

Introdução à Física de Partículas

Prof. Wagner Carvalho
DFNAE / IF / UERJ

wpc@uerj.br
Sala 3030A

2019/1

Programa

- I. Conceitos básicos
- II. Detectores e aceleradores de partículas
- III. Princípios de invariância e leis de conservação
- IV. Interações eletromagnéticas
- V. Interações fracas
- VI. Interações fortes

Cronograma

	Fev	Mar				Abr				
Ter	26	5	12	19	26	2	9	16	23	30
Qui	28	7	14	21	28	4	11	18	25	1

	Mai					Jun				Jul
Ter	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2 Prova
Qui	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4



Conceitos Básicos



Interações Eletromagnéticas



Detectores e Aceleradores



Interações Fracas



Princípios de Invariância e Leis de Conservação



Interações Fortes

Bibliografia de Apoio

Disponíveis na biblioteca da Física (CTC/D):

- ◆ **Aitchison, Ian J. R.**, *Gauge theories in particle physics, volume 1 : a practical introduction: From relativistic quantum mechanics to QED (2013)*. Exemplares: 1.
- ◆ **Aitchison, Ian J. R.**, *Gauge theories in particle physics, volume 2 : a practical introduction: From relativistic quantum mechanics to QED (2013)*. Exemplares: 2.

- ◆ **Griffiths, David J.**, *Introduction to elementary particles (2008)*. Exemplares: 2.
- ◆ **Griffiths, David J.**, *Introduction to elementary particles (1987)*. Exemplares: 2.

- ◆ **Perkins, Donald H.**, *Introduction to High Energy Physics (2000)*. Exemplares: 1.
- ◆ **Perkins, Donald H.**, *Introduction to High Energy Physics (1987)*. Exemplares: 3.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ◆ Nesta seção, estudaremos as reações básicas que ocorrem quando a radiação encontra a matéria e os efeitos nela produzidos por esses processos.
- ◆ Usaremos o termo **radiação** com um sentido mais amplo que engloba radiações eletromagnéticas, partículas isoladas e mesmo núcleos atômicos ou fragmentos de núcleos.
- ◆ O conhecimento dos processos de interação entre radiação e matéria são fundamentais para um físico experimental nuclear ou de partículas.
- ◆ De fato, tais processos são a base de todos os sistemas de detecção usados nestas áreas e determinam sua sensibilidade e eficiência.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ◆ A radiação penetrante “enxerga” a matéria em termos de seus constituintes básicos: os elétrons e núcleos (ou mesmo, seus constituintes).

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (\text{Relação De Broglie})$$

- ◆ As reações específicas que irão ocorrer dependem do tipo e da energia da radiação incidente. Tais reações podem se dar com o átomo como um todo ou com o núcleo ou mesmo com seus constituintes.
- ◆ Todas as reações possíveis irão ocorrer segundo suas probabilidades específicas, que são determinadas pelas leis da mecânica quântica e pela intensidade das interações fundamentais envolvidas.
- ◆ Características de um determinado tipo de radiação como poder de penetração, potencial de dano biológico e grau de detetabilidade, são definidos pelos processos físicos pelos quais esta radiação interage com a matéria.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

1. Seção de choque

- ◆ Usada para caracterizar a colisão ou interação entre duas partículas ou estados mais complexos, como núcleos ou átomos.
- ◆ A seção de choque é uma quantidade que exprime a probabilidade de que uma reação ocorra.
- ◆ Pode ser calculada quando as interações básicas entre as partículas interagentes são conhecidas.
- ◆ Usualmente, representada pelo símbolo σ .

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ▶ A seção de choque é definida em função dos seguintes parâmetros:

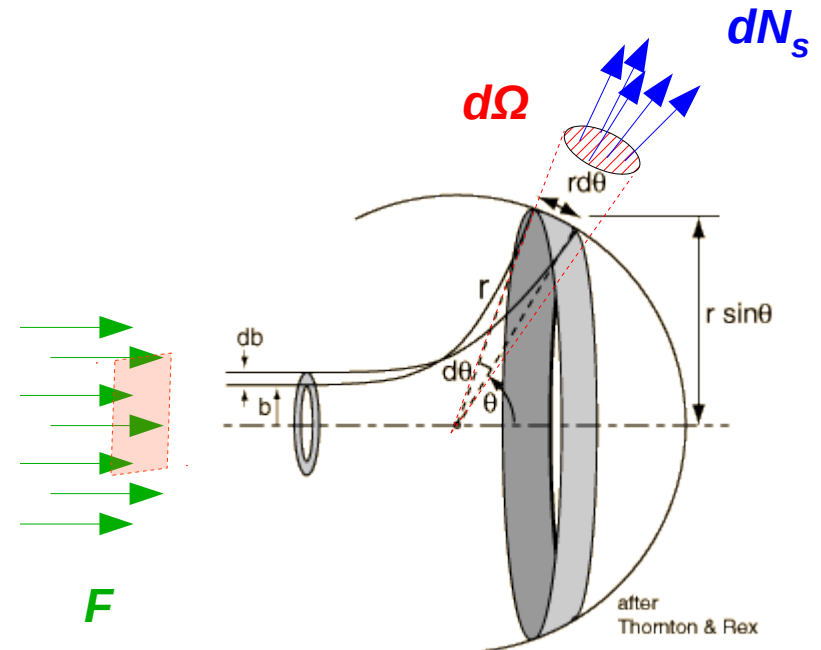
F – Fluxo de partículas incidentes por unidade de área e por unidade de tempo sobre um alvo.

$d\Omega$ – Intervalo de ângulo sólido.

dN_s – Número médio de partículas espalhadas por unidade de tempo.

- ▶ A figura ao lado ilustra o conceito de seção de choque diferencial para um alvo pontual, cuja expressão formal é dada logo abaixo.

- ▶ A seção de choque tem dimensão de área.



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ▶ A probabilidade de que haja um espalhamento em qualquer direção é dada pela seção de choque total, obtida integrando-se a expressão anterior:

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

- ▶ Na prática, é comum se ter como alvo um pedaço de material com área A e espessura δx , contendo N centros de espalhamento por unidade de volume.
- ▶ Assumindo que os centros de espalhamento sejam uniformemente distribuídos e que o material não seja tão espesso que eles se sobreponham significativamente, o número de centros por unidade de área é dado por $N\delta x$.
- ▶ Sendo FA o número de partículas incidentes por unidade de tempo sobre a área do alvo, obtém-se a seguinte expressão para o número de partículas espalhadas em $d\Omega$ por unidade de tempo:

$$N_s(\Omega) = FAN\delta x \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- Integrando-se a expressão anterior, obtém-se o número total de partículas espalhadas em qualquer ângulo:

$$N_{total} = FAN\delta x\sigma$$

- Por fim, dividindo-se esta expressão pelo número de partículas incidentes por unidade de tempo, FA , obtém-se a probabilidade de espalhamento de uma única partícula em uma espessura δx do material:

$$P_s = N\delta x\sigma$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

2. Probabilidade de interação na distância x e livre caminho médio

- ◆ Anteriormente, consideramos a probabilidade de interação da radiação ao atravessar uma camada fina de um material. Vamos considerar agora o caso mais geral de uma espessura x qualquer.
- ◆ É mais fácil perguntar-se qual é a probabilidade de que a partícula não sofra uma interação após atravessar uma distância x . Conhecida como probabilidade de sobrevivência, pode ser calculada da seguinte forma. Sejam:

$P(x)$: probabilidade de **não** haver uma interação após a distância x ;

$w dx$: probabilidade de haver uma interação entre x e dx ;

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ◆ A probabilidade de não haver uma interação entre x e dx é então:

$$P(x + dx) = P(x)(1 - wdx)$$

$$P(x) + \frac{dP}{dx}dx = P(x) - P(x)wdx$$

$$dP = -wP(x)dx$$

- ◆ Integrando-se a expressão anterior, obtém-se:

$$P(x) = Ce^{-wx}$$

- ◆ Exigindo-se que $P(0)=1$, isto é, que a probabilidade da radiação não interagir seja 1 para $x=0$, chega-se a:

$$P(x) = e^{-wx}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- Assim, a probabilidade de que a radiação interaja em algum ponto numa distância x é:

$$P_{int}(x) = 1 - e^{-wx}$$

- É útil definir-se também a probabilidade de haver uma interação no intervalo x a $x+dx$ após a sobreviver à distância x :

$$F(x)dx = e^{-wx}w dx$$

- Um parâmetro extremamente relevante no estudo da interação da radiação com a matéria é o **livre caminho médio**, que consiste na distância média λ percorrida sem sofrer uma interação:

$$\lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx} = \frac{1}{w} \quad [\mathbf{L}]$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ◆ O livre caminho médio está relacionado com a densidade de centros de interação N e com a seção de choque σ definida anteriormente.
- ◆ Expandindo-se a expressão que fornece P_{int} para pequenos valores de δx :

$$P_{int}(x) = 1 - \left(1 - \frac{\delta x}{\lambda} + \dots\right) \approx \frac{\delta x}{\lambda}$$

- ◆ Este resultado deve ser equivalente ao obtido anteriormente para a probabilidade de espalhamento de uma partícula de um feixe por um alvo de espessura δx :

$$P_s = N\delta x\sigma$$

- ◆ Comparando-se as duas, chega-se ao resultado:

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

- ◆ Usando-se a relação anterior, as probabilidades definidas anteriormente podem ser escritas como:

$$P(x) = e^{-N\sigma x}$$

Probabilidade de sobrevivência após percorrer a distância x .

$$P_{int}(x) = 1 - e^{-N\sigma x}$$

Probabilidade de interação na distância x .

$$F(x)dx = e^{-N\sigma x} N\sigma dx$$

Probabilidade de interação no intervalo δx após percorrer a distância x .

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

3. Densidade superficial

- ◆ Uma grandeza frequentemente utilizada para caracterizar a espessura dos absorvedores é a chamada **densidade superficial** ou **espessura de massa**.

- ◆ A espessura de massa de um material é definida como o produto de sua densidade de massa ρ por sua espessura t :

$$\mu \equiv \rho t \quad [\text{ML}^{-2}]$$

- ◆ A espessura de massa é uma grandeza mais apropriada do que o comprimento para discutir a interação da radiação com a matéria, pois é mais proximamente relacionada à densidade de centros de interação.
- ◆ Proporciona uma normalização de materiais com diferentes densidades.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

O estudo da interação das partículas com a matéria é usualmente dividido em três categorias, segundo o tipo da partícula interagente:

- partículas carregadas pesadas (excetuando o elétron)
- radiação gama
- elétrons e pósitrons

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

Partículas carregadas

Principais efeitos da passagem de partículas carregadas pela matéria:

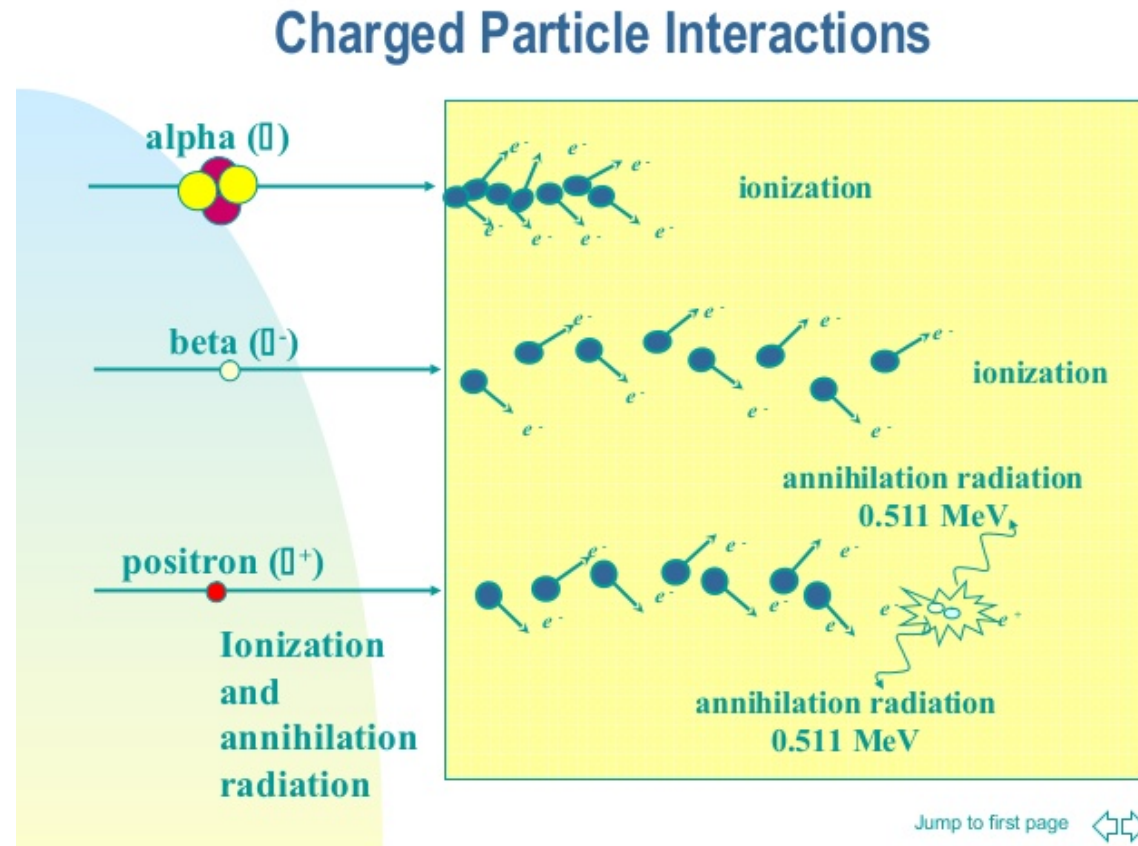
- perda de energia
- deflexão de sua direção original

Estes efeitos resultam dos seguintes processos:

- colisões inelásticas com os elétrons atômicos dos materiais
 - espalhamento elástico pelo núcleo
 - emissão de radiação Cherenkov
 - reações nucleares
 - *bremsstrahlung*
- } Relativamente raros

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria



<https://www.slideshare.net/erletshaq1/lecture-1-30005220>

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

- Perda de energia quase que exclusivamente através de colisões inelásticas.
- As colisões de partículas com os átomos na matéria têm natureza estatística, ocorrendo segundo probabilidades governadas pela mecânica quântica.
- Resultam na ionização ou excitação dos átomos do meio.
- Fração muito pequena da energia da partícula transferida em cada colisão.
- Contudo, na matéria densa, o número de colisões por unidade de comprimento é muito grande e a quantidade de energia depositada mesmo em uma espessura fina de material é substancial.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

- Valor médio de perda de energia por unidade de comprimento (*stopping power* é um termo frequentemente usado) dado pela *fórmula de Bethe-Bloch*:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m\gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

r_e : raio clássico do elétron

m_e : massa do elétron

N_a : número de Avogadro

I : potencial médio de excitação

Z : número atômico do material absorvedor

A : número de massa do material absorvedor

ρ : densidade do material absorvedor

z : carga da partícula incidente em unidades de e

β : v/c da partícula incidente

γ : $(1-\beta^2)^{-1/2}$

δ : correção de densidade

C : correção de camada

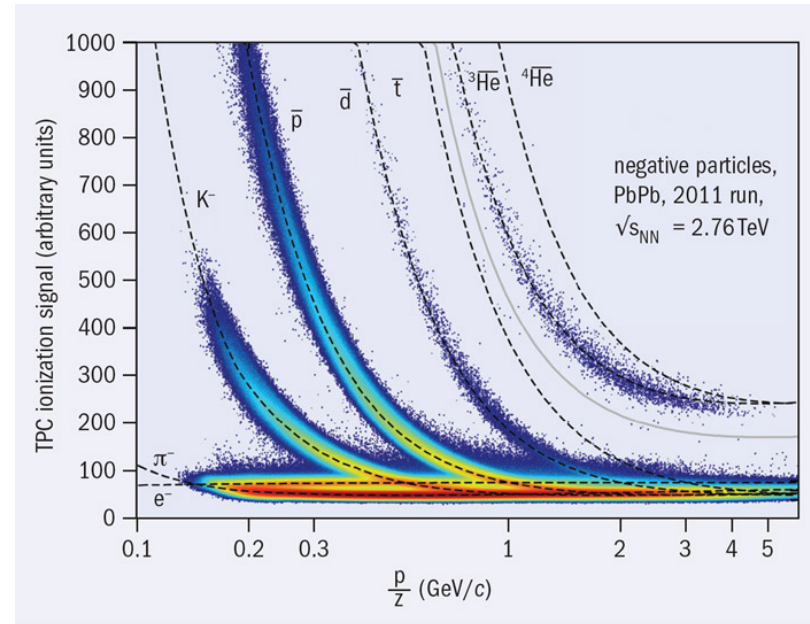
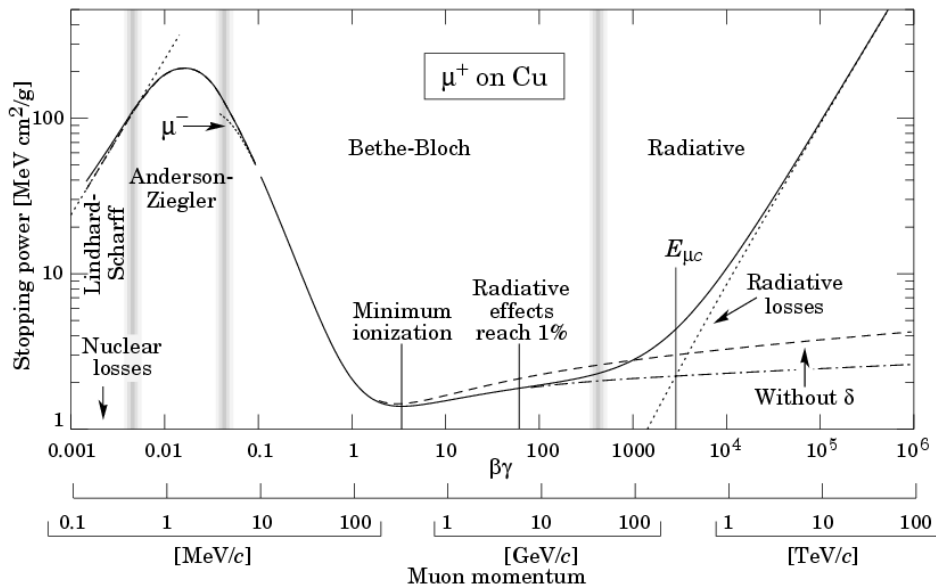
W_{max} : máxima transferência de energia em uma única colisão

II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m\gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

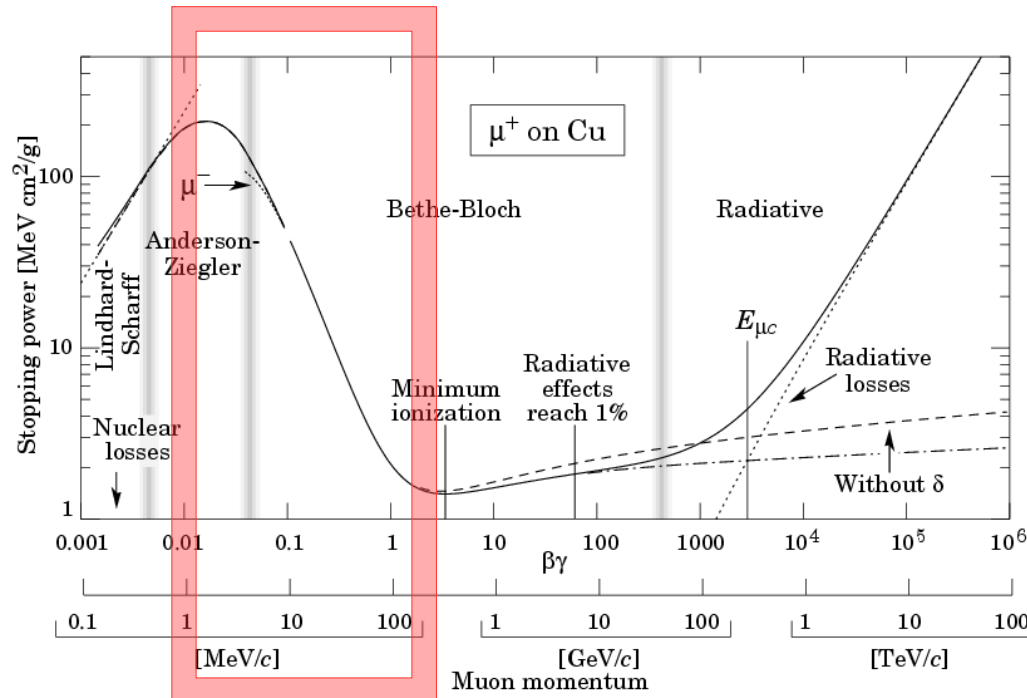


II – Detectores e aceleradores de partículas

Perda de energia de partículas carregadas pesadas (cont.)

◆ Analisando-se as curvas de dE/dx das variadas partículas, constata-se que:

- A energias não-relativísticas, o comportamento de dE/dx é dominado pelo fator global $1/\beta^2$, decrescendo com o aumento da velocidade (e, portanto, energia) da partícula.

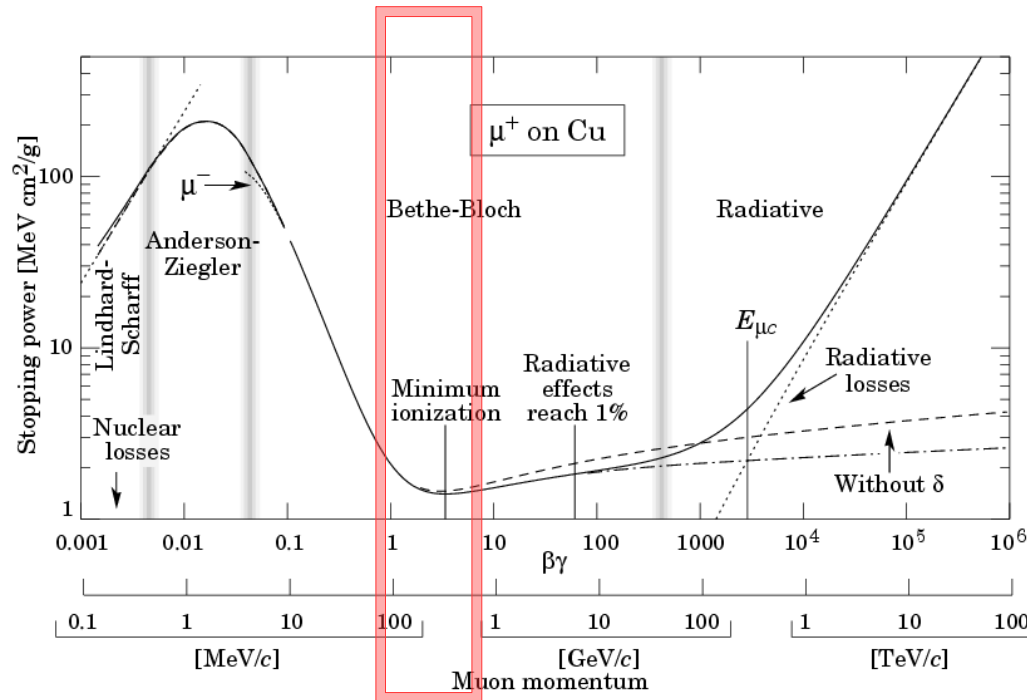


II – Detectores e aceleradores de partículas

Perda de energia de partículas carregadas pesadas (cont.)

◆ Analisando-se as curvas de dE/dx das variadas partículas, constata-se que:

- O valor de dE/dx atinge um mínimo para $\beta \approx 0,96$. Partículas neste ponto são chamadas de **partículas minimamente ionizantes**.

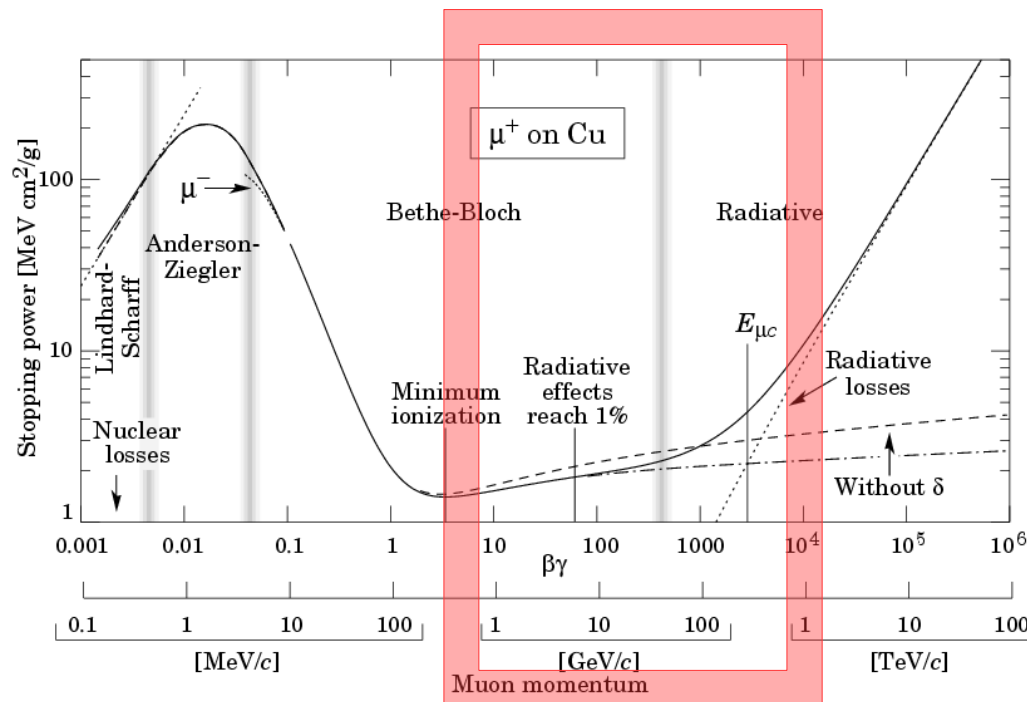


II – Detectores e aceleradores de partículas

Perda de energia de partículas carregadas pesadas (cont.)

◆ Analisando-se as curvas de dE/dx das variadas partículas, constata-se que:

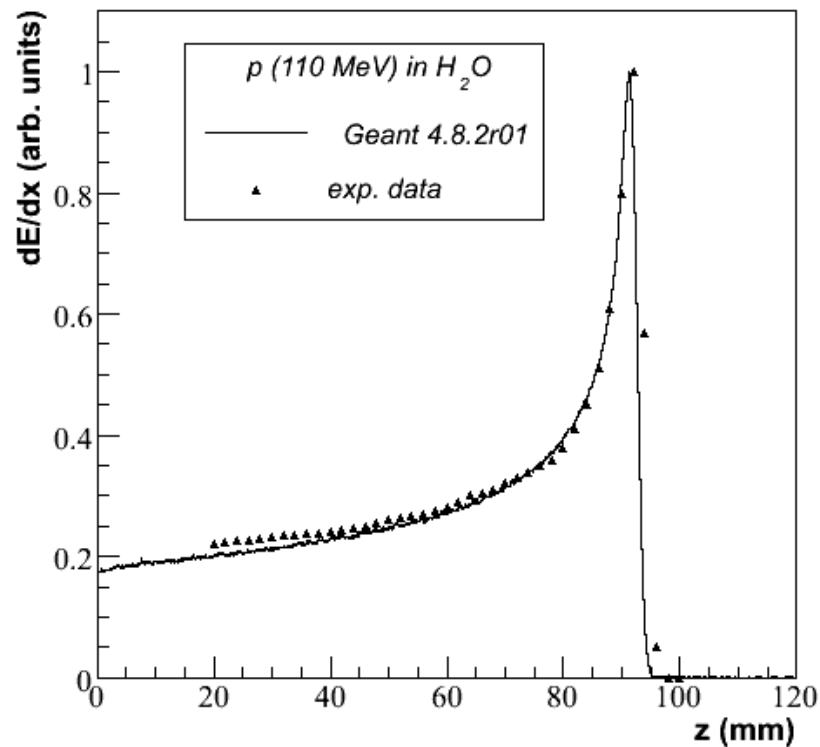
- O mínimo de dE/dx é quase o mesmo para todas as partículas de mesma carga.
- Além do ponto de ionização mínima, o termo $1/\beta^2$ torna-se quase constante e dE/dx volta a crescer lentamente, devido ao termo logarítmico.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Perda de energia de partículas carregadas pesadas (cont.)

- ▶ O resultado é que uma grande quantidade de energia por unidade de comprimento é depositada justamente no final do caminho da partícula. Este efeito é chamado **pico de Bragg** e pode ser visualizado na figura abaixo.



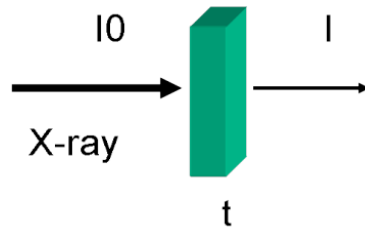
II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

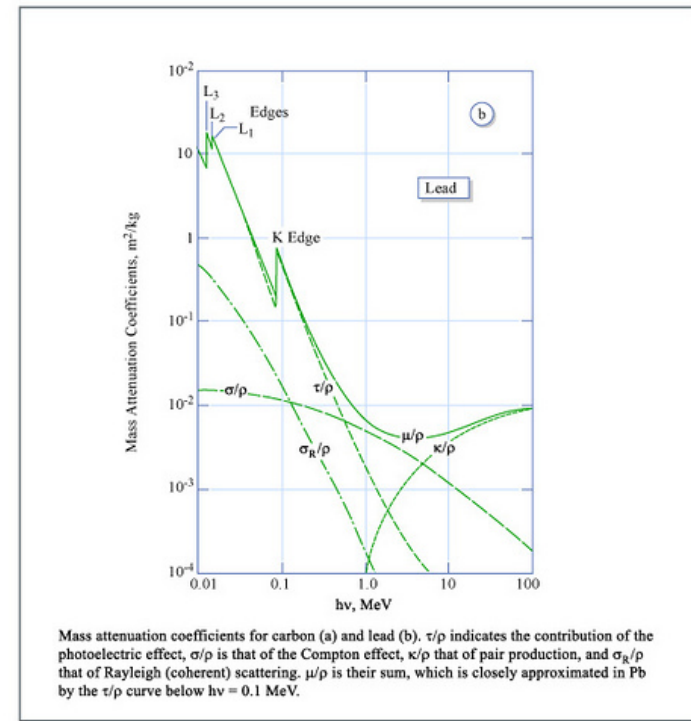
Radiação γ (fótons)

Por não possuir carga elétrica, o fóton interage com a matéria de forma bem distinta das partículas carregadas. Sua interação é pontual, através dos seguintes processos:

- **efeito fotoelétrico:** o fóton desaparece e um elétron é ejetado do átomo
- **efeito Compton:** espalhamento fóton-elétron ($\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$)
- **produção de pares:** conversão do fóton em um par elétron-pósitron ($\gamma \rightarrow e^+ e^-$)



$$I = I_0 e^{-\mu t}$$



II – Detectores e aceleradores de partículas

Interação de partículas e radiação com a matéria

Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

- Os elétrons e pósitrons, ao atravessarem a matéria, perdem energia por dois processos principais:
 - **Ionização**: dominante a baixas velocidades (energias)
 - **Bremsstrahlung** (irradiação de fótons ao serem desacelerados pelo campo coulombiano do núcleo): dominante a velocidades relativísticas (altas energias)

- Energia média do elétron, no limite ultrarelativístico ($\beta \sim 1$), após atravessar uma camada de espessura x :

$$\langle E \rangle = E_0 e^{-x/X_0}$$

- X_0 é chamado de **comprimento de radiação** e é a distância na qual a energia média do elétron reduz-se a $1/e$ do seu valor inicial.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **Sensibilidade**

Capacidade de produzir um sinal utilizável para a detecção de uma radiação de um certo tipo e energia.

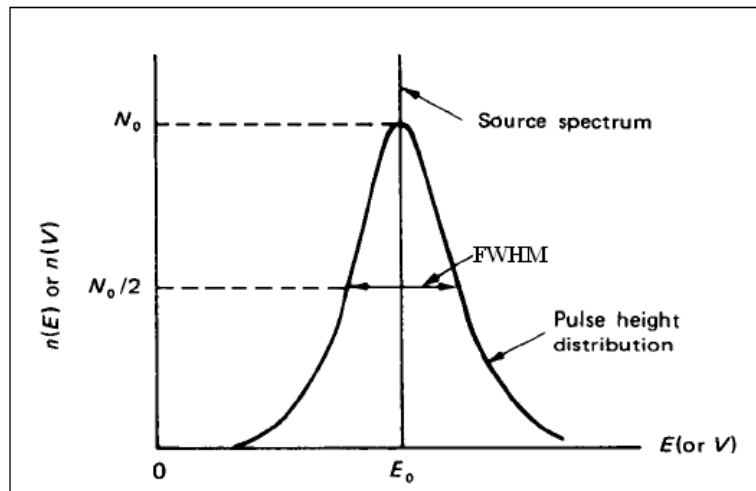
- **Resposta**

Relação entre a energia da radiação e o sinal deixado no detector (corrente, carga ou altura de pulso)

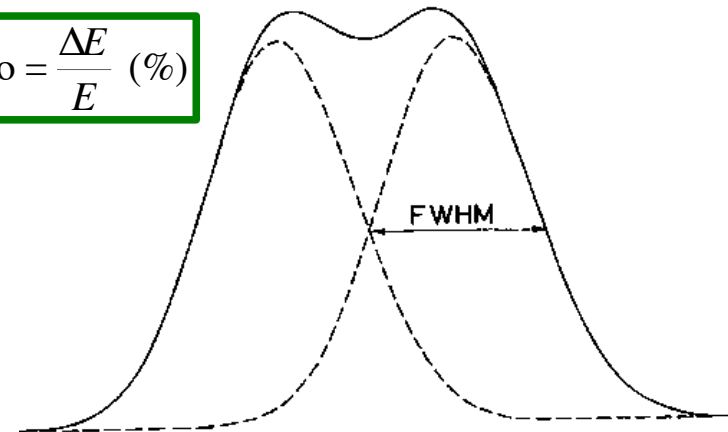
II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **Resolução de energia**
 - Parâmetro que mede a capacidade de distinguir duas energias próximas.
 - A resolução é dada em termos de FWHM (Full Width at Half Maximum). Energias que estão mais próximas do que esse intervalo são ditas não-resolvíveis.



$$\text{resolução} = \frac{\Delta E}{E} (\%)$$

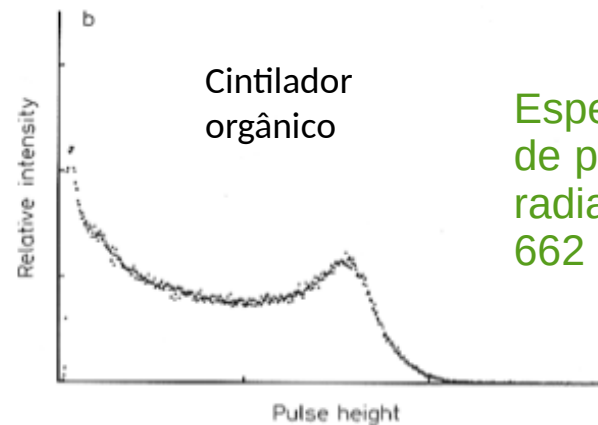
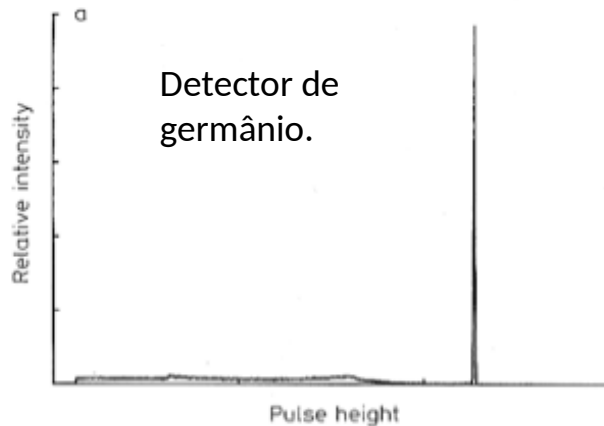


II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **Função de resposta**

- É a distribuição das alturas de pulso obtidas quando o detector é bombardeado por radiações de **mesma energia**.
- Pode ser distinta para diferentes tipos de radiação, pois depende dos diferentes processos físicos que ocorrem e das dimensões do detector.



Espectro de altura de pulsos para uma radiação gama de 662 keV

II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **Tempo de resposta**

Tempo que o detector leva para formar o sinal de resposta após a passagem da radiação.

Também a **duração temporal** do sinal é uma característica fundamental, determinando a taxa limite de contagem em que o detector pode operar.

- **Tempo morto**

Tempo finito necessário para processar um evento e que está normalmente relacionado com tempo de duração do pulso elétrico do detector.

Durante esse tempo, o detector fica indisponível para registrar um novo evento.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **Eficiência de detecção**

Razão entre o número de eventos (partículas ou radiações) registrados N_{reg} pelo detector e o número de eventos emitidos N_{emit} pela fonte.

$$\epsilon = \frac{N_{reg}}{N_{emit}}$$

A eficiência total é a convolução de duas componentes:

- **eficiência intrínseca**: fração dos eventos incidentes N_{inc} no detector que são de fato registrados. Depende da seção de choque de interação da radiação incidente com o material do detector.

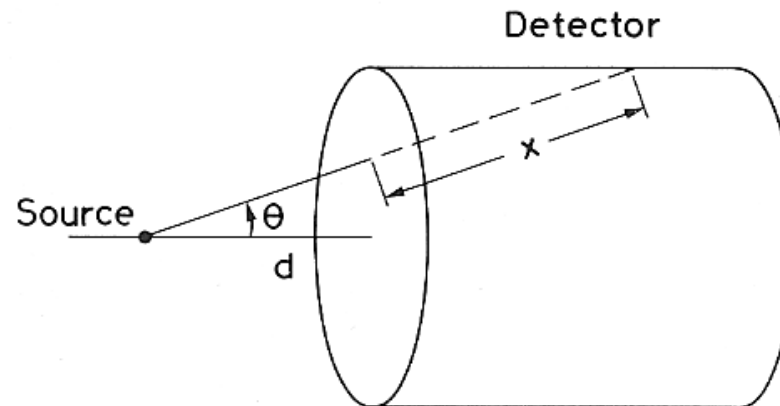
$$\epsilon_{intr} = \frac{N_{reg}}{N_{inc}}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Características gerais dos detectores

- **eficiência geométrica** (ou aceitação): fração do total da radiação emanada que é interceptada pelo detector. Depende completamente da configuração geométrica do detector e da fonte.

$$\epsilon_{geom} = \frac{N_{inc}}{N_{emit}}$$



II – Detectores e aceleradores de partículas

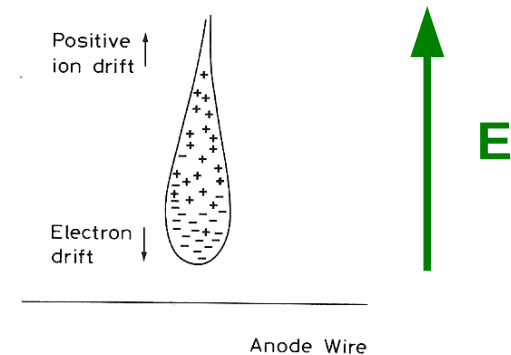
Detectores de ionização

- Baseiam-se na coleta dos elétrons e íons produzidos no gás ou outro meio pela passagem da radiação ionizante.
- Tipos básicos de detectores a gás:
 - câmaras de ionização
 - contadores proporcionais
 - contadores saturados (Geiger-Muller)
- Grande evolução nos anos 60, com a invenção das câmaras proporcionais multifilares (*multi-wire proportional chamber - MWPC*).
- Atualmente há uma ampla variedade deste tipo de detectores: câmara de arrasto, RPC (*resistive plate chamber*), tubos *streamer*, etc.
- Emprego intensivo em experimentos de física de altas energias.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Detectores de ionização

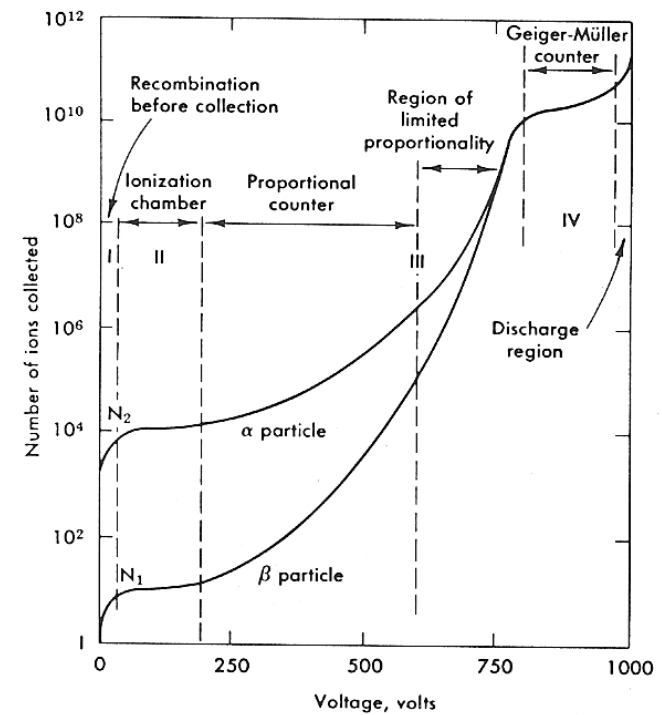
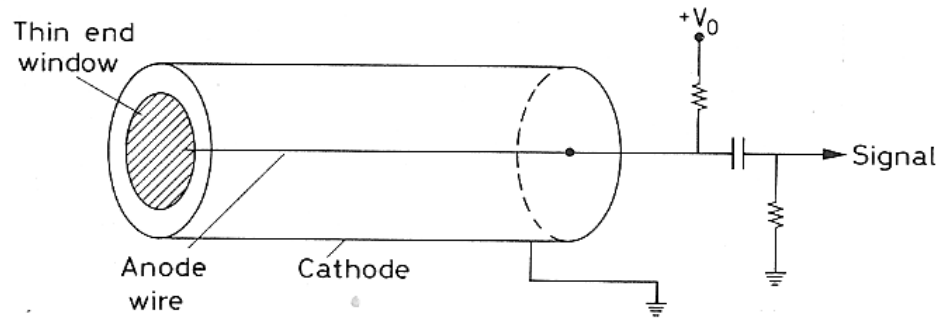
- Vários fenômenos de ionização ocorrem em gases. Ao longo dos anos, eles foram estudados e explorados para o uso em detectores de partículas.
- Um fenômeno fundamental é a multiplicação que ocorre quando os elétrons da ionização primária adquirem energia suficiente para a produção de novas ionizações, processo denominado de **avalanche**.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Detectores de ionização

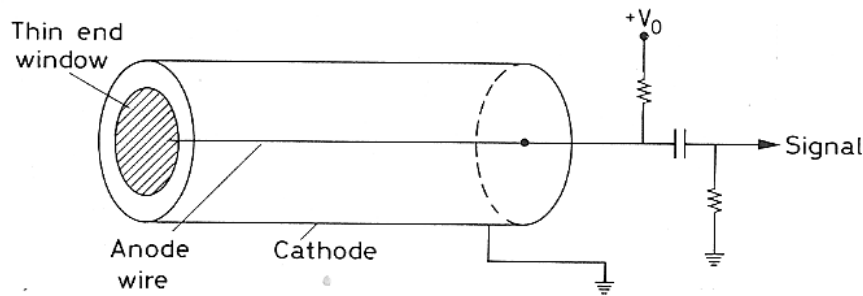
- Os tipos básicos de detectores a gás são essencialmente o mesmo dispositivo.
- A diferença reside nos limites de operação, que são ajustados para explorar os diferentes fenômenos.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Detector proporcional cilíndrico

- A característica principal deste tipo de detector é a **proporcionalidade** do sinal com o número de ionizações primárias.



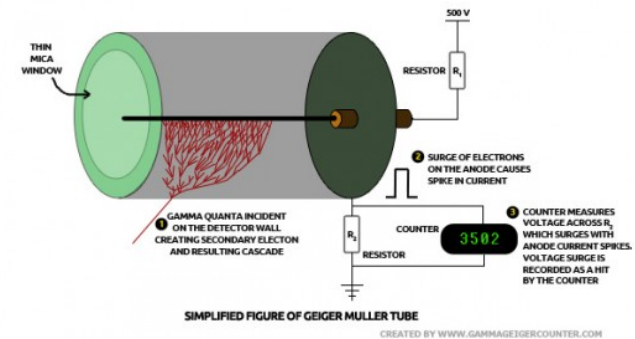
$$E = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

- A geometria cilíndrica impõe uma dependência de $1/r$ ao campo elétrico.
- O ajuste apropriado de V_0 , faz com que a avalanche se desenvolva rapidamente apenas na região muito próxima do fio, onde o campo E é suficientemente intenso para produzir o efeito multiplicador das ionizações.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Detector Geiger-Müller

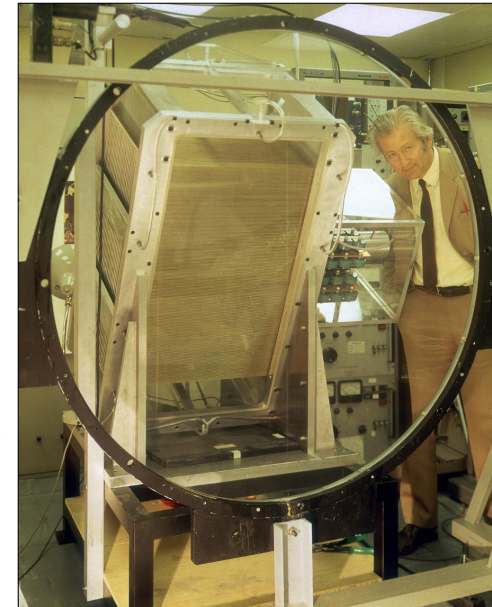
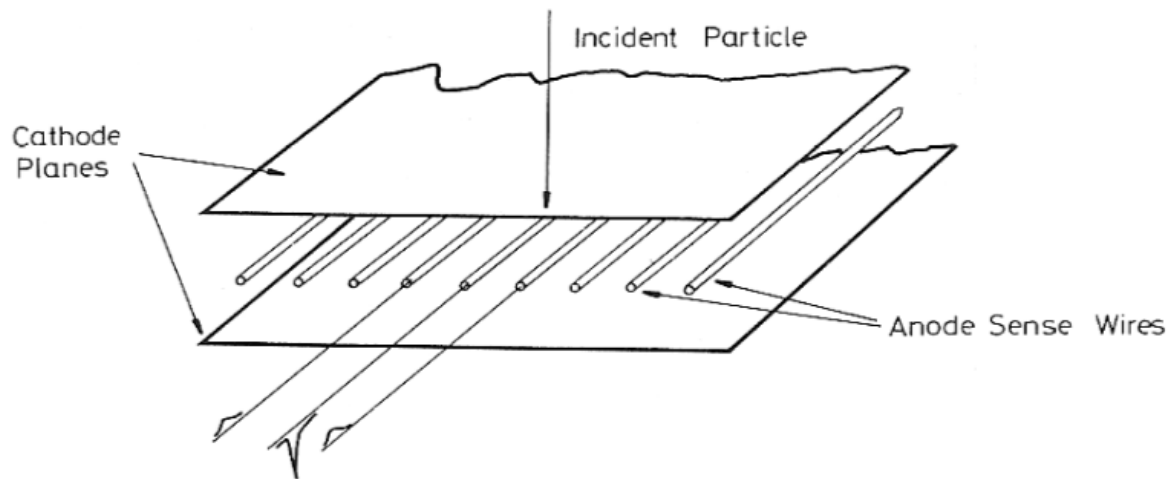
- É um dos tipos mais antigos de detectores, tendo sido introduzido em 1928 por Geiger e Müller.
- Opera na **região de saturação**: o sinal coletado varia pouco com a tensão aplicada e independe da energia depositada pela radiação.
- Principais características:
 - simples
 - baixo custo
 - fácil operação
- É um dos detectores de maior uso comercial até hoje.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Câmara proporcional multifilar

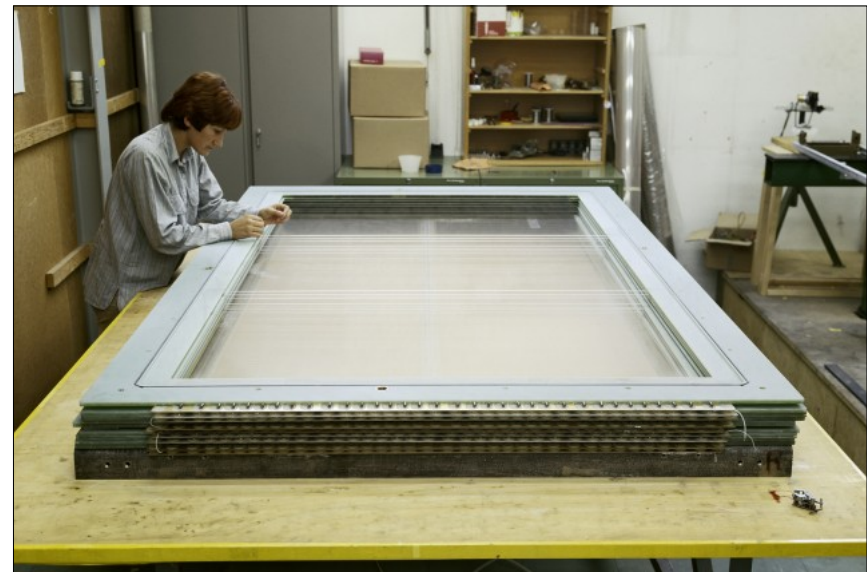
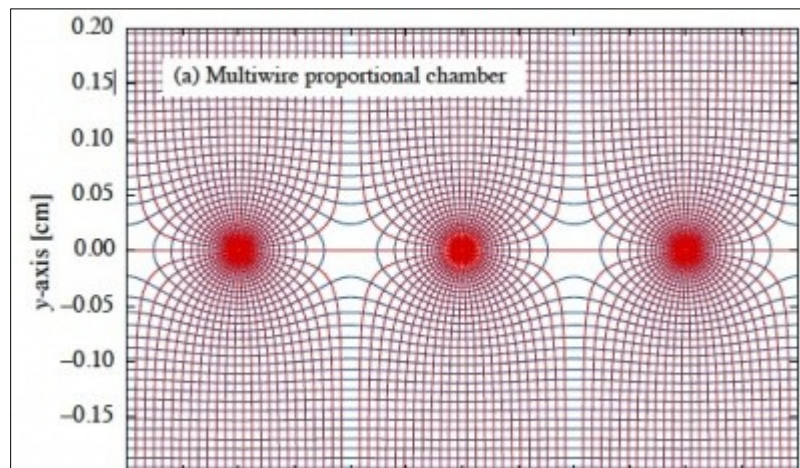
- Consiste de um plano de fios ânodos igualmente espaçados centrado entre dois planos cátodos.
- O espaçamento típico entre os fios é da ordem de 2 mm e a distância entre os planos ânodo e cátodo é de 7 ou 8 mm.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Câmara proporcional multifilar

- Linhas de campo elétrico e equipotenciais no interior de uma câmara proporcional multifilar submetida a uma diferença de potencial.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Câmara de arrasto

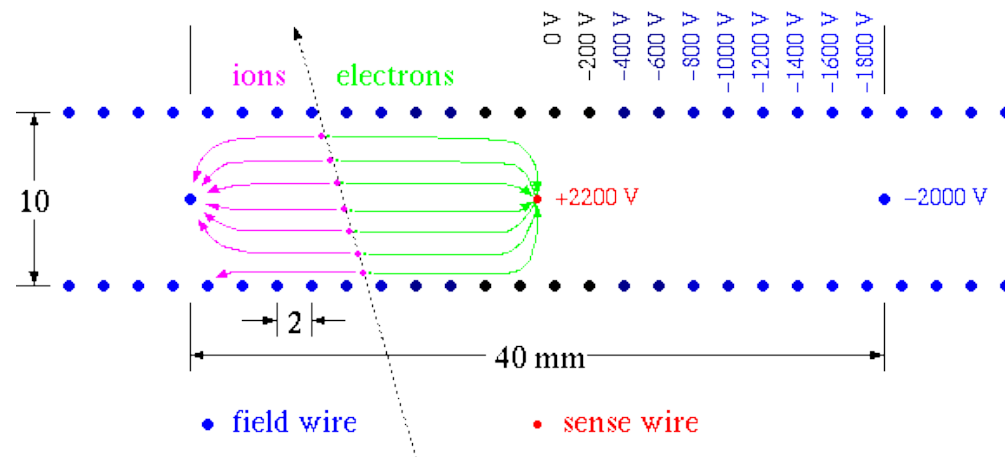
- Aperfeiçoamento da MWPC.
- Usa o **tempo de chegada** dos elétrons no fio, t_1 , para obter a informação espacial.
- Se o tempo de chegada da partícula, t_0 , e a **velocidade de arrasto**, u , são conhecidos, então a distância x entre o ponto de passagem da partícula e o ânodo é dada por:

$$x = \int_{t_0}^{t_1} u dt$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Câmara de arrasto

- É desejável que a velocidade de arrasto u seja constante.
- Para isso, o campo elétrico entre os fios de ânodo deve ser mais uniforme.
- Fios adicionais de modulação do campo são adicionados e os fios de ânodo são posicionados mais afastados em relação à MWPC.



II – Detectores e aceleradores de partículas

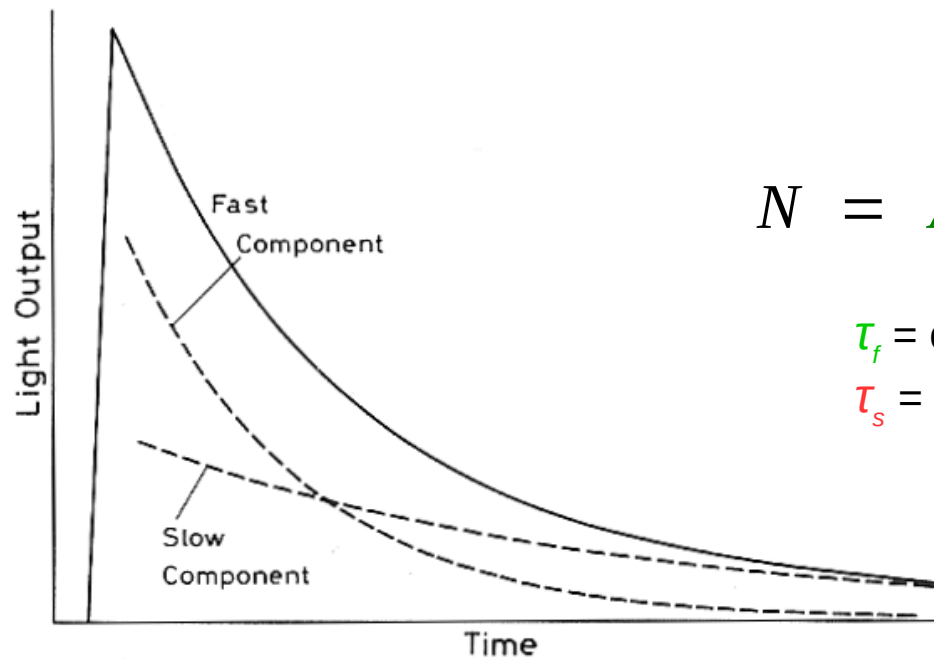
Cintilação

- Os materiais cintiladores exibem a propriedade de **luminescência**.
- Quando expostos a certas formas de energia, esses materiais absorvem e reemitem essa energia na forma de luz visível.
- Se a reemissão ocorre dentro de um intervalo de tempo de $\sim 10^{-7}$ s o processo é chamado **fluorescência**.
- Se a reemissão é atrasada devido ao estado excitado ser metaestável o processo é chamado **fosforescência**.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Cintilação

- O processo é caracterizado por uma ou às vezes duas escalas de tempo através de **constantes de tempo** que expressam a velocidade do decaimento do(s) estado(s) excitado(s).



$$N = A e^{-\frac{t}{\tau_f}} + B e^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

τ_f = constante de decaimento rápido

τ_s = constante de decaimento lento

II – Detectores e aceleradores de partículas

Materiais cintiladores

- **Cintiladores orgânicos:** mais rápido / menor resolução de energia
 - cristais
 - líquidos
 - plásticos
- **Cintiladores inorgânicos:** menos rápido / maior resolução de energia
 - cristais
- **Gases cintiladores**
- **Vidros cintiladores**

II – Detectores e aceleradores de partículas

Cintiladores: principais características

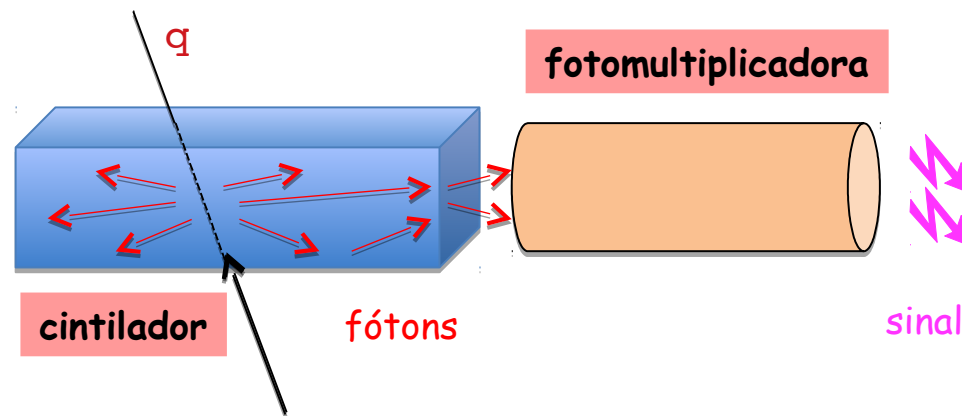
Várias informações podem ser extraídas dos sinais dos cintiladores:

- *Energia*: Acima de uma energia mínima, a maior parte dos cintiladores comporta-se de forma aproximadamente linear com a energia depositada pela radiação.
- *Informação temporal*: Os cintiladores são dispositivos rápidos comparados a outros tipos de detectores.
- *Discriminação por forma de onda*. Com esta característica, alguns cintiladores são capazes de distinguir o tipo de radiação incidente.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Detectores de cintilação

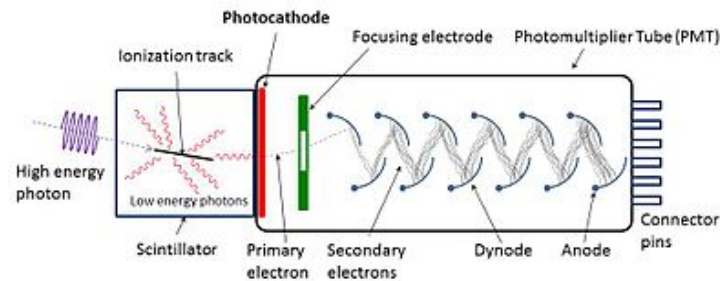
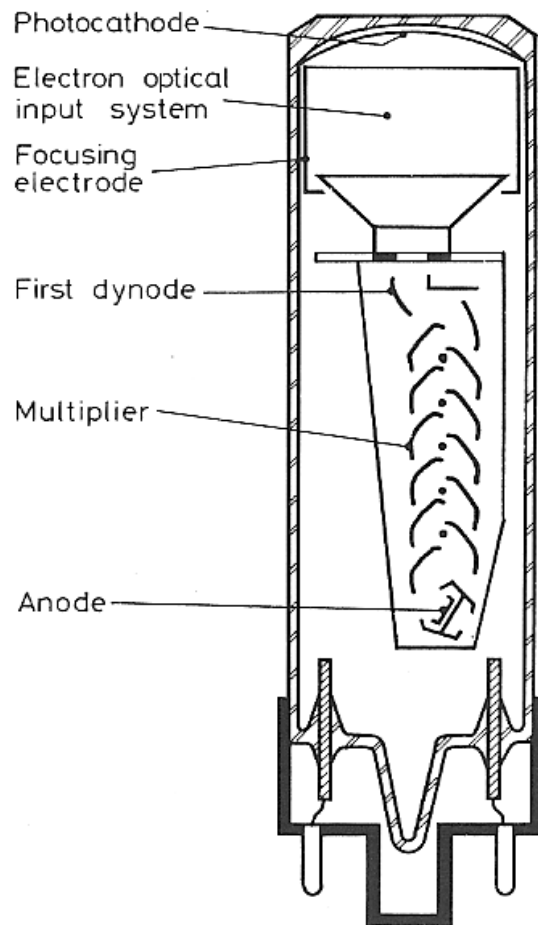
- Juntamente com os detectores a gás, é um dos dispositivos mais usados na detecção de partículas.
- Processo indireto de produção de sinais elétricos. Duas etapas de transferência de energia.
- Dois dispositivos: **material cintilador** e um **fotossensor**.
- Vantagem principal em relação aos detectores a gás: ausência do gás e alguma inconveniência que isso possa significar (demanda de renovação contínua, pressão controlada, etc...).



II – Detectores e aceleradores de partículas

Fotomultiplicadora

- Dispositivo usualmente utilizado juntamente com cintiladores.



- Uma alta voltagem é aplicada no cátodo, dinodos e ânodo formando uma escada de potencial.
- O fotoelétron emitido pelo cátodo é dirigido para o estágio de multiplicação gerando um efeito cascata.
- Os elétrons são finalmente coletados pelo ânodo gerando uma corrente que pode ser amplificada e analisada.
- Pode ser operado no modo *contínuo* ou *pulso*.

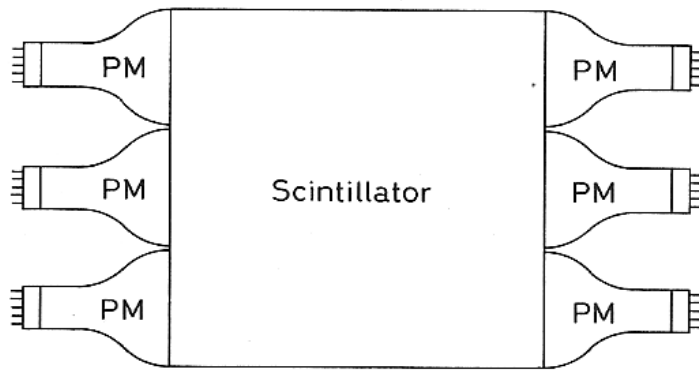
II – Detectores e aceleradores de partículas

Características desejáveis dos materiais cintiladores

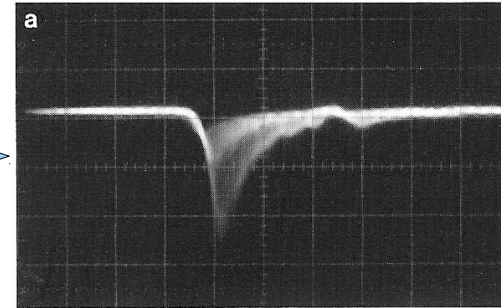
- **Alta eficiência** para conversão da energia de excitação para radiação de fluorescência.
- **Transparência** à fluorescência tal que permita a transmissão da luz.
- Espectro de emissão compatível com o espectro de sensibilidade da fotomultiplicadora.
- Constante de tempo τ **pequena**.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Conjunto cintilador-fotomultiplicadora

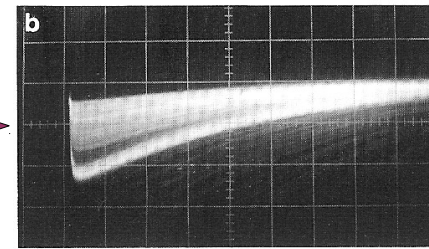


Cintilador Orgânico



Plastic
Vert. scale : 0.2 V/cm
Hor. scale : 10 ns/cm
Source : ^{207}Bi 10 μCi

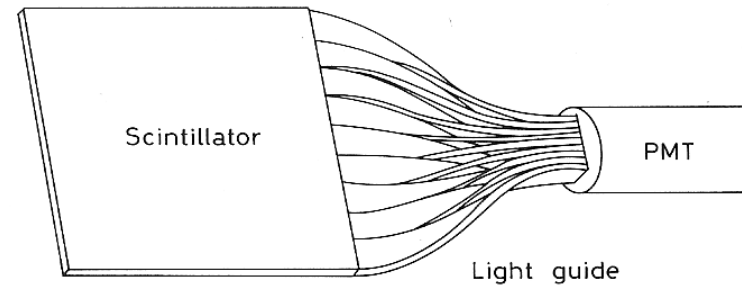
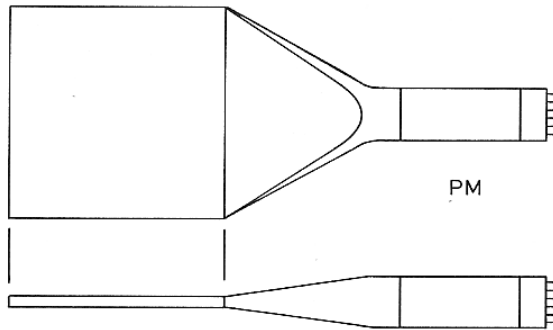
Cintilador Inorgânico



NaI
Vert. scale : 0.2 V/cm
Hor. scale : 5 $\mu\text{s/cm}$
Source : ^{137}Cs 10 μCi

Fig. 9.16. Anode signals from plastic (a) and NaI (b) scintillation counters

Light guide



II – Detectores e aceleradores de partículas

Aplicações de detectores cintiladores

- Devido às suas características de rapidez, eficiência e baixo custo, os cintiladores são bastante utilizados em aplicações em física de altas energias.
- Sistemas de trigger e de calorimetria são alguns exemplos.



II – Detectores e aceleradores de partículas

Aceleradores de partículas

- Elementos radioativos e radiação cósmica são as fontes naturais de partículas e radiação.
- Nos primórdios da física de partículas, as fontes radioativas foram usadas nas investigações sobre a natureza da matéria. Exemplo célebre, é o experimento de Geiger-Marsden-Rutherford que levou à descoberta do núcleo atômico a partir do espalhamento de partículas α provenientes de uma fonte do elemento rádio (Ra).
- Já os raios cósmicos, radiações provenientes de fora da Terra, foram e são até hoje usados como fontes de radiações altamente energéticas para a investigações no campo da física de partículas.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Aceleradores de partículas

Os aceleradores de partículas nasceram das limitações intrínsecas dessas duas fontes naturais:

- A energia das partículas emitidas por fontes radioativas está limitada a ~ 10 MeV.
- O espectro de energia dos raios cósmicos primários se estendem por muitas e muitas ordens de grandeza até cerca de 10^{20} eV.
- O que chega à superfície da Terra são os raios cósmicos secundários. Sua composição e espectro de energia é extremamente variada, dependendo de fatores como a espécie do raio cósmico primário, sua energia, altitude da interação e do ponto de observação.

II – Detectores e aceleradores de partículas

Aceleradores de partículas

Os aceleradores de partículas proporcionam **feixes controlados**, com composição e energia bem definidos.

Permitem a preparação do estado inicial da reação em estudo.

A aceleração e controle de feixes de **partículas carregadas** dependem somente da **interação eletromagnética**.

O princípio de funcionamento são as interações básicas de uma carga elétrica q com os campos elétrico \vec{E} e magnético \vec{B} :

$$\begin{aligned}\vec{F}_E &= q \vec{E} \\ \vec{F}_B &= q \vec{v} \times \vec{B}\end{aligned}$$

II – Detectores e aceleradores de partículas

Aceleradores de partículas

Principais tipos de aceleradores:

- Eletrostáticos
- Lineares
- Circulares (órbita fechada)

Aplicações:

- Pesquisa: física de partículas, física de materiais, biologia
- Aplicações médicas
- Indústria, segurança, conservação de alimentos, tratamento de rejeitos