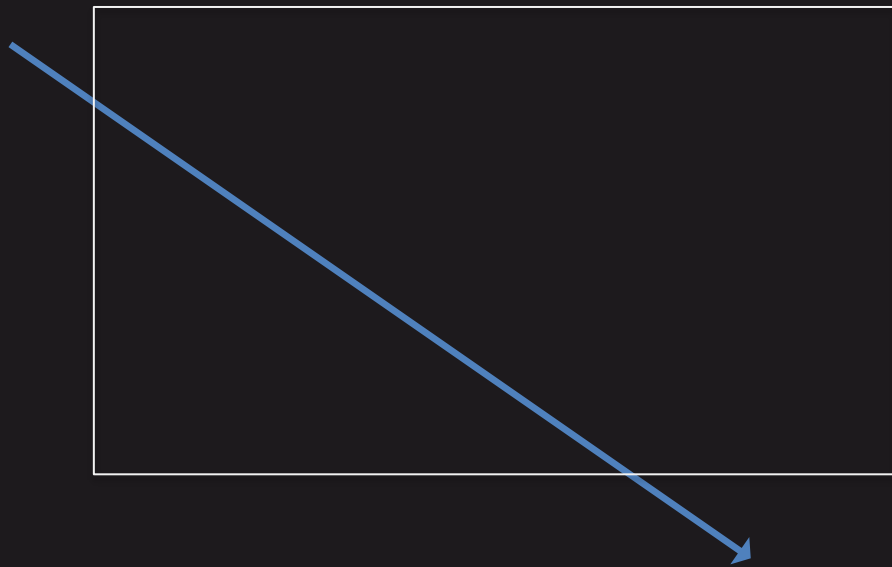


# *Interações em detectores (1)*

Detector



Uma partícula incidindo em um meio material irá sofrer tipicamente uma série de interações, via diferentes processos.

As probabilidades de interação são quantificadas pelas seções de choque de cada processo. Elas dependem do tipo de partícula e da sua energia, e do material.

Para cada tipo de partícula incidente, e para diferentes faixas de energias, haverá um processo ou poucos processos que dominarão (maiores valores de seção de choque) e que descrevem os efeitos na partícula, especialmente a sua perda de energia para o meio.

É conveniente separar as partículas incidentes em categorias:

- Partículas carregadas *pesadas* (ou seja, excluindo elétrons/pósitrons)
- elétrons e pósitrons
- fótons
- prótons, nêutrons, outros hádrons e núcleos atômicos que interagem significativamente via interações nucleares

*Panorama*

### Partículas carregadas *pesadas*

- Possuem muito alta seção de choque de interação com elétrons do meio, causando excitação do elétron atômico, ou a sua liberação (ionização).
- A desexcitação do átomo libera fótons de baixa energia, que podem gerar ionização secundária (via efeito fotoelétrico).
- Apenas para energias muito altas (centenas de GeV) a emissão de radiação, ou seja fótons, se torna importante (processo *bremsstrahlung*).
- Partículas carregadas defletem em relação à sua direção original principalmente a partir de múltiplas interações com os núcleos atômicos.
- Outros processos: interações fotonucleares e produção de pares por partícula carregada.

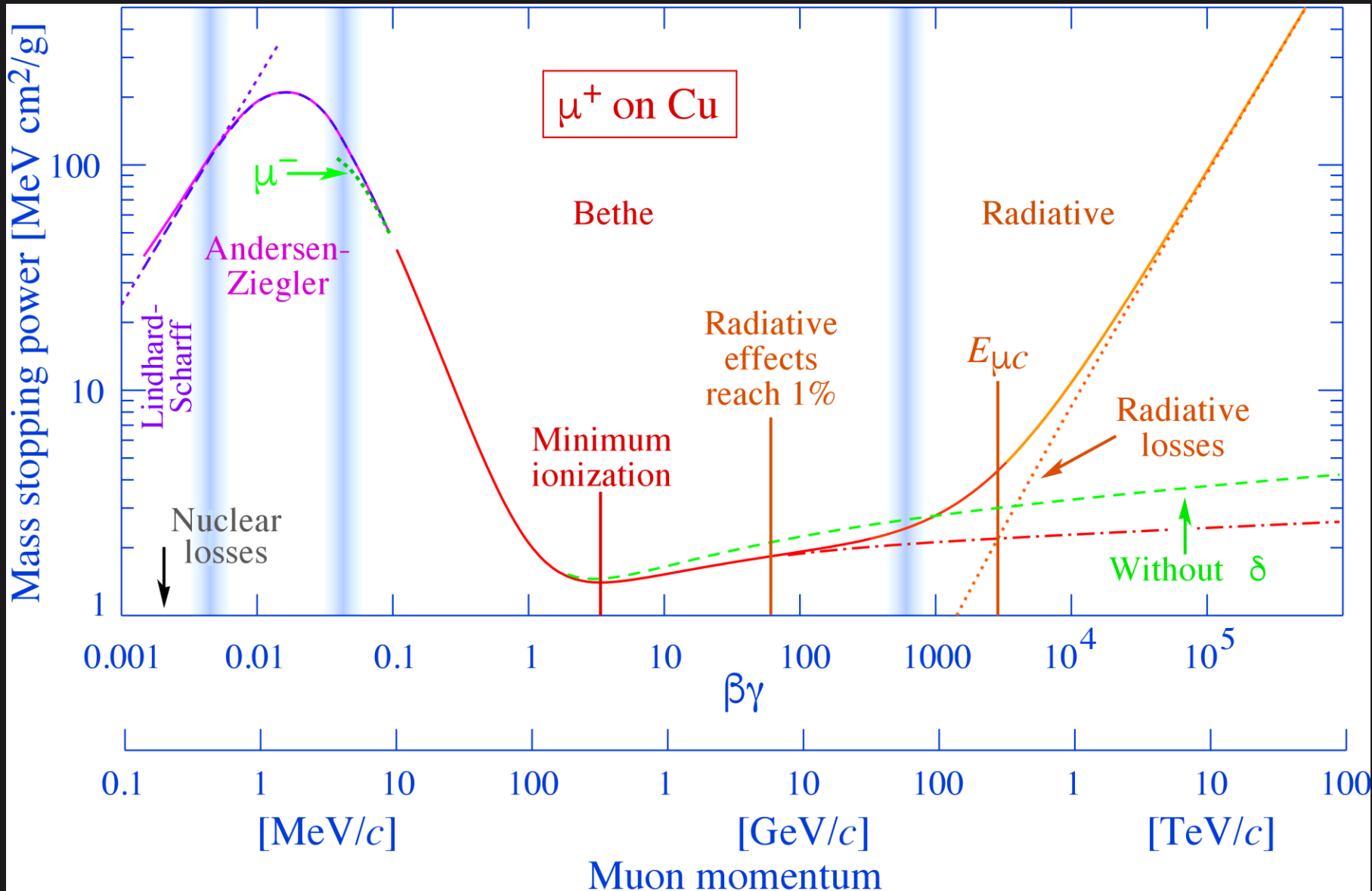
### elétrons e pósitrons

- A baixas energias, a maior probabilidade de interação e a maior fração de perda de energia é por excitação e ionização do meio (com uma descrição teórica diferentes de outras partículas já que é o mesmo tipo da partícula alvo).
- Por ser significativamente mais leve do que qualquer outra partícula, a partir de energias da ordem de 10 MeV, emissão de radiação (*bremsstrahlung*) já é o processo dominante.
- No caso de pósitrons que perdem quase toda a sua energia cinética para o meio, eles se aniquilam com elétrons atômicos, causando a emissão de dois fótons em direções opostas (cada um com energia de 511 keV).

### fótons

- Interações de fótons a baixa energia ocorrem predominantemente via efeito fotoelétrico
- A energias intermediárias, fótons interagem principalmente via *espalhamento Compton* com os elétrons de baixa ligação dos átomos do meio.
- Produção de pares elétron-pósitron é o processo dominante para valores de energia do fóton maiores que o limiar cinemático para a produção do par. O processo pode ocorrer sob interação com o potencial de núcleos ou elétrons atômicos.
- Apesar do fóton ser neutro, os três processos acima geram portadores de carga livres no meio.

# $dE/dx$



Perda de energia média (devido a várias interações).

Flutuações, especialmente em absorvedores finos.

Espessura de massa (para distância  $s$ ):

$$x \equiv \rho s [\text{g/cm}^2]$$

$$\frac{dE}{ds} = \rho \frac{dE}{dx}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$p = \gamma M v$$

$$E = \gamma M c^2$$

# $dE/dx$ – Excitação e ionização

Equação de Bethe-Block (para partícula *pesada* e válida a partir de  $\beta\gamma \sim 0.1$ ):

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$$
$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2}$$

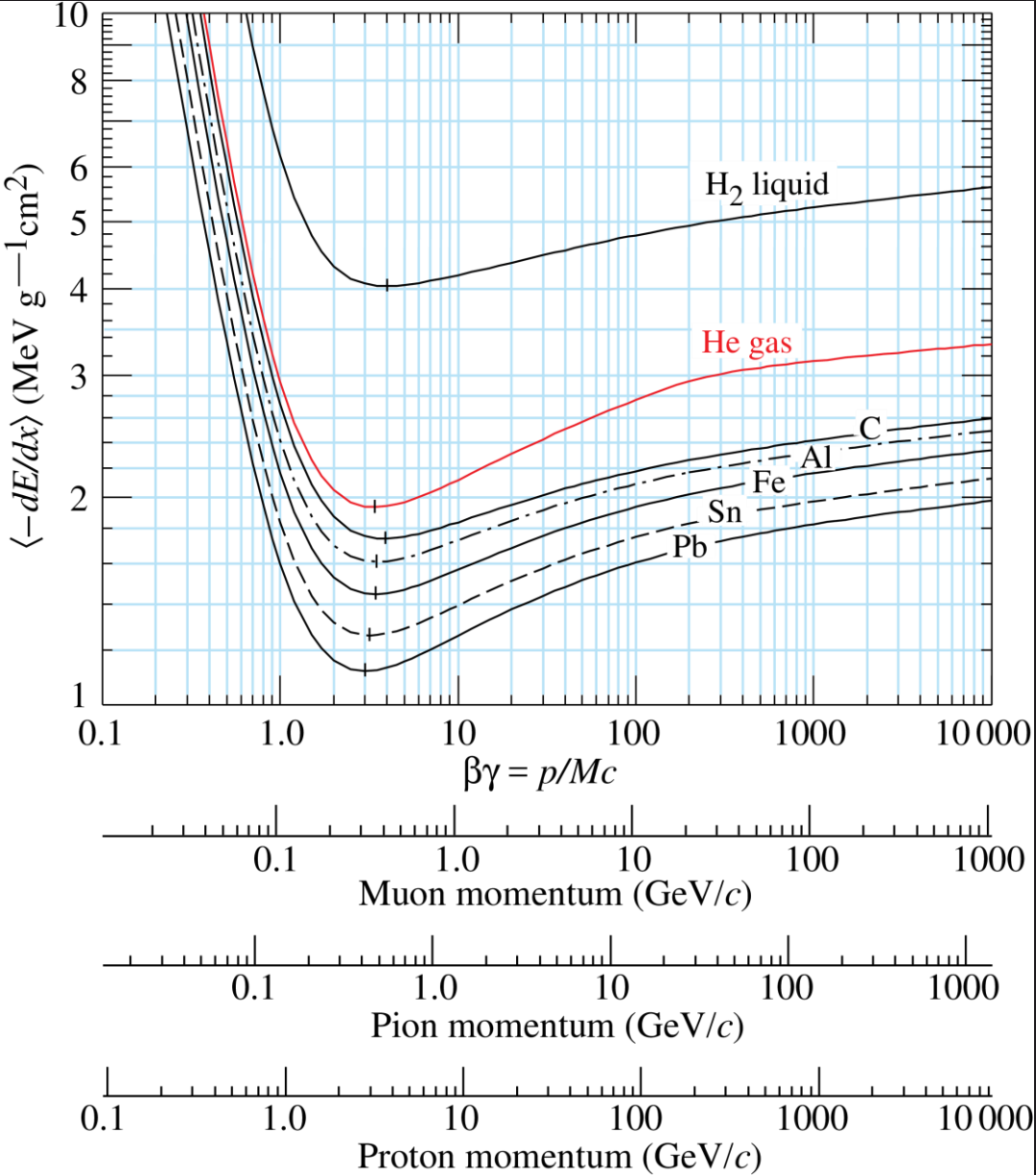
$$W_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}$$

$I$  : Energia de excitação média, característica do material. Pode ser parametrizada empiricamente.

$\delta$  : “Correção de densidade”. Efeito de densidade, polarização do meio reduz interação do campo da partícula com elétrons distantes. Importante para materiais densos.

Comportamento  $\sim 1/\beta^2$ , seguido de um *mínimo de ionização*, com posterior aumento logarítmico.

$dE/dx$

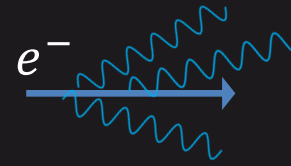
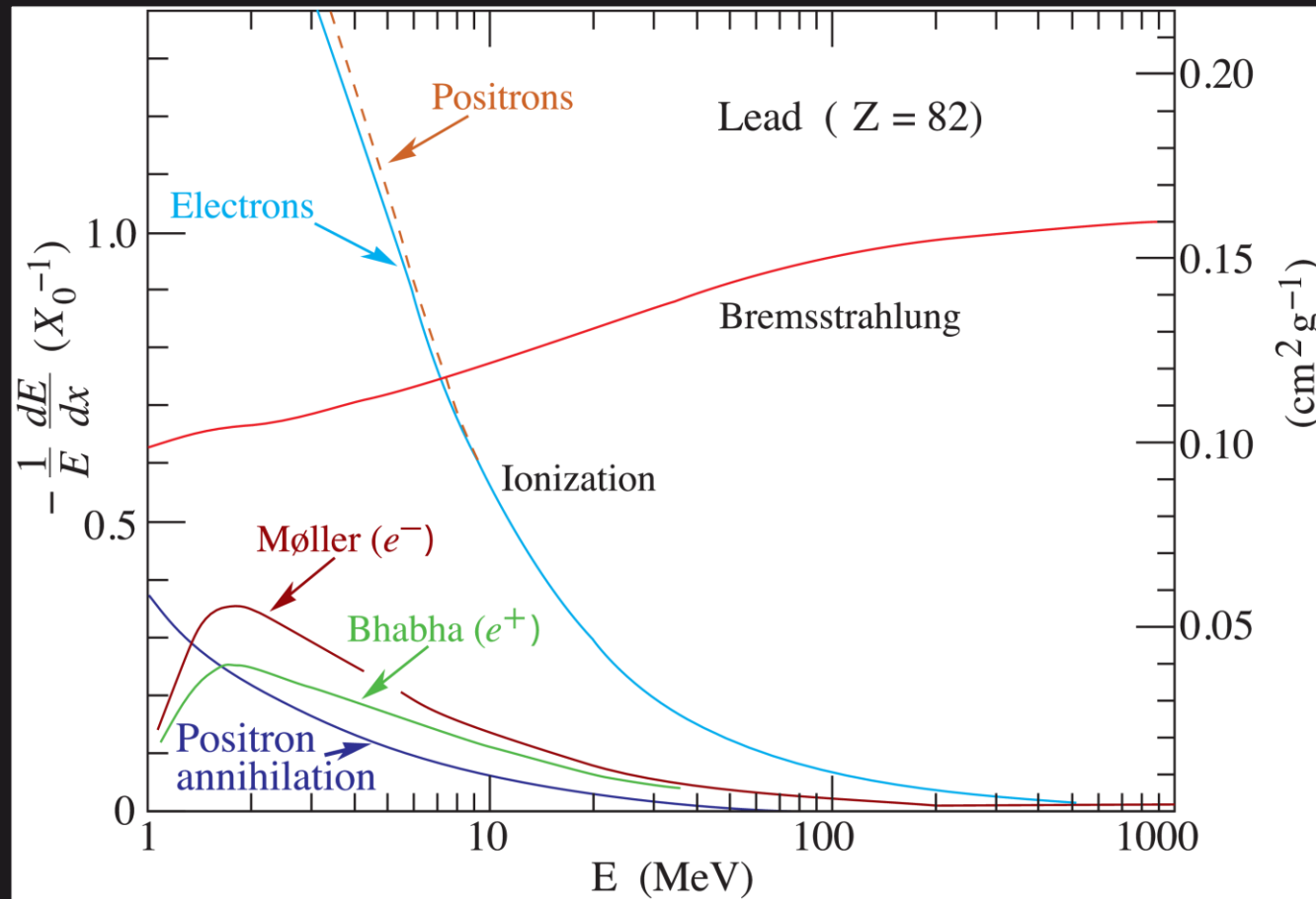


Absorber	$\left. \frac{dE}{dx} \right _{\min} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right]$	$\left. \frac{dE}{dx} \right _{\min} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \right]$
Hydrogen ( $\text{H}_2$ )	4.10	$0.37 \cdot 10^{-3}$
Helium	1.94	$0.35 \cdot 10^{-3}$
Lithium	1.64	0.87
Beryllium	1.59	2.94
Carbon (Graphite)	1.75	3.96
Nitrogen	1.82	$2.28 \cdot 10^{-3}$
Oxygen	1.80	$2.57 \cdot 10^{-3}$
Air	1.82	$2.35 \cdot 10^{-3}$
Carbon dioxide	1.82	$3.60 \cdot 10^{-3}$
Neon	1.73	$1.56 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	1.62	4.37
Silicon	1.66	3.87
Argon	1.52	$2.71 \cdot 10^{-3}$
Titanium	1.48	6.72
Iron	1.45	11.41
Copper	1.40	12.54
Germanium	1.37	7.29
Tin	1.26	9.21
Xenon	1.25	$7.32 \cdot 10^{-3}$
Tungsten	1.15	22.20
Platinum	1.13	24.24
Lead	1.13	12.83
Uranium	1.09	20.66
Water	1.99	1.99
Lucite	1.95	2.30
Shielding concrete	1.70	4.25
Quartz ( $\text{SiO}_2$ )	1.70	3.74



# Bremsstrahlung

Perda de energia por emissão de radiação/fótons é particularmente importante para elétrons e pósitrons:



Brem. devido à interação com o campo de Coulomb do núcleo, partícula de massa  $m$ :

$$-\frac{dE}{dx} \approx 4\alpha \cdot N_A \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot z^2 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

Para elétrons/pósitrons:

$$-\frac{dE}{dx} \approx 4\alpha N_A \cdot \frac{Z^2}{A} r_e^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

Brem. devido à interação com elétrons atômicos:  
 $Z^2 \rightarrow Z$

Somando as contribuições:  $Z^2 \rightarrow Z^2 + Z = Z(Z + 1)$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

$X_0$  : "Comprimento de radiação"

# Fótons

Efeito fotoelétrico:

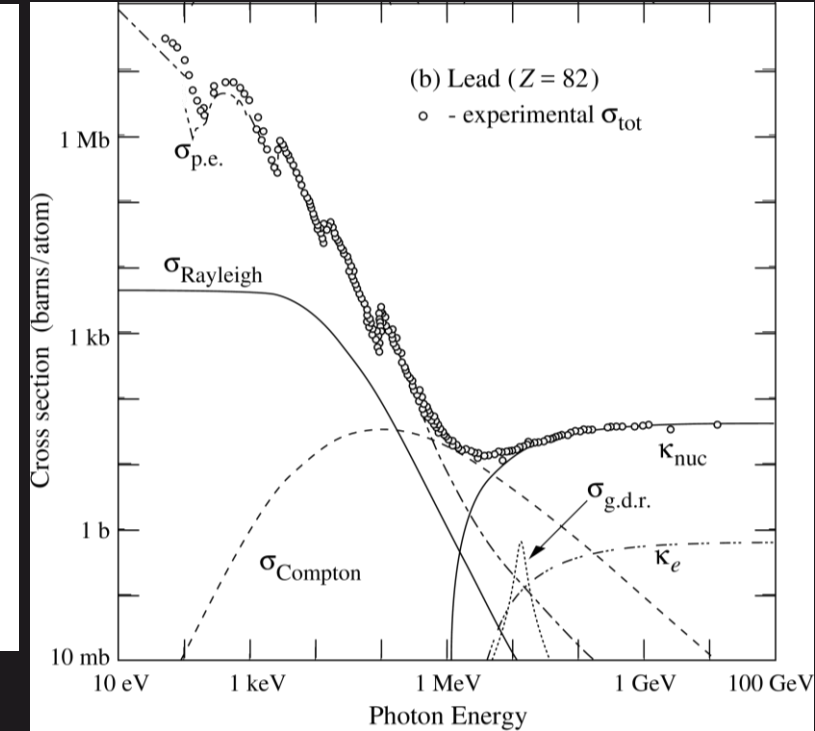
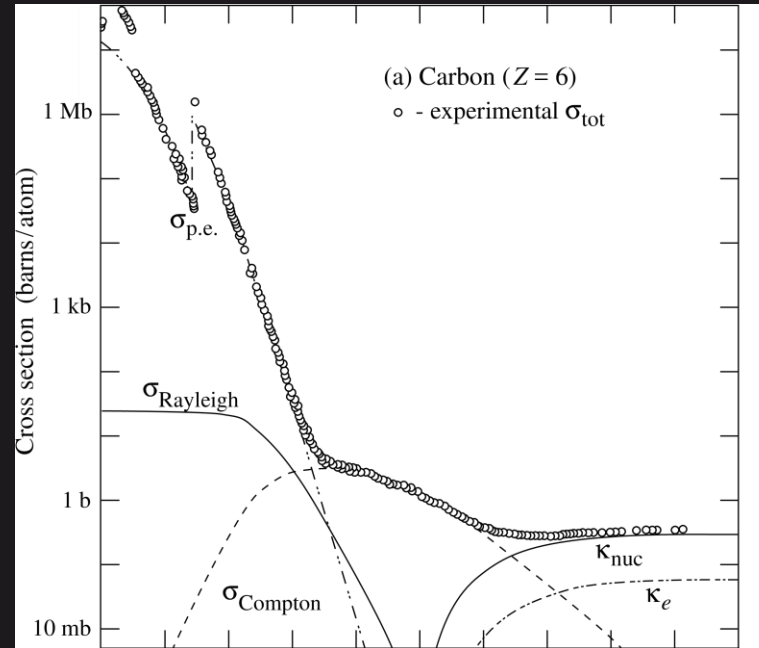
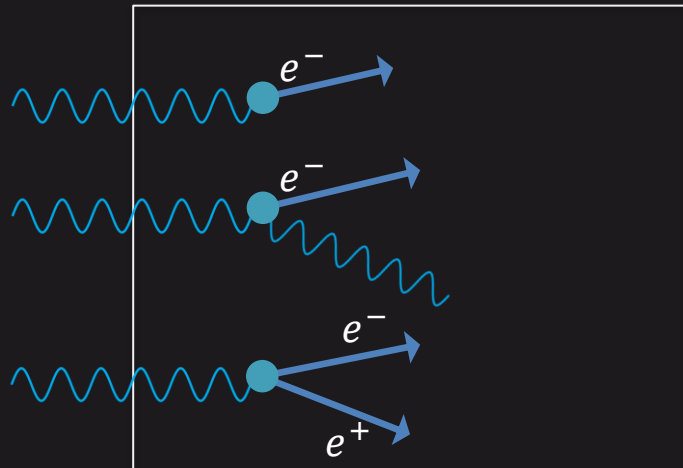
$$\gamma + X \rightarrow X^+ + e^-$$

Espalhamento Compton:

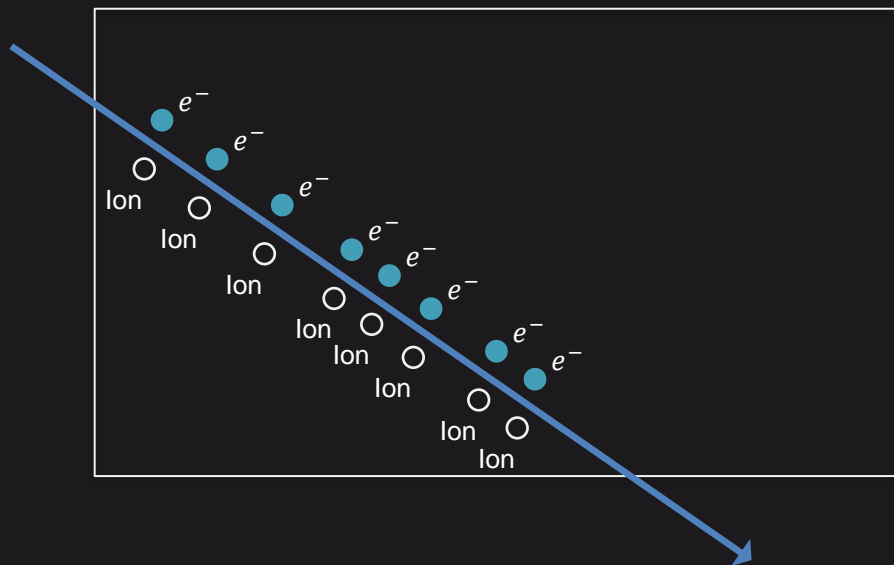
$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

Produção de pares:

$$\gamma + (\text{núcleo}/e^-) \rightarrow e^- + e^+ + (\text{núcleo}/e^-)$$



# Ionização



Partículas carregadas pesadas, e elétrons/pósitrons de energia relativamente baixa (até  $\sim 10$  MeV), interagem e perdem energia predominantemente por excitação e ionização do meio.

Como fótons produzem elétrons ou pósitrons ao interagirem com o meio, indiretamente eles também perdem energia via excitação e ionização.

É possível a emissão, via ionização, de elétrons relativamente energéticos (“raios  $\delta$ ” ou “elétrons  $\delta$ ”) que podem gerar ionização secundária.

$W$  : Energia para a criação de um par elétron-íon

Ionização total:  $n_T = \frac{\Delta E}{W}$

A desexcitação dos átomos gera ainda fótons de baixa energia que podem liberar elétrons via efeito fotoelétrico (possivelmente distante da interação original).

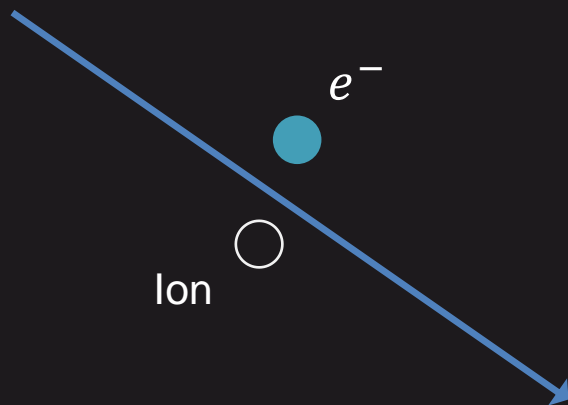
Gas	Density $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$I_0$ [eV]	$W$ [eV]	$n_p$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n_T$ [cm <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub>	$8.99 \cdot 10^{-5}$	15.4	37	5.2	9.2
He	$1.78 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	5.9	7.8
N <sub>2</sub>	$1.25 \cdot 10^{-3}$	15.5	35	10	56
O <sub>2</sub>	$1.43 \cdot 10^{-3}$	12.2	31	22	73
Ne	$9.00 \cdot 10^{-4}$	21.6	36	12	39
Ar	$1.78 \cdot 10^{-3}$	15.8	26	29	94
Kr	$3.74 \cdot 10^{-3}$	14.0	24	22	192
Xe	$5.89 \cdot 10^{-3}$	12.1	22	44	307
CO <sub>2</sub>	$1.98 \cdot 10^{-3}$	13.7	33	34	91
CH <sub>4</sub>	$7.17 \cdot 10^{-4}$	13.1	28	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$2.67 \cdot 10^{-3}$	10.8	23	46	195

# Movimento das cargas

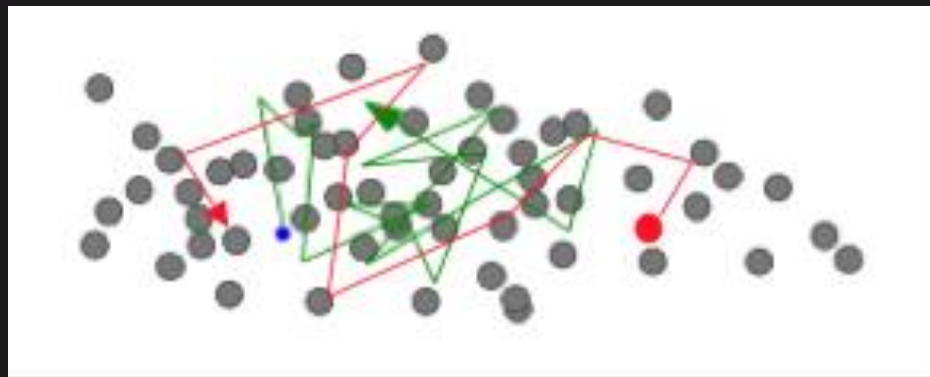
Cargas e movimento induzem uma diferença de tensão em eletrodos instalados junto ao material do detector, mas:

Elétrons e íons irão interagir sucessivamente até perderem toda sua energia e se recombinaem.

Elétrons podem ainda ser capturados por átomos *eletronegativos*.



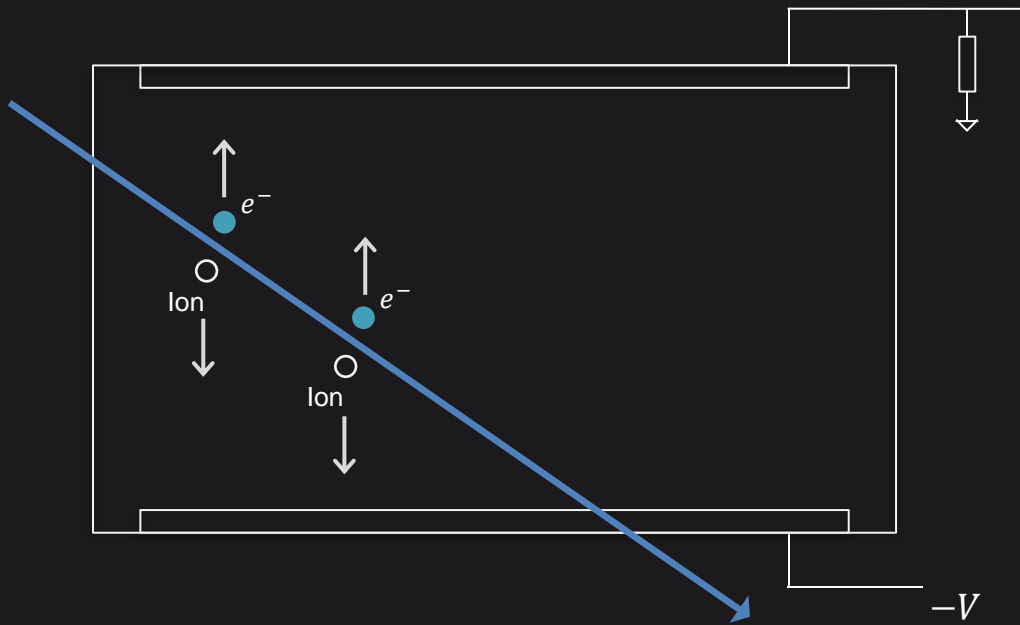
Difusão



As cargas permanecem livres por pouco tempo.

# Movimento das cargas

A solução é introduzir um campo elétrico:

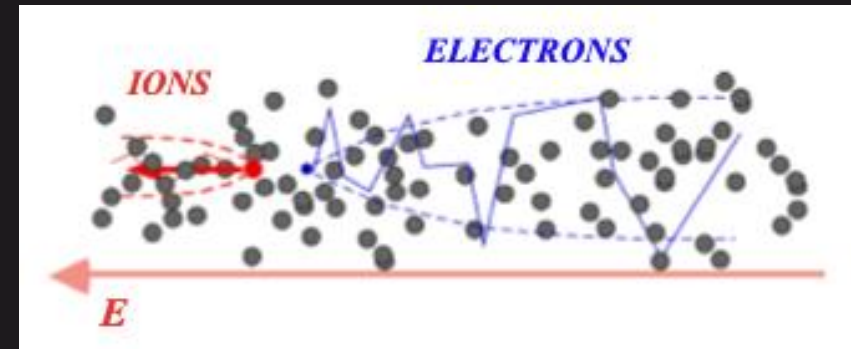


Entre colisões, elétrons e íons ganham energia devido ao campo elétrico, o que evita recombinações.

Os elétrons se movem em direção ao anodo, os íons ao catodo.

Elétrons e íons assumem uma velocidade de *deriva*.

As colisões causam difusão na direção transversal ao campo elétrico.

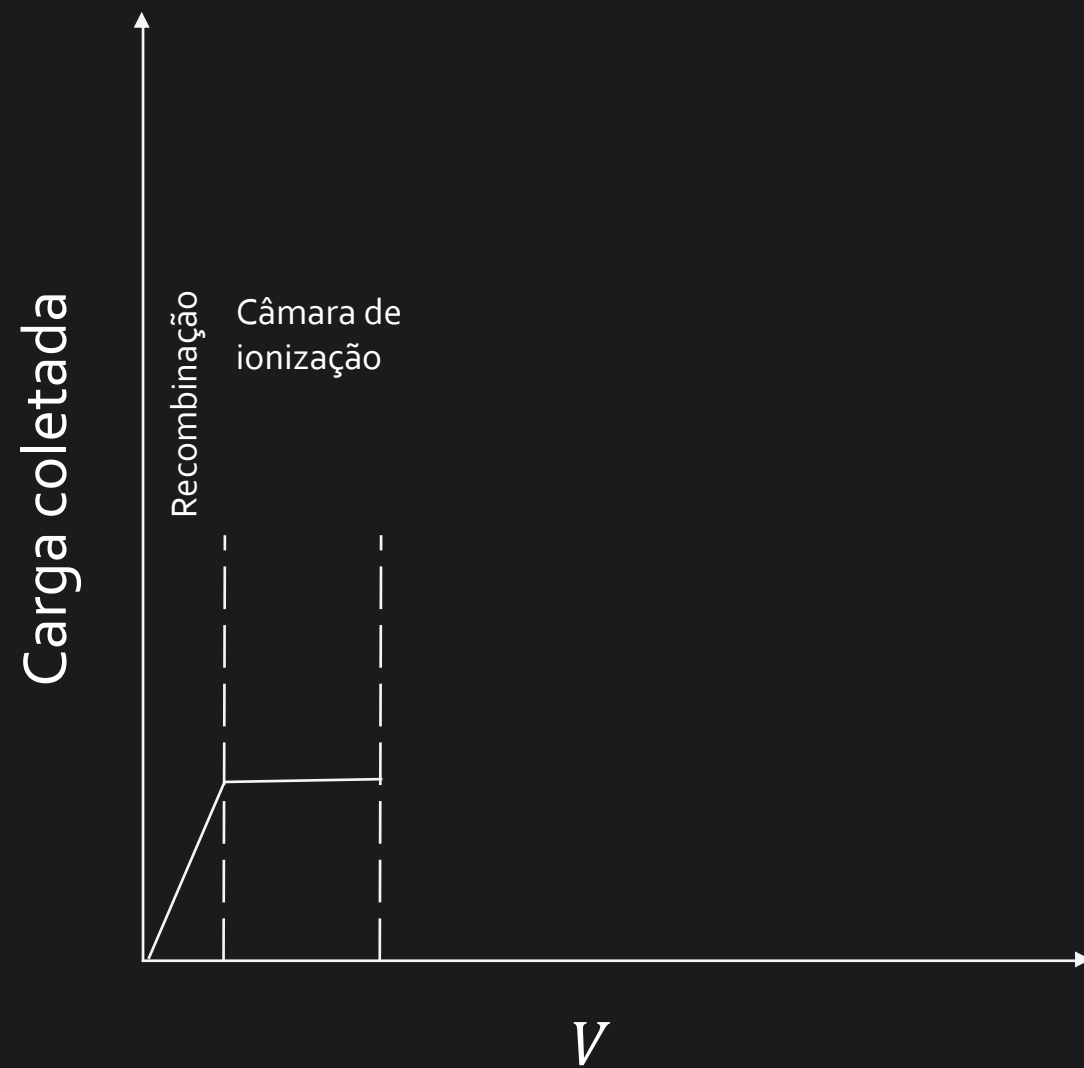


Velocidade de deriva e mobilidade:

$$\vec{v}_{drift} = \mu(E)\vec{E}$$

$$v^{e^-} > v^{Ion}$$

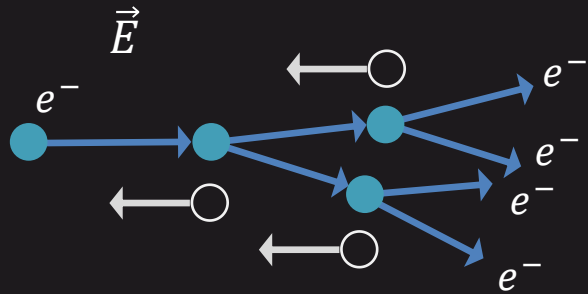
# *Carga coletada*



# Multiplicação de cargas

Na presença do campo elétrico, elétrons e íons devido à ionização primária são acelerados entre colisões sucessivas.

Quando o ganho de energia cinética ( $\Delta E_{kin}$ ) for maior que um limiar de ionização, novos pares elétron-íon serão gerados.

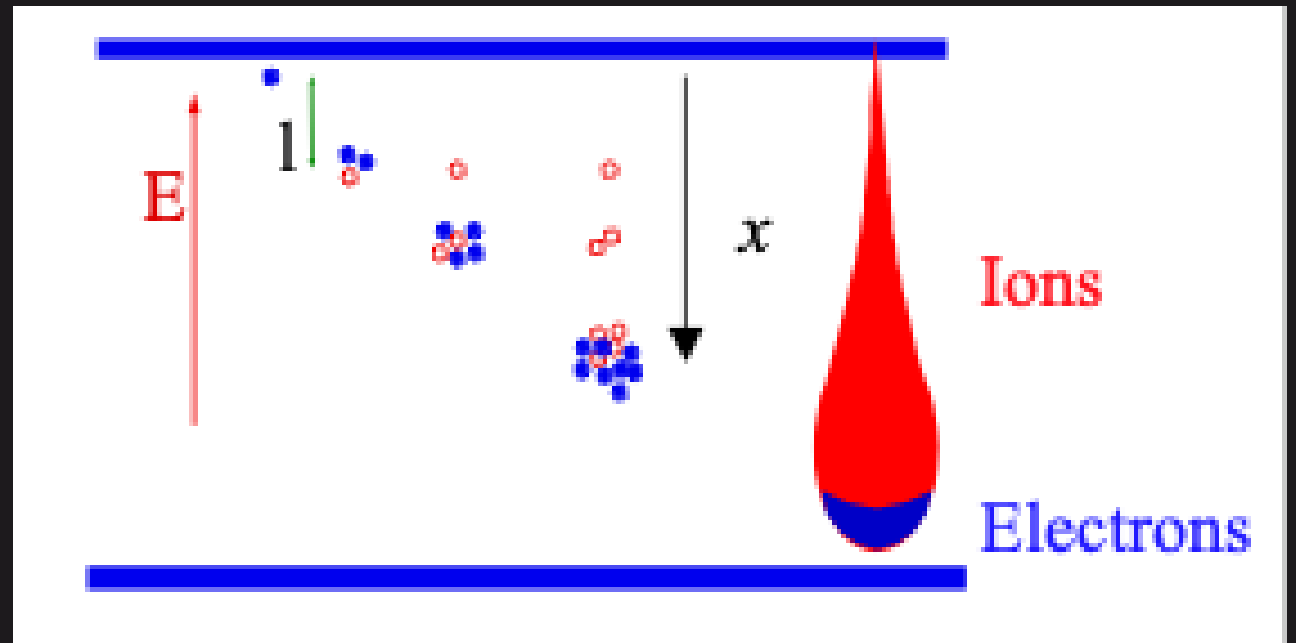


$$\Delta E_{kin} = eE \lambda_0$$

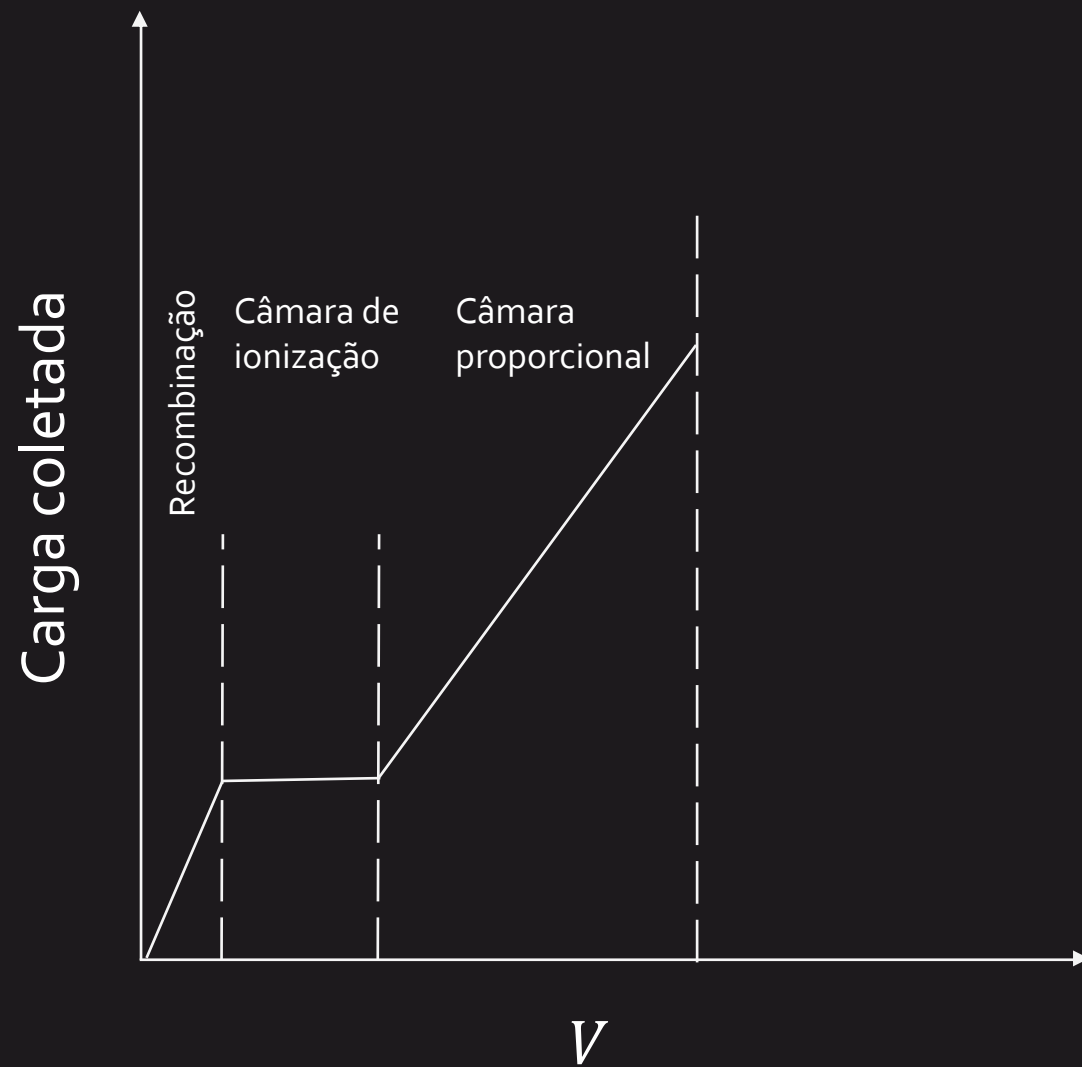
$$dN(x) = \alpha(E)N(x)dx$$

$$N(x) = N_0 \cdot A = N_0 \cdot \exp\left(\int \alpha(E)dx\right)$$

$\alpha$  : primeiro coeficiente de Townsend



# *Carga coletada*





# *Multiplicação de cargas*

