

# INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR

## INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Claudio C. Conti

# Interação da Radiação com a Matéria

→ A operação de qualquer tipo de detector é baseada no tipo da interação da radiação com a matéria.

Radiação de partículas carregadas	Radiação não carregada
Alfa, pósitron, partículas pesadas e elétrons	Nêutron, raios X e gama
Perdem energia continuamente por interação do campo coulombiano	Sofrem interações localizadas, gerando partículas pesadas (p/ neutros) ou elétrons (p/ gama ou X)

Para ser detectada, a partícula deverá depositar uma porção de sua energia (total ou parcialmente) no volume ativo do detector.

# Penetração da radiação na matéria em sólidos

Radiação	Penetração*
partículas pesadas	~ 0.01mm
elétrons	~ 1mm
neutrons	~ 10cm
raios X e gama	~ 10cm

\*ordem de grandeza

# Partículas pesadas

→ Perda de energia ocorre por interação do campo coulombiano entre a sua carga positiva e as cargas negativas dos elétrons orbitais que sofrem o impulso de sua força atrativa.

→ Caso a atração seja suficiente poderá ocorrer:

a. O elétron vai para um nível energético superior (excitação)

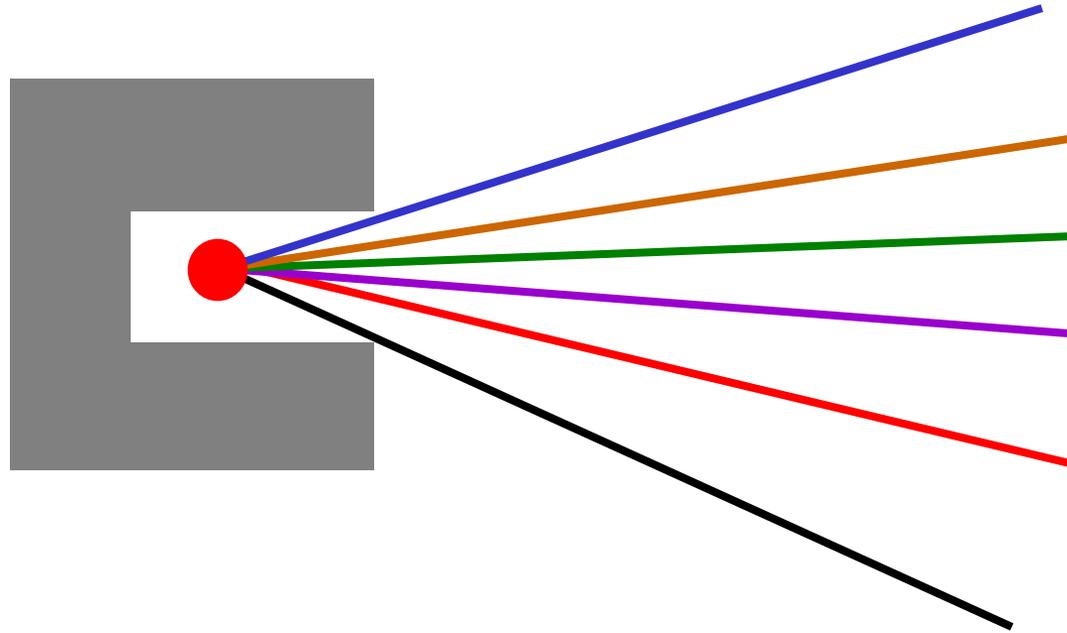
b. O elétron é removido do átomo (ionização)

b1. O elétron poderá receber energia suficiente para causar ionização em outros átomos (raios delta)

→ Energia máxima transferida em uma única interação:

$$E_{\max} \sim 1/500 E_{\text{partícula}}$$

# Caminho percorrido



# Stopping power

A taxa de perda de energia é dada pela equação (linear stopping power):

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

A equação que define a taxa de perda de energia (Bethe formula) é:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB$$

$$B \equiv Z \left[ \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

# Bethe formula

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad B \equiv Z \left[ \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

$p/v \ll c \rightarrow$  somente o 1º termo de B é significativo.

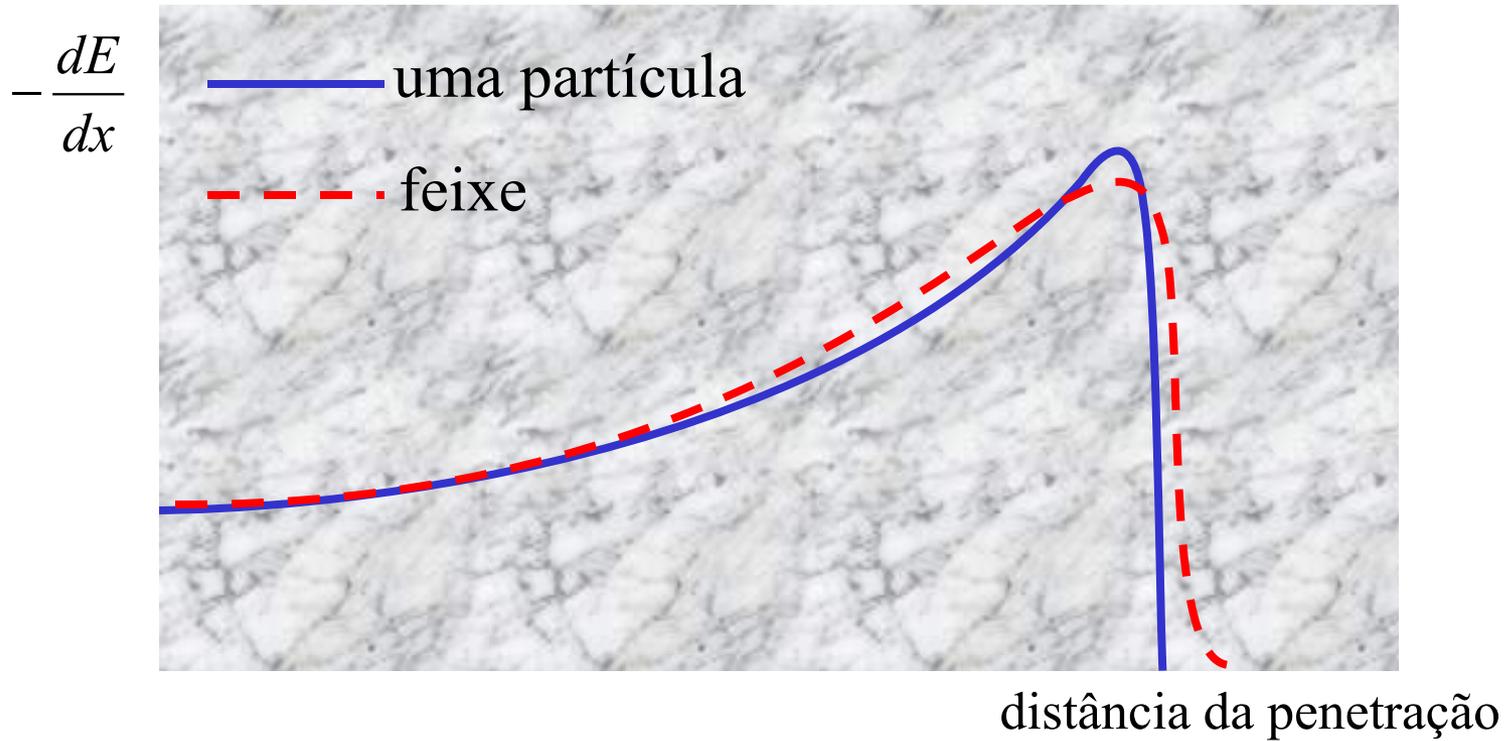
B varia pouco com a velocidade da partícula (energia), então  $dE/dx$  é governado pelo fator multiplicativo.

$dE/dx$  varia  $c/1/v^2$  (inverso da energia): quanto menor a velocidade, maior a perda de energia.

Partículas com maior carga perdem mais energia ( $z$  no numerador).

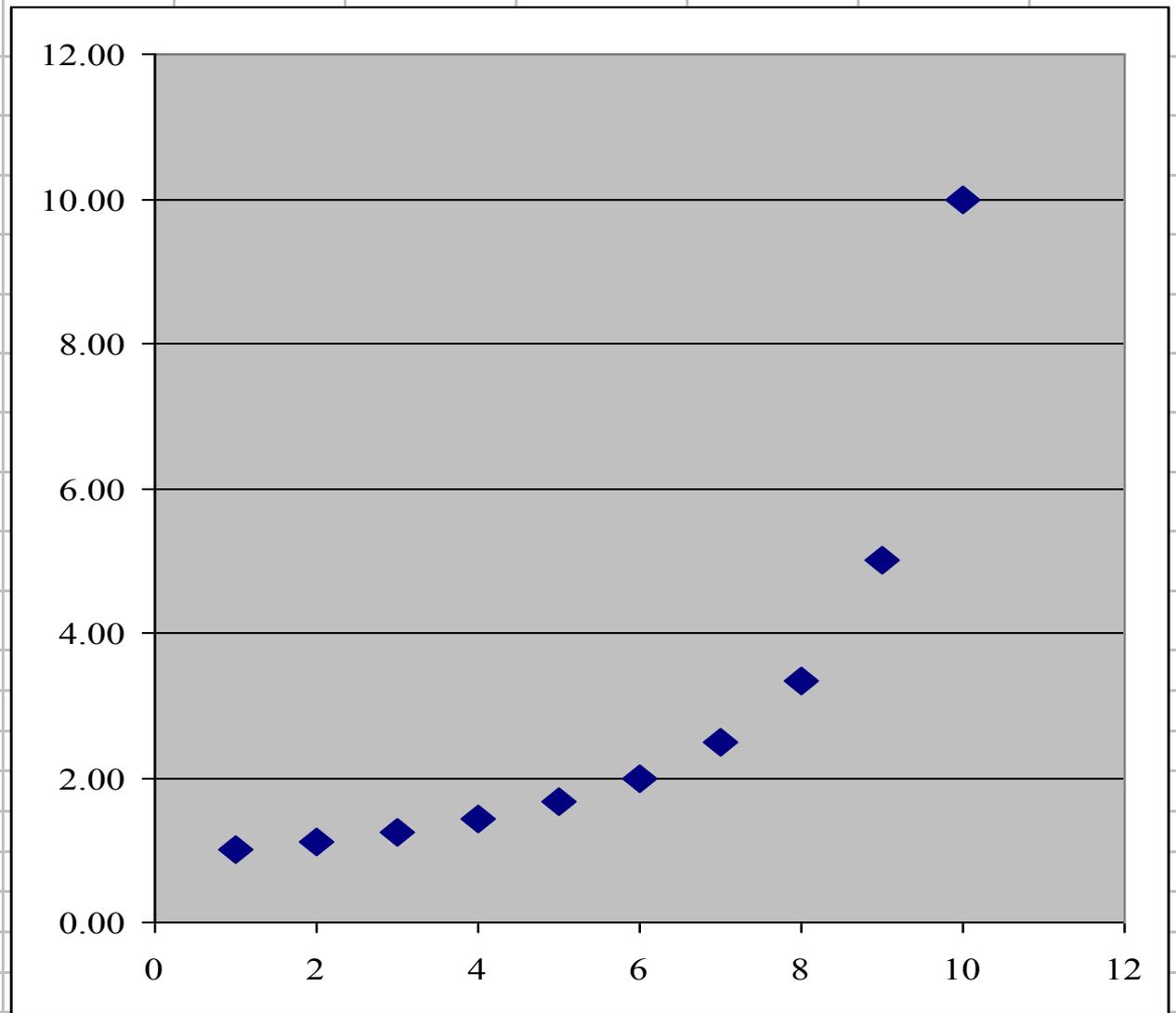
$dE/dx$  depende de  $NZ$  (meio)  $\rightarrow N$  e  $Z \rightarrow$  no. de elétrons  $\rightarrow$  maior stopping power.

# Curva de Bragg - alfa

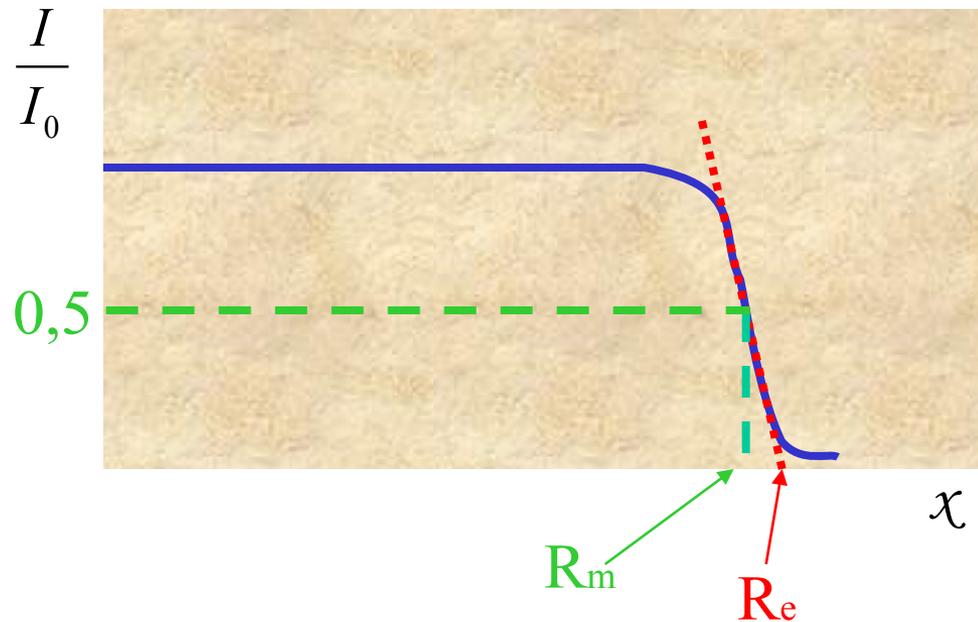
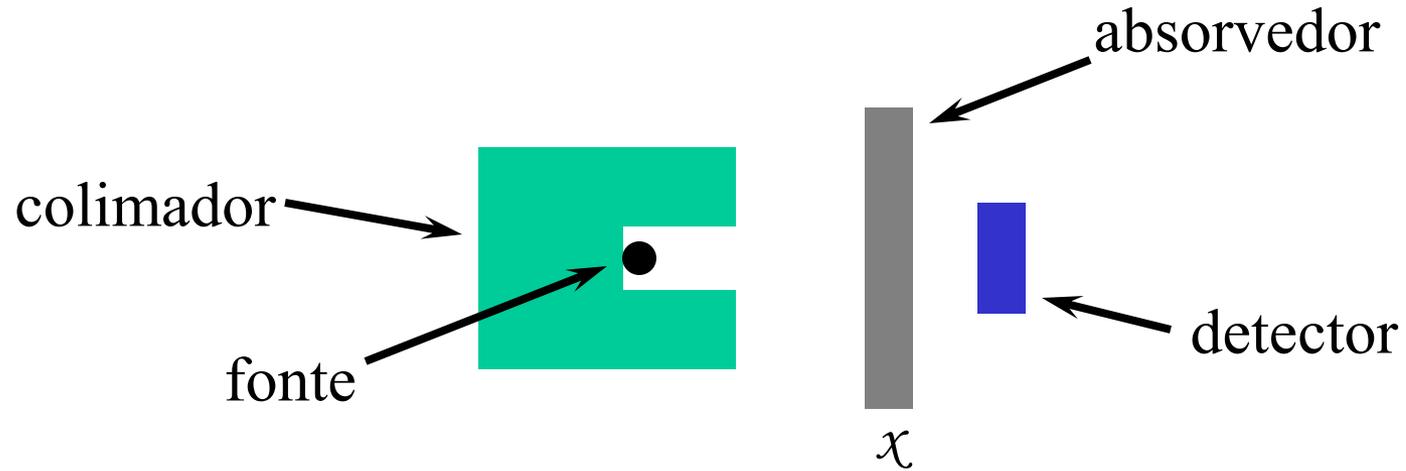


$$-dE/dx \sim 1/E$$

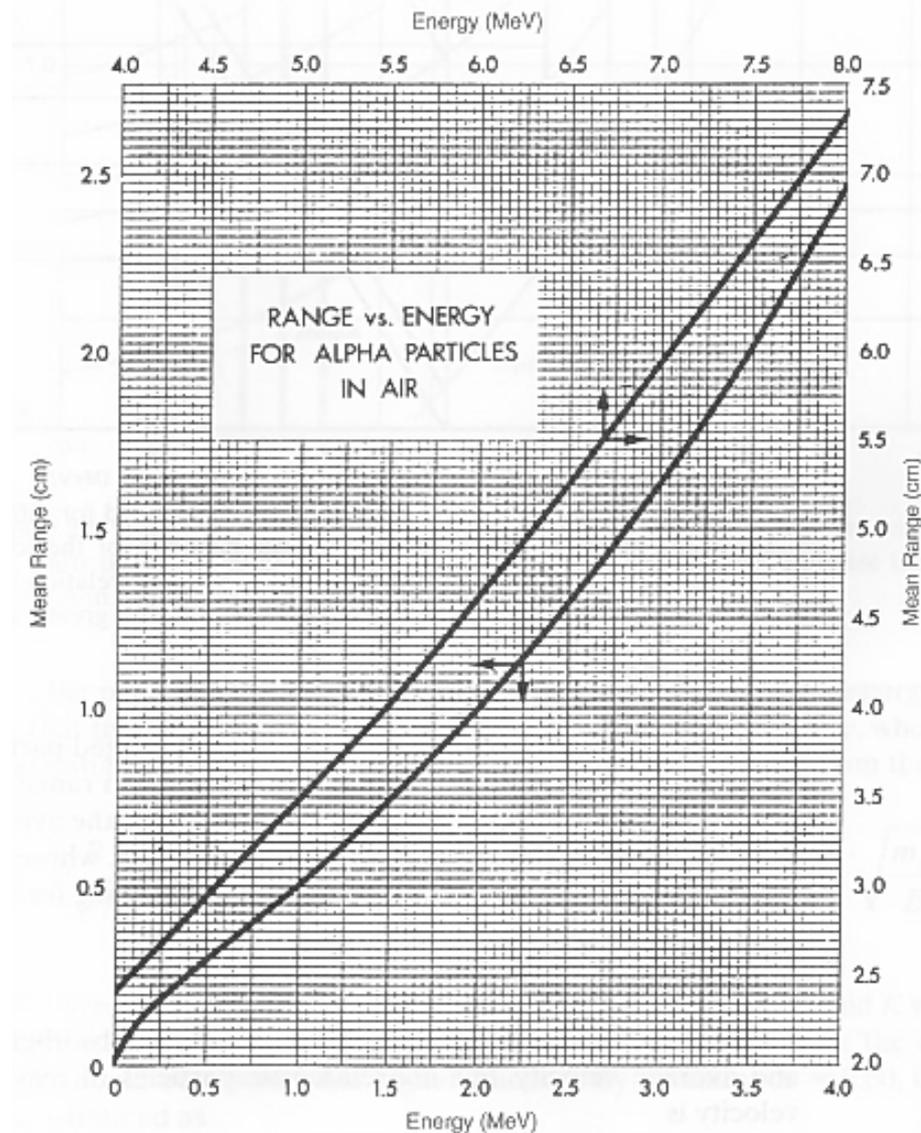
1	1.00
0.9	1.11
0.8	1.25
0.7	1.43
0.6	1.67
0.5	2.00
0.4	2.50
0.3	3.33
0.2	5.00
0.1	10.00
energia	1/energia



# Alcance da partícula $\alpha$



# Alcance da partícula $\alpha$



**Figure 2.6** Range–energy plot for alpha particles in air at 15°C and 760 mm Hg pressure. (From *Radiological Health Handbook*, U.S. Department of Health, Education and Welfare, Washington, DC, 1970.)

# Produtos de fissão

- Os p.f. apresentam um comportamento diferente do que foi apresentado até o momento.
- Devido ao fato de apresentar elevada carga, a taxa de perda de energia é maior.
- Como a energia inicial é alta, o alcance de um p.f. típico é aprox. metade do alcance de um alfa de 5MeV.
- A taxa de perda de energia para p.f. diminui com a diminuição da energia. Isto se deve ao fato dos p.f. da diminuição da carga pela coleta de elétrons em velocidades menores.

# Elétrons



Quando comparados com partículas pesadas os elétrons percorrem um caminho mais tortuoso.

## Por que?

Porque a sua massa é igual a massa dos elétrons orbitais no meio em que ocorre a interação, e maior fração de sua energia pode ser perdida em uma única interação. Além de ser possível a interação com o núcleo do átomo, alterando abruptamente a sua direção.

# Elétrons

A taxa de perda de energia é dada pela equação (Bethe formula):

$$S = -\frac{dE}{dx} = -\left( \left( \frac{dE}{dx} \right)_c + \left( \frac{dE}{dx} \right)_r \right)$$

Perda de energia por  
ionização e excitação

Perda de energia por  
processos radiativos -  
bremsstrahlung

Pela teoria clássica, toda carga  
irradia energia quando acelerada, as  
deflexões dos elétrons correspondem  
a esta aceleração.

# Bremsstrahlung

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \frac{NEZ(Z+1)e^4}{137m_0^2c^4} \left(4 \ln \frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3}\right)$$

A contribuição é desprezível para partículas pesadas → massa no denominador.

↑ E → bremsstrahlung ↑

↑ Z → bremsstrahlung ↑

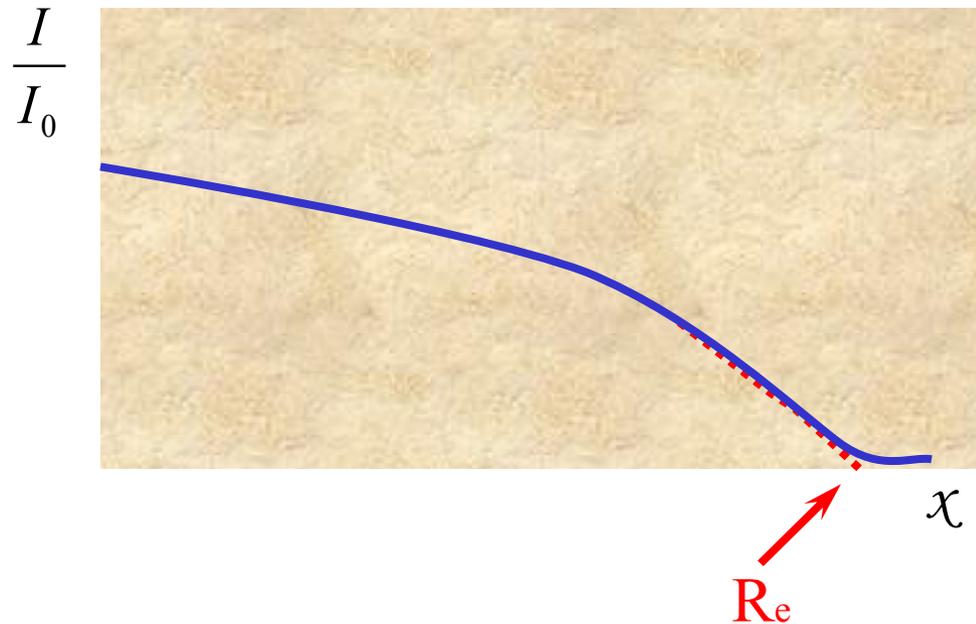
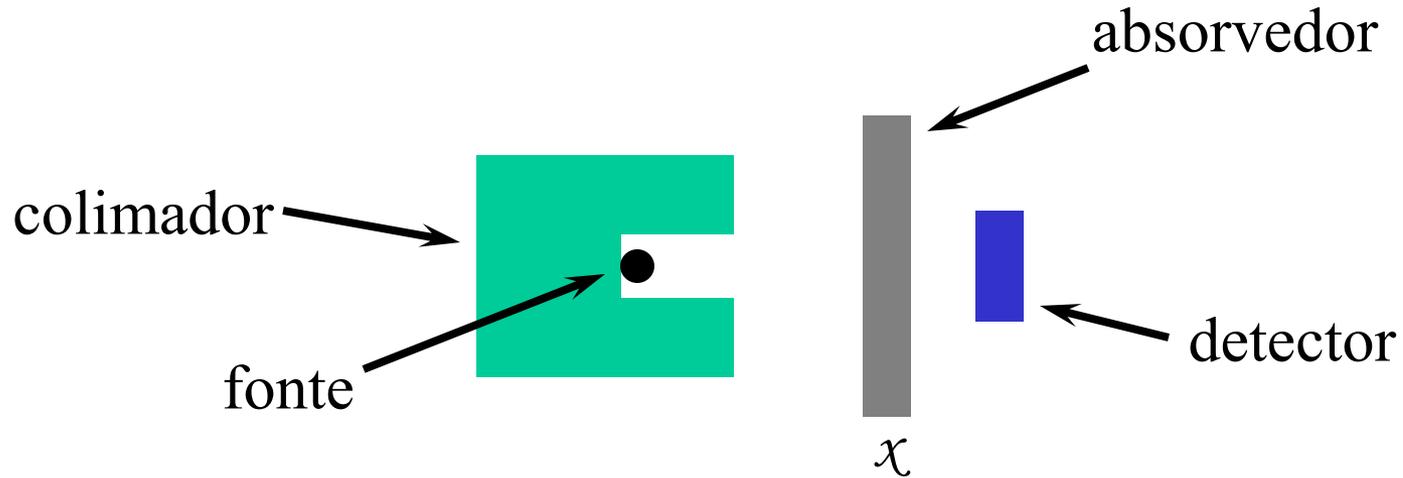
Para energias médias, a energia do bremsstrahlung é muito baixa, depositando toda sua energia perto do ponto de origem. Todavia, em alguns casos, pode influenciar na resposta de detectores pequenos.

# Razão da perda de energia

$$\frac{(dE / dx)_r}{(dE / dx)_c} \approx \frac{EZ}{700}$$

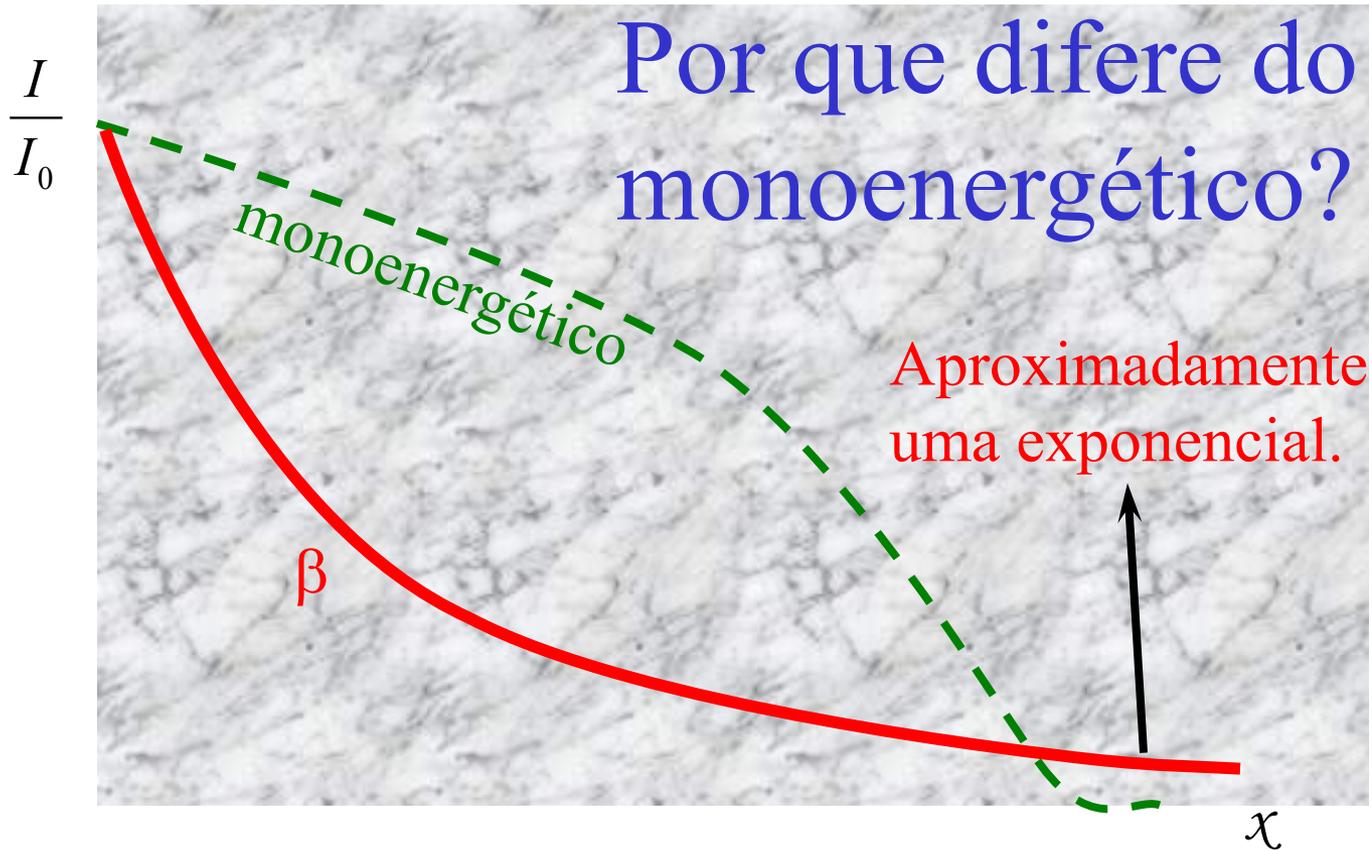
Energia em MeV.

# Alcance de elétrons monoenergéticos



O alcance é determinado pelos elétrons que menos se desviaram da direção inicial

# Alcance da partícula $\beta$



Porque as baixas energias do espectro contínuo são mais rapidamente absorvidas.

# Alcance

Uma estimativa do alcance é dado por:

2 mm por MeV em materiais de baixa densidade;

1 mm por MeV em materiais de densidade média.

# Pósitrons

A interação coulombiana, o principal mecanismo de perda de energia para elétrons e partículas pesadas, ocorre tanto para cargas negativas quanto positivas.

Se a interação é repulsiva ou atrativa entre a partícula e os elétrons orbitais, a energia transferida é a mesma para partículas de massas iguais.

Portanto, o comportamento para pósitrons é o mesmo que para elétrons com relação ao percurso, taxa de perda de energia e alcance.

Qual a diferença entre elétrons e pósitrons?

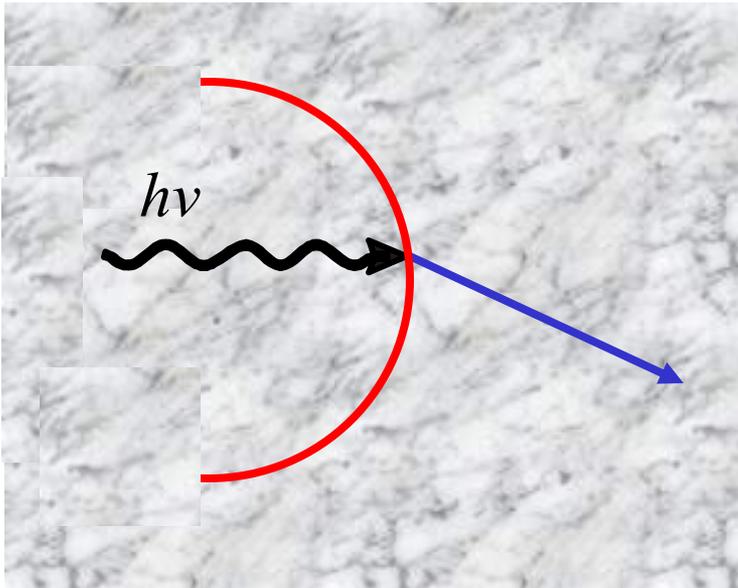
Uma diferença é o processo de aniquilação. Os fótons de 511keV podem depositar energia em região longe do caminho do pósitron.

# Fótons

Podem sofrer três processos de perda de energia, podendo o alterar o seu percurso e energia e, até mesmo desaparecer completamente.

## 1. absorção fotoelétrica

Interação do fóton com o átomo, ocorrendo a transferência total da energia e um elétron é ejetado, segundo a equação:



$$E_e = h\nu - E_b$$

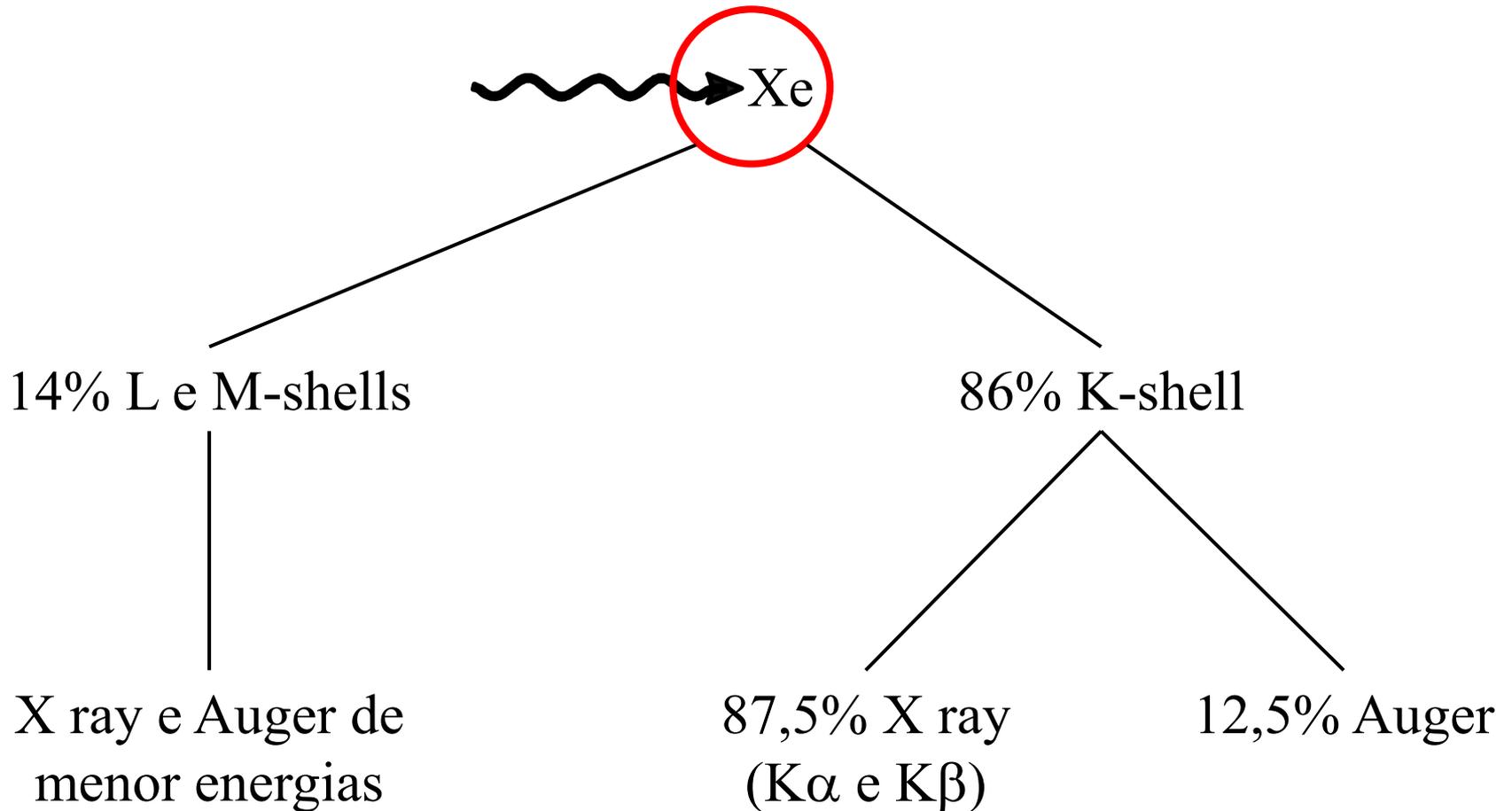
$E(\gamma)$  ↓

$Z$  ↑

Fotoelétrico ↑

Fotoelétrico ↑

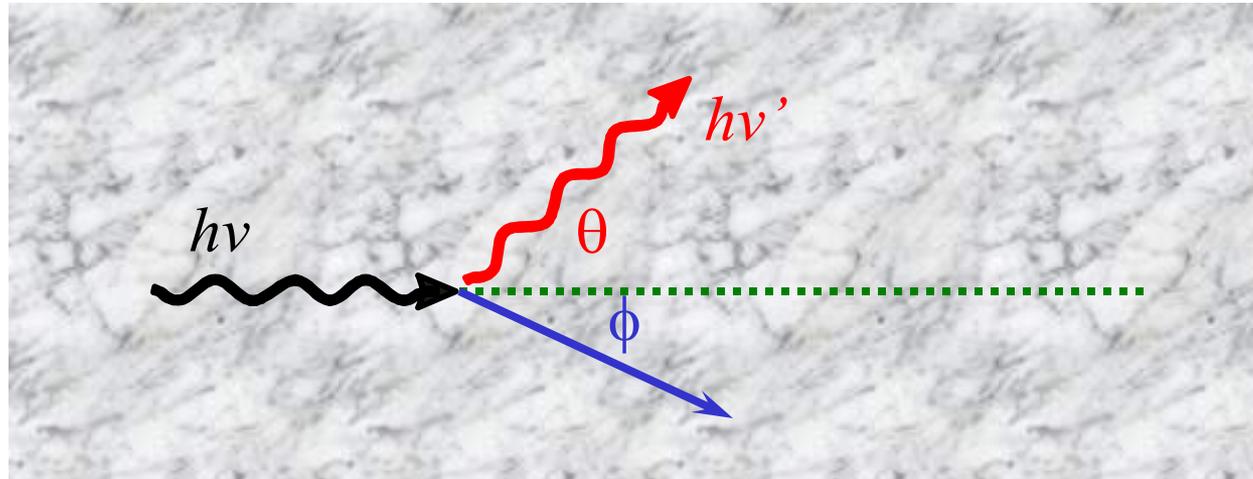
# Gamas $>30\text{keV}$ em Xe



# Fótons

## 2. Interação Compton

Interação do fóton com um elétron, ocorrendo a transferência parcial da energia ao elétron, segundo a equação:

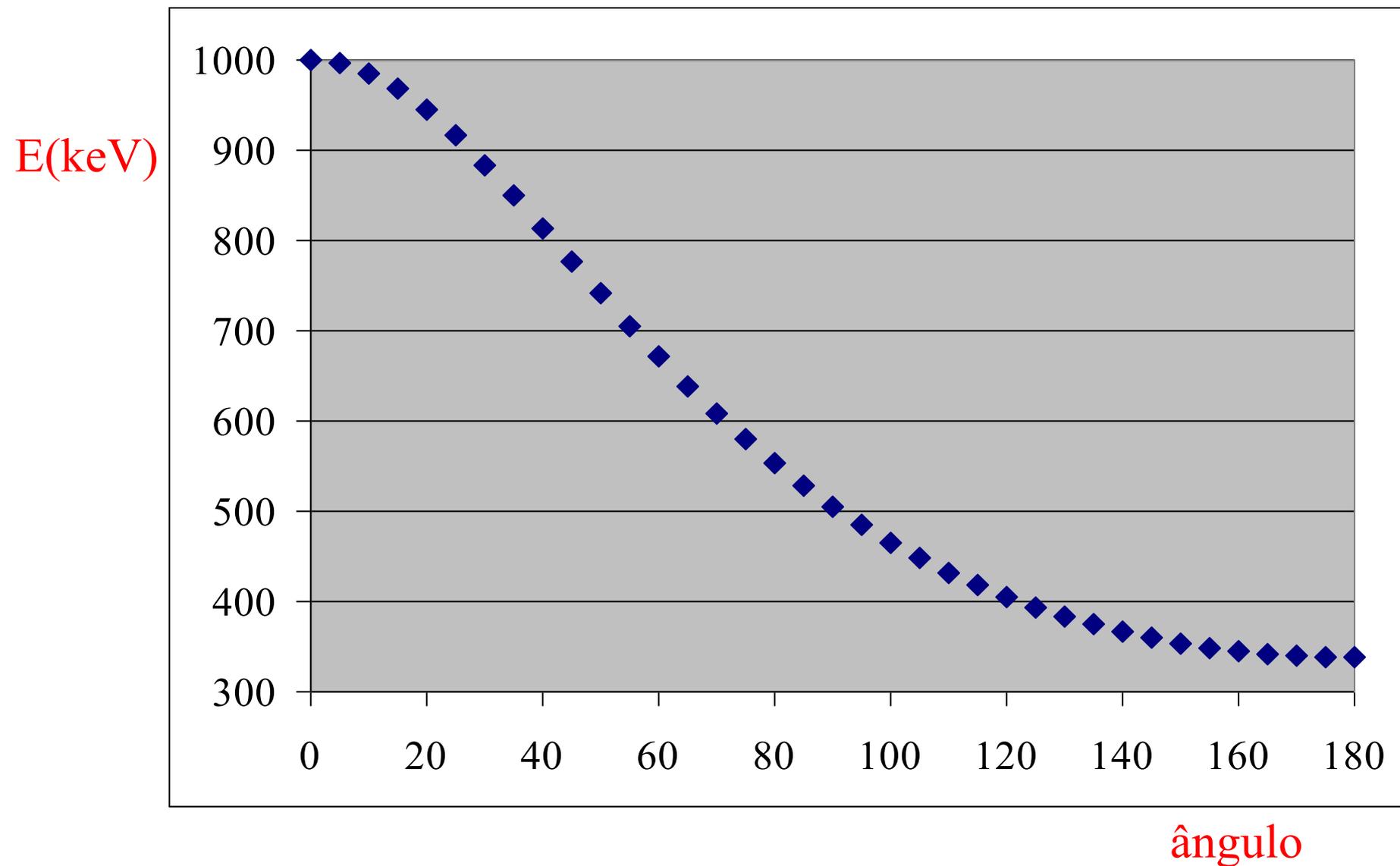


$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2} (1 - \cos \theta)}$$

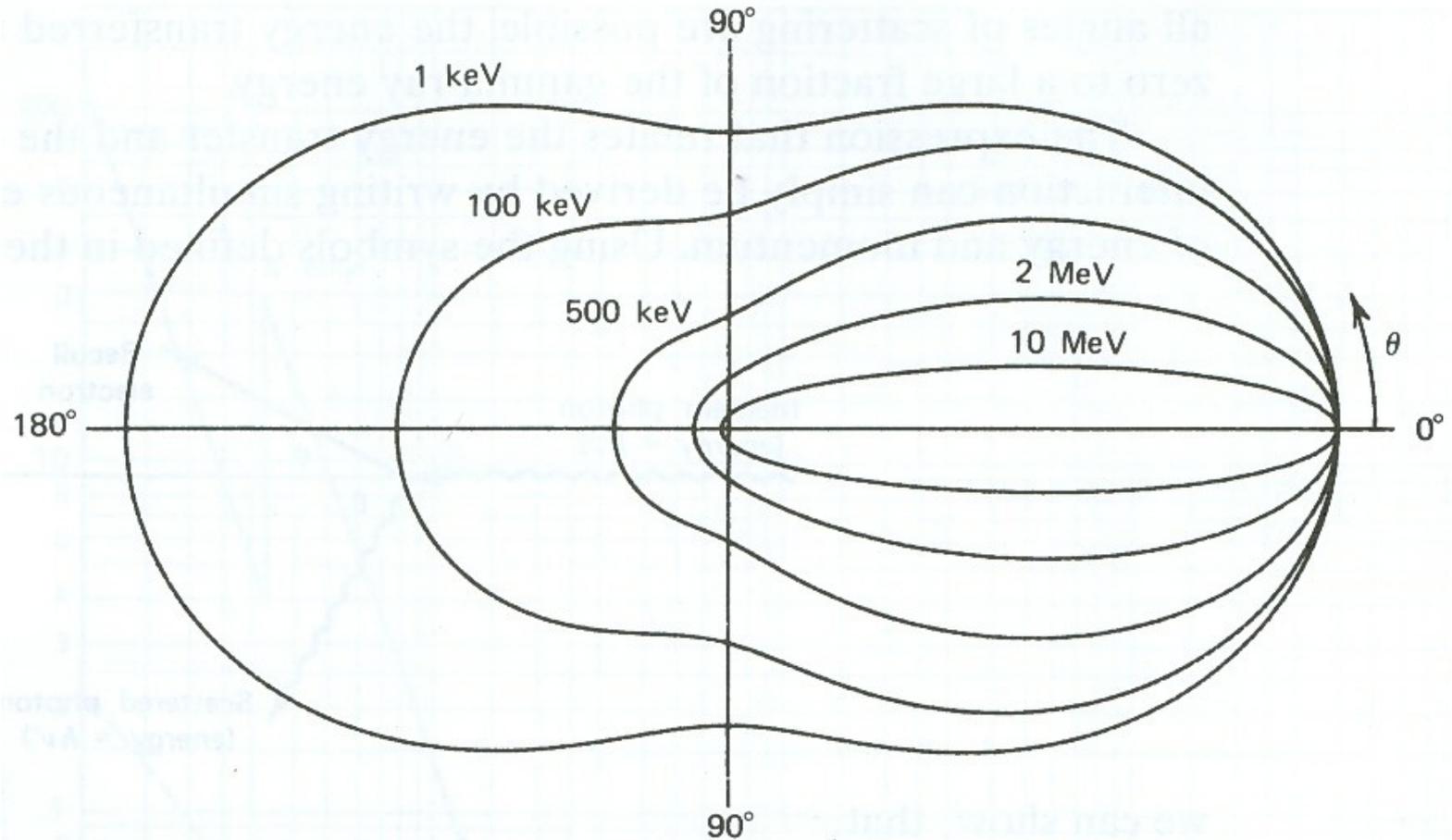
Z ↑

Compton ↑

# Energia do Compton em função do ângulo de espalhamento



# Espalhamento Compton

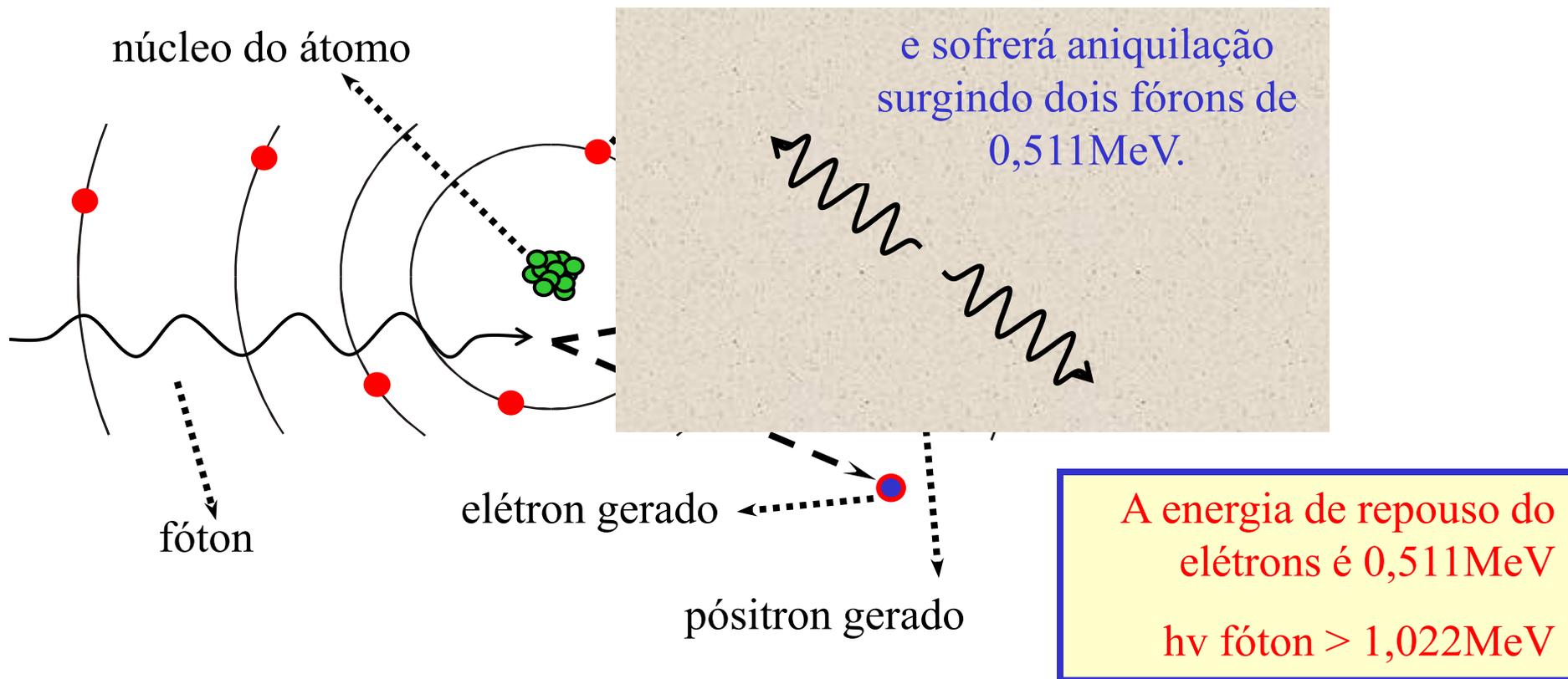


Espalhamento Compton de fótons incidindo da esquerda para a direita. (Knoll, fig. 2.19)

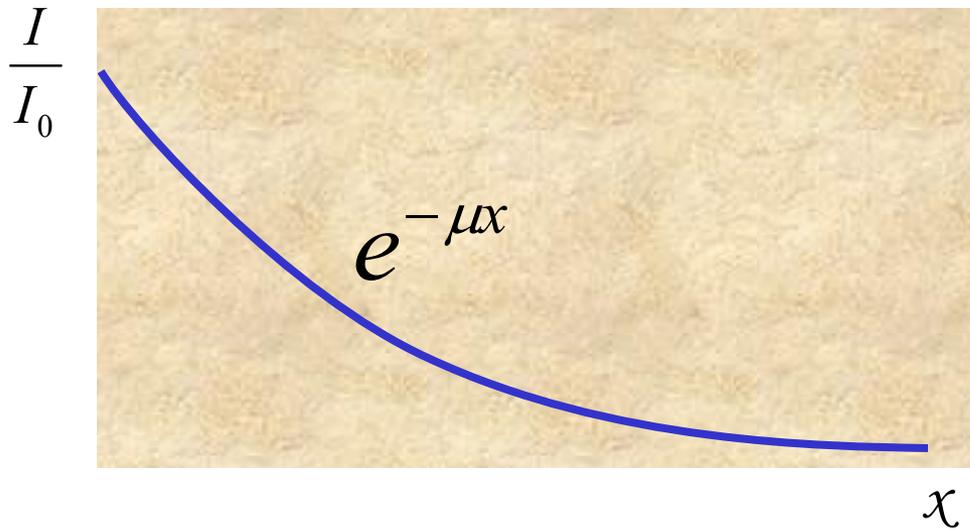
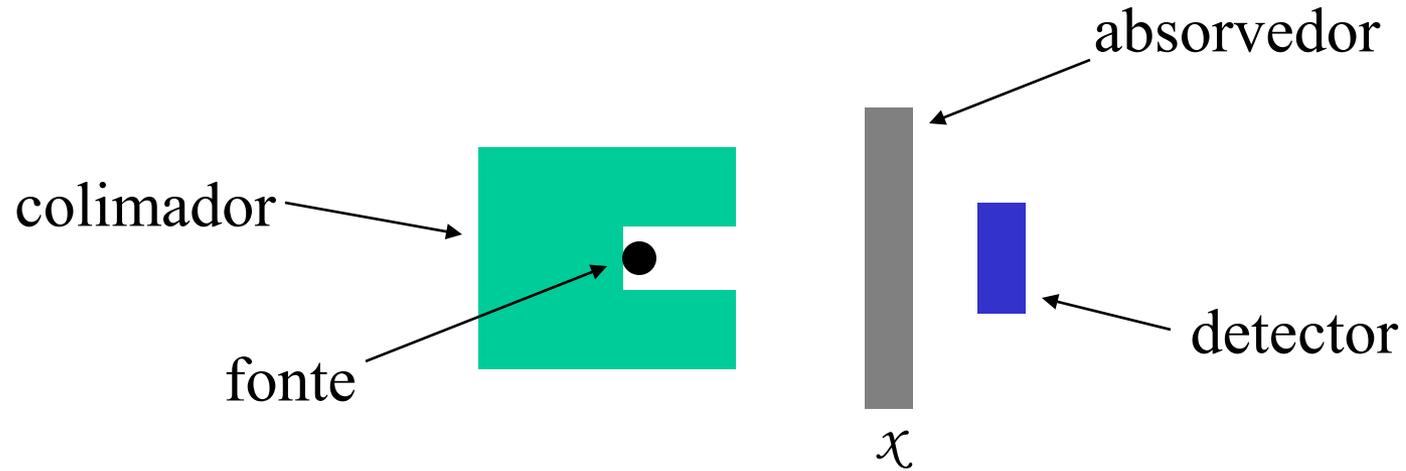
# Fóton

## 3. Produção de par

Um dos mais surpreendentes fenômenos, ocorre pela interação com o forte campo coulombiano do núcleo, onde um fóton desaparece, surgindo um par elétron-pósitron.



# Fóton



onde  $\mu$  = coeficiente  
linear de atenuação

# Fótons

Todos os três processos contribuem para que fótons desviem do feixe e podem ser caracterizados por probabilidades.

$$\mu = \tau(\text{fotoelétrico}) + \sigma(\text{Compton}) + \kappa(\text{p.p.})$$

Onde  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear. O número de fótons transmitidos através de um meio absorvedor qualquer é expresso por:

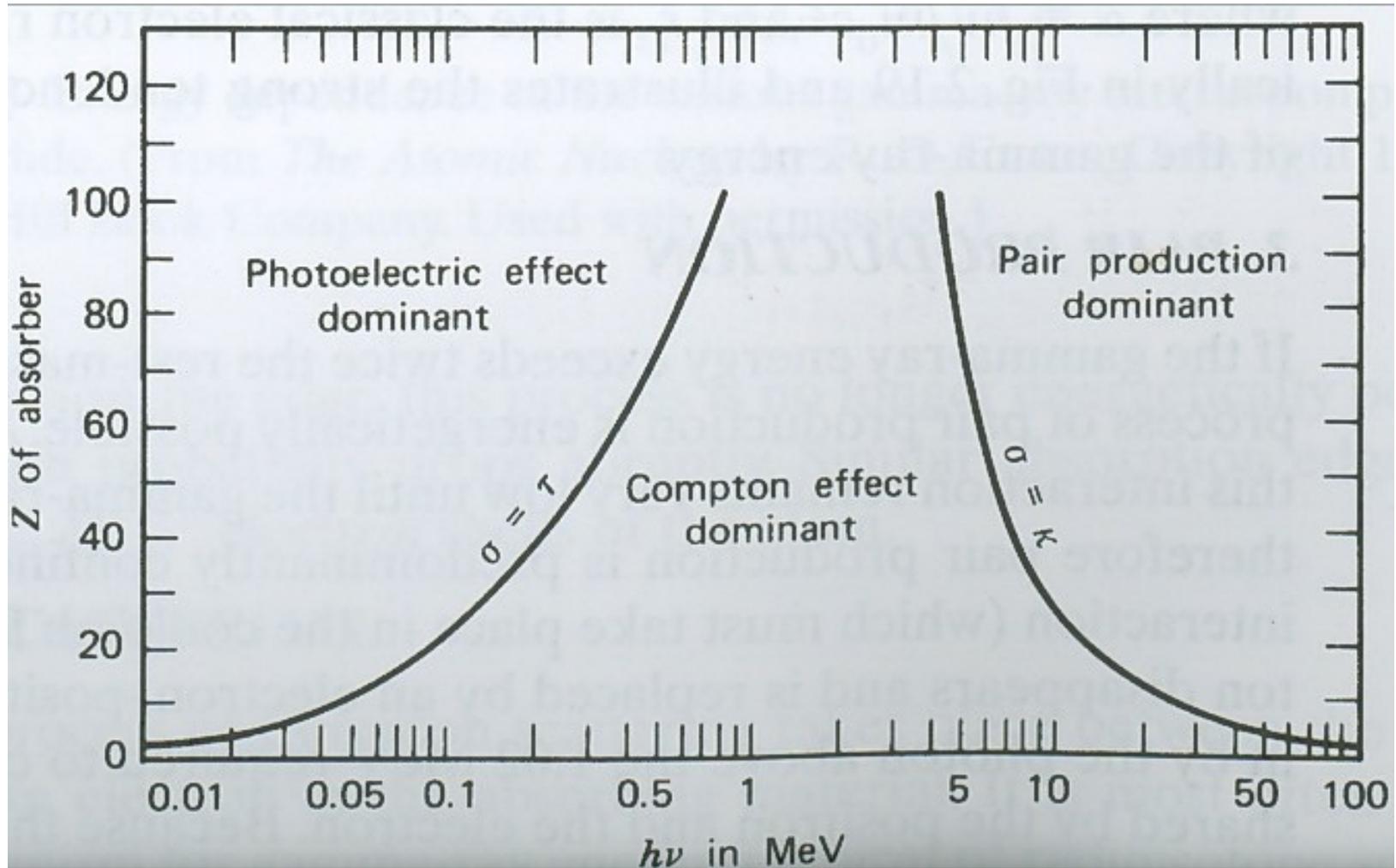
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$\mu$  é dependente da densidade, o coeficiente de atenuação de massa é mais utilizado:  $\mu/\rho$

# Medida de transmissão

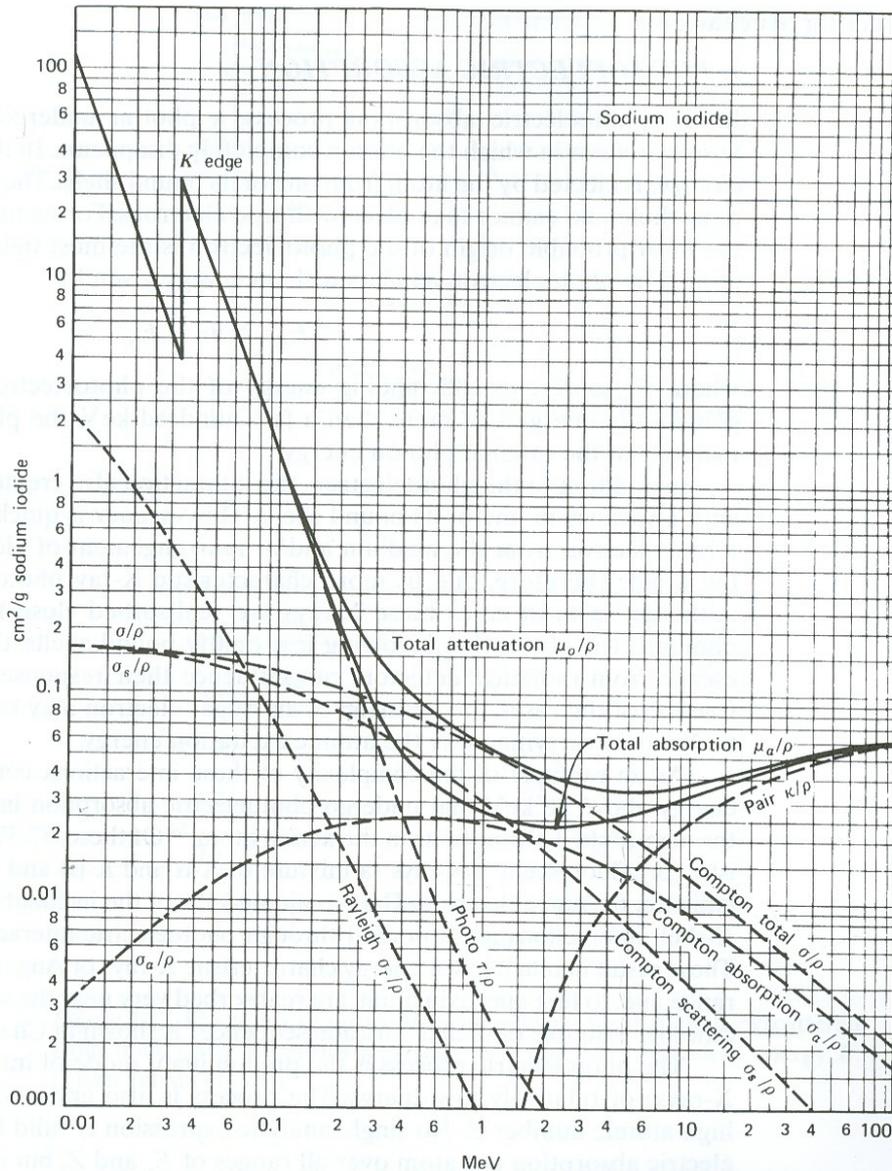


# Importância relativa dos três processos



(Knoll, fig.2.20)

# Dependência energética



Dependência dos vários processos de interação gama com a matéria com a energia para iodeto de sódio. (Knoll, fig. 2.18)

# Neutrons

- Neutrons interagem com o núcleo dos átomos do meio. Nesta interação pode ocorrer uma de duas situações:
  - O neutron desaparece, dando lugar a uma ou mais radiações secundárias;
  - Alteração da direção e energia.
- A probabilidade relativa de ocorrência de interação do neutron com o meio varia drasticamente com a sua energia.

# Neutrons

Neutrons lentos →  $E \sim 0,5 \text{ eV}$

Principais interações:

- Espalhamento elástico – conduz o neutrons ao equilíbrio térmico  
 $E \sim 0,025 \text{ eV}$
- Reações nucleares –  $(n, \gamma)$ ,  $(n, \alpha)$  e  $(n, p.f.)$

mais úteis para detecção  
de neutrons

## Neutrons rápidos

-A probabilidade de ocorrência de reações nucleares decresce rapidamente com o aumento da energia do neutron.

- Pode transferir um apreciável quantidade de energia para um núcleo (núcleo de recuo)

# Neutrons rápidos

- A probabilidade de ocorrência de reações nucleares decresce rapidamente com o aumento da energia do neutron.
- Pode transferir um apreciável quantidade de energia para um núcleo (núcleo de recuo)

# Exercício

Indique qual dos três principais processos de interação de fótons é dominante nas situações seguintes:

- a) 1MeV em alumínio
- b) 100keV em hidrogênio
- c) 100keV em ferro
- d) 10MeV em carbono
- e) 10MeV em chumbo

## Exercício

Do gráfico apresentado no slide 31, calcule a caminho médio ( $\lambda=1/\mu$ ) de fótons de 1MeV em NaI(Tl) ( $\rho=3.67\text{g/cm}^3$ ).

# Exercício

Do gráfico apresentado no slide 31, qual a probabilidade que um fóton de 600keV interagir por efeito fotoelétrico em 1cm de NaI(Tl)?