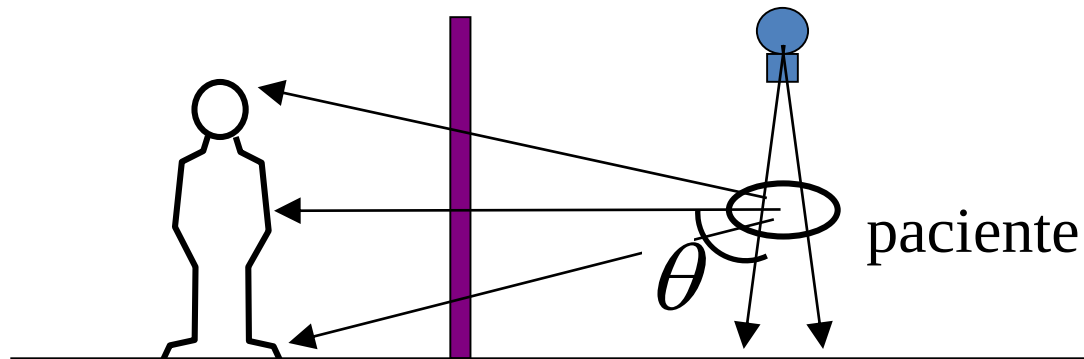


Fig. 8.6 Seção de choque diferencial em energia transferida, por elétron, calculada pela expressão de Klein-Nishina, para algumas energias de fóton incidente. As linhas pontilhadas verticais indicam as energias máximas dos elétrons, cujos valores numéricos estão marcados

Espalhamento Compton



Espalhamento Compton

