

# *Interação Radiação-Matéria* *p/ Física de Partículas*

*Thiago Tomei*  
*IFT-UNESP*  
*Março 2009*

# Sumário

- ❑ *Definição de detecção.*
- ❑ *Interações fundamentais.*
- ❑ *Processos de interação.*
- ❑ *Processos eletromagnéticos.*
  - *Excitação/ionização.*
  - *Bremsstrahlung.*
  - *Efeito fotoelétrico.*
  - *Espalhamento Thompson / Compton.*
  - *Produção de pares.*
- ❑ *Processos nucleares.*
- ❑ *Resumo*

# Definição de Detecção

- *Partícula descrita por uma coleção de quantidades.*
  - *Quadriposição  $x^\mu$ , quadrimomento  $p^\mu$ .*
  - *Identidade da partícula.*
    - *Carga elétrica (positiva/negativa, neutra).*
    - *Interação responsável pela maior parte da perda de energia.*
  - *Em geral: partícula  $\mathbf{p}_i = \{x_\mu^i, p_\mu^i, \xi^i\}$*
- *Sistema macroscópico  $\mathbf{X} \rightarrow$  coleção de partículas:  $\mathbf{X} = \{\sum \mathbf{q}_i\}$* 
  - *Estado do sistema após interação com partícula  $\mathbf{p}$  = estado das partículas constituintes após interação:  $\mathbf{X} = \{\sum \mathbf{q}_i(\mathbf{p})\}$*
  - *Estado  $\mathbf{X}(\mathbf{p})$  = soma sobre interações individuais das partículas  $\mathbf{q}_i$  com  $\mathbf{p}$  ~ soma sobre média dessas interações.*
  - *Conhecimento sobre interações é necessário.*

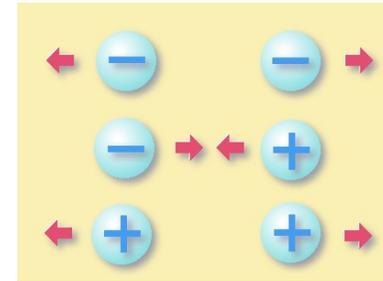
# Interações Fundamentais

❑ *Partículas estão sujeitas a interações fundamentais de acordo com suas características.*

❑ *Interação eletromagnética.*

– *Afeta partículas com carga elétrica.*

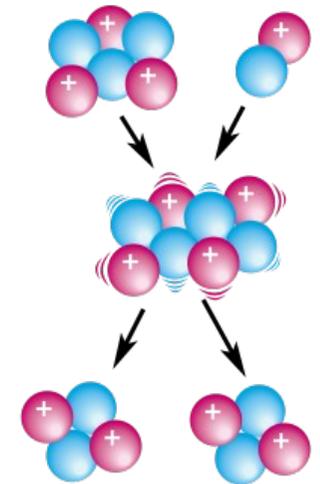
– *Afeta também o fóton – mediador.*



❑ *Interação forte.*

– *Afeta partículas com carga de "cor".*

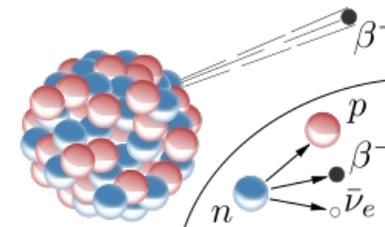
– *Em geral: quarks e o glúon – mediador.*



❑ *Interação fraca.*

– *Afeta todas as partículas quirais.*

❑ *Gravidade.*



# Interações Fundamentais

- ❑ *Em geral, apenas as interações forte e eletromagnética produzem efeitos tais que podem ser usados para detecção de partículas.*
- ❑ *Magnitudes relativas das interações:*

<i>Tipo de Interação</i>	<i>Intensidade</i>
Forte	1
Eletromagnética	1.00E-02
Fraca	1.00E-05
Gravitacional	1.00E-39

- *Note que a interação forte, apesar de sua magnitude, é de curtíssimo alcance – ordem de fm.*
- *Note também que a interação entre hádrons é uma interação remanescente da interação forte – "Van der Waals".*

# Processos de Interação

- ❑ *Em geral, o processo de interação de uma partícula com um sistema formado de um material depende de:*
  - *Quadrimomento e identidade da partícula.*
  - *Composição do material que forma o sistema.*
- ❑ *De modo geral, os processos de interação podem ser divididos em duas grupos e subgrupos:*
  - *Partículas carregadas.*
    - Partículas carregadas massivas.
    - Elétrons.
  - *Radiação neutra.*
    - Partículas neutras massivas (nêutrons).
    - Radiação eletromagnética (fótons).

# Processos Eletromagnéticos

- ❑ *Processos que a interação eletromagnética é a dominante.*
  - *Quaisquer processos envolvendo elétrons e fótons.*
  - *Processos envolvendo outras partículas carregadas, dependendo da energia e da partícula.*
- ❑ *Para partículas carregadas:*
  - *Ionização/excitação.*
  - *Bremsstrahlung.*
- ❑ *Para fótons:*
  - *Efeito fotoelétrico.*
  - *Efeito Compton.*
  - *Produção de pares.*

# Ionização/Excitação – Fórmula de Bethe

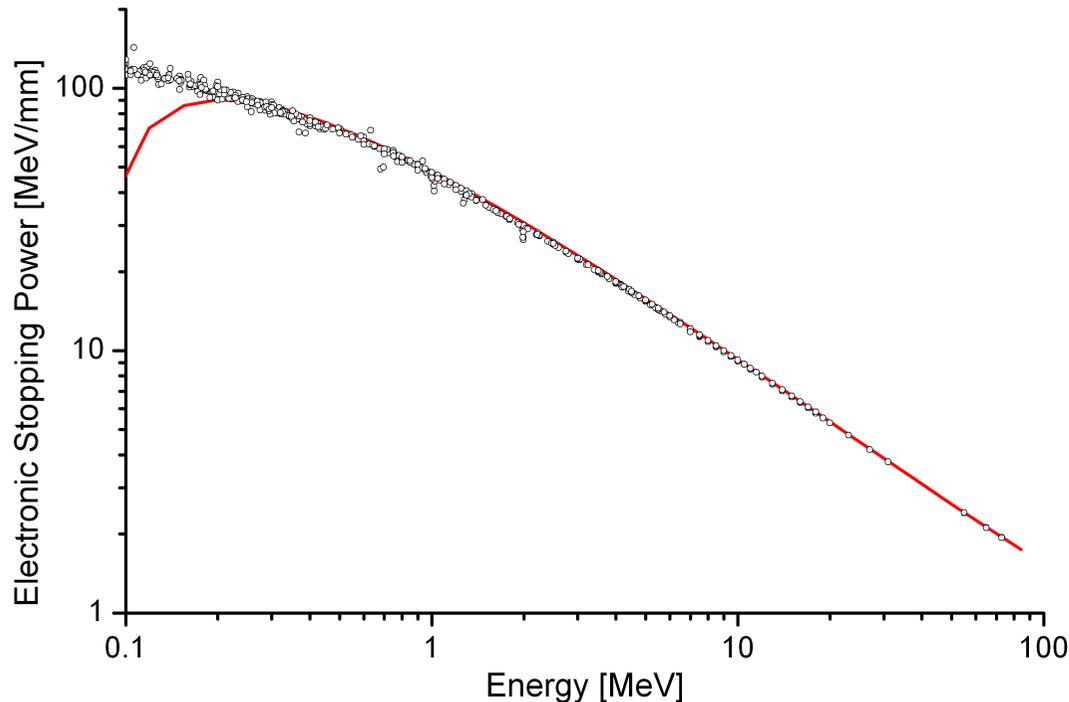
- ❑ *Partícula carregada perde energia para elétrons do meio.*
- ❑ *Importante a baixas energias.*
  - *Mas ainda muito maiores que energia média do e- no átomo.*
- ❑ *Para partícula com massa  $M \gg m_e$ , a perda de energia por unidade de comprimento  $\times$  densidade de átomos:*

$$\frac{dE}{d(\rho x)} = -KZ^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

onde  $K = \frac{4\pi N_A \alpha^2 \hbar^2}{m_e} \approx 0.31 \text{ MeV cm}^2/\text{mol}$

- *Primeiro termo e segundo termos: espalhamento Coulombiano em 1ª aprox. (Born) + correções quânticas.*
- *Terceiro termo: efeito de densidade (polarização do meio).*

# Ionização/Excitação – Fórmula de Bethe



❑ *Poder de parada de prótons em Al em função da energia do próton.*

❑ *Aproximações:*

- *Massa da partícula incidente  $M \gg m_e$ .*
- *Ignorando spin da partícula incidente.*
- *Muitas colisões ao longo da passagem da partícula incidente x pouca perda de energia por colisão.*

❑ *Acurácia da fórmula de Bethe  $\sim 1\%$ .*

# Bremsstrahlung

- ❑ *Partícula carregada sofre espalhamento Coulombiano.*
  - *Sofre aceleração → emite radiação → perde energia.*
- ❑ *Espalhamento tanto com e- como com núcleos do meio.*
- ❑ *Derivável a partir da aproximação de Weizsacker-Williams.*
  - *Campo E.M de uma carga relativística ~ campo de um pulso de radiação na direção do momento da carga.*
  - *Em uma dada colisão de partículas carregadas (A,B):*
    - Definir quem é o "alvo" e quem é o "projétil".
      - *Cuidado: em colisão e- / núcleo o "alvo" é o elétron!*
    - Calcular o pulso de radiação equivalente ao campo do projétil.
    - Análise de Fourier do pulso.
    - Efeito do pulso no alvo (espalhamento e absorção).

# Bremsstrahlung

- ❑ *Importante em uma região de energias mais altas.*
- ❑ *Para energias altas o suficientes, perdas por Bremsstrahlung dominam todos os outros mecanismos.*
- ❑ *Energia  $E_c$  a partir da qual Bremsstrahlung domina:*

– *Elétrons:*  $E_c = \frac{610}{Z+1.24} \text{ MeV (sólidos)}$

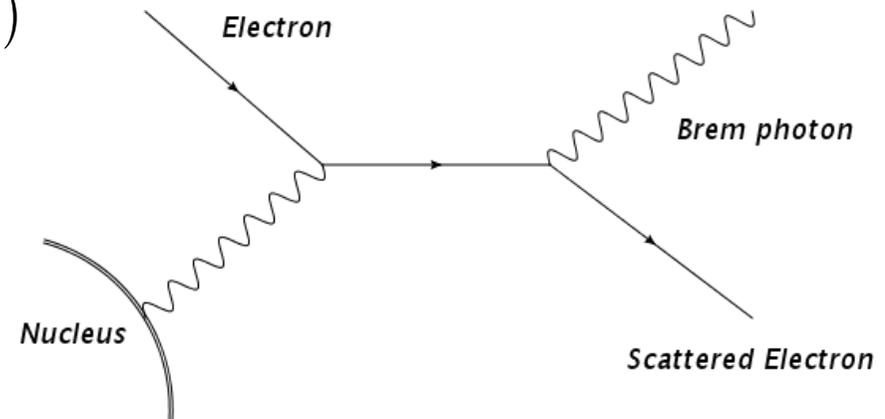
$$E_c = \frac{710}{Z+0.92} \text{ MeV (fluidos)}$$

– *Múons: ~ centenas de GeV.*

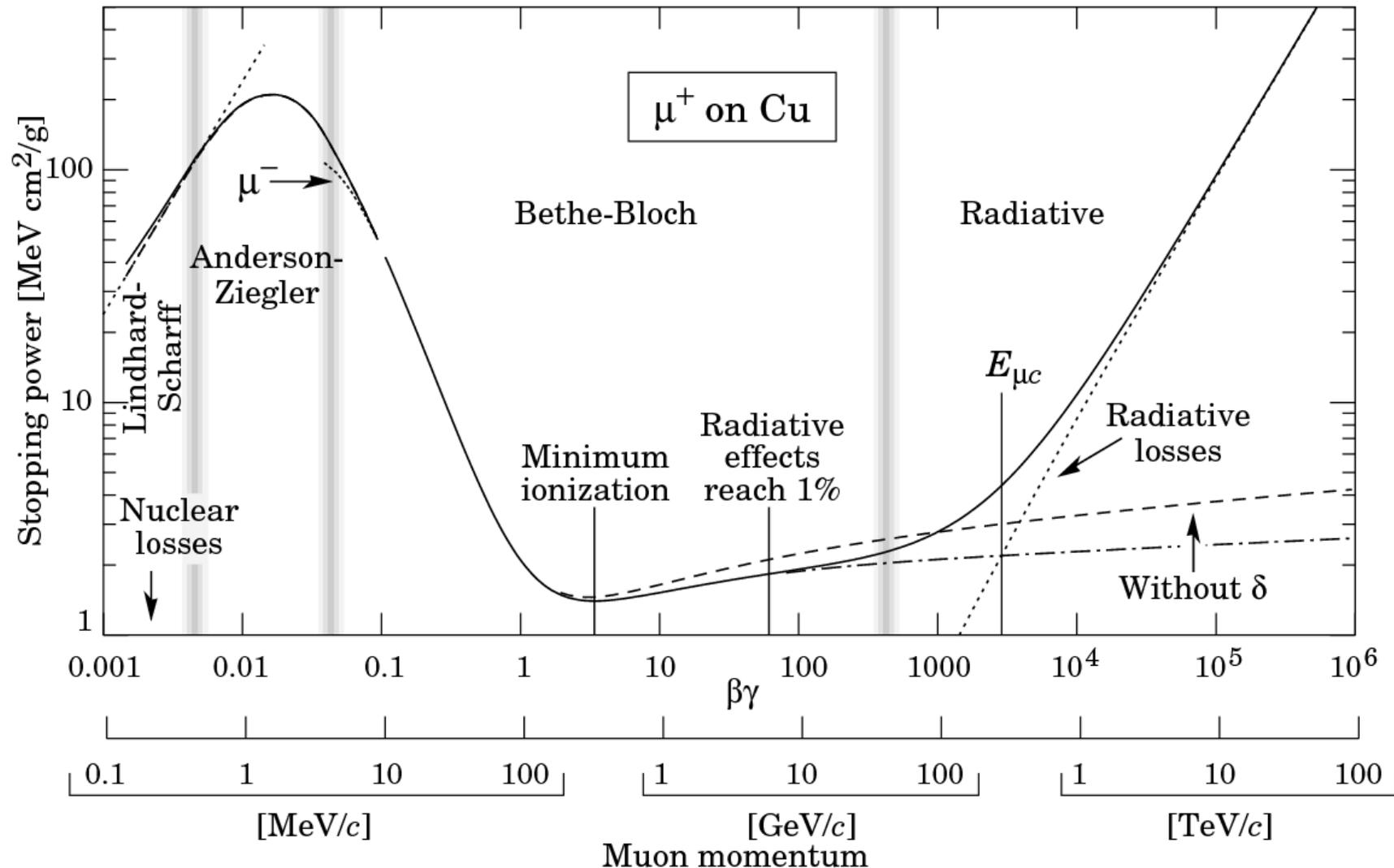
- ❑ *Taxa de perda de energia:*

$$\frac{dE}{d\rho x} = -\frac{E}{X_0}, \quad X_0 = X_0(Z, A, m)$$

–  *$X_0$  = comprimento de radiação.*



# $dE/dx$ – Partículas Carregadas



- ▣ Poder de parada de múons positivos em cobre (Particle Data Group). Perceba os diferentes regimes de energia.

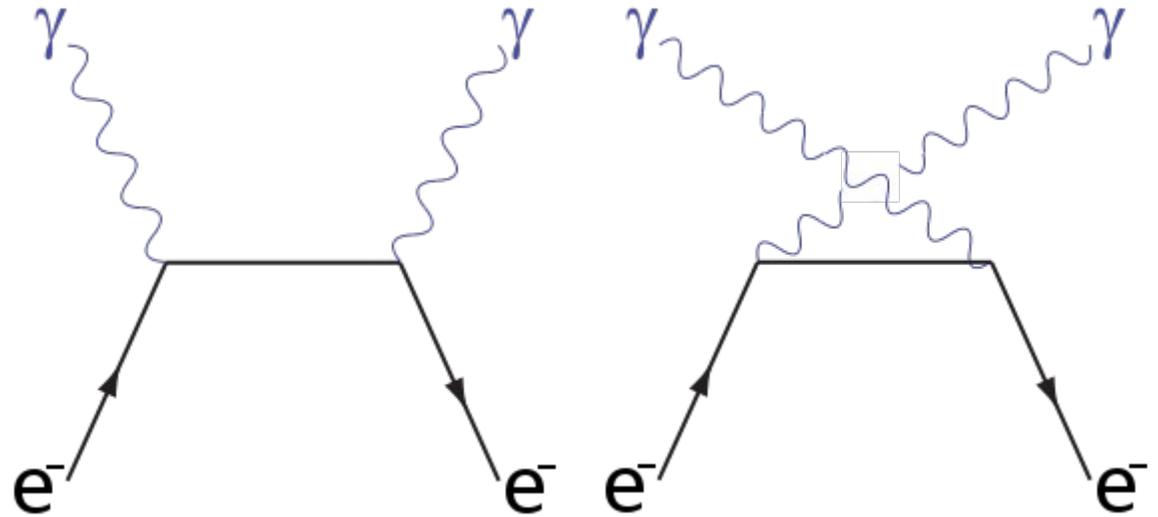
# Efeito Fotoelétrico

- *Átomo +  $\gamma \rightarrow \text{íon} + e^-$*
- *Importante a baixas energias.*
- *Tratável por teoria de perturbação não relativística.*
  - *Escreve a hamiltoniana de interação campo E.M – elétron.*
  - *Escreve o elemento de matriz  $\langle f | H | i \rangle$ , onde o estado inicial é o elétron ligado no átomo e o estado final é o elétron livre.*
  - *Aplica a regra de ouro de Fermi.*
- *Seção de choque para elétron da camada K:*

$$\sigma_{photo}^K \sim \frac{8\pi}{3} \left( \frac{32}{\epsilon^7} \right)^{1/2} \frac{\alpha^6 Z^5}{m_e^2}, \text{ com } \epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e}$$

# Efeito Compton

- $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$
- *Importante a energias intermediárias (cerca de 1 MeV).*
  - *Pode não ser relevante para certos materiais.*



- *Pode ser calculado de Eletrodinâmica Quântica.*

- *Diagramas de Feynman dos canais s e u do espalhamento Compton*

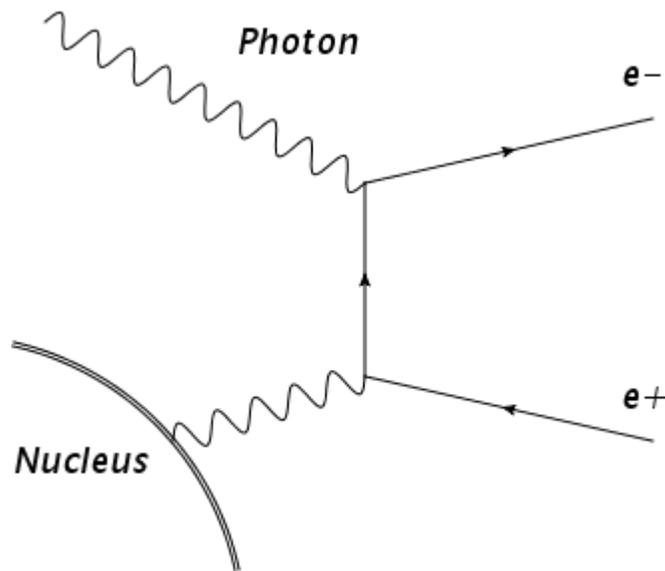
– *Fórmula de Klein-Nishina.*

- *Seção de choque total → soma incoerente sobre elétrons do átomo.*

$$\sigma_c^K \sim Z \pi \frac{\alpha^2}{m_e^2} \frac{\ln \epsilon}{\epsilon}, \quad \text{com } \epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e}$$

# Produção de Pares

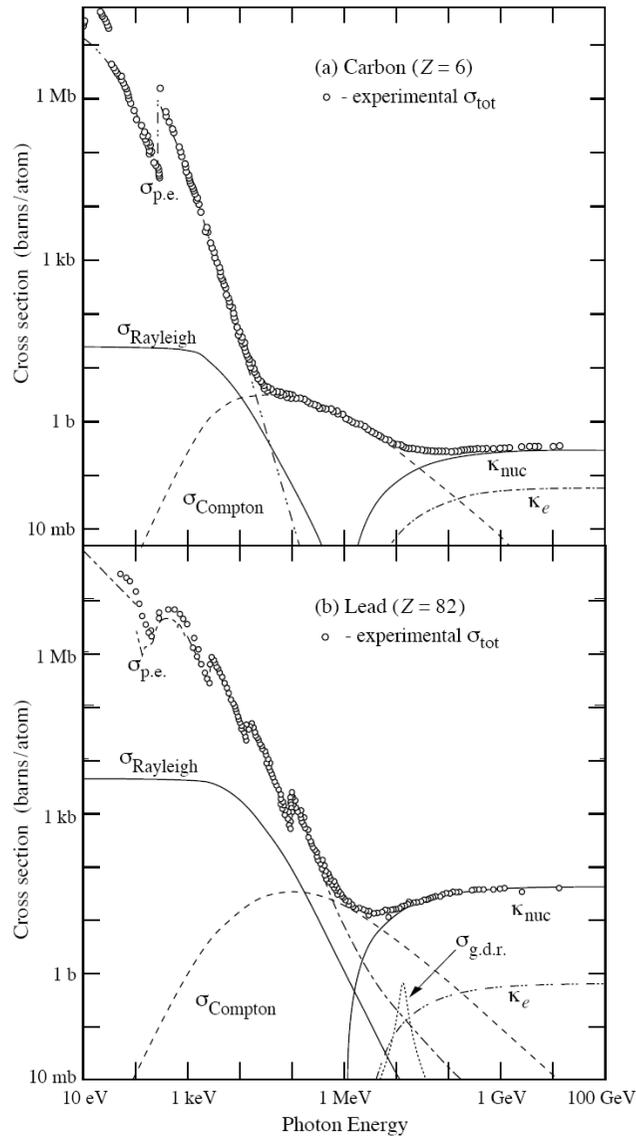
- $\gamma + \text{núcleo} \rightarrow \text{núcleo} + e^+ e^-$
- *Relacionado com Bremsstrahlung nuclear por crossing.*
  - *Conservação de energia-momento: o fóton recua contra o núcleo para dar origem ao par elétron-pósitron.*
- *Comprimento de radiação  $X_0$  aparece novamente.*



- *Seção de choque:*

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{A}{X_0 N_A} \left( 1 - \frac{4}{3} x(1-x) \right) \rightarrow$$
$$\sigma_{pairs} = \frac{7}{9} \frac{A}{X_0 N_A}, \text{ com } x = \frac{E}{k}$$

# Seção de Choque – Fótons



- ❑ Para diferentes regimes de energia, diferentes processos são dominantes.
- ❑ Perceba a dualidade. A altas energias:
  - Elétrons liberam fótons por bremsstrahlung.
  - Fótons geram elétrons por produção de pares.
- ❑ Essa é a origem do fenômeno conhecido como chuva eletromagnética.

# Processos Nucleares

- *Dominantes para partículas neutras que interagem hadronicamente.*
- *Essencialmente processos inelásticos.*
- *Ordem de grandeza:*  
$$\sigma_{nuc} \sim \pi a_N^2 \sim 30 \text{ mb},$$
$$a_N \sim 1 \text{ fm}$$
- *Literatura: tabelas contendo comprimentos de interação para diferentes materiais*

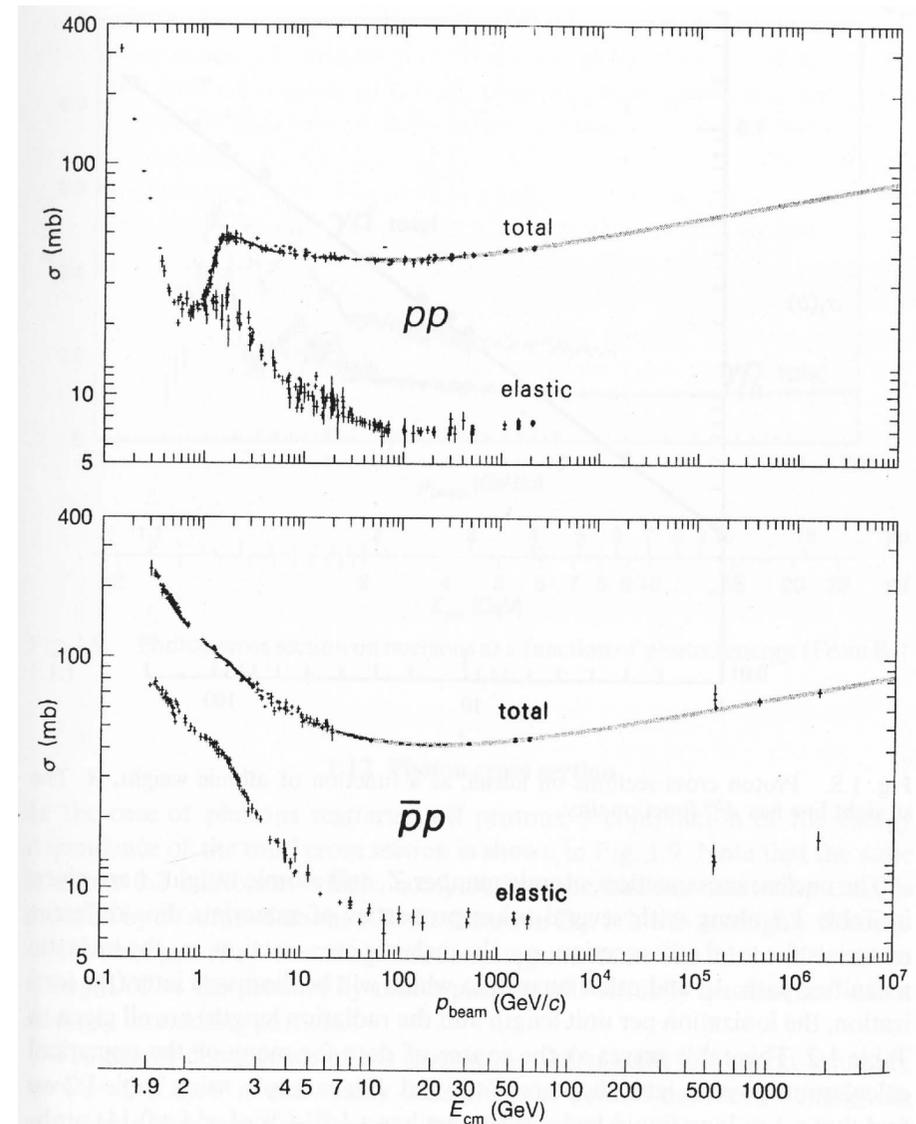


Fig. 1.7. Proton/antiproton cross section on proton as a function of projectile energy. (From Ref. 1.1.)

# Processos Nucleares

Table 1.5. Total and inelastic cross sections as well as interaction and absorption lengths for various materials derived from the corresponding cross sections [34, 35]

material	Z	A	$\sigma_{\text{total}}$ [barn]	$\sigma_{\text{inel}}$ [barn]	$\lambda_w \cdot \rho$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$\lambda_a \cdot \rho$ [g/cm <sup>2</sup> ]
Water	1	1.01	0.0387	0.033	43.3	50.8
Helium	2	4.0	0.133	0.102	49.9	65.1
Beryllium	4	9.01	0.268	0.199	55.8	75.2
Carbon	6	12.01	0.331	0.231	60.2	86.3
Nitrogen	7	14.01	0.379	0.265	61.4	87.8
Oxygen	8	16.0	0.420	0.292	63.2	91.0
Aluminum	13	26.98	0.634	0.421	70.6	106.4
Silicon	14	28.09	0.660	0.440	70.6	106.0
Iron	26	55.85	1.120	0.703	82.8	131.9
Copper	29	63.55	1.232	0.782	85.6	134.9
Tungsten	74	183.85	2.767	1.65	110.3	185
Lead	82	207.19	2.960	1.77	116.2	194
Uranium	92	238.03	3.378	1.98	117.0	199

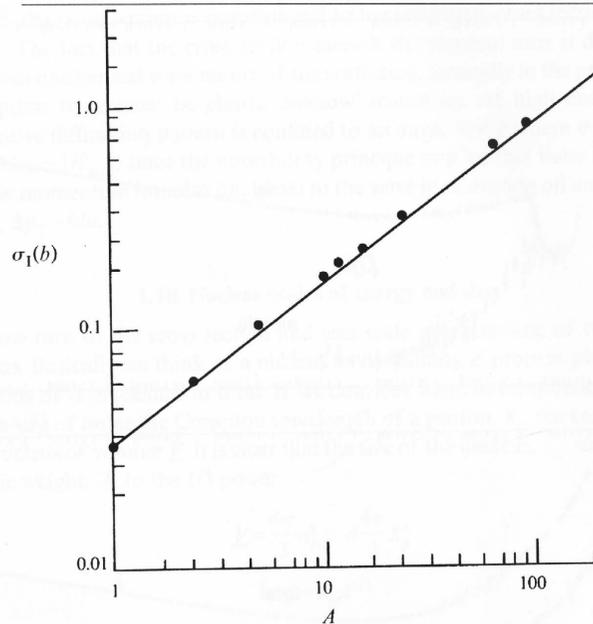


Fig. 1.8. Proton cross sections on nuclei, as a function of atomic weight,  $A$ . The straight line has  $A^{2/3}$  functionality.

- ❑ Núcleos de alto  $Z$ : essencialmente "escuros".
- ❑ Raio do núcleo pode ser estimado a partir da física nuclear:

$$R \simeq r_0 A^{1/3}, \quad R \simeq 1.16 \text{ fm}$$

- ❑ Seção de choque é proporcional a  $R^2 \rightarrow$  dependência com  $A^{2/3}$ .
- ❑ Também ocorre formação de chuviscos hadrônicos.

# Resumo

- ❑ *Partículas interagem com a matéria de acordo com suas propriedades e energia.*
- ❑ *Elétrons:*
  - *Baixas energias: excitação/ionização.*
  - *Altas energias: bremsstrahlung*
- ❑ *Partículas carregadas massivas: excitação/ionização.*
- ❑ *Fótons:*
  - *Energias crescentes: efeitos fotoelétrico, Compton, produção de pares.*
- ❑ *Hádrons neutros: processos nucleares.*
- ❑ *Pergunta – e os léptons neutros?*