# Princípios Físicos da Detecção de Radiação e Partículas

## Hugo Natal da Luz

Técnicas Experimentais para Física de Partículas

6 de Agosto de 2018







### Resumo

- 1 Introdução
- 2 Seção de Choque
- 3 Interacção de fotões
  - Efeito fotoeléctrico
  - Efeito de Compton
  - Produção de pares
- 4 Partículas carregadas
  - Fórmula de Bethe-Bloch
  - Identificação de partículas
  - Flutuações dem dE/dx (distribuição de Landau)
  - Alcance de partículas carregadas
  - Curva de Bragg
  - Electrões um caso especial
  - Bremsstrahlung
  - Espalhamento de Coulomb múltiplo (multiple Coulomb scattering)
  - Radiação de Čerenkov
  - Radiação de Transição
- 5 Neutrões

### Introdução Secão de

Choque

### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau

Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Cerenkov Transição Neutrões





# Princípios da Detecção de Partículas

Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part. Carregadas

PID Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Bethe-Block

### Čerenkov Transição Neutrões

3/40

### Precisamos de detectar partículas para:

- Entender as suas propriedades
- Estudar partículas que não existem às energias normais
- Tirar vantagem das suas propriedades em aplicações.

### Para detectar partículas, elas têm que:

- Interagir com o material do detector
- Transferir a sua energia de um modo que se possa identificar.

### Para isso temos que explorar propriedades já conhecidas:

- Carga eléctrica (quantizada)
- Tipo de interacção a que cada partícula é sujeita (forte, fraca, electromagnética)





Secão de Choque

Fotões Fotoeléctrico Compton

P. pares

Carregadas Bethe-Block

DID

Landau

Alcance Bragg

Flectrões

Multiplo Čerenkov

Transição

Neutrões

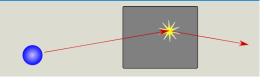
Bremsstrahlung

# Interacções de partículas com a matéria

### Para uma partícula ser detectada, ela tem que interagir com o material do detector

Partículas podem interagir com:

- átomos ou moléculas
- electrões
- núcleo



### **Partículas**

carregadas Ionização, Bremstrahlung, Čerenkov. ...

Hadrões Interaccões nucleares

Compton, produção de pares

Neutrinos Interacção fraca

### Exemplos

Fotões Efeito fotoeléctrico e de

### Curto alcance

- interacção forte
- interacção fraca

### Longo alcance

Interacção electromagnética:

- ionização
- processos radiativos
- produção de pares



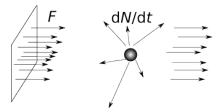


# Conceito: Seção de Choque

Seção de choque Área efectiva de uma colisão/interacção.

Reflecte a probabilidade de uma interacção.

Feixe paralelo uniforme, incidindo em um átomo.



$$\sigma(E) = \frac{1}{F} \frac{dN}{dt} = \frac{\dot{N}}{F} \qquad (fm^2)$$

F fluxo:  $N_0/(cm^2 s)$ ,  $\dot{N}$  partículas que interagiram por unidade de tempo, E Energia

Atenção Este exemplo só funciona com:

- uma partícula no alvo
- feixe ocupando área muito maior do que a partícula
- lacktriangle Se for uma bola de boliche bombardeada por bolas de gude:  $\sigma$  é a área da seção recta da bola de boliche
- $\blacksquare$  Se for um asteroide passando perto da Terra:  $\sigma$  é maior que a área da seção recta da Terra!

### Introdução

### Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

### Carregadas

## Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões

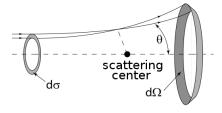




# Conceito: Seção de Choque

Seção de choque diferencial Para medir a seção de choque total  $\sigma(E)$ , seria necessário um detector em  $4\pi$ .

Normalmente estamos interessados em apenas uma fracção do ângulo sólido d $\Omega$  correspondente a partículas que passaram no anel de área d $\sigma$ .



$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}(E,\Omega) = \frac{1}{F} \frac{\mathrm{d}\dot{N}}{\mathrm{d}\Omega}$$

Seção de choque total:

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

### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões

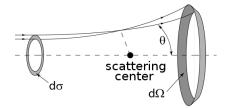




# Conceito: Seção de Choque

Seção de choque diferencial Para medir a seção de choque total  $\sigma(E)$ , seria necessário um detector em  $4\pi$ .

> Normalmente estamos interessados em apenas uma fracção do ângulo sólido d $\Omega$  correspondente a partículas que passaram no anel de área d $\sigma$ .



$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}(E,\Omega) = \frac{1}{F} \frac{\mathrm{d}\dot{N}}{\mathrm{d}\Omega}$$

Seção de choque total:

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

Introdução

### Fotões Fotoeléctrico

Compton P. pares

## Carregadas

Bethe-Block PID Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

Neutrões

6/40



## Alvos têm sempre mais do que um átomo

$$n = AN_{\rho}\Delta x = AN_{a}$$
, com  $N_{a} = N_{\rho}\Delta x$ 

n átomos no alvo, A área exposta ao feixe,  $N_o/N_a$  átomos por unidade de volume/área,  $\Delta x$  espessura do alvo

## Partículas espalhadas para d $\Omega$ :

$$\dot{N}(E,\Omega) = Fn \frac{d\sigma}{d\Omega} = FAN_a \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

## Número total de interacções:

$$\dot{N}_{\rm tot}(E) = FAN_{\rm a}\sigma$$

## Probabilidade de interacção:

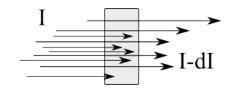
$$p_{\text{int}} = \frac{\dot{N}_{\text{tot}}(E)}{N_{\text{incid}}} = \frac{\dot{N}_{\text{tot}}(E)}{FA} = N_{\text{a}}\sigma$$



## Interacção de fotões com a matéria

Introdução

O fotão pode desaparecer do feixe com a primeira interacção!



### Fotoeléctrico

Secão de Choque

Compton P. pares

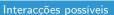
Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

### Neutrões



- Efeito fotoeléctrico
- Efeito de Compton
- Produção de pares





# Interacção de fotões com a matéria

Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

### Carregadas

Bethe-Bloch

PID

Landau Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

### Neutrões

7/40

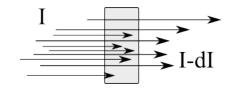
O fotão pode desaparecer do feixe com a primeira interacção!

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I$$

 $\mu = N_{\rho}\sigma$  coeficiente de absorção

### Interacções possíveis

- Efeito fotoeléctrico
- Efeito de Compton
- Produção de pares









### Seção de Choque

#### Fotões

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

# Carregadas Rethe-Bloch

PID Landau

Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões

7/40

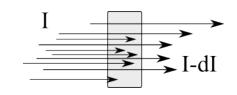
# O fotão pode desaparecer do feixe com a primeira interacção!

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x} = -\mu I$$

 $\mu = N_{\rho}\sigma$  coeficiente de absorção

### Interacções possíveis

- Efeito fotoeléctrico
- Efeito de Compton
- Produção de pares



### Lei de Beer-Lambert

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

$$\lambda = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{N_{
ho}\sigma}$$
 caminho livre médio





# Interacção de fotões com a matéria

### Introdução

### Seção de Choque

### Fotoeléctrico

Compton P. pares

### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

# Transição Neutrões

8/40



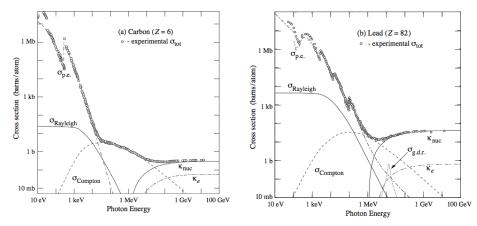


Figure 27.14: Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes:

 $\sigma_{\rm p.e.}=$  Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)

 $\sigma_{\text{Rayleigh}} = \text{Rayleigh}$  (coherent) scattering-atom neither ionized nor excited  $\sigma_{\text{Compton}} = \text{Incoherent}$  scattering (Compton scattering off an electron)

 $\kappa_{\text{nuc}} = \text{Pair production, nuclear field}$ 

 $\kappa_e$  = Pair production, electron field

 $\sigma_{\rm g.d.r.}$  = Photonuclear interactions, most notably the Giant Dipole Resonance [48]. In these interactions, the target nucleus is broken up.



# Efeito fotoeléctrico

Introdução

Secão de Choque

Fotões Fotoeléctrico

Compton

P. pares

Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov

Transição

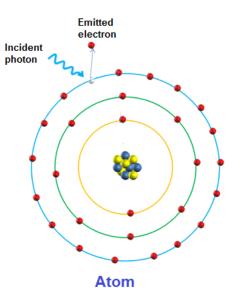
Neutrões 9/40





$$E_{\rm e}={\rm h} \nu-E_{\rm b}$$

 $h\nu$  Energia do fotão, E<sub>b</sub> energia de ligação (dependente de Z e da camada electrónica)





# Efeito fotoeléctrico

Introdução

Seção de Choque

Fotões

Fotoeléctric

Compton P. pares

Part.

Carregadas

Bethe-Bloch

PID

Landau

Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões

9/40

ıtrões

Energia do electrão ejectado:

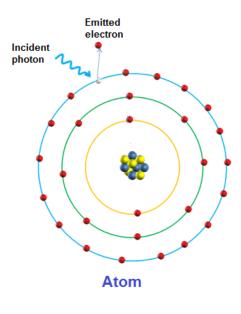
$$E_e = h\nu - E_b$$

 $h\nu$  Energia do fotão,

 $E_{\rm b}$  energia de ligação (dependente de Z e da camada electrónica)

$$\sigma_{
m p.e.} \propto rac{Z^n}{({
m h}
u)^{rac{7}{2}}}$$

 $\emph{n}$  camada electrónica (mudanças bruscas para h $\nu < E_{\rm k}$ )







## Efeito fotoeléctrico

Introdução

Seção de Choque Fotões

Compton

P. pares

Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

Neutrões

9/40

Energia do electrão ejectado:

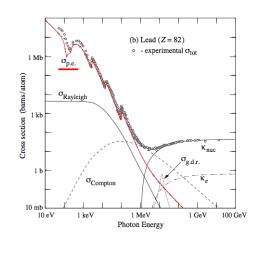
$$E_e = h\nu - E_b$$

 $h\nu$  Energia do fotão,

E<sub>b</sub> energia de ligação (dependente de Z e da camada electrónica)

$$\sigma_{
m p.e.} \propto rac{Z^n}{({
m h}
u)^{rac{7}{2}}}$$

n camada electrónica (mudanças bruscas para  $h\nu < E_k$ )







# Efeito de Compton

Introdução Secão de

Choque Fotões

Fotoeléctrico

P. pares

Part.

## Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau

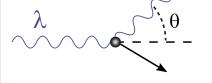
Alcance Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões





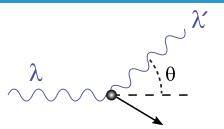
### Conservação do momento e da energia

$$\begin{cases} h\nu + m_{\rm e}c^2 &= h\nu' + \sqrt{(p_{\rm e}c)^2 + (m_{\rm e}c^2)^2} \\ \vec{p_{\gamma}} &= \vec{p_{\rm e}} + \vec{p_{\gamma}} \end{cases}$$

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}$$



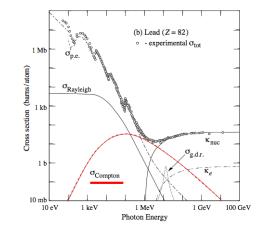
# Efeito de Compton



## Conservação do momento e da energia

$$\begin{cases} h\nu + m_{\rm e}c^2 &= h\nu' + \sqrt{(p_{\rm e}c)^2 + (m_{\rm e}c^2)^2} \\ \vec{p_{\gamma}} &= \vec{p_{\rm e}} + \vec{p_{\gamma}'} \end{cases}$$

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_{\rm e}c} (1 - \cos \theta)$$
$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_{\rm e}c^2} (1 - \cos \theta)}$$



Para  $E_{\gamma}$  elevado:

$$\sigma_{
m compton} \propto Z \cdot rac{\ln(E_{\gamma}/m_{
m e}c^2)}{m_{
m e}c^2}$$

### Introdução

Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico

P. pares

#### P. pare

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau Alcance

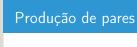
Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição Neutrões

Neutrõe







Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Part

Carregadas Bethe-Bloch

Bethe-Blo

Landau

Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

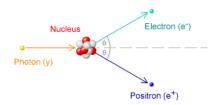
Multiplo Čerenkov

Transição

### Neutrões







Necessita da vizinhança do campo eléctrico de um núcleo.

$$E_{\gamma} \ge 2m_{\rm e}{
m c}^2(1+m_{\rm e}/m_{\rm n})$$
  $E_{{
m e}^-}+E_{{
m e}^+}={
m h}
u-2m_{
m e}{
m c}^2$ 

O excesso de energia é transferido para o e<sup>-</sup> e para o e<sup>+</sup> sob a forma de energia cinética.

Secão de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo

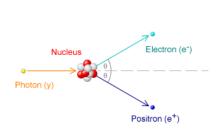
Čerenkov Transição

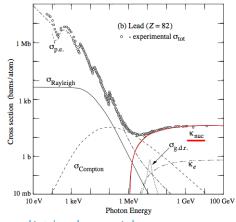
### Neutrões

11/40



# Produção de pares





Necessita da vizinhança do campo eléctrico de um núcleo.

$$E_{\gamma} \ge 2m_{\rm e}{
m c}^2(1+m_{\rm e}/m_{\rm n})$$
  $E_{\rm e^-} + E_{\rm e^+} = {
m h} 
u - 2m_{\rm e}{
m c}^2$ 

O excesso de energia é transferido para o e<sup>-</sup> e para o e<sup>+</sup> sob a forma de energia cinética.



Introdução

Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões

12/40



## Perda de energia média (Stopping power)

$$S = -\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \right\rangle$$



Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch

PID Landau Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

Transição

### Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$



Introdução Seção de

### Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

### Rethe-Bloch

PID
Landau
Alcance
Bragg
Electrões
Bremsstrahlung
Multiplo
Čerenkov
Transicão

#### Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- lacksquare Só para partículas pesadas ( $M>>m_{
  m e}$  e  $v>>v_{
  m e}$ )
- Não é válida para electrões



# Introducão

#### Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part. Carre Beth

### Carregadas Bethe-Bloch

Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

# Transição Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 \, T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio



## Introducão

#### Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

### P. pares

#### Carregadae

### Bethe-Bloch

PID Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

### Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio

$$K = N_A e^2/\epsilon_0 = 0.307 \,\mathrm{MeVcm^2/g}$$



Introdução Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Part.

### Bethe-Bloch

PID Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

### Neutrões

12/40

### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio

$$K = N_A e^2/\epsilon_0 = 0.307 \,\mathrm{MeVcm^2/g}$$

z e Z Número atómico da partícula incidente e do meio



## Introducão

Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

## Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio

$$K = N_A e^2 / \epsilon_0 = 0.307 \,\text{MeVcm}^2/\text{g}$$

z e Z Número atómico da partícula incidente e do meio

/ Energia de ionização



Introdução Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

## P. pares

#### Carregadas

Bethe-Block

PID Landau

Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio

$$K = N_A e^2/\epsilon_0 = 0.307 \,\mathrm{MeVcm^2/g}$$

z e Z Número atómico da partícula incidente e do meio

/ Energia de ionização

$$T_{\rm max} = {2m_{\rm e}c^2 eta^2 \gamma^2 \over 1 + 2\gamma m_{\rm e}/M + (m_{\rm e}/M)^2}$$
 (energia máxima transferida em uma colisão)



Introdução Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões

12/40



### Perda de energia média (Stopping power)

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Só para partículas pesadas  $(M >> m_e \text{ e } v >> v_e)$
- Não é válida para electrões

A Massa atómica do meio

$$K = N_A e^2 / \epsilon_0 = 0.307 \, \text{MeVcm}^2 / \text{g}$$

z e Z Número atómico da partícula incidente e do meio

$$T_{\max} = \frac{2m_{\rm e}c^2\beta^2\gamma^2}{1+2\gamma m_{\rm e}/M+(m_{\rm e}/M)^2}$$
 (energia máxima transferida em uma colisão)

$$\delta(\beta\gamma)$$
 correcção de densidade





Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau Alcance

Bragg

Electrões

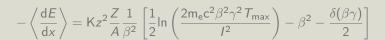
Bremsstrahlung Multiplo

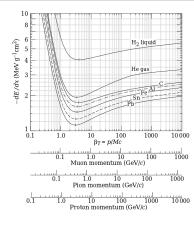
Čerenkov

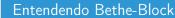
Transição

### Neutrões











Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

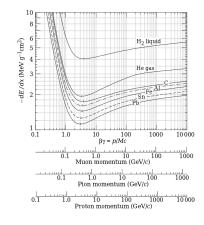
Neutrões

13/40



$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 \, T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta (\beta \gamma)}{2} \right]$$

Perda de energia independente da massa da partícula incidente (para  $M >> m_e$ )









Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch

PID Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

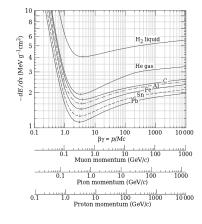
Multiplo Čerenkov Transição

Neutrões



$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 \, T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta (\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Perda de energia independente da massa da partícula incidente (para  $M >> m_e$ )
- Dependência quadrática da carga e da velocidade:  $\sim z^2/\beta^2$







Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch

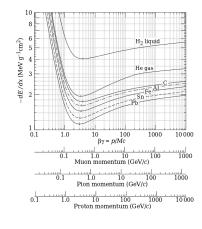
PID
Landau
Alcance
Bragg
Electrões
Bremstrahlung
Multiplo
Čerenkov

# Transição Neutrões



$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Perda de energia independente da massa da partícula incidente (para  $M >> m_e$ )
- Dependência quadrática da carga e da velocidade:  $\sim z^2/\beta^2$
- Depende pouco do absorvedor (Z/A, quase constante para todos os materiais)







Secão de

### Choque Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas

Bethe-Bloch

PID Landau Alcance Bragg Electrõe

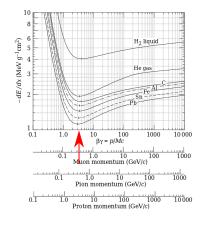
Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov Transição

### Neutrões



$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$$

- Perda de energia independente da massa da partícula incidente (para  $M >> m_e$ )
- Dependência quadrática da carga e da velocidade:  $\sim z^2/\beta^2$
- Depende pouco do absorvedor (Z/A, quase constante para todos os materiais)
- Mínimo para  $\beta \gamma \approx 3.5$  (mip minimum ionizing particle)







## Entendendo Bethe-Block

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2\frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\mathrm{ln}\left(\frac{2\mathrm{m_e}\mathrm{c}^2\beta^2\gamma^2T_{\mathrm{max}}}{I^2}\right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

## Dependência de $1/\beta^2$

$$\Delta p = \int F dt = \int F \frac{dx}{v}$$

Partículas mais lentas 'sentem' a força eléctrica durante mais tempo.

# $dE/dx (MeV g^{-1}cm^2)$ H2 liquid He gas 100 1.0 1000 10000 $\beta \gamma = p/Mc$ Muon momentum (GeV/c) Pion momentum (GeV/c) Proton momentum (GeV/c)

# Particle Data Gro (pdg.lbl.gov)

### Introdução Secão de

### Choque Fotões

#### Fotoeléctrico Compton

P. pares

### Part.

### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões



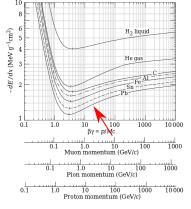
## Entendendo Bethe-Block

$$-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2\mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

## Dependência de $1/\beta^2$

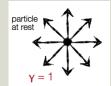
$$\Delta p = \int F dt = \int F \frac{dx}{v}$$

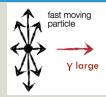
Partículas mais lentas 'sentem' a força eléctrica durante mais tempo.



### Regime relativístico: $\beta \gamma > 4$

Partícula de alta energia: o campo eléctrico transverso aumenta (transformação de Lorentz:  $E_y \rightarrow \gamma E_y$ ), aumentando a intensidade da interacção.





Particle Data

### Compton P. pares

#### Part. Carregadas Bethe-Bloch

Introdução Secão de

Choque Fotões

PID Landau Alcance

Alcance Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões







## Secão de

### Choque Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

### Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau Alcance Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

# Transição Neutrões

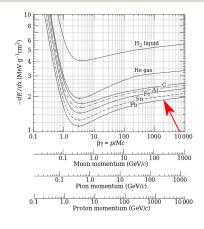
15/40



# $-\left\langle \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right\rangle = \mathrm{K}z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \mathrm{ln} \left( \frac{2 \mathrm{m_e} \mathrm{c}^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\mathrm{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta \gamma)}{2} \right]$

### Correcção da densidade

- Átomos do meio são polarizados pelas partículas do feixe
- Blindagem dos electrões que estão mais longe
- Partículas 'sentem' menos intensamente o campo desses electrões.







# Como detectar e identificar uma partícula carregada?

O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?

## Introdução

Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

Carregadas Bethe-Bloch

PID

#### Landau Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões







■ lões quase à velocidade da luz colidem



### O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

Carregadas Bethe-Bloch

Landau

Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

#### Neutrões

16/40

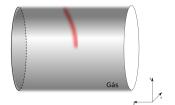


Gás

- lões quase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)



### O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



- lões quase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)
- A partícula deixa um rasto de electrões livres no gás



### Choque

#### Fotões Fotoeléctrico

Compton P. pares

Carregadas Bethe-Bloch

Landau Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

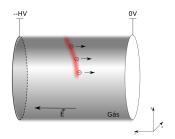
Čerenkov Transição

#### Neutrões





### O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



- lões quase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)
- A partícula deixa um rasto de electrões livres no gás
- Campo eléctrico para trazê-los para o plano de leitura...

### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Carregadas

Bethe-Bloch

#### Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo

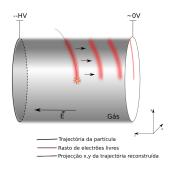
Čerenkov Transição

#### Neutrões





### O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



- lões quase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)
- A partícula deixa um rasto de electrões livres no gás
- Campo eléctrico para trazê-los para o plano de leitura...

...onde podemos projectar a trajectória no plano x,y.

#### Introdução

### Secão de

### Choque

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part. Carregadas

#### Carregadas Bethe-Bloch

#### PID

Landau Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo

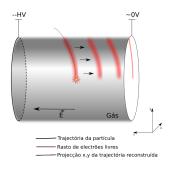
Čerenkov Transição

#### Neutrões





### O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



- lões quase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)
- A partícula deixa um rasto de electrões livres no gás
- Campo eléctrico para trazê-los para o plano de leitura...
- ...onde podemos projectar a trajectória no plano x,y.
- Para o z:



Introdução

Compton
P. pares
Part.

#### Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões





Choque

Fotões

P. pares

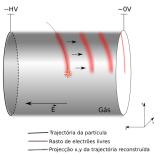
Landau

Alcance Bragg Flectrões

Čerenkov

### Como detectar e identificar uma partícula carregada?

O que acontece na Time Projection Chamber do ALICE?



- lões guase à velocidade da luz colidem
- Várias partículas são projectadas (vamos focar-nos apenas em uma)
- A partícula deixa um rasto de electrões livres no gás
- Campo eléctrico para trazê-los para o plano de leitura...

### Introdução Secão de Fotoeléctrico Compton Carregadas Bethe-Block

- ...onde podemos projectar a trajectória no plano x,y.
- Para o z:

$$v = \frac{\mu E}{p},$$

 $\mu$ : mobilidade das cargas

E: campo eléctrico

p: pressão)

sabendo o instante da colisão, medimos o tempo de deriva  $\Rightarrow z = v\Delta t$ 



Bremsstrahlung Multiplo





Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

#### PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

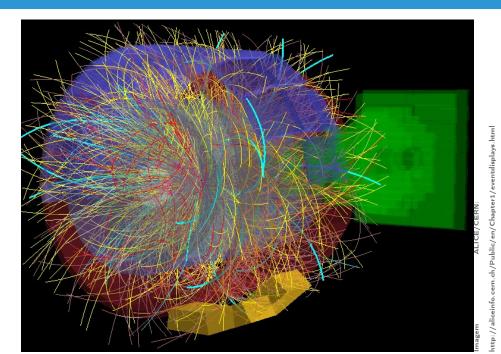
Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

Neutrões







### Identificação de partículas na TPC

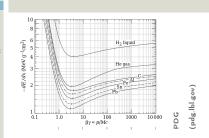
### A TPC permite calcular directamente dE/dx

■ MIPs: dE/dx constante

### Medida do momento

Raio da curvatura da trajectória:

$$\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t} = q\vec{v} \times \vec{B} \Leftrightarrow p_{\perp} = qr_{c}B$$



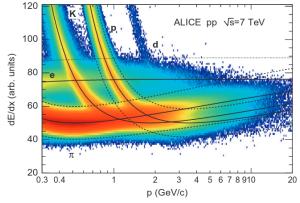


Fig. 3. dE/dx spectrum versus momentum in the ALICE TPC from pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV.

#### Introducão

#### Seção de Choque

### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas Bethe-Bloch

#### PID

Landau Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões

18/40



IM A 706 (2013) 55-

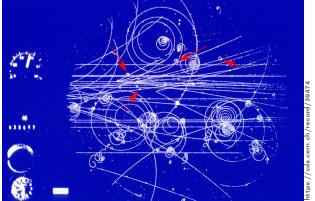


### Flutuações em d $\overline{E}/dx$

Bethe-Bloch descreve apenas a média da perda de energia.

$$\Delta E = \sum_{n=1}^{N} \Delta E_n$$

Na passagem de uma partícula há zonas com pouca perda de energia, mas outras com uma perda elevada (electr $oes-\delta$ )



Decaimento de uma partícula A na câmara de bolhas de 32 cm (1960)

#### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

### PID PID

Landau Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões



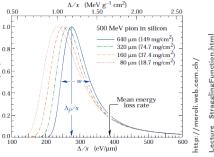


### Flutuações em dE/dx

Bethe-Bloch descreve apenas a média da perda de energia.

$$\Delta E = \sum_{n=1}^{N} \Delta E_n$$

Na passagem de uma partícula há zonas com pouca perda de energia, mas outras com uma perda elevada (electrões- $\delta$ )



Cauda nas altas energias. Valor mais provável  $\neq$  média.

#### Introdução Secão de

Choque

### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part

Carregadas Bethe-Bloch PID

### Landau

Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões





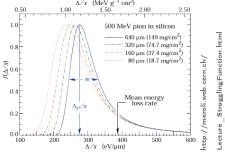
### Flutuações em dE/dx

### Distribuição de Landau

$$f(x,\Delta) = \frac{m_{\rm e}v^2}{2\pi N_A {\rm e}^4} \cdot \frac{A}{Z} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\inf} {\rm e}^{-u \ln u - \lambda u} \sin(\pi u) {\rm d}u$$

$$\text{com } \lambda = \frac{(\Delta - \Delta^{\mathbf{m},\mathbf{p}_+}) \cdot m_{\mathbf{e}} v^2}{2\pi N_A \mathrm{e}^4 \cdot x}, \text{ em que } \Delta^{\mathbf{m},\mathbf{p}_+} = \frac{2\pi N_A \mathrm{e}^4}{m_{\mathbf{e}} v^2} \cdot \frac{Z}{A} \cdot x \left\{ \ln \left( \frac{4\pi N_A \mathrm{e}^4 \gamma^2}{l^2} \cdot \frac{Z}{Z} \cdot X \right) - \beta^2 + 1 - \gamma_E \right\}$$

Na passagem de uma partícula há zonas com pouca perda de energia, mas outras com uma perda elevada (electrões- $\delta$ )



Cauda nas altas energias. Valor mais provável  $\neq$  média.

#### Introdução Secão de

### Choque

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

### Landau

Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov Transição

#### Neutrões





### Alcance médio

### Integrar a distância para as perdas de energia de $E_0$ até 0

Introdução Secão de

Choque Fotões Fotoeléctrico

Compton P. pares

Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

Neutrões



$$dE = -\frac{dE}{dx} \cdot dx \Leftrightarrow dx = -\frac{1}{dE/dx} \cdot dE$$

$$R = \int_{E0}^{0} \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}E/\mathrm{d}x}$$



Introdução

Secão de

Choque

Fotões

Fotoeléctrico

Compton

Carregadas Bethe-Bloch

P. pares

Part.

PID

Landau

Bragg Electrões

Multiplo

Čerenkov

Transição

Neutrões

### Alcance médio

# Integrar a distância para as perdas de energia de $E_0$ até 0

$$dE = -\frac{dE}{dx} \cdot dx \Leftrightarrow dx = -\frac{1}{dE/dx} \cdot dE$$

$$R = \int_{E0}^{0} \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}E/\mathrm{d}x}$$

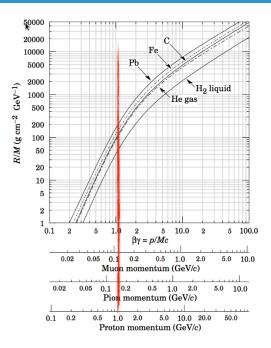
### Exemplo

Protão com  $p=1\,\mathrm{GeV/c}$  Alvo: chumbo com  $\rho=11.34\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$ 

$$R/M = 200 \, \mathrm{g \, cm^{-2} \, GeV^{-1}}$$
  
 $\to R = 200/11.34/1 \, \mathrm{cm} \sim 20 \, \mathrm{cm}$ 

# 20/40

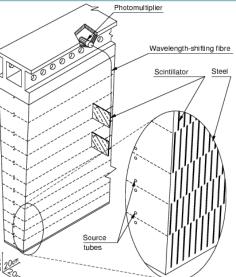
Bremsstrahlung





### Como medir a energia de partículas carregadas pesadas?

### Calorímetro hadrónico — ATLAS



Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

#### Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões

21/40



Camadas de material denso alternadas com camadas de detecção.



### Como medir a energia de partículas carregadas pesadas?

### Calorímetro hadrónico — ATLAS



Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

#### Landau

Alcance

Bragg Electrões

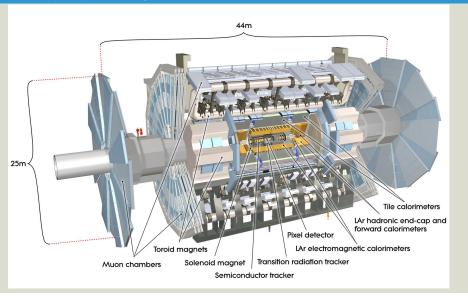
Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões

21/40





Camadas de material denso alternadas com camadas de detecção.



### Chuveiros hadrónicos

#### Introdução Secão de

#### Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

#### Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

#### Transição Neutrões

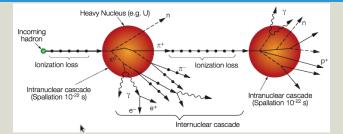
22/40



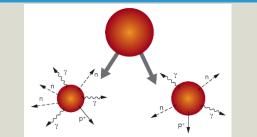
### Interacções hadrónicas

- Colectivamente com os núcleos
- individualmente com os nucleões

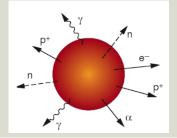
#### Excitação nuclear



### Fissão



### Evaporação nuclear







#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas
Bethe-Bloch

#### Landau

Alcance

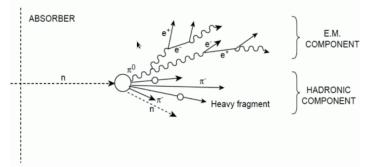
#### Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo

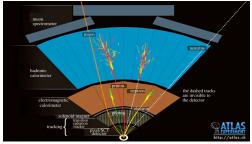
Čerenkov Transição

#### Neutrões





- electrões
- fotões
- neutrões
- piões
- fragmentos de núcleos.







#### Introdução

### Secão de

### Choque

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

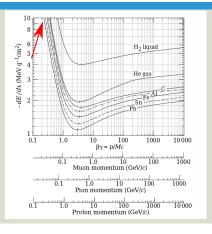
#### Bragg

#### Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões



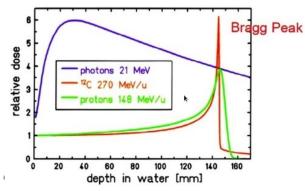
- Quanto menor é a energia da partícula, maior é a perda de energia
- A partícula perde a maior parte da sua energia no final:
  - Campo dos electrões exerce maior influência
  - No final a partícula pode recombinar com os electrões e ser absorvida no meio.





### Curva de Bragg

Partículas pesadas carregadas perdem a maior parte da sua energia no final da trajectória.



- Curva de Bragg: perda de energia pela deposição de energia em função da profundidade
- A maior dose de radiação é localizada no fim da trajectória (com fotões, já vimos, a maior perda dá-se no início, com decaimento exponencial)

U. Landgraf e S. Kühn.

#### Introdução

Secão de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

Carregadas Bethe-Block PID

Landau Alcance

### Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

#### Neutrões

25/40



http://hep.uni-freiburg.de/tl files/home/wwwherten/particle detectors/slides/Teilchendetektoren-WS1617-InteractionChargedParticles-2A.pdf



### Curva de Bragg

Partículas pesadas carregadas perdem a maior parte da sua energia no final da trajectória.

#### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance

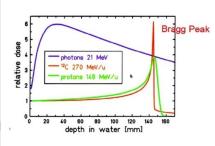
Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

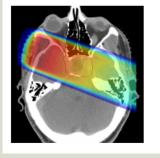
#### Neutrões

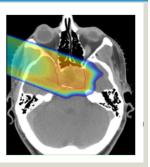
25/40





# Aplicações muito importantes em tratamentos com radioterapia





Por exemplo: aceleradores no GSI, Darmstadt e DFKZ, Heidelberg, na Alemanha.

U. Landgraf e S. Kühn,

 $http://hep.uni-freiburg.de/tl\_files/home/wwwherten/particle\_detectors/slides/Teilchendetektoren-WS1617-InteractionChargedParticles-2A.pdf$ 



### Perdas de energia para electrões

### Electrões (e positrões) perdem energia por ionização

Como as outras partículas, mas a fórmula de Bethe-Bloch precisa de ser modificada:

- Electrões incidente e do alvo têm a mesma massa
- Espalhamento de duas partículas iguais e indistinguíveis.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{e} = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^{2}} \left[ \ln \frac{m_{e} c^{2} \beta^{2} \gamma^{2} T}{2I^{2}} - (\ln 2)(2\sqrt{1 - \beta^{2}} - 1 + \beta^{2}) + (1 - \beta^{2}) + \frac{1}{8}(1 - \sqrt{1 - \beta^{2}})^{2} \right]$$

Devido à sua massa pequena, perdem muita energia em processos radiativos:

- Bremsstrahlung
- Produção de pares e chuveiros electromagnéticos.

Seguem um caminho muito mais tortuoso antes de perderem completamente a sua energia.

#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas
Bethe-Bloch
PID
Landau
Alcance
Bragg

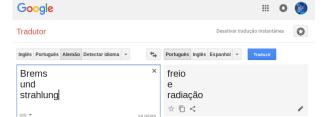
Electrões
Bremsstrahlung
Multiplo
Čerenkov
Transição

#### Neutrões





### Bremsstrahlung



Causado pelas acelerações (mudanças de direcção) dos electrões pelos núcleos do meio.

$$\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_{\mathrm{Brems}} = 4\alpha N_{\mathrm{A}} \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathrm{e}^2}{\mathrm{mc}^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{EZ^2}{\mathrm{m}^2}$$

z carga eléctrica

*m* massa

*E* energia

 $\alpha$  constante da estrutura fina (1/137)

Z, A número atómico e número de massa do material

N<sub>A</sub> Númerdo de Avogadro



Choque Fotões

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

Neutrões





### Bremsstrahlung

Causado pelas acelerações (mudanças de direcção) dos electrões pelos núcleos do meio.

$$\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_{\mathrm{Brems}} = 4\alpha N_{\mathrm{A}} \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{EZ^2}{m^2}$$

z carga eléctrica

 $\alpha$  constante da estrutura fina (1/137)

m massa

Z, A número atómico e número de massa do material

*E* energia

NA Númerdo de Avogadro

### Dependências:

*E* importante para energias elevadas

7<sup>2</sup> materiais com 7 elevado

 $\frac{1}{m^2}$  partículas leves!

Compton P. pares

Introdução

Secão de Choque

Fotões Fotoeléctrico

Carregadas Bethe-Block

PID Landau Alcance Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

Transição Neutrões





Introdução Secão de Choque Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

Carregadas

Landau Alcance

Bragg Electrões

Neutrões

### Bremsstrahlung

Causado pelas acelerações (mudanças de direcção) dos electrões pelos núcleos do meio.

$$\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_{\mathrm{Brems}} = 4\alpha N_{\mathrm{A}} \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{EZ^2}{m^2}$$

z carga eléctrica

m massa

*E* energia

 $\alpha$  constante da estrutura fina (1/137)

Z, A número atómico e número de massa do material

N<sub>A</sub> Númerdo de Avogadro

#### Bethe-Block PID

Relação entre perdas de energia por colisões e de Bremsstrahlung

Stopping power total:

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brems}}$$
$$\frac{(dE/dx)_{\text{ion}}}{(dE/dx)_{\text{Brems}}} \cong \frac{EZ}{700}$$

(E em MeV).



27/40

Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov Transição



### Bremsstrahlung — Comprimento de radiação $X_0$

Seção de Choque

Fotões Fotoeléctrico

Compton P. pares

Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance Bragg

Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões

28/40



$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = 4\alpha N_{\mathrm{A}} \frac{z^2 Z^2}{A} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathrm{e}^2}{\mathrm{mc}^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{EZ^2}{m^2}$$

Arranjando a equação de modo a que:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{X_0}E$$
 ou seja:  $X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln(183Z^{-\frac{1}{3}})}$ 

Temos, por integração:

$$E=E_0\mathrm{e}^{-\frac{x}{X_0}}$$

■ Quando  $x = X_0$ ,  $E = E_0/e$ 



### Bremsstrahlung — Comprimento de radiação $X_0$

Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

P. pares

Carra

Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

Neutrões

28/40



$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = 4\alpha N_{\mathrm{A}} \frac{z^2 Z^2}{A} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{EZ^2}{m^2}$$

Arranjando a equação de modo a que:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{X_0}E$$
 ou seja:  $X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln(183Z^{-\frac{1}{3}})}$ 

Temos, por integração:

$$E=E_0\mathrm{e}^{-\frac{x}{X_0}}$$

Quando  $x = X_0$ ,  $E = E_0/e$ 

X<sub>0</sub> é a distância para um electrão ficar apenas com 1/e da sua energia, devido a perdas por Bremsstrahlung.



### Bremsstrahlung — exemplos

#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### P. pares

#### Part. Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau Alcance

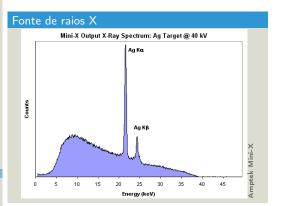
Bragg Electrões

#### Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

### Neutrões







### Bremsstrahlung — exemplos

#### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part

#### Carregadas Bethe-Bloch

PID
Landau
Alcance
Bragg

#### Electrões Bremsstrahlung

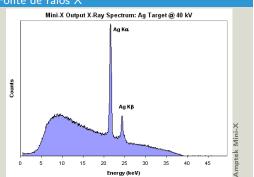
Multiplo Čerenkov Transição

#### Neutrões

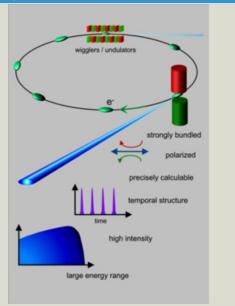
29/40



### Fonte de raios X



### Radiação de sincrotrão





### Bremsstrahlung — exemplos

#### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

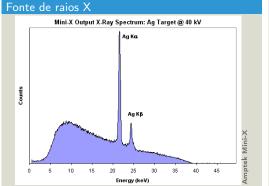
Bethe-Bloch PID Landau Alcance Bragg

#### Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

#### Neutrões

29/40



### Radiação de sincrotrão



Sirius — futuro acelerador em construção perto de campinas







#### Introdução Secão de

### Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Part.

Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

#### Neutrões



- Espalhamento elástico devido ao campo dos electrões e dos núcleos do meio
- Não há emissão de radiação, apenas desvios pequenos na trajectória
- Processo descrito à la Rutherford:

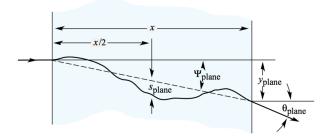
$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} \cong z^2 Z^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\epsilon}{2}}$$



### Espalhamento de Coulomb múltiplo

- Espalhamento elástico devido ao campo dos electrões e dos núcleos do meio
- Não há emissão de radiação, apenas desvios pequenos na trajectória
- Processo descrito à la Rutherford:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} \cong z^2 Z^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$



#### Introdução Secão de

### Choque

#### Fotões Fotoeléctrico

Compton
P. pares

#### Part.

#### Carregadas Bethe-Bloch

PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

Neutrões 30/40





### Espalhamento de Coulomb múltiplo

- Espalhamento elástico devido ao campo dos electrões e dos núcleos do meio
- Não há emissão de radiação, apenas desvios pequenos na trajectória
- Processo descrito à la Rutherford:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} \cong z^2 Z^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$

- Tratado estatísticamente
- Depende do número atómico do material
- Quase todas as interacções resultam em ângulos de deflexão pequenos
- Com uma distribuição gaussiana à volta de  $\Theta = 0$ :

$$\sigma_{\Theta} = \frac{13.6 \, \textit{MeV}}{\beta \textit{cp}} z \sqrt{\frac{\textit{x}}{\textit{X}_0}} \left[ 1 + 0.038 \, \text{ln} \left( \frac{\textit{x}}{\textit{X}_0} \right) \right]$$

z, p carga e momento da partícula,  $x/X_0$  espessura em comprimentos de radiação

#### Introdução Seção de Choque

#### Fotões

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição Neutrões







#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov

Transição

Neutrões











### Radiação de Čerenkov

Objectos no mundo macroscópico que se deslocam em um meio mais rápido do que as ondas desse meio:

#### Introdução

Secão de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

Carregadas Bethe-Block PID Landau Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Transição

Neutrões

32/40



# Avião à velocidade do som



### Ondas criadas por um barco



- Uma onda produzida por uma fonte viajando mais rápida do que a propagação dessa onda gera uma onda plana
- Partículas carregadas também!



Introdução

Seção de Choque Fotões Fotoeléctrico Compton

P. pares

Carregadas

Landau

Bragg Electrões

Multiplo

Transição

Neutrões

Bethe-Bloch PID

Bremsstrahlung

### Radiação de Čerenkov

Velocidade da luz em um material:

$$v_{luz} = c/n$$

*n* índice de refracção.

### Passagem de uma partícula carregada

- Com uma velocidade v < c/n: polarização simétrica, não há momento dipolar
- Com uma velocidade v > c/n:
  - polarização assimétrica
  - mudança abrupta da polarização
  - emissão de radiação electromagnética: radiação de Čerenkov

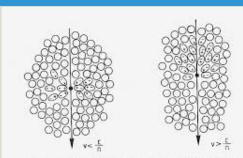


Fig. 6.7. Illustration of the Cherenkov effect [68].

33/40

Pequena correcção na perda de energia:  $\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Brems} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\check{C}}$  (da ordem de 1% de  $(dE/dx)_{ion}$ ).



### Radiação de Čerenkov

### Introdução

#### Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

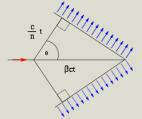
Transição

Neutrões

34/40



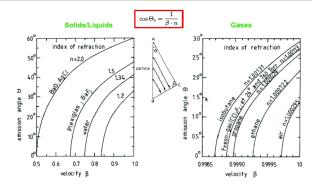
### Ângulo de Čerenkov



- lacksquare Partícula viaja  $\beta$ ct
- Fotão viaja  $\left(\frac{c}{n}\right)t$

$$\cos\theta_{\check{c}} = \frac{1}{\beta \cdot n}$$

Materiais possíveis:





#### Introdução

#### Secão de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau

Alcance

Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

#### Neutrões

35/40



#### Identificação de partículas

- Partículas mais leves emitem mais radiação
- lacktriangle O ângulo de Čerenkov dá uma medida directa de eta (com outras medidas adicionais, obtemos  $p \rightarrow \text{massa}$ ).



#### Identificação de partículas

- Partículas mais leves emitem mais radiação
- $\blacksquare$  O ângulo de Čerenkov dá uma medida directa de  $\beta$  (com outras medidas adicionais, obtemos  $p\to$  massa).

# Neutrino Charged particle in water

**Photosensors** 

#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Landau Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo

Transição

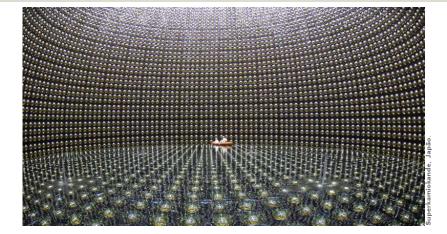
Neutrões





#### Identificação de partículas

- Partículas mais leves emitem mais radiação
- $\blacksquare$  O ângulo de Čerenkov dá uma medida directa de  $\beta$  (com outras medidas adicionais, obtemos  $p\to$  massa).



#### Introdução Secão de

#### Choque Fotões

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part

#### Carregadas

Bethe-Bloch

PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

,

Neutrões 35/40





#### Introdução Secão de

# Choque

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas

Bethe-Bloch

PID

Landau

Alcance

Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

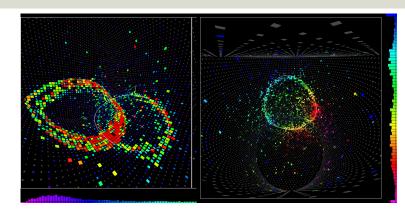
Čerenkov

Transição Neutrões

35/40

#### Identificação de partículas

- Partículas mais leves emitem mais radiação
- $\blacksquare$  O ângulo de Čerenkov dá uma medida directa de  $\beta$  (com outras medidas adicionais, obtemos  $p\to$  massa).

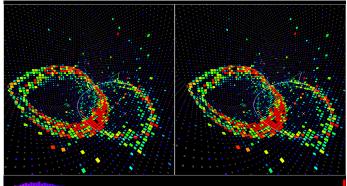




#### Identificação de partículas

- Partículas mais leves emitem mais radiação
- $\blacksquare$  O ângulo de Čerenkov dá uma medida directa de  $\beta$  (com outras medidas adicionais, obtemos  $p\to$  massa).

## Imagem 3D (trocar os olhos):



#### Introdução

Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

#### Carregadas Bethe-Bloch

PID

Landau

Alcance

Bragg

Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov

Transição

Neutrões 35/40







Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance Bragg

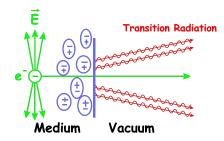
Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

#### Neutrões

36/40





Dois meios com propriedades dieléctricas diferentes,





Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

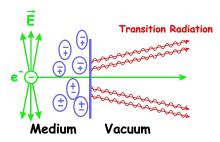
#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

#### Neutrões





- Dois meios com propriedades dieléctricas diferentes,
- Electrão (ou partícula carregada) polariza o meio temporariamente na superfície entre os dois lados.





Seção de Choque

#### Fotões

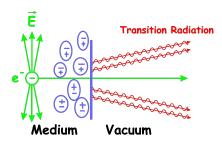
Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch PID Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

#### Neutrões





- Dois meios com propriedades dieléctricas diferentes,
- Electrão (ou partícula carregada) polariza o meio temporariamente na superfície entre os dois lados.
  - quando a partícula deixa o meio, a polarização altera-se abruptamente
  - emissão de fotões.





Seção de Choque

#### Fotões

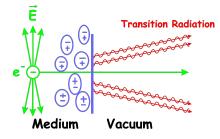
Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Bloch PID

Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição Neutrões



- Dois meios com propriedades dieléctricas diferentes,
- Electrão (ou partícula carregada) polariza o meio temporariamente na superfície entre os dois lados.
  - quando a partícula deixa o meio, a polarização altera-se abruptamente
  - emissão de fotões.
- Fotões emitidos na gama de raios X (2–20keV)







Introdução Secão de

Choque

#### Fotoeléctrico

Compton P. pares

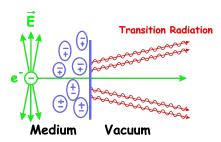
#### Part.

Carregadas
Bethe-Bloch
PID
Landau
Alcance
Bragg

Electrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

#### Neutrões





- Dois meios com propriedades dieléctricas diferentes,
- Electrão (ou partícula carregada) polariza o meio temporariamente na superfície entre os dois lados.
  - quando a partícula deixa o meio, a polarização altera-se abruptamente
  - emissão de fotões.
- Fotões emitidos na gama de raios X (2–20keV)
- baixa intensidade: arranjo de 'sandwiche' alternando os dois meios.





#### Seção de Choque

#### Fotões

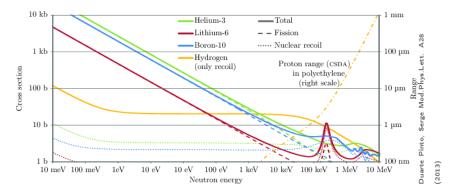
Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part.

Carregadas
Bethe-Bloch
PID
Landau
Alcance
Bragg
Electrões
Bremsstrahlung
Multiplo
Čerenkov

# Transição Neutrões





- Neutrões são partículas neutras, com pouca interacção
- A única possibilidade de interacção é através de reacções nucleares com alguns isótopos,
- Quanto menor for a energia do neutrão, maior é a sua seção de choque para a reacção.

#### Introdução Secão de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Carregadas Bethe-Bloch

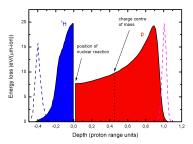
PID Landau Alcance Bragg Electrões Bremsstrahlung

Multiplo Čerenkov Transição

38/40

#### Neutrões: Hélio-3

$$n + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}H + {}^{1}H + 0.764 \,MeV$$



- Centroid of the charge cloud
- Possible avalanches due to the tritons
- Possible neutron interaction points
- Possible avalanches due to the protons



- A solução mais interessante durante muitos anos,
- Boa eficiência de detecção,

# 200

#### Introdução Seção de Choque

#### Fotões

Fotoeléctrico Compton

P. pares

#### Carregadas

Bethe-Bloch

PID Landau

Alcance Bragg Electrões

Bremsstrahlung Multiplo

Čerenkov Transição

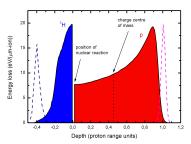
#### veutroes

38/40



### Neutrões: Hélio-3

$$n + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}H + {}^{1}H + 0.764 \,MeV$$



- Centroid of the charge cloud
- Possible avalanches due to the tritons
- Possible neutron interaction points
- Possible avalanches due to the protons



- A solução mais interessante durante muitos anos,
- Boa eficiência de detecção,
- <sup>3</sup>He já não existe!



### Neutrões: Boro-10



No estado sólido em PTN.

Difícil de depositar em superfícies,

 Eficiência de detecção limitada mesmo em camadas espessas por causa da auto-absorção dos produtos da reacção.

#### Introdução Secão de Choque

#### Fotões Fotoeléctrico

Compton P. pares

#### Part.

Carregadas Bethe-Block DID Landau Alcance Bragg Flectrões Bremsstrahlung Multiplo Čerenkov

# Transição

39/40



#### Some <sup>10</sup>B-based solutions: Multi-grid [1]

Inclined detector [2]







Boron coating Substrate

Neutrons

Ialousie [3]

Cátodos microestruturados revestidos com boro em MWPC empilhadas [4] Straw tubes revestidos com boro [5].

[1] J.C. Buffet et al., IEEE NSS 15 Conf. Rec., p. 171, 2012.

[2] J. Buffet et al., NIM A. 554, 1-3, p. 392, 2005. [3] C.J.Schmidt, M. Klein, CDT: www.n-cdt.com/

- [4] I.Stefanescu et al., Jinst. 8 P12003, 2013.
- [5] Proportional Technologies Inc., www.proportionaltech.com



Introdução Seção de

Choque Fotões

Fotoeléctrico Compton P. pares

#### Part. Carregadas

Bethe-Bloch

PID

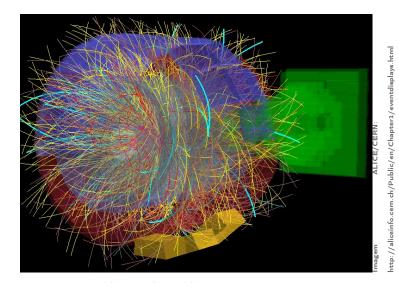
Landau Alcance

Bragg

Electrões

Bremsstrahlung Multiplo





Obrigado pela vossa atenção.