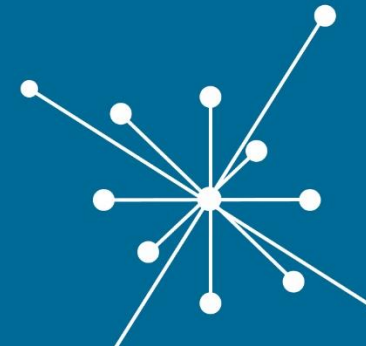




Interação de partículas carregadas rápidas com a matéria parte 2

FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa



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

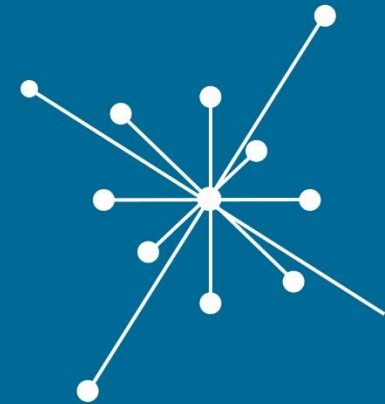
IFUSP - Instituto de Física da USP



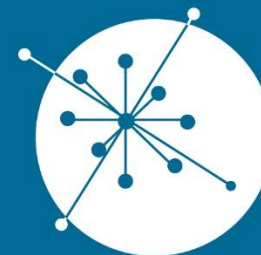
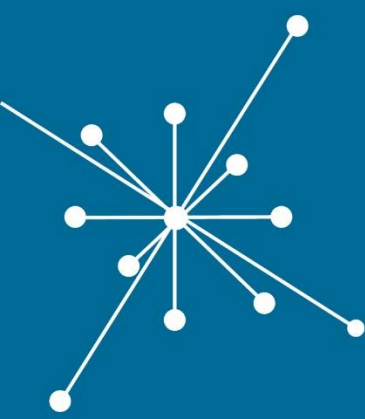
Sumário

- Caracterização das interações
- Poder de freamento
- Partículas carregadas pesadas
 - alcance





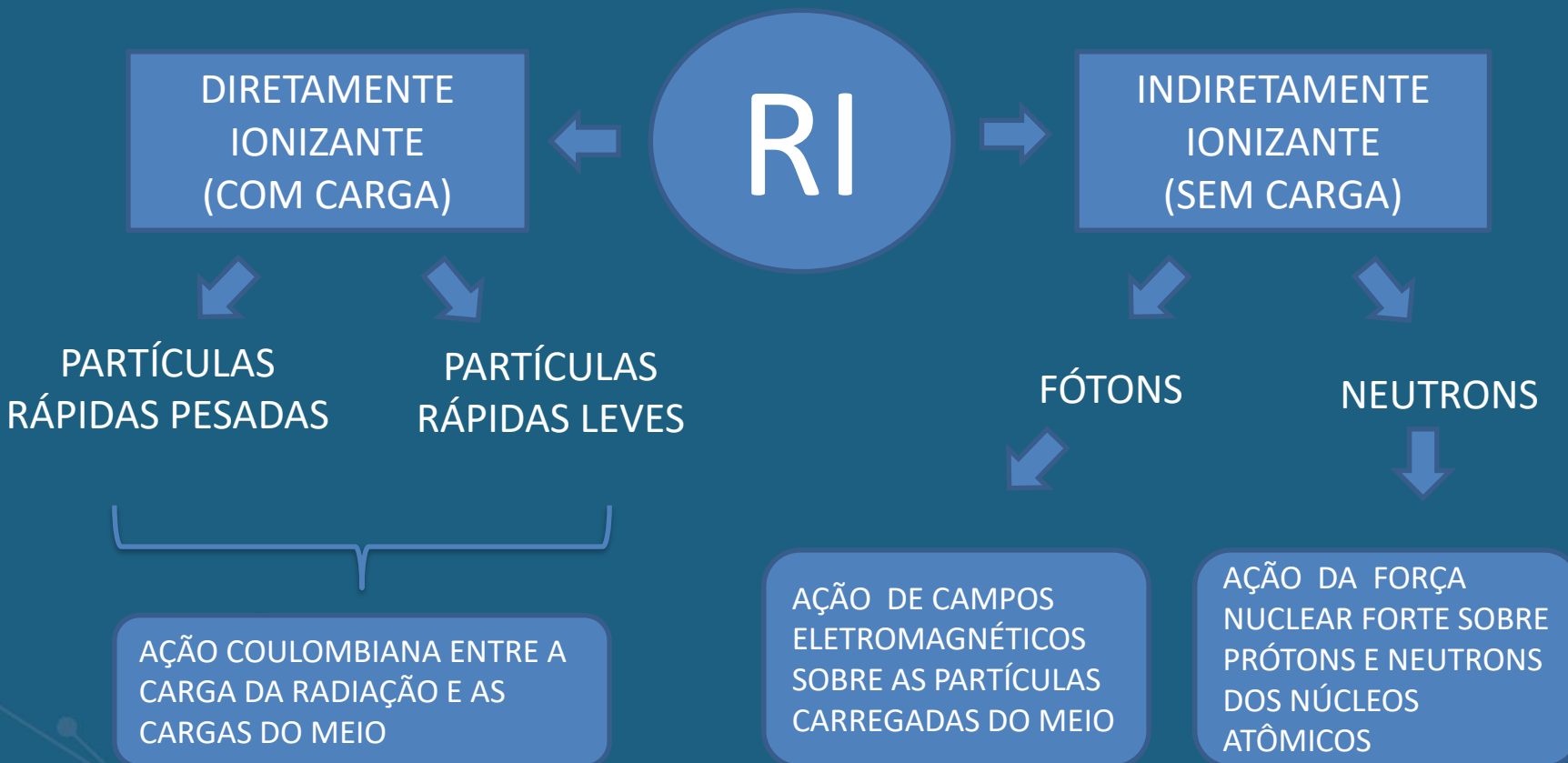
Caracterização das interações



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Introdução

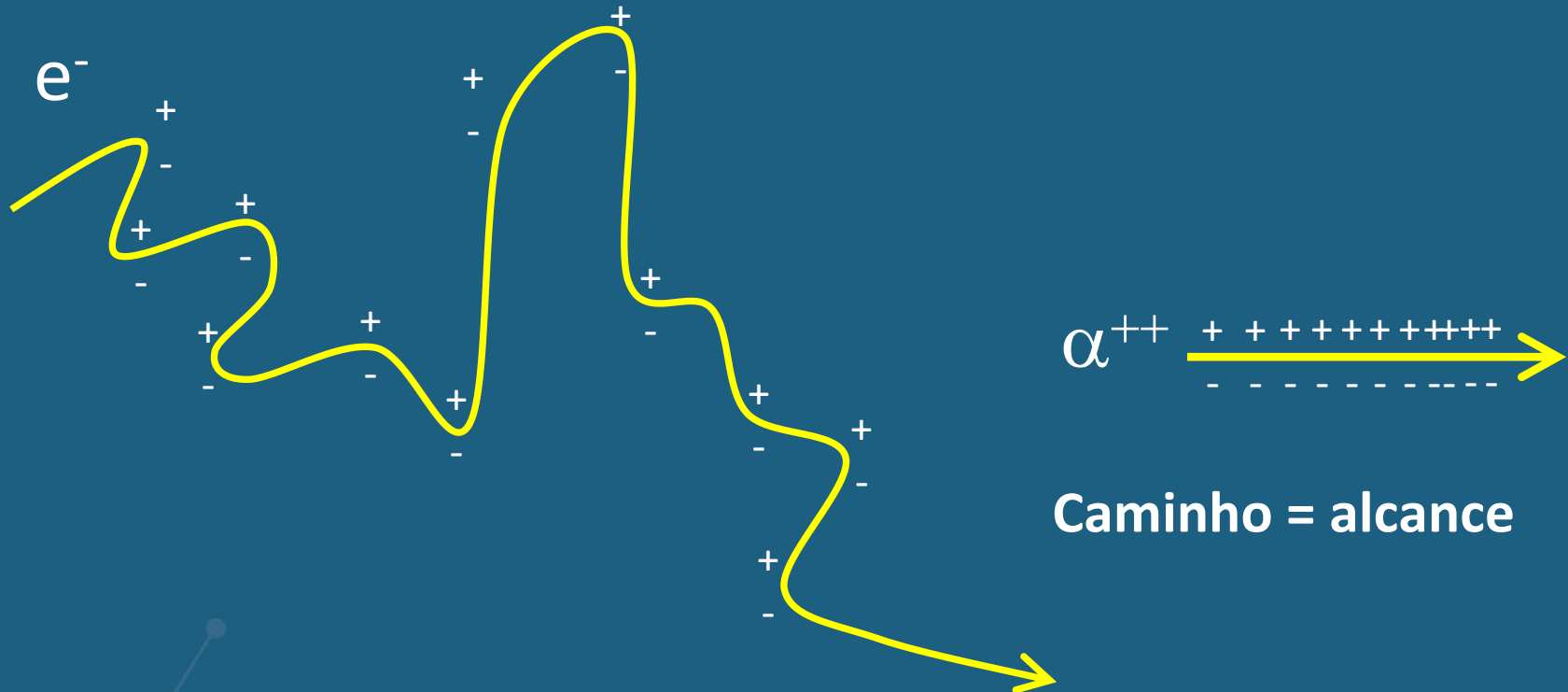


Excitação, ionização e perda radiativa

- Partículas carregadas
 - Interações coulombianas (se $v \ll c$)
 - Perda de energia cinética
- Excitação e ionização
 - Partículas carregadas $\longleftrightarrow$ elétrons orbitais
- Excitação
 - Energia transferida $<$ energia de ligação
- Ionização
 - Energia transferida $\geq$ energia de ligação



Excitação, ionização e perda radiativa

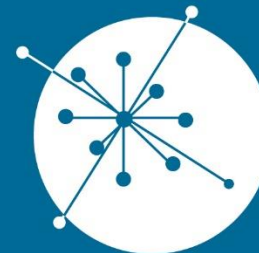
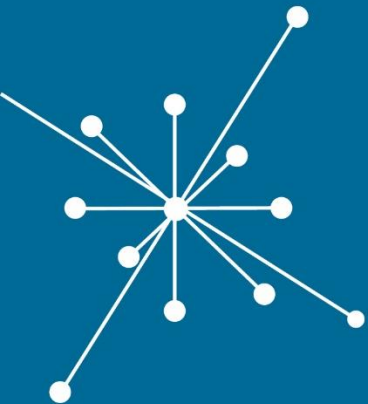
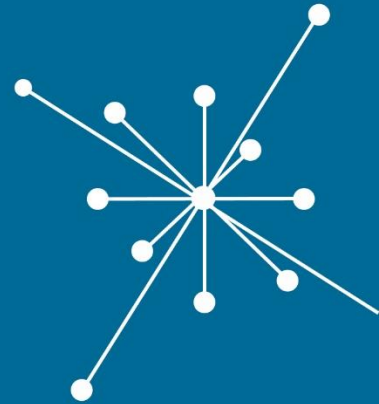


Caminho > alcance

α^{++} 

Caminho = alcance

Poder de freamento



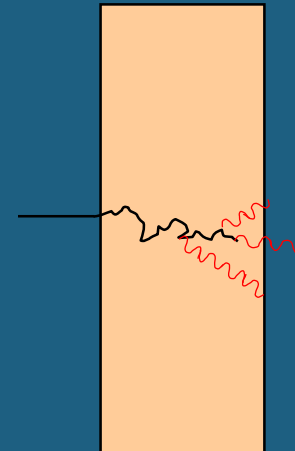
GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Alcance - Aproximações devidas à natureza estocástica das interações

- *Continuous Slowing Down Approximation (CSDA)*
 - Flutuações das perdas de energia não são consideradas
 - Partículas perdem sua energia continuamente numa taxa dada pelo *stopping power*
 - Não inclui interações sem perda de energia (difusão térmica, espalhamento elástico, etc.)

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-dE / dx}$$



Poder de freamento

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

- *Poder de freamento*
 - *Stopping power* ou poder de freamento
 - Valor esperado da taxa média de perda de energia de uma partícula por unidade de distância atravessada como função da energia da partícula [MeV.cm⁻¹ ou J.m⁻¹]
 - *Mass stopping power* ou poder de freamento mássico [MeV.cm².g⁻¹ ou J.m².kg⁻¹]

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

Poder de freamento

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

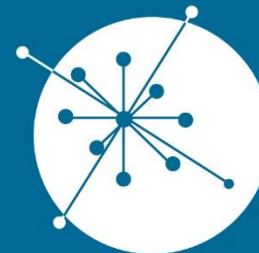
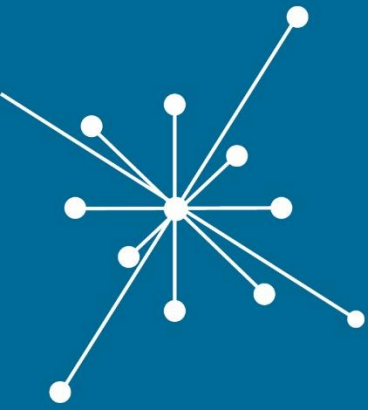
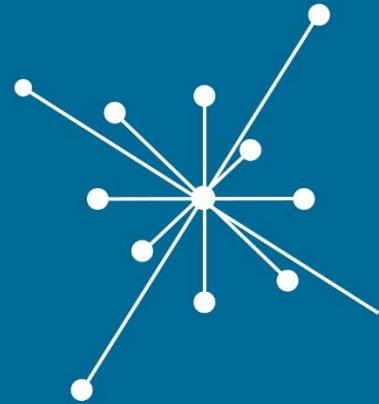
- Colisões leves
- Colisões duras

*deposição de energia
próxima do caminho
da partícula*

- interação com o
campo nuclear

*deposição de energia
distante do caminho
da partícula*

Partículas carregadas pesadas



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Poder de freamento de partículas carregadas pesadas

- Somente colisões
 - Inelásticas com o átomo (suaves)
 - Inelástica com elétrons fortemente ligados (duras)
- Poder de freamento
 - Relacionado à ionização e excitação dos átomos
 - Chamado de “eletrônico” ou “por colisão”
- Quando a energia é baixa
 - Espalhamento elástico com o núcleo
 - Poder de freamento nuclear – muito pequeno

Poder de freamento de partículas carregadas pesadas

- Processo complexo
 - Muitos tipos de aproximações
 - Ex. Hartree-Fock
 - Variação da carga do íon durante a trajetória
 - Carga efetiva
 - Diminui a medida que o íon perde velocidade
 - Tem dependência com o meio
- Não há expressão analítica geral (válida para qualquer energia) para o poder de freamento eletrônico para partículas carregadas pesadas

Interações de partículas carregadas pesadas

Dependência em I:
energia média
gasta para
ionizar e excitar
os átomos do meio

$$I \approx 10Z \text{ [eV]}$$

Dependência em (Z/A):
decrecente e
pouco variável

**Não há
dependência
com a massa
da partícula**

$$\left(\frac{dE}{\rho dx} \right)_{col} = 0,3071 \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[13,8373 + \ln \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - \ln I - \frac{C}{Z} \right]$$

**Aumenta com
o quadrado da
carga da partícula**

**APROXIMAÇÃO PARA CARGA
FIXA DO ÍON E VELOCIDADE DA
PARTÍCULA MUITO MAIOR QUE
DOS ELÉTRONS ORBITAIS**

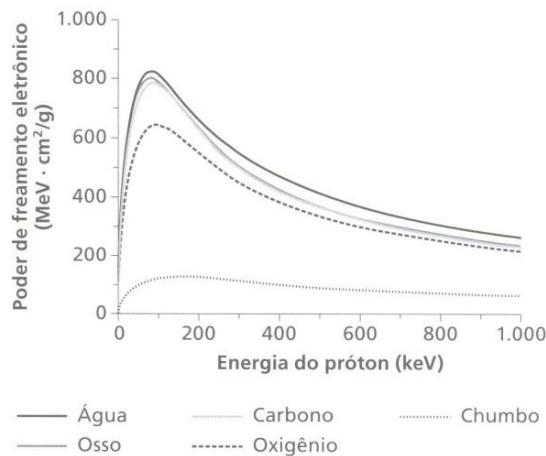


Fig. 7.1 Poder de freamento mássico eletrônico para prótons ($^1\text{H}^+$) incidentes em água, osso compacto, carbono (grafite), oxigênio e chumbo em função da energia cinética do próton. Valores obtidos da base de dados PStar (Berger et al., 2010a)

Interações de partículas carregadas pesadas

Para misturas:

$$\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{mist} = w_1 \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_1 + w_2 \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_2 + \cdots w_i \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_i$$

Regra de Bragg

Interações de partículas carregadas pesadas

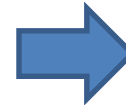
$$\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{col} = 0,3071 \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 \left[13,8373 + \ln\left(\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\right) - \beta^2 - \ln I - \frac{C}{Z} \right]$$

**Aumenta com
o quadrado da
carga da partícula**

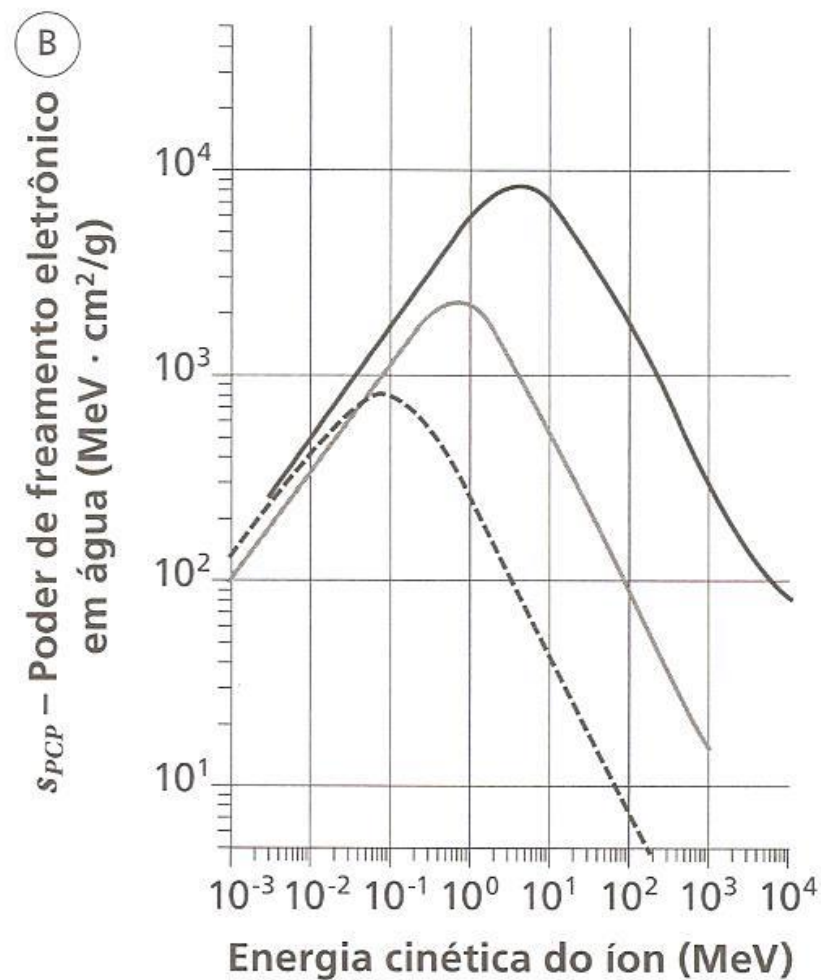
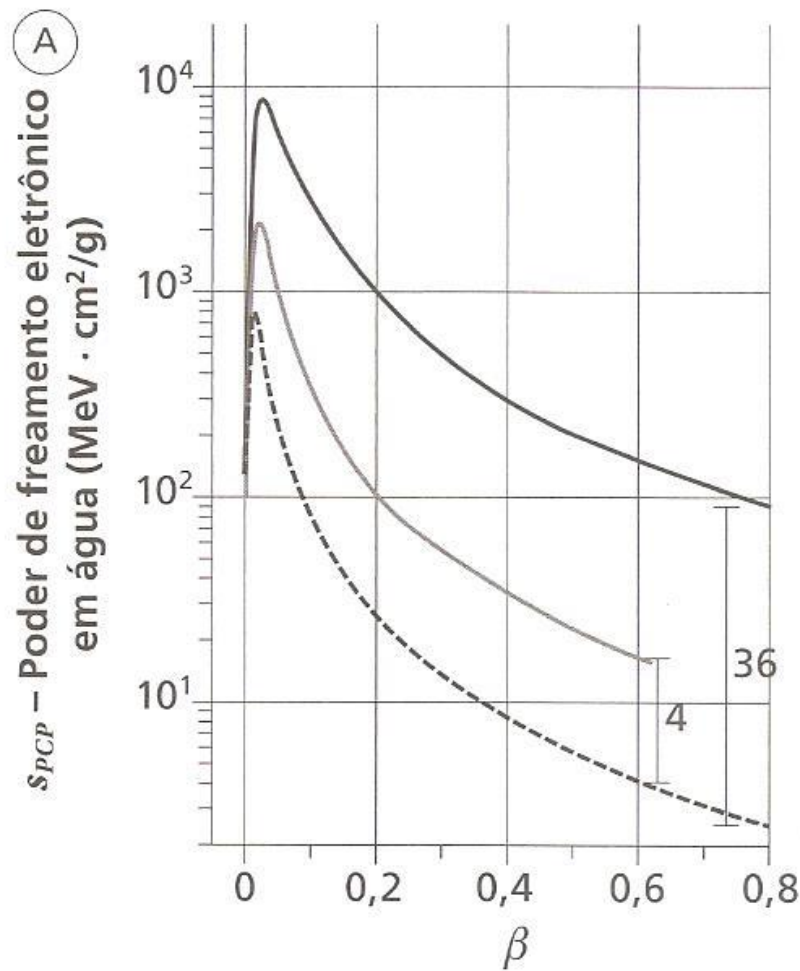
**Partícula alfa com
mesma velocidade
que um próton**



**Perda de energia
por unidade de
caminho 4x maior**



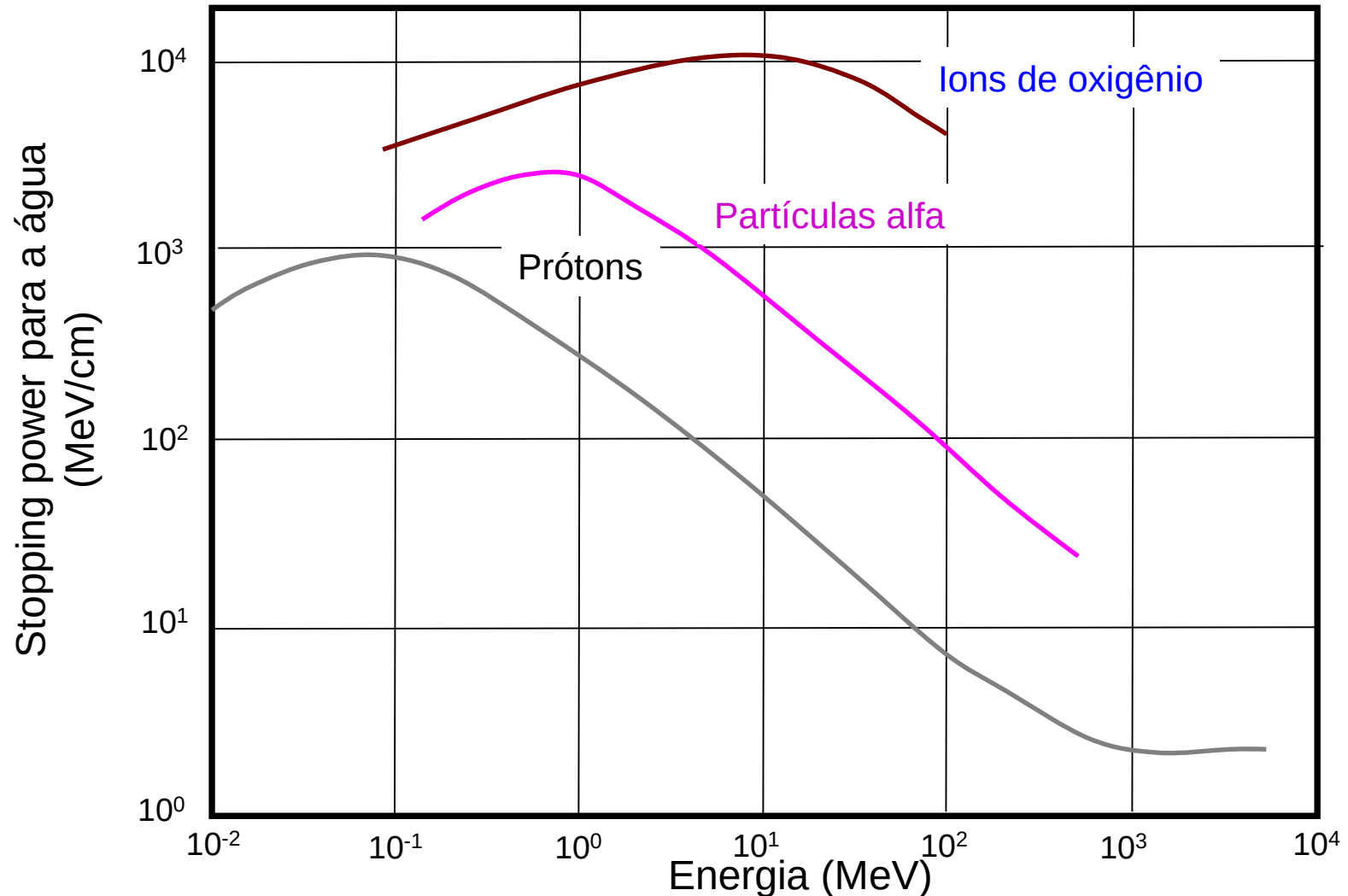
**Alcance cerca de
4x menor**



— C^{6+} — He^{2+} - - - H^+

Fig. 7.2 (A) Poder de freamento mássico eletrônico para três íons – próton ($^1\text{H}^+$), partícula alfa ($^4\text{He}^{2+}$) e carbono ($^{12}\text{C}^{6+}$) – incidentes em água, em função da velocidade dos íons; (B) mesmos valores de poder de freamento, em função da energia cinética das partículas. Valores obtidos com os programas PStar e AStar (Berger et al., 2010a) e MStar (Paul, 2010)

Interações de partículas carregadas pesadas



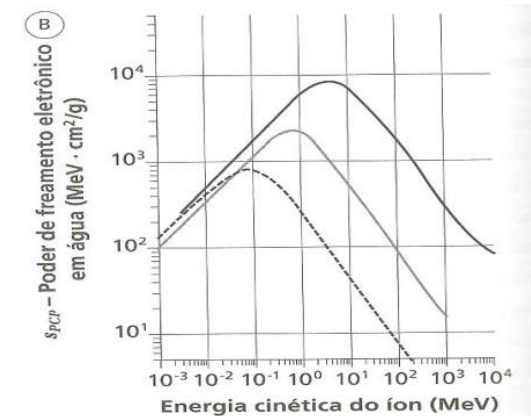
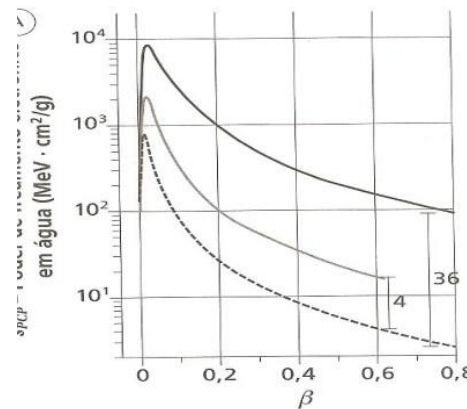
Exemplo 7.1

$$\Delta E \cong \Delta x \frac{dE}{dx} = \Delta x \rho \frac{dE}{\rho dx}$$

$$\Delta x \ll \text{alcance}$$

- Obtenha a energia perdida por um feixe de prótons de 20MeV com 10^{10} partículas que incide na córnea do olho. Suponha que a córnea tenha 0,60mm de espessura e que sua composição química seja muito próxima a da água.

$$\Delta E \cong \Delta x \frac{dE}{dx} = \Delta x \rho \frac{dE}{\rho dx}$$

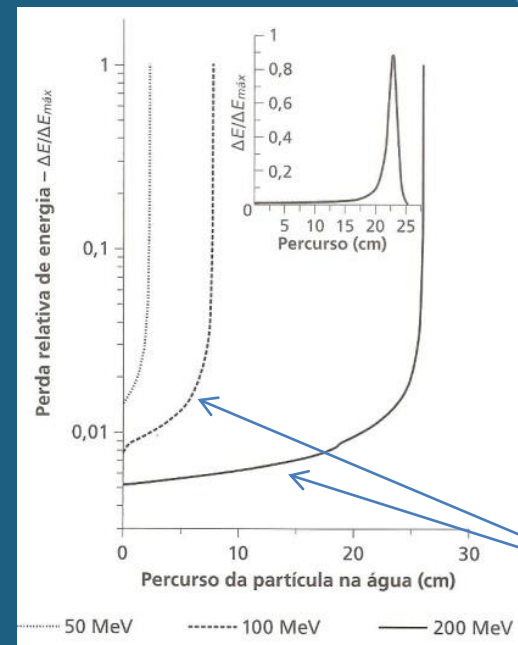


$$\Delta E \cong 0,06\text{cm} \times 1\text{g/cm}^3 \times 26\text{MeVcm}^2/\text{g} = 1,56\text{MeV/próton}$$

$$\Delta E_T \cong 1,56 \times 10^{10}\text{MeV} = 2,5 \times 10^{-3}\text{J}$$

Alcance

- Não há expressões analíticas para o poder de freamento para todas as energias
 - Solução → tabelas e programas baseados em compilações de dados experimentais e simulações
- Perda de energia cinética pelo íon
 - Não uniforme ao longo do percurso
 - Grande densidade de ionizações próximo ao fim do percurso
 - Aplicação → protonterapia



1 próton

muitos prótons de 200 MeV
(alargamento do Pico de Bragg)

Interações de partículas carregadas pesadas

$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-dE/dx}$
→
 $R(\beta_0) = \frac{M}{z^2} \int_0^{\beta_0} \frac{g(\beta)d\beta}{G(\beta)} = \frac{M}{z^2} f(\beta_0)$

Energia cinética inicial após algumas mudanças de variáveis Massa de repouso

Continuous slowing-down approximation (csda)

Processo de freamento contínuo com taxa média de perda de energia $(-dE/dx)$

$$\therefore \frac{R_1(\beta_0)}{R_2(\beta_0)} = \frac{z_2^2 M_1}{z_1^2 M_2}$$

Comparando deutério
com partícula alfa

$$\frac{R_d(\beta_0)}{R_\alpha(\beta_0)} = \frac{M_d}{1^2} \frac{2^2}{M_\alpha} = \frac{M_d}{2M_d} \frac{4}{1}$$

$$R_d(\beta_0) = 2R_\alpha(\beta_0)$$

Alcance de íons pesados

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-dE/dx}$$

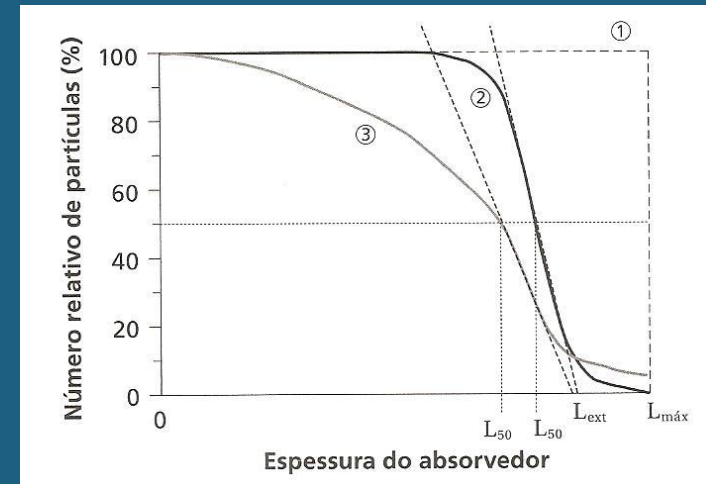
$$\text{partículas } \alpha \text{ no ar } R_{\alpha}^{ar} [cm] = \begin{cases} 0,56 E_{\alpha} & \text{para } E_{\alpha} < 4MeV \\ 1,24 E_{\alpha} - 2,62 & \text{para } 4MeV \leq E_{\alpha} < 8MeV \end{cases}$$

$$\text{partículas } \alpha \text{ em um meio } x \quad R_{\alpha}^x = 3,37 \times 10^{-4} R_{\alpha}^{ar} \frac{\sqrt{A_x}}{\rho_x}$$

$$\text{prótons no ar } R_p^{ar} [m] = \left[\frac{E_p}{9,3} \right]^{1,8} \quad \text{para } E_p < 200MeV$$

Alcance de partículas carregadas pesadas

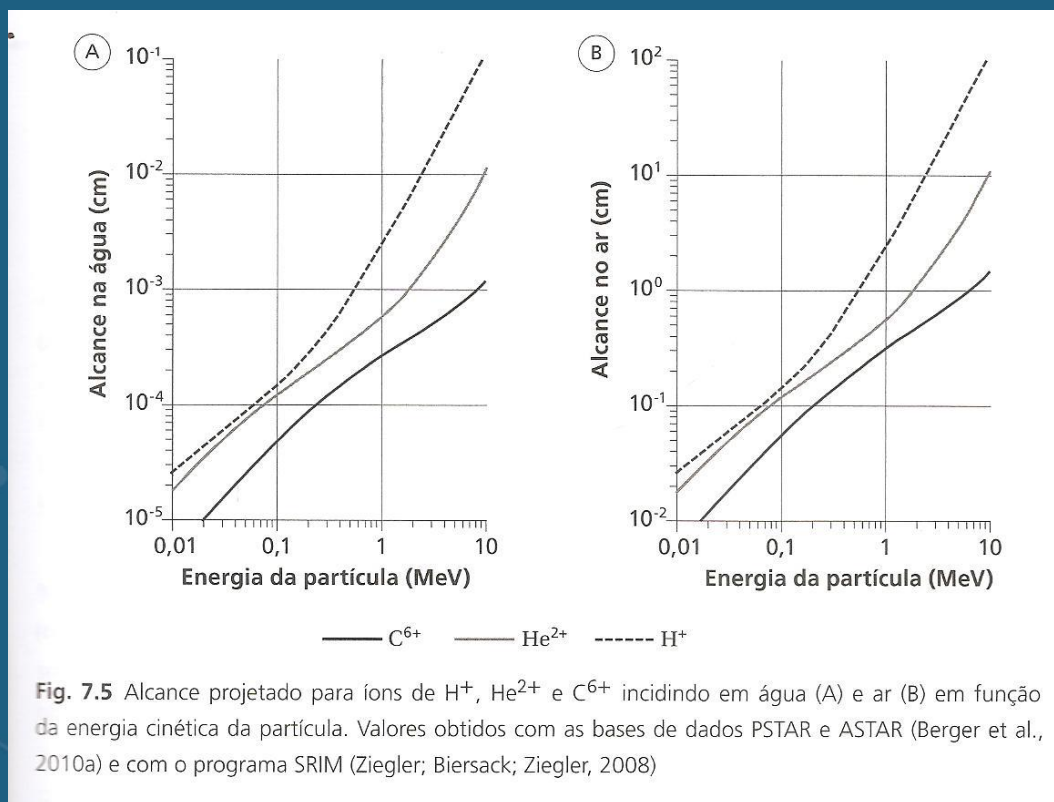
- Várias formas de definir o alcance
 - Figura: feixe monoenergético de partículas idênticas incidindo perpendicularmente em um material absorvedor homogêneo
 - 1 – situação ideal;
 - 2 – partículas pesadas
 - 3 – elétrons e pósitrons
 - Decréscimo lento → dispersão das trajetórias
 - Alcance médio (L_{50}) → redução de $\frac{1}{2}$ das partículas
 - Alcance extrapolado (L_{ext}) → extrapolação da tangente
 - Alcance máximo (L_{max}) → intersecção com o eixo das abcissas



Alcance de partículas carregadas pesadas: Alcance projetado

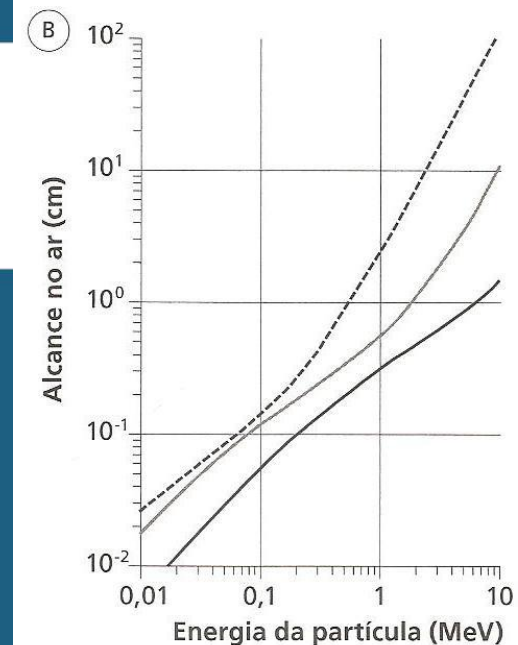
Alcance projetado: valor médio das espessuras máximas de material
que cada uma das partículas do feixe atravessa

Partículas pesadas: $L_{\text{proj}} \approx$ comprimento da trajetória



Exemplo 7.2

- Utilize a figura ao lado para obter o alcance de partículas alfa no ar com as energias mostradas na Tabela 7.1A. A partir desses valores, obtenha a espessura de ar necessária para diminuir a energia das partículas alfa emitidas pelo ^{210}Po do valor inicial (5,34 MeV) para 2 MeV



Tab. 7.1A

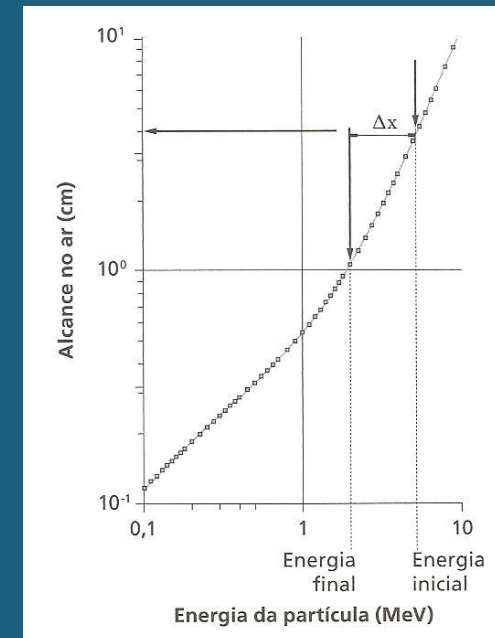
Energia da partícula alfa (MeV)
1,0
2,0
3,0
4,0
5,34

Para $E = 5,34 \text{ MeV} \rightarrow L_{\text{ar}} = 3,9 \text{ cm}$

Ao atingir $E = 2 \text{ MeV}$, a expectativa de alcance passa para 1 cm

Assim, o caminho percorrido para chegar aos 2 MeV é:

$$\Delta x = 3,9 - 1,0 = 2,9 \text{ cm}$$



Fonte: Okuno;Yoshimura
Física das radiações. 2010

Sumário

- Caracterização das interações
- Poder de freamento
- Partículas carregadas pesadas
 - alcance

