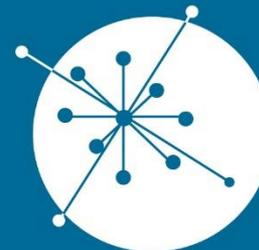


Cálculo da dose absorvida

FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

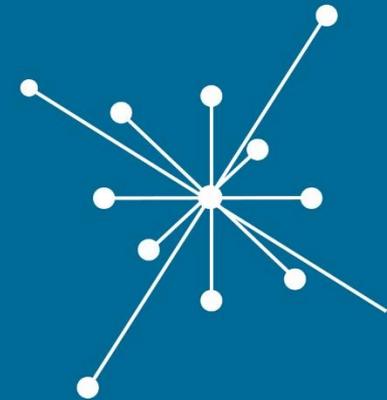
Sumário



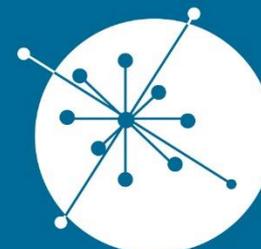
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Poder de freamento e LET
- Cálculo da dose absorvida





Poder de freamento e LET



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Poder de freamento

$$-\frac{dE}{dx} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$$

- Colisões leves
- Colisões diretas

*deposição de energia
próxima do caminho
da partícula*

- interação com o
campo nuclear

*deposição de energia
distante do caminho
da partícula*

Poder de freamento e LET

- $S_c \rightarrow$ taxa média de perda de energia pela partícula carregada por colisões (suaves e duras)
 - Raios delta resultantes de colisões duras podem carregar energia para longe do caminho da partícula
 - Cálculo de dose em pequenos volumes
 - Deposições de energia localizadas
 - Uso de S_c superestima a dose
 - Uso de definições auxiliares
 - Poder de freamento restrito, S_Δ
 - Transferência linear de energia, L (ou LET) e L_Δ

Poder de freamento e LET

- Toda energia perdida por partículas carregadas em processos colisionais é absorvida pelo meio
 - $S_c \rightarrow$ perda de energia da partícula para o meio
 - LET ou L \rightarrow energia transferida para o meio
 - Quantidade média de energia recebida pelo meio por unidade de caminho da partícula carregada
 - Outra interpretação
 - Densidade de ionizações no meio

Deposição de energia na matéria por partículas carregadas

- Colisões diretas ($b \sim a$)
 - Interação com elétron atômico mais provável
 - Ejeção do elétron – raio δ
 - Energia de ligação desprezada
 - Energia cinética do elétron ejetada é alta
 - Interações secundárias seguindo outro caminho



Transferência linear de energia

- Transferência linear de energia não-restrita (L_{∞})
 - Todas as energias cinéticas são consideradas
 - Numericamente igual ao poder de freamento colisional
 - É definido também para radiações indiretamente ionizantes
 - Fótons: elétrons liberados nas interações
 - Nêutrons: partículas carregadas pesadas resultantes das interações ou reações nucleares
 - Efeitos biológicos \leftrightarrow LET

Transferência linear de energia

- *Linear Energy Transfer* (LET ou L)
 - Quantidade média de energia depositada em colisões por unidade de comprimento da partícula carregada (eV/cm)
 - Densidade de ionizações no meio
 - L_{Δ} → transferência linear de energia com restrição a valores transferidos $> \Delta$

$$L_{\Delta} = \frac{dT_{\Delta}}{dx} = \rho \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{\Delta} = \frac{dT_c - \sum(T > \Delta)}{dx}$$

- Exclui-se valores transferidos a raios delta maiores que Δ → vizinhanças da trajetória
 - Aplicações: radiobiologia e microdosimetria

Transferência linear de energia

- Unidades usuais do LET

$$L_{\Delta}(keV/\mu m) = \frac{\rho}{10} \left[\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{\Delta} (MeV \cdot cm^2/g) \right]$$

- Se a energia de corte, Δ , é igual a energia máxima ($T/2$ para elétrons e T para pósitrons)

$$\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{\Delta} = \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_c$$

$$L_{\Delta} = L_{\infty}$$

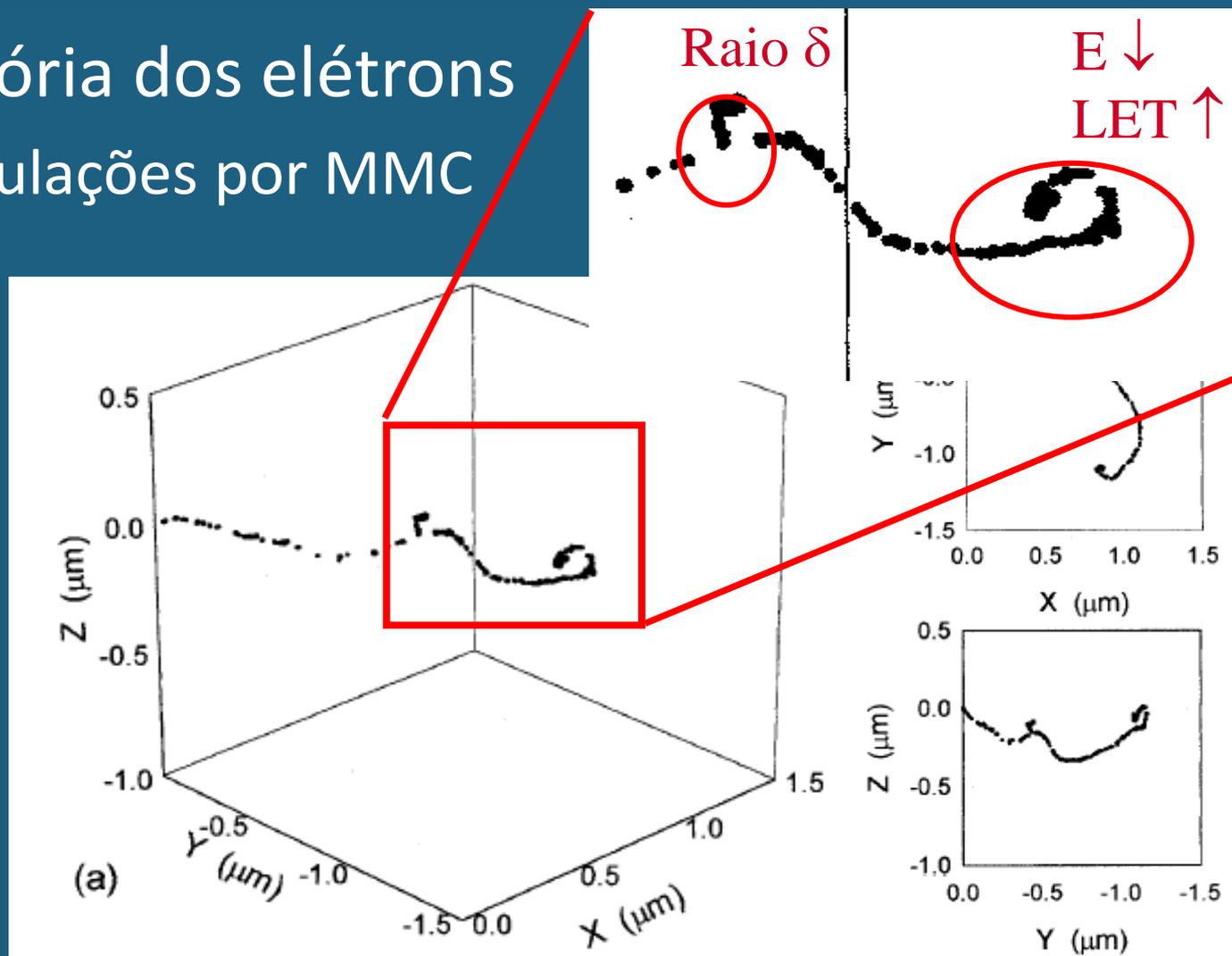
Deposição de energia na matéria por partículas carregadas

- Trajetória dos elétrons
– Simulações por MMC

**elétron
de 10 keV
na água**

Pontos:

- H_2O^+
- H_2O^* ou
- e^- de baixa energia

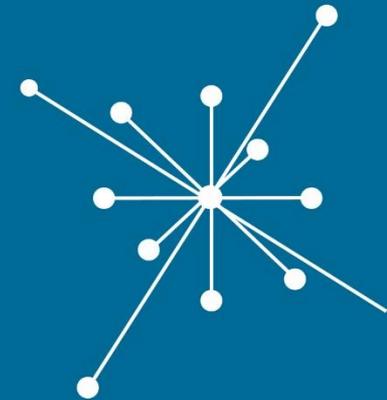


Transferência linear de energia

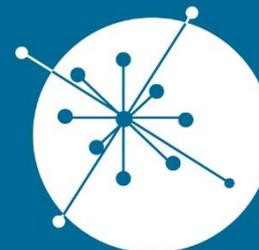
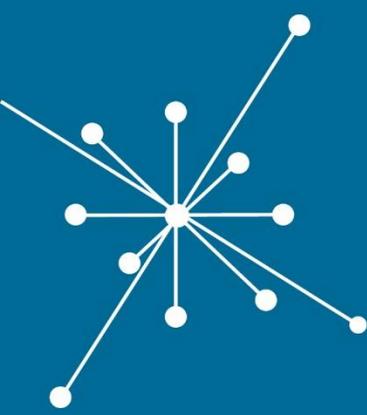
Tab. 7.6 VALORES DE LET PARA ALGUNS TIPOS DE RADIAÇÃO E ENERGIA, EM ÁGUA

Partícula	Energia (MeV)	L_{∞} (keV· μm^{-1})
raios gama do Co-60	1,25	0,2
raios X produzidos com 250 kV	até 250 keV	2,0
prótons	10	4,7
prótons	150	0,5
alfa	2,5	166
íons de Fe	2.000	1.000

Fonte: Hall e Giaccia (2006).



Cálculo da dose absorvida



GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas finas
 - Caso simplificado
 - Feixe de partículas carregadas com energia T_0 atingindo, perpendicularmente, uma folha de um material de número atômico Z
 - Folha fina:
 - Poder de freamento colisional se mantém constante e assume o valor relacionado à energia T_0
 - Todas as partículas atravessam a folha, ou seja, não há retroespalhamento
 - A energia cinética que emerge da folha por raios δ é negligenciável, uma vez que a folha é fina em comparação ao alcance médio dos raios δ .
 - EXEMPLO 7.3 a – resolvido na aula passada

Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas finas

Fluência de
Partículas carregadas
[partículas/cm²]

$$D = \Phi \frac{\left[\left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_c^{T_0} \right] \rho t}{\rho t} = \Phi \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_c^{T_0} \quad [MeV/g]$$

↑
Espessura da placa
↓
massa

$$D = 1,6 \times 10^{-10} \Phi \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_c^{T_0} \quad [Gy]$$

Cálculo da dose absorvida

- Correções para
 - Perdas de energia pelos raios δ
 - Correções no caminho percorrido pela partícula devido ao espalhamento na folha

Ver Attix, 1986 – Cap8.V

Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas mais espessas ($<$ alcance)
 - Partículas carregadas pesadas
 - Encontrar o alcance CSDA para as partículas do feixe incidente
 - Depende da energia e do material
 - Subtrai-se a espessura da folha para achar o alcance CSDA residual das partículas emergentes
 - Usando as tabelas de alcance, encontra-se a energia cinética residual, T_{ex}
 - Energia gasta na folha por cada partícula $\Delta T = T_0 - T_{ex}$
 - Semelhante ao EXEMPLO 7.3 c – resolvido na aula passada (para elétrons)

Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas mais espessas ($<$ alcance)
 - Partículas carregadas pesadas
 - Se as partículas incidem na folha formando um ângulo θ , a dose fica

$$D = 1,602 \times 10^{-10} \frac{\Phi \Delta T \cos \theta}{\rho t} \quad [Gy]$$



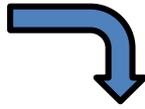
Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas mais espessas (< alcance)
 - Elétrons
 - Neste caso, o *bremsstrahlung* que sai da folha deve ser considerado
 - Usando tabelas obtemos o alcance CSDA para a energia do feixe
 - Da mesma forma que usado para partículas pesadas, obtemos o alcance residual dos elétrons emergentes, a energia cinética T_{ex} e a energia depositada
 - $\Delta T = T_0 - T_{ex}$
 - Usamos o rendimento radiativo (aula 9) para descontar o *bremsstrahlung* que escapa do meio

Interações de elétrons e pósitrons

Eficiência (ou rendimento) da produção
de radiação por elétrons

Fração da
energia do
elétron que
resulta em
radiação

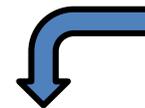


$$y = \frac{\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{rad}}{\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{col} + \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{rad}}$$



Em alvos finos: fração da energia
perdida que é convertida em radiação

Em toda a
trajetória
do elétron



$$Y = \bar{y} = \frac{1}{-T_0} \int_{T_0}^0 y(T) dT = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} y(T) dT$$



Em alvos espessos: fração da energia
inicial que é convertida em radiação

Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas mais espessas ($<$ alcance)
 - Elétrons
 - A energia gasta pelos elétrons em interações colisionais fica

$$(\Delta T)_c = (T_0 - T_{ex})_c = \{T_0[1 - Y(T_0)] - T_{ex}[1 - Y(T_{ex})]\}_c$$

$$\bar{D} = 1,602 \times 10^{-10} \frac{\Phi(\Delta T)_c}{\rho t} \quad [Gy]$$

Cálculo da dose absorvida

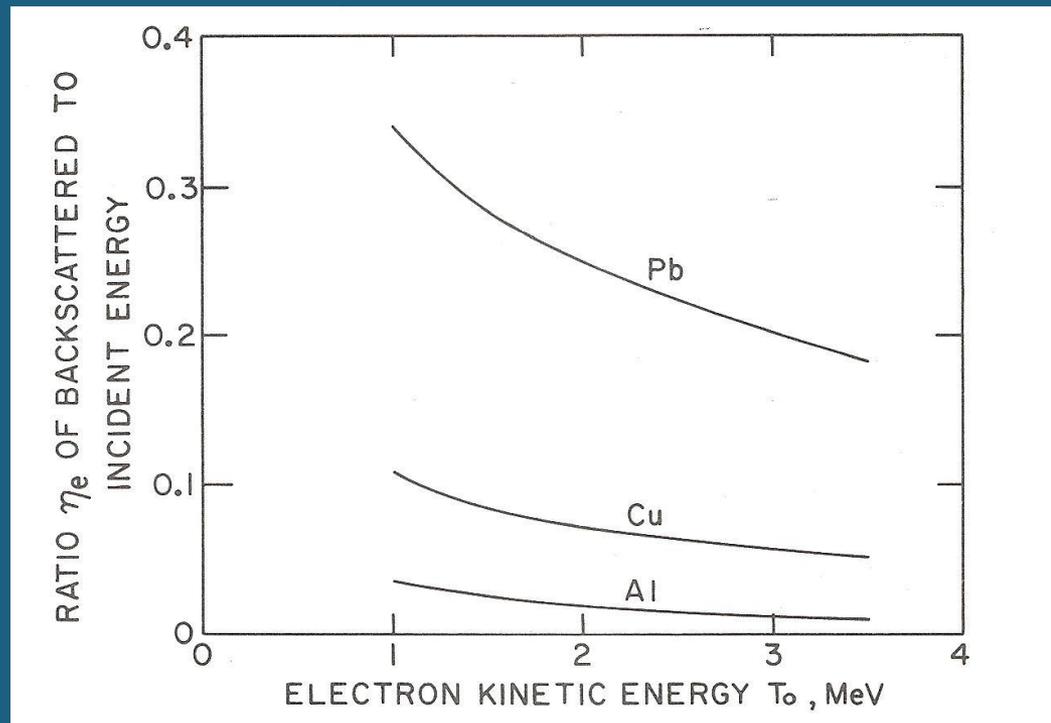
- Dose em folhas espessas ($>$ alcance)
 - Considerando o retroespalhamento negligenciável
 - Energia depositada na folha por unidade de área

$$E = \Phi T_0 [1 - Y(T_0)] \quad [MeV/cm^2]$$

$$\bar{D} = 1,602 \times 10^{-10} \frac{\Phi T_0 [1 - Y(T_0)]}{\rho t} \quad [Gy]$$

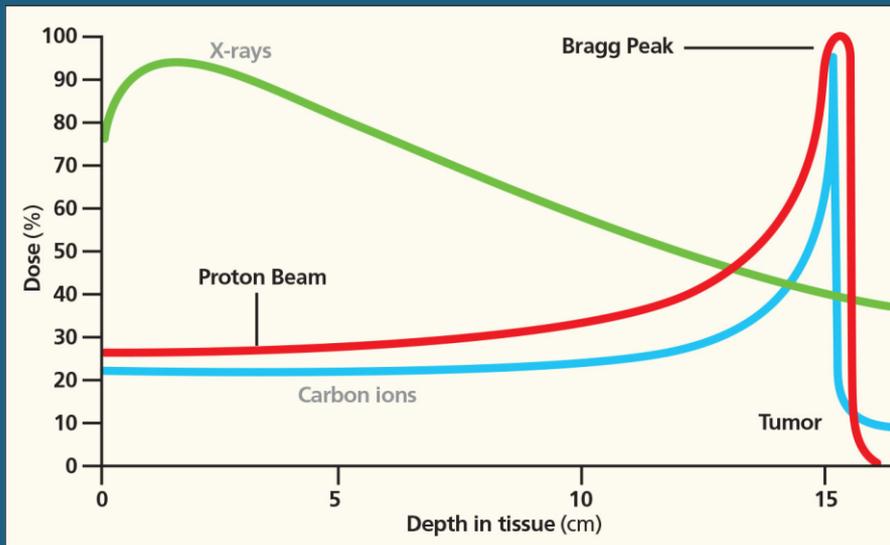
Cálculo da dose absorvida

- Dose em folhas espessas ($>$ alcance)
 - Correções para o retroespalhamento dos elétrons
 - Ver Attix, 1986, cap 8.V.C

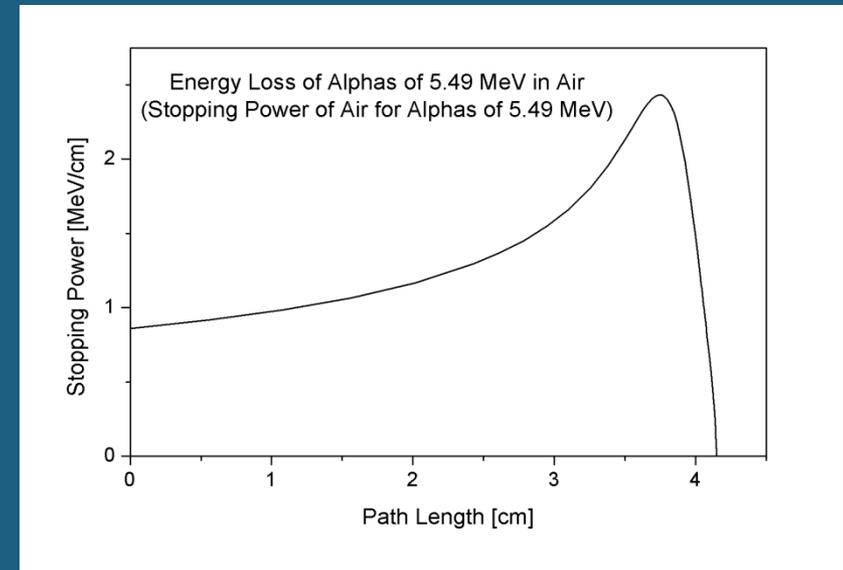


Cálculo da dose absorvida

- Dose em profundidade
 - Feixes de partículas carregadas pesadas



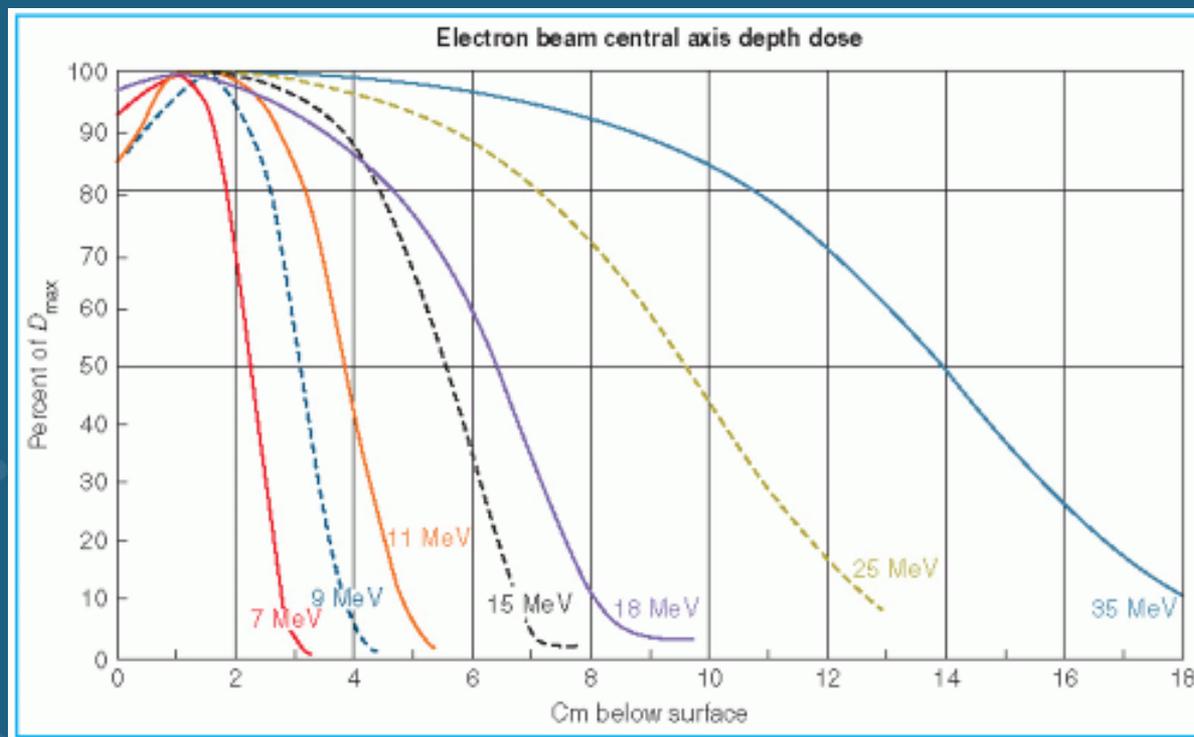
Fonte: scripps.org



Fonte: wikipedia.org

Cálculo da dose absorvida

- Dose em profundidade
 - Feixes de elétrons



Cálculo da dose absorvida

- Cálculo da dose absorvida em profundidade
 - Supondo que o espectro de fluência é conhecido, a dose na profundidade x em um material m é

$$D_m = 1,602 \times 10^{-10} \int_0^{T_{max}} \Phi_x(T) \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,m} dT \quad [Gy]$$

$$1,602 \times 10^{-10} \text{ Gy} = 1 \text{ MeV/g}$$

Exclui os raios δ

Cálculo da dose absorvida

- Cálculo da dose absorvida em profundidade
 - A fluência de partículas em x é difícil de ser estimada (MMC)
 - Adotando-se o procedimento de calcular o alcance residual e a energia remanescente, T_r , pode-se estimar a dose como

$$D_m = 1,602 \times 10^{-10} \Phi_0(T) \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_{c,m} [Gy]$$

**Não vale se
 $x \approx$ alcance**

Fluência incidente

Calculado
Em T_r

Cálculo da dose absorvida

$$D = \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_C \cdot \Phi = \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)_C \cdot \frac{N}{S} \equiv \frac{dT}{dm}$$

Número de partículas

Área do feixe

Dose absorvida
média

$$\bar{D} = N \left(\frac{\Delta T_c}{\Delta m} \right)_C$$

Energia média perdida por colisão

Sumário

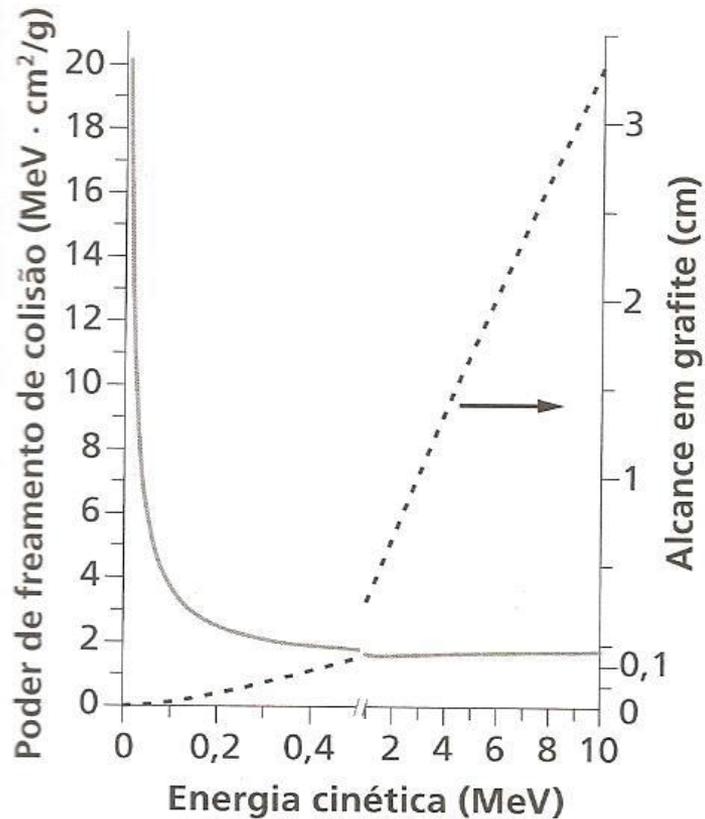


IFUSP - Instituto de Física da USP

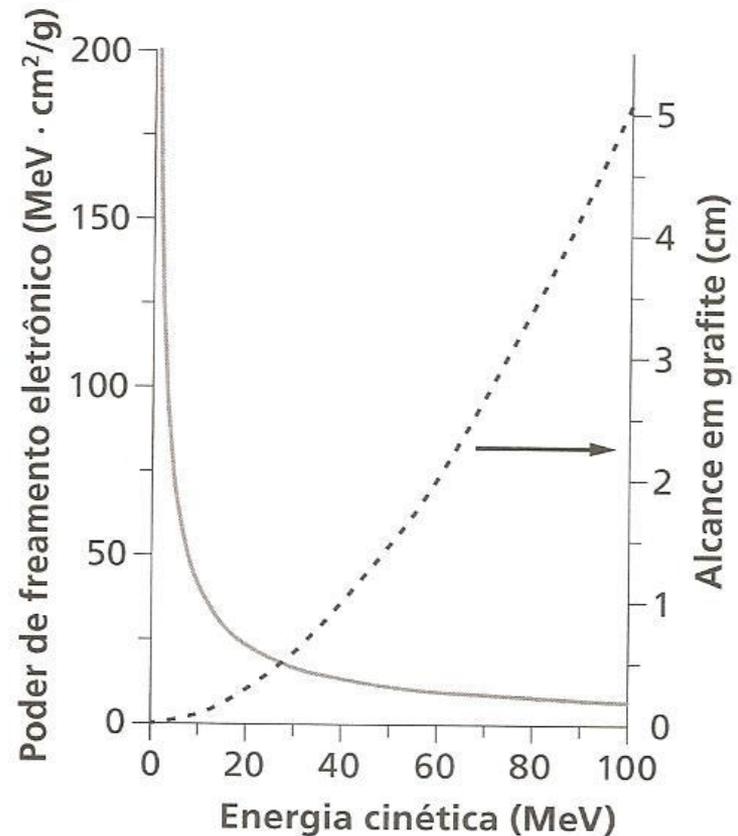
- Poder de frenamento e LET
- Cálculo da dose absorvida



(A) Elétrons



(B) Prótons



— s_c - - - - alcance

Fig. 7.14 (A) Poder de freamento de colisão e alcance de elétrons (\mathcal{R}_{CSDA}) em grafite, em função da energia cinética; (B) poder de freamento eletrônico e alcance projetado de prótons em grafite, em função da energia cinética. Dados das bases de dados ESTAR e PSTAR (Berger et al., 2010a)