

Técnicas Experimentais em Física de Altas Energias

Interação da radiação com a matéria

“Progress in a branch of experimental physics is always closely linked with improved methods of measurement in this field.”

Frase introdutória da referência [2], K. Kleinknecht

“Every effect of particles or radiation can be used as a working principle for a particle detector.”

(Particle Detectors book ?!), Claus Grupen (University of Siegen)

Roteiro

- Conceitos básicos
- Interação das radiações com a matéria

Conceitos básicos

- **Unidades de medida**

No estudo da física de partículas é geralmente mais adequado expressar algumas grandezas em outras unidades que não as do SI. É o caso da energia, do momentum e da massa, as quais são expressas em múltiplos do elétron-volt (eV). Por exemplo: GeV, keV/c e MeV/c².

- **Seção de choque**

Expressa a probabilidade de que uma dada reação ou processo físico ocorra. Tem grandeza de área e nas reações nucleares ou entre partículas, usa-se o barn ($1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$) e seus submúltiplos como unidades de medida.

- **Fluxo de partículas**

Número de partículas **N** que atravessam uma superfície **A** em um intervalo **t** de tempo:

$$F = \frac{N}{At}$$

Conceitos básicos

- **Probabilidade de interação em uma distância x**

Sendo $w dx$ a probabilidade da partícula sofrer uma interação entre x e $x+dx$, pode-se mostrar que a probabilidade de a partícula **não** sofrer uma interação após percorrer a distância x é:

$$P(x) = \exp(-wx)$$

Portanto, a probabilidade de interação em uma distância x é simplesmente:

$$P_{\text{int}}(x) = 1 - \exp(-wx)$$

- **Livre caminho médio**

Distância média percorrida pela partícula antes que interaja no meio.

$$\lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx} = \frac{1}{w}$$

Interação das partículas com a matéria

Para se estudar as partículas elementares e as interações que ocorrem entre elas são necessários instrumentos apropriados: os **detectores de partículas** e radiações e sua instrumentação associada.

Porém, o próprio funcionamento desses detectores baseia-se na **interação dessas partículas com o material que compõe o detector**, produzindo dessa forma algum sinal que possa ser usado para identificar ou medir alguma propriedade da partícula.

O **estudo da interação das partículas com a matéria** é portanto fundamental para o projeto e construção dos detectores.

Interação das partículas 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

Interação das partículas 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 basicamente dos seguintes processos:

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



Relativamente
raros

Interação das partículas com a matéria

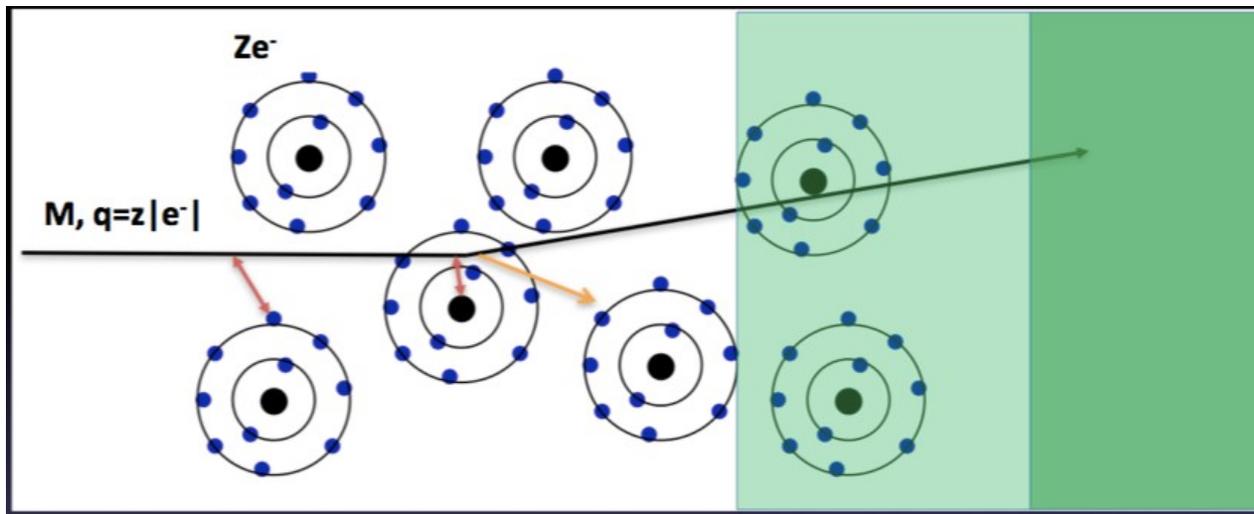
Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

- Perda de energia quase que exclusivamente através de colisões inelásticas.
- Ionização ou excitação dos átomos do meio.
- Fração muito pequena da energia da partícula transferida em cada colisão.
- Entretanto, o número de colisões por unidade de comprimento é muito grande, o que produz uma substancial perda cumulativa de energia.
- Exemplo: um próton de 10 MeV deposita toda sua energia cinética em apenas cerca de 0,25 mm de cobre.

Interação das partículas com a matéria

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

Perda de energia via colisões eletromagnéticas inelásticas



Interação com os elétrons atômicos (excitação e ionização)

Interação com os núcleos atômicos (deflexão e emissão de fótons de bremsstrahlung)

Emissão de radiação Cherenkov ($\beta' > 1$) e de radiação de transição.

Interação das partículas com a matéria

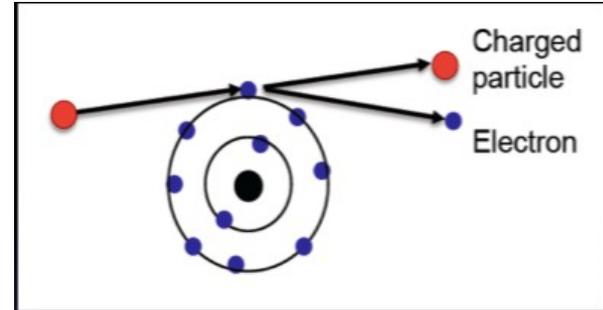
Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

- Colisões são um processo estatístico por natureza, governado pelas leis da mecânica quântica.
- O número de colisões é geralmente muito grande para um intervalo macroscópico e as flutuações relativas na energia total são conseqüentemente pequenas.
- Faz sentido, então, definir a grandeza **valor médio de perda de energia por unidade de comprimento**, frequentemente chamada de *stopping power* ou dE/dx .
- Primeiramente calculada via argumentos clássicos por Bohr, foi depois obtida por Bethe, Bloch e outros usando os princípios da mecânica quântica.

Interação das partículas com a matéria

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

Hipóteses para o cálculo de dE/dx :



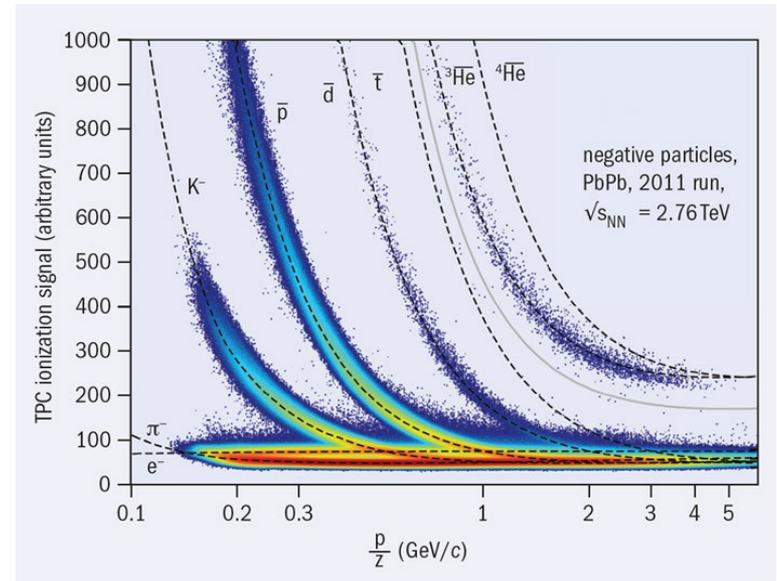
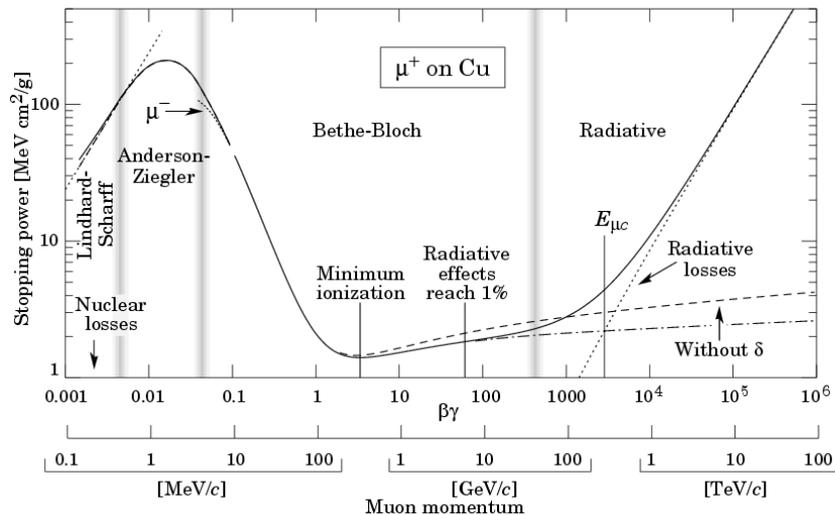
- A massa da partícula incidente é muito maior do que a do elétron ($Mc^2 \gg m_e c^2$).
- A perda de energia é dominada pelas colisões elásticas com os elétrons.
- A energia é transferida para os elétrons.
- A trajetória da partícula carrega não é alterada numa colisão.

Interação das partículas com a matéria

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

- Valor médio de perda de energia por unidade de comprimento dado pela fórmula de Bethe-Bloch:

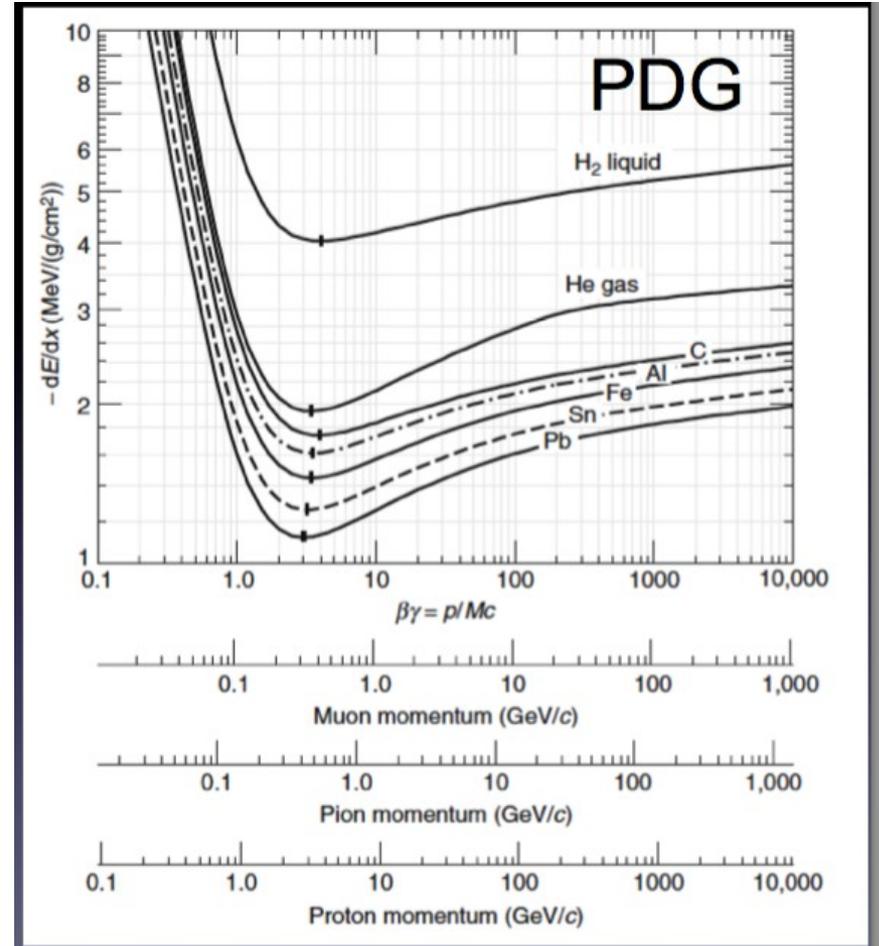
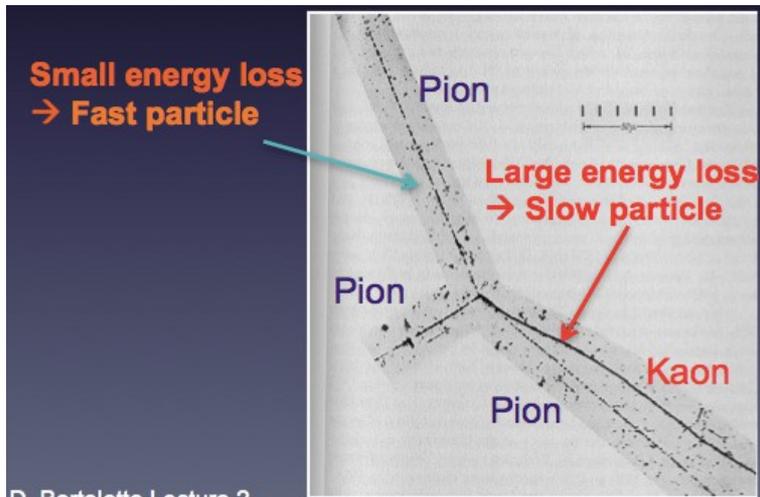
$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m\gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$



Interação das partículas com a matéria

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

- Rápido crescimento, $1/\beta^2$, para baixas energias.
- Mínimo na faixa $3 < \beta\gamma < 4$
- Crescimento lento para altos valores de $\beta\gamma$
- Chama-se de partícula minimamente ionizante (mip) aquela próxima do mínimo de dE/dx .

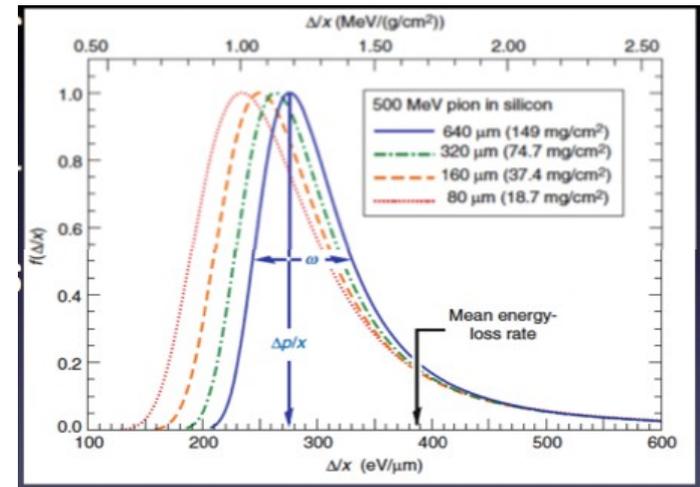


Interação das partículas com a matéria

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

Perda de energia em um absorvedor fino

- Bem representada por uma distribuição de Landau (Gaussiana + “cauda”)
- Distribuição assimétrica:
valor médio \neq valor mais provável
- A cauda é devida à perda elevada de energia em colisões frontais (*head-on*) com os elétrons.
- Estes elétrons são arrancadas com alto momentum e são chamados de raios δ .



$$L(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})\right] \quad \lambda = \frac{\Delta E - \Delta E^{MP}}{\xi}$$

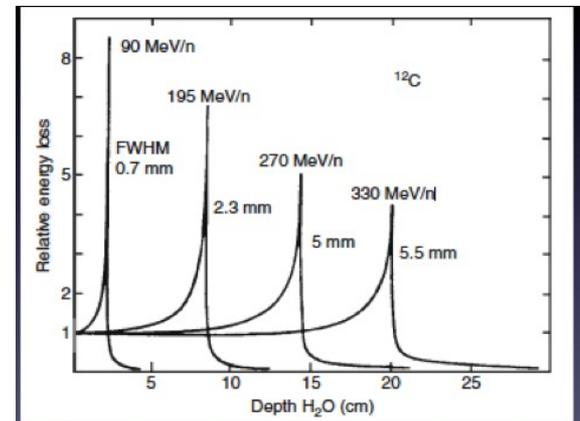
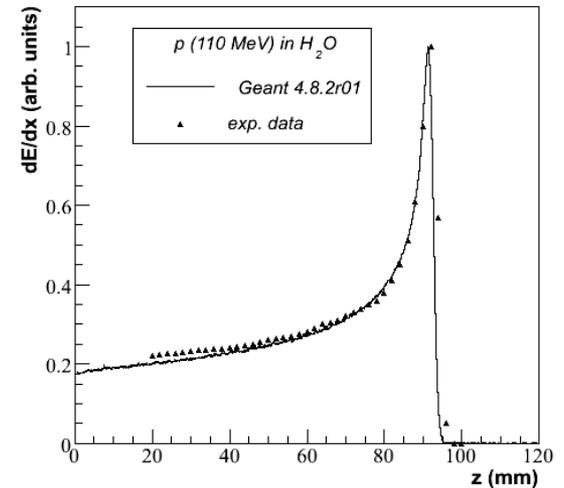
ξ depende do material

Interação das partículas com a matéria

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

Pico de Bragg

- Rápido crescimento de dE/dx , $\sim 1/\beta^2$, para baixas energias.
- Na região de muito baixas energias, a fórmula de Bethe-Bloch para dE/dx deixa de ser aplicável.
- Quando a velocidade da partícula se torna comparável às velocidades dos elétrons orbitais nos átomos do material, dE/dx atinge um máximo e, então, decresce rapidamente.
- A grande quantidade de ionização produzida próxima ao fim do percurso da partícula é chamada de **pico de Bragg**.



Interação das partículas com a matéria

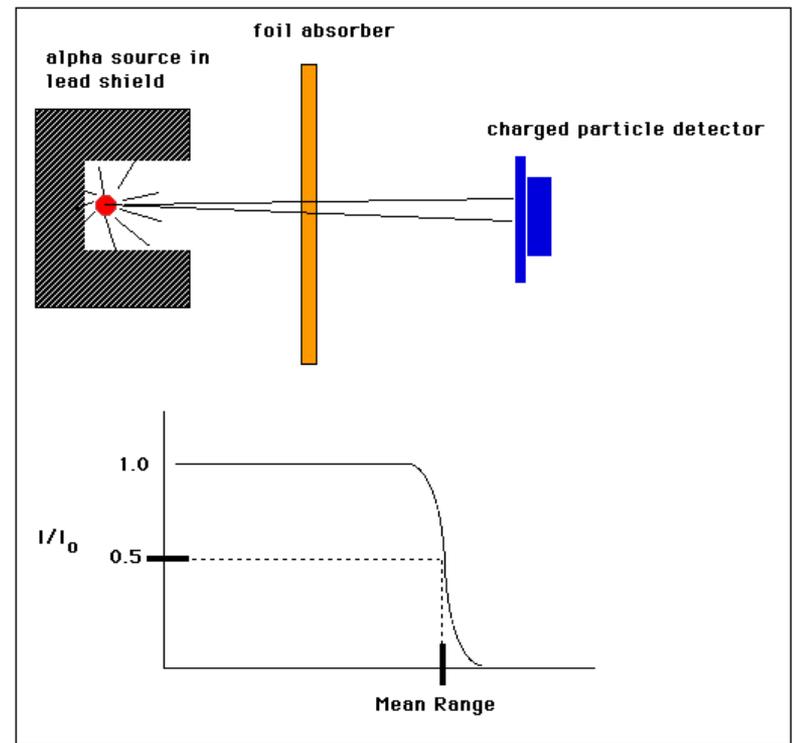
Partículas carregadas pesadas ($\mu, \pi, \rho, \alpha, \dots$)

Alcance

- A partícula carregada perde energia na matéria de uma forma contínua.
- A distância que ela percorre até chegar ao repouso é uma quantidade bem definida, e caracteriza seu **alcance**.

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \frac{1}{dE/dx} dE$$

- Naturalmente, o alcance depende do material, do tipo de partícula e de sua energia.
- Experimentalmente, o alcance é caracterizado medindo-se a razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente de um feixe preparado de partículas.

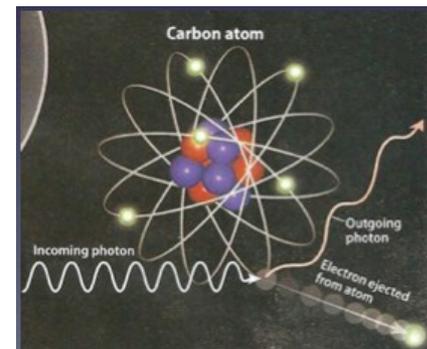
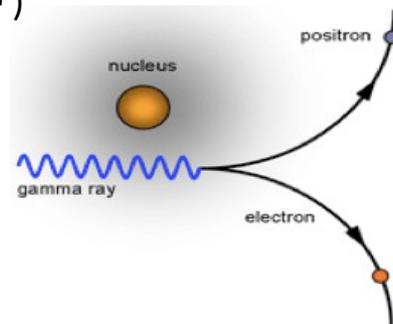
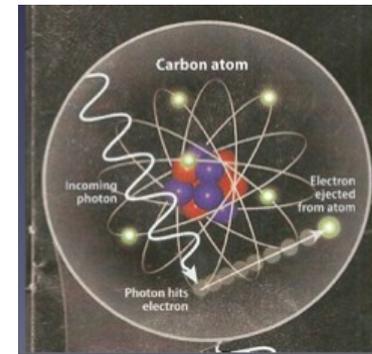


Interação das partículas com a matéria

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:

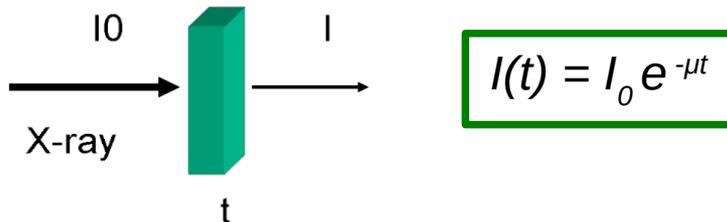
- **efeito fotoelétrico:** o fóton desaparece e um elétron é ejetado do átomo
- **efeito Compton:** espalhamento fóton-elétron ($\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$)
- **produção de pares:** conversão do fóton em um par elétron-pósitron ($\gamma \rightarrow e^+ e^-$)



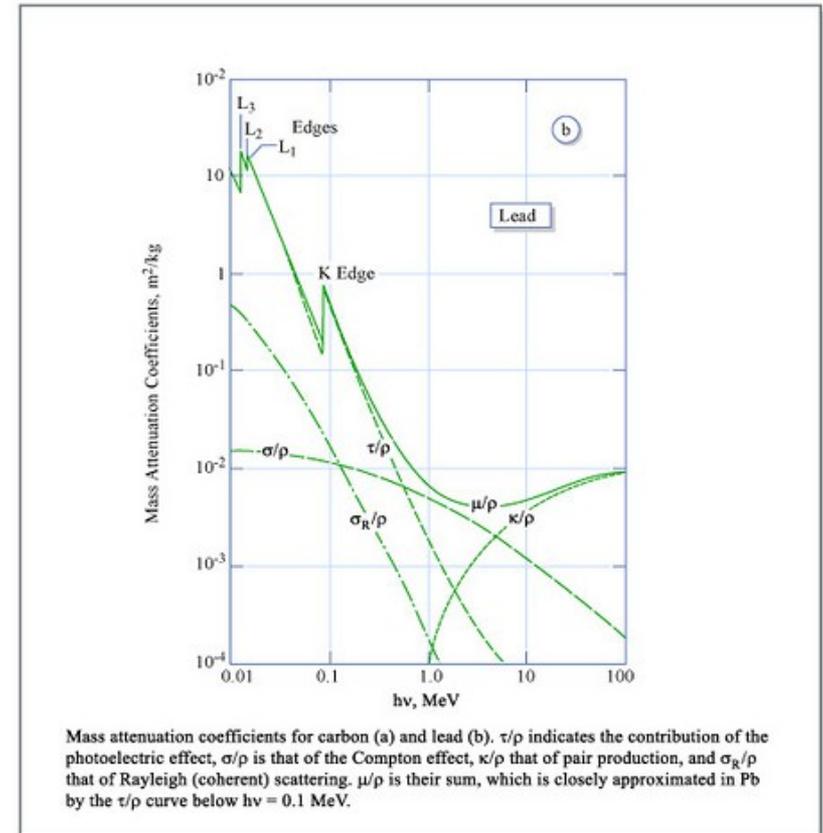
Interação das partículas com a matéria

Radiação γ (fótons)

- O fóton pode desaparecer ou ter sua energia alterada dramaticamente em cada interação.
- Um feixe de fótons ao atravessar a matéria é atenuado a medida que os fótons interagem segundo os processos elementares mencionados.



- μ é denominado **coeficiente total de absorção** e representa a probabilidade por unidade de comprimento de um fóton interagir no material.



Interação das partículas com a matéria

Radiação γ (fótons)

- A seção de choque total de interação do fóton é a soma das seções de choque para os processos fundamentais:

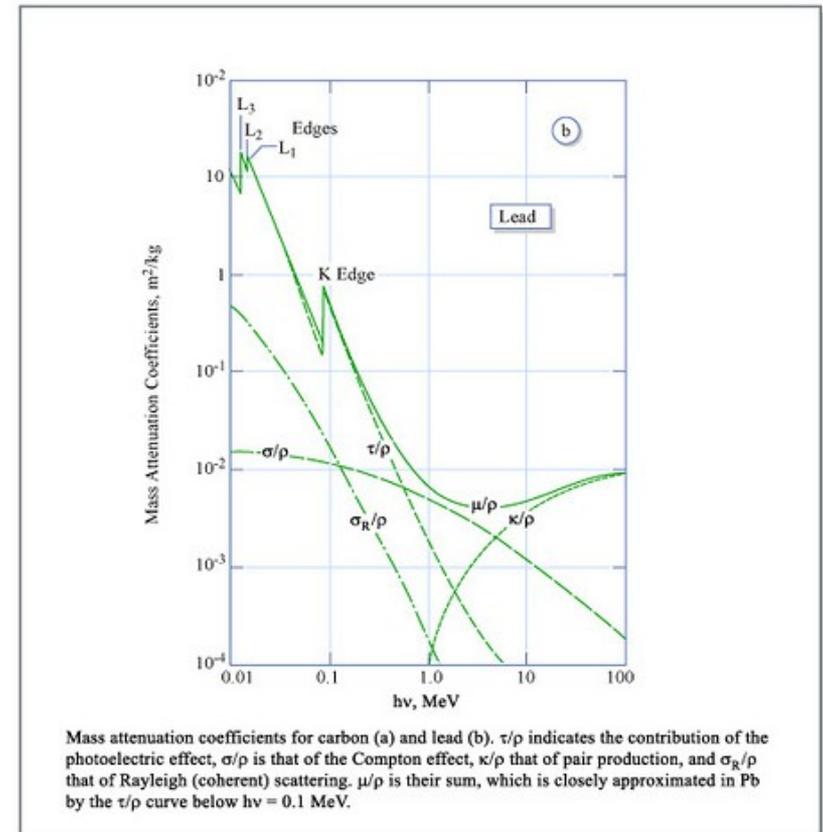
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{f.e.}} + \sigma_{\text{Comp}} + \sigma_{\text{par}}$$

- A relação entre a seção de choque e o coeficiente de absorção é dada por:

$$\mu = \sigma \frac{N_a \rho}{A}$$

- Caminho livre médio do fóton:

$$\lambda = \frac{1}{\mu}$$



Interação das partículas 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 que ocorre quando o elétron ou pósitron é desacelerado pelo campo coulombiano do núcleo.
Este processo é dominante a velocidades relativísticas (altas energias)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brem} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$$

Interação das partículas com a matéria

Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

Ionização

- O mecanismo básico de perda de energia por colisões, esboçado para as partículas carregadas pesadas, permanece válido para elétrons e pósitrons.
- Mas, em razão de sua massa, a fórmula de Bethe-Block precisa ser modificada.
- Uma razão é que a hipótese de que a partícula incidente não sofre um desvio significativo já não é mais válida.
- Um segundo motivo é que a colisão ocorre entre partículas idênticas no caso dos elétrons e os cálculos devem levar em conta de que se tratam de partículas indistinguíveis.

Interação das partículas com a matéria

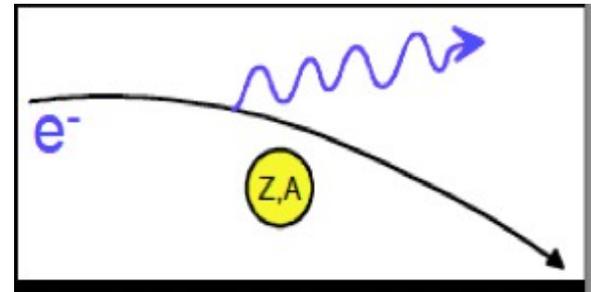
Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

Bremsstrahlung

- A energias abaixo de alguns GeV, elétrons e pósitrons são as únicas partículas para as quais a perda de energia por radiação é significativa.
- A probabilidade de emissão de um fóton é proporcional a m^{-2} .

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

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{brem} \propto \frac{E}{m^2}$$



Interação das partículas com a matéria

Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

- 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.

Interação das partículas com a matéria

Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

Chuveiros eletromagnéticos

- Efeito combinado da produção de pares elétron-pósitron e da emissão de radiação de *bremsstrahlung*.
- Processo estatístico por natureza.

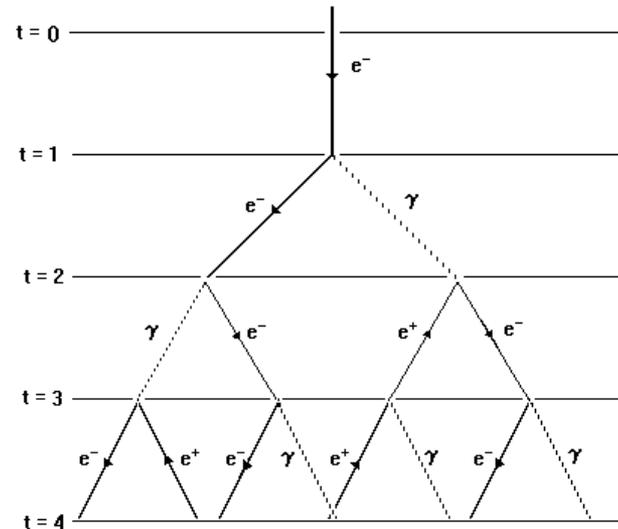
$$t \equiv X_0$$

$$N \approx 2^t$$

$$E(t) \approx E_0/2^t$$

$$t_{\max} \approx [\ln(E_0/E_c)] / \ln 2$$

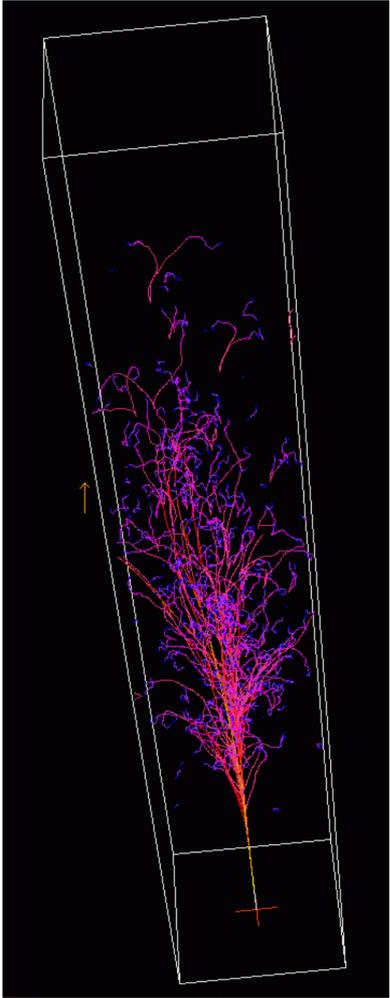
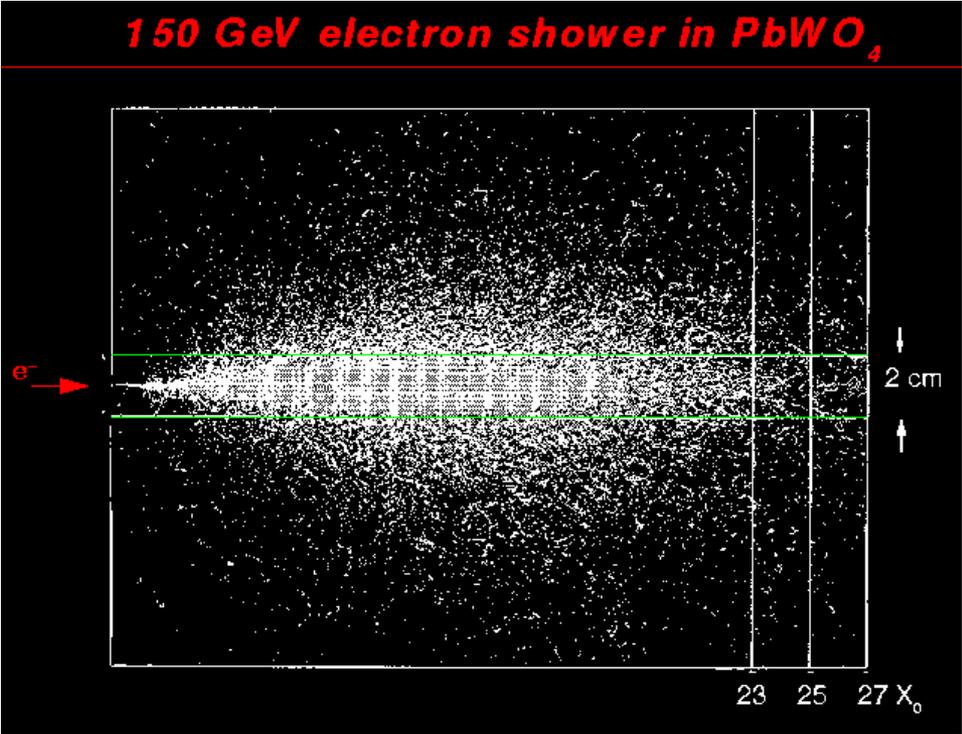
$$N_{\max} \approx E_0/E_c$$



Interação das partículas com a matéria

Partículas carregadas: elétrons e pósitrons

Chuveiros eletromagnéticos



Características gerais dos detectores

- **Sensibilidade**

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

- **Resposta**

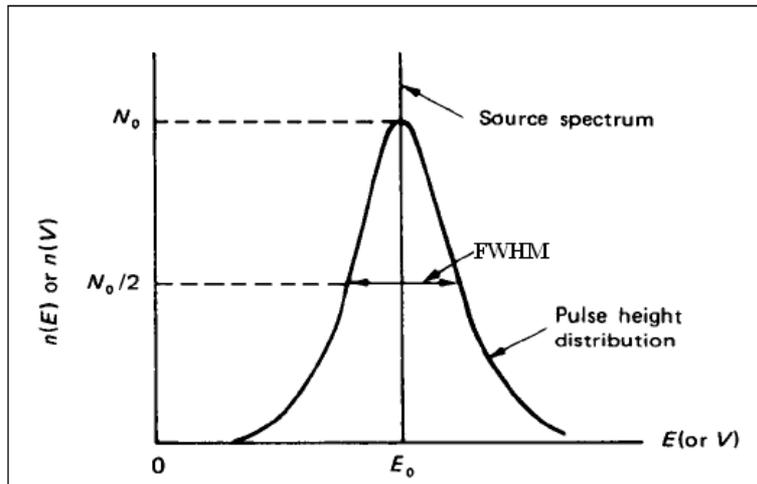
Relação entre a energia da radiação e o sinal deixado no detector (corrente, carga ou altura de pulso)

Características gerais dos detectores

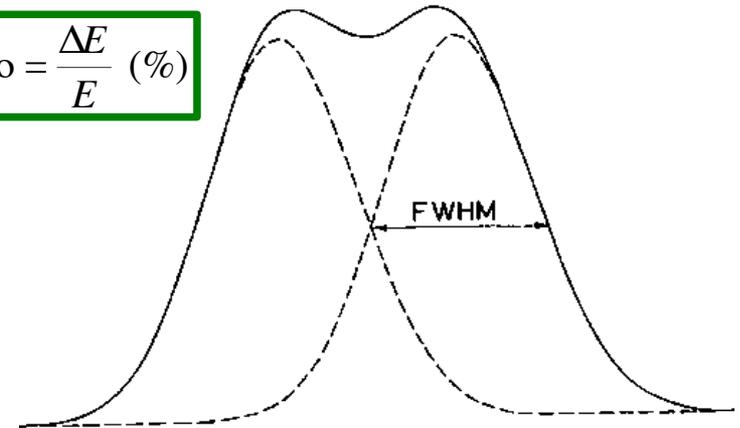
- **Resolução de energia**

- Parâmetro que mede a capacidade de distinguir duas energias próximas.

- A resolução é dada em termos de FWHM. Energias que estão mais próximas que esse intervalo são ditas não-resolvíveis.



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

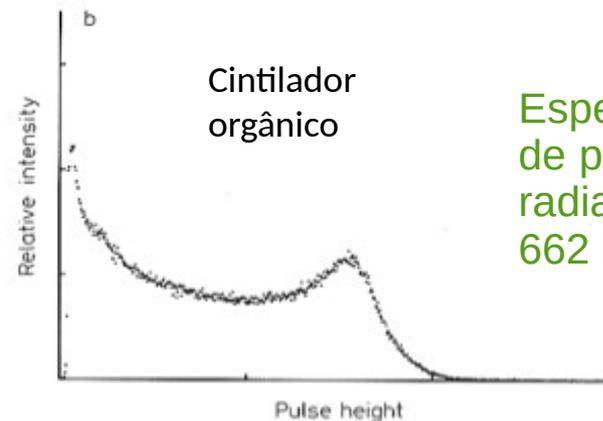
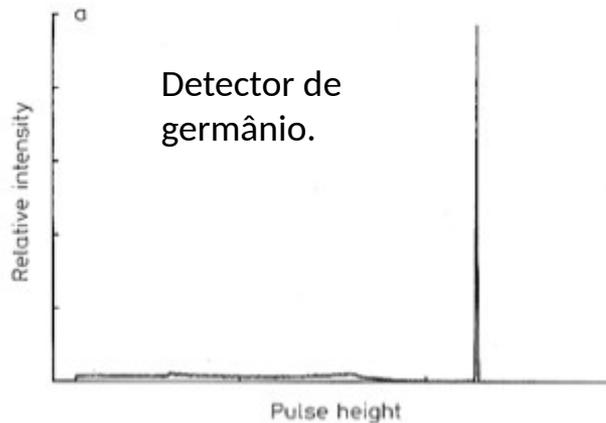


Características gerais dos detectores

- **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

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.

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:

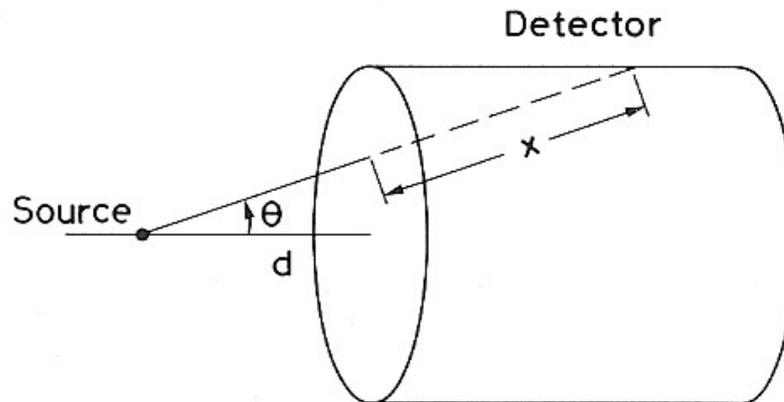
- **eficiência intrínseca**: fração dos eventos incidentes N_{inc} no detector que são de fato registrados. Depende da seção de choque da radiação incidente com o material do detector.

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

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.

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



Detectores

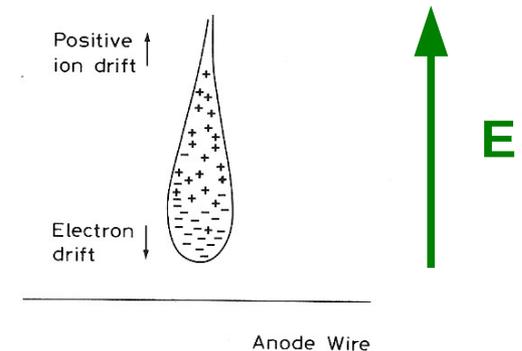
Detectores de ionização

- 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 chambers*).
- 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.

Detectores

Detectores de ionização

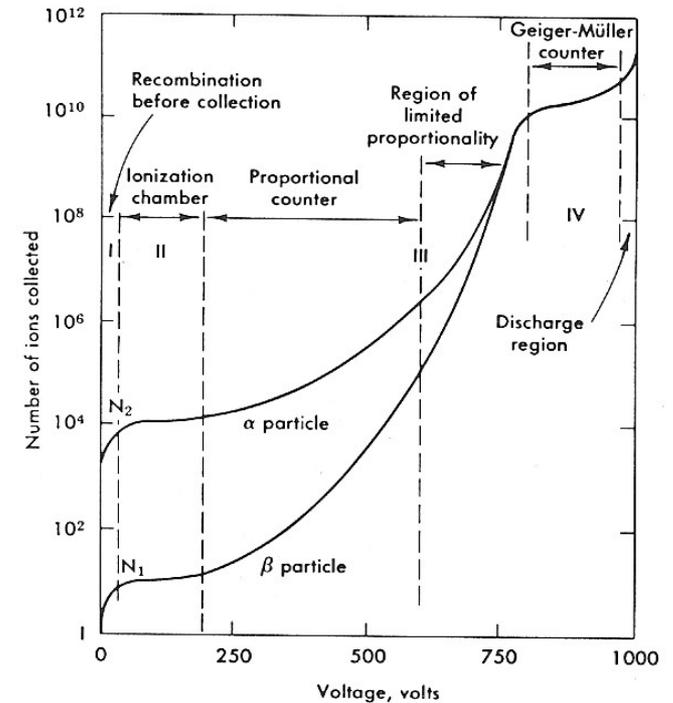
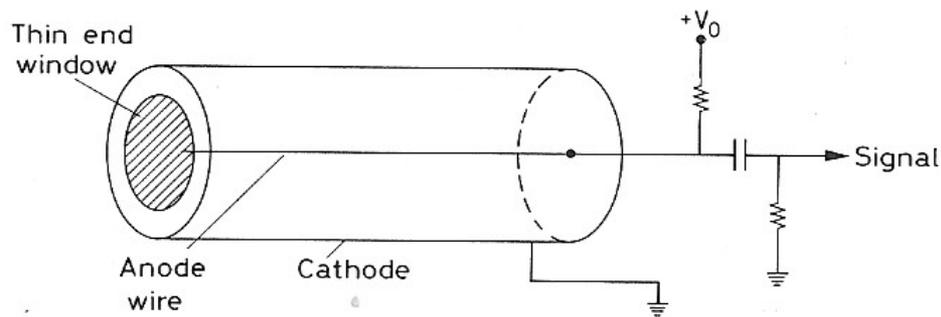
- Vários fenômenos de ionização ocorrem em gases. Ao longo dos anos, eles foram estudados e explorados para o uso em detectores de partículas.
- Um fenômeno fundamental é a multiplicação que ocorre quando os elétrons da ionização primária adquirem energia suficiente para a produção de novas ionizações,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



Detetores

Detetores de ionização

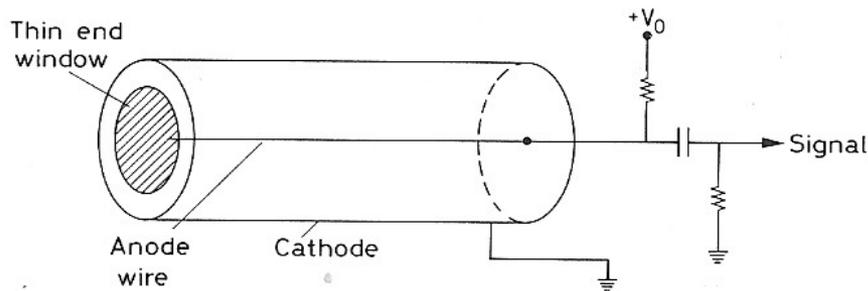
- Os tipos básicos de detetores a gás são essencialmente o mesmo dispositivo.
- A diferença reside nos limites de operação, que são ajustados para explorar os diferentes fenômenos.



Detecutores

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.

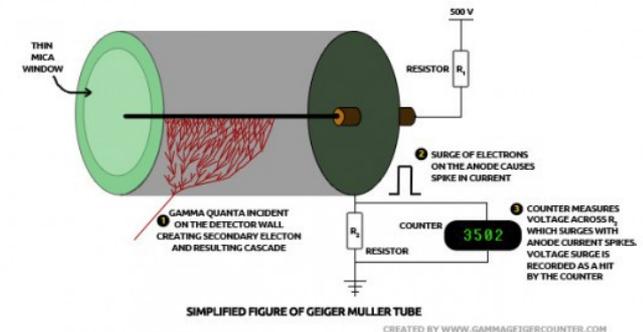
Detectores

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

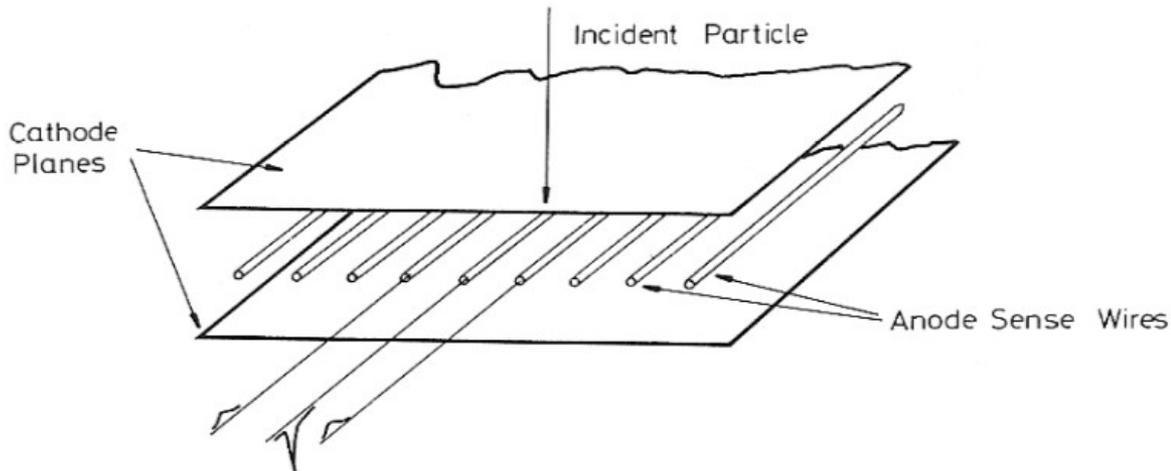


- É um dos detectores de maior uso comercial até hoje.

Detectores

Câmara proporcional multifilar

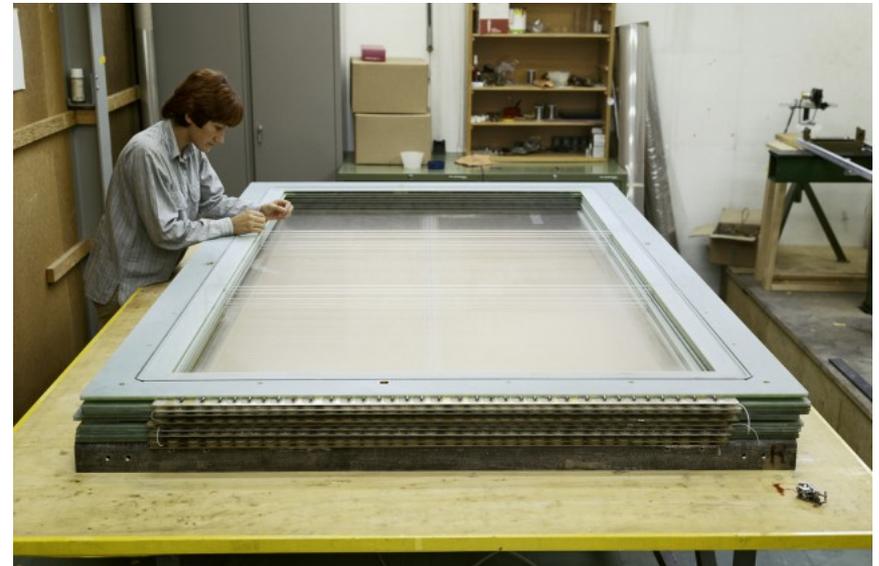
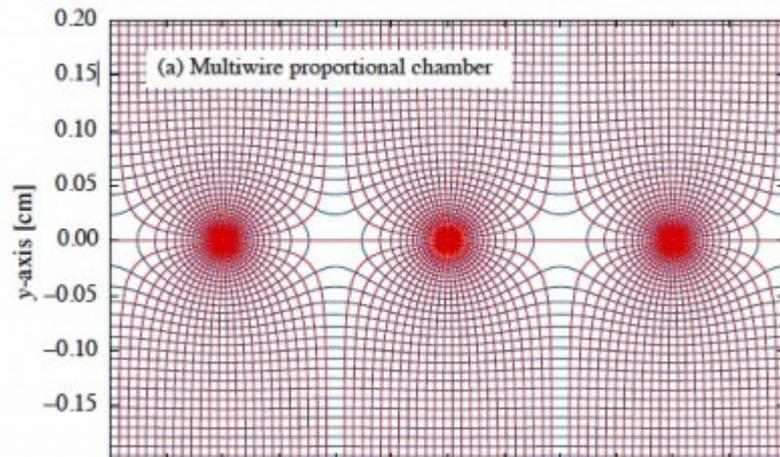
- Consiste de um plano de fios ânodos igualmente espaçados centrado entre dois planos cátodos.
- O espaçamento típico entre os fios é da ordem de 2 mm e a distância entre os planos ânodo e cátodo é de 7 ou 8 mm.



Detectores

Câmara proporcional multifilar

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



Detectores

Câmara de arrasto

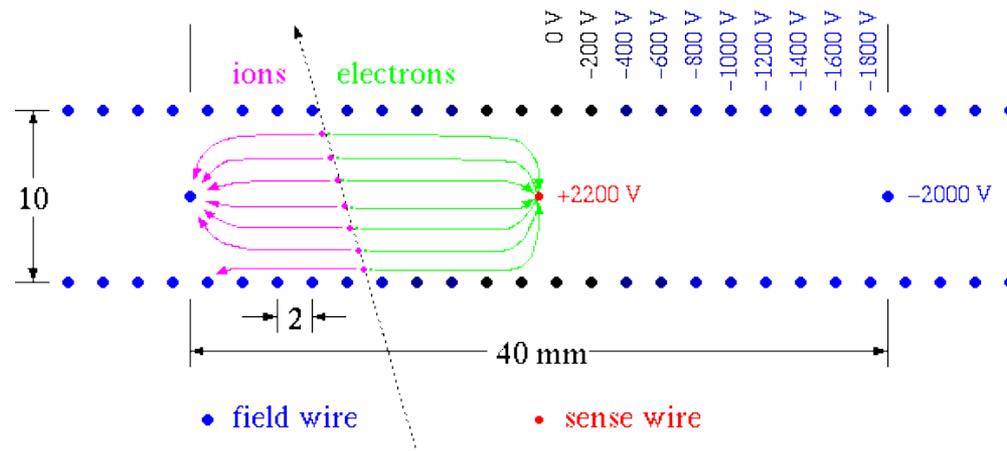
- Aperfeiçoamento da MWPC.
- Usa o tempo de chegada dos elétrons no fio, t_1 , para obter a informação espacial.
- Se o tempo de chegada da partícula, t_0 , e a velocidade de arrasto, u , são conhecidos, então a distância x entre o ponto de passagem da partícula e o ânodo é dada por:

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

Detectores

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.

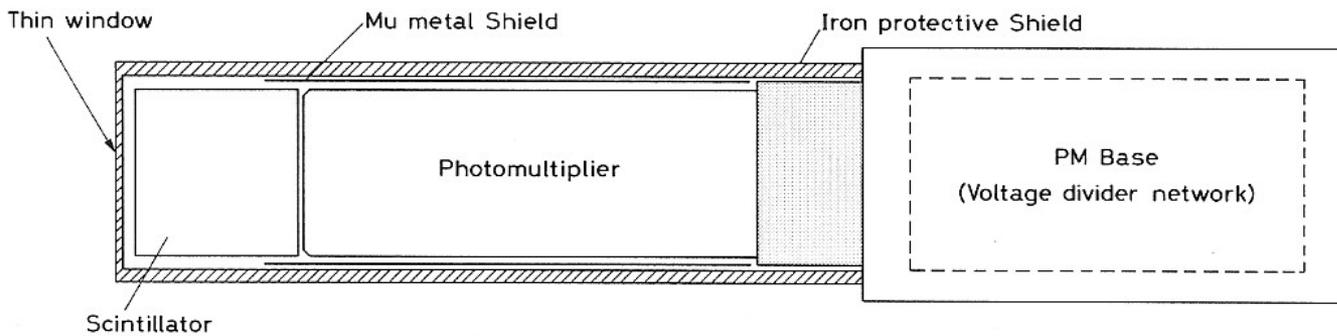
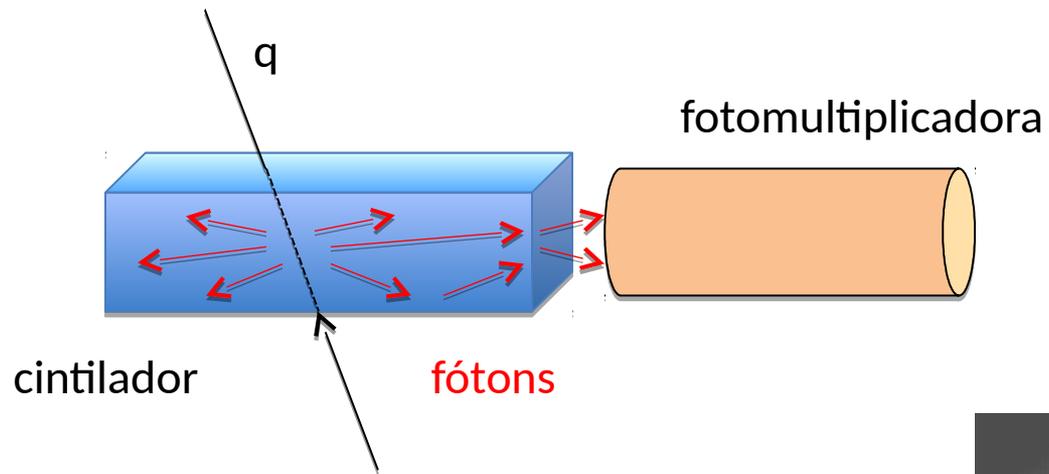


Detectores

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...).

Detetores de cintilação



Detectores de cintilação

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**

Detectores de cintilação

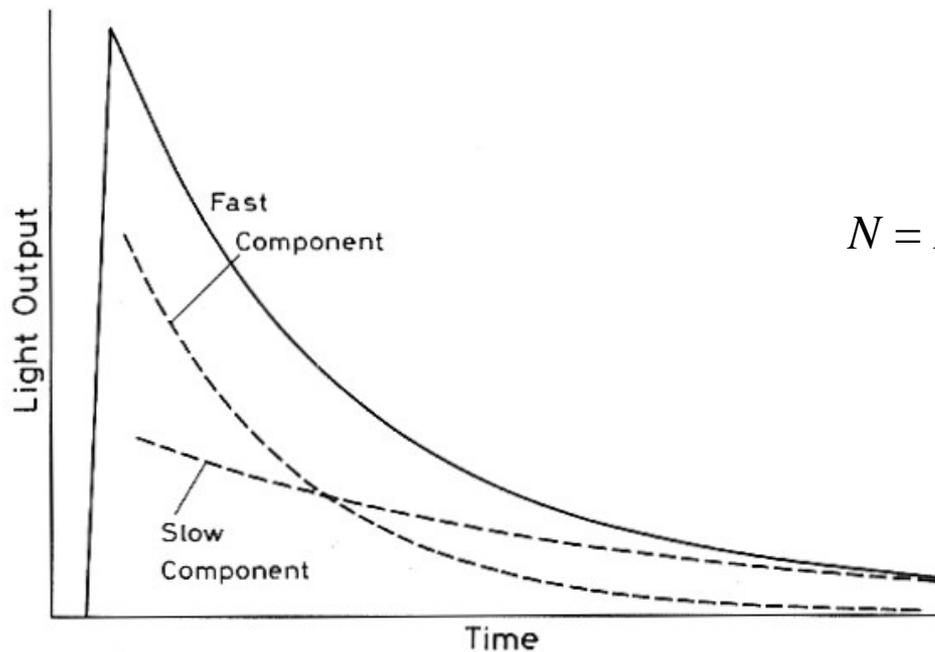
Cintilação

- 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**.

Detectores de cintilação

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).



$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

Detectores de cintilação

Características principais

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.

Detectores de cintilação

Características desejáveis do material

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

Detectores de Cintilação

Aplicações

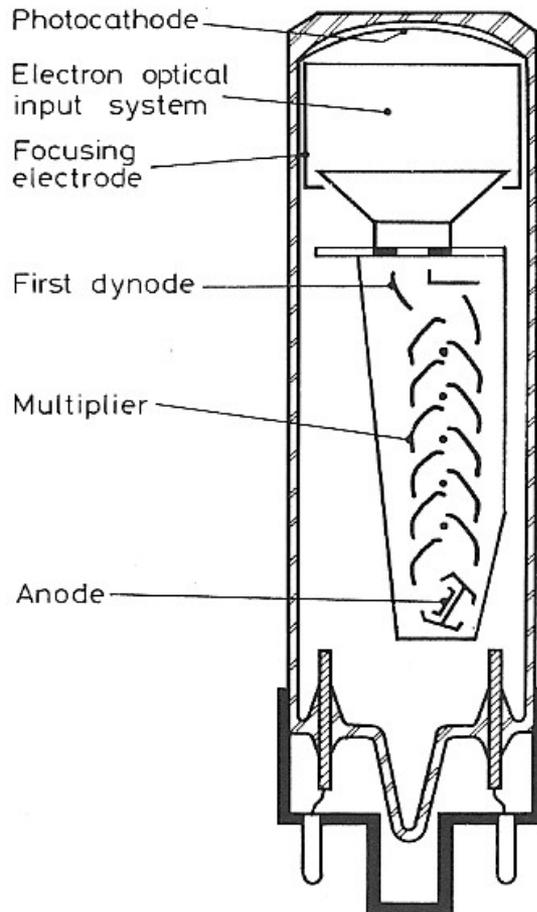
- Devido às suas características de rapidez, eficiência e baixo custo, os cintiladores são bastante utilizados em aplicações em física de altas energias.
- Sistemas de trigger e de calorimetria são alguns exemplos.



Detectores

Fotomultiplicadora

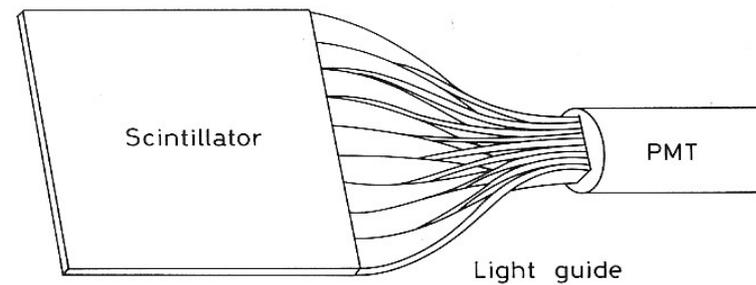
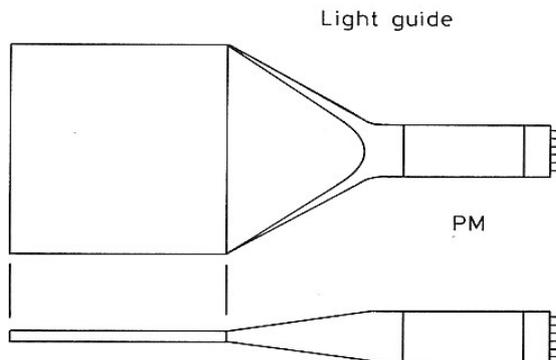
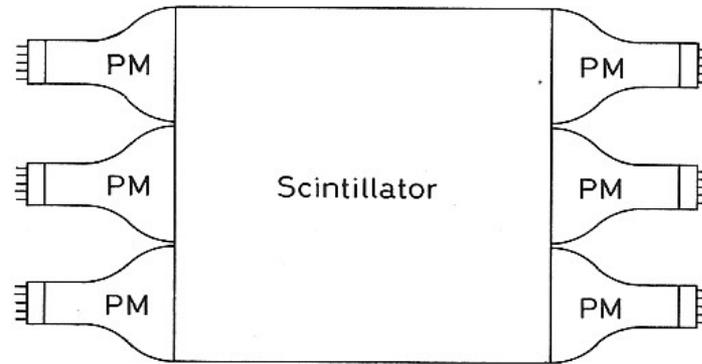
- Dispositivo usualmente utilizado juntamente com cintiladores.



- ✓ 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*.

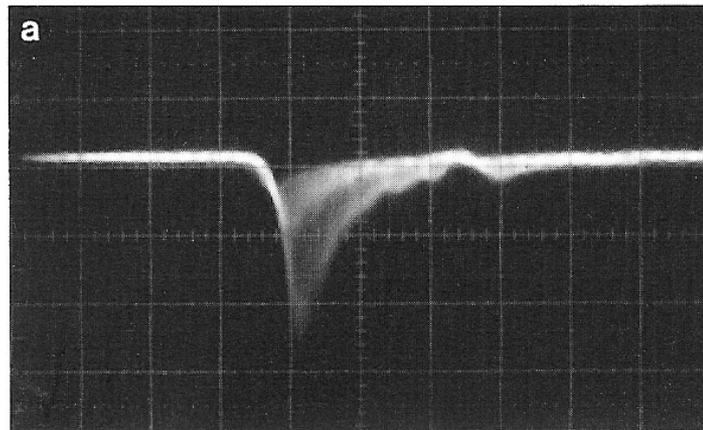
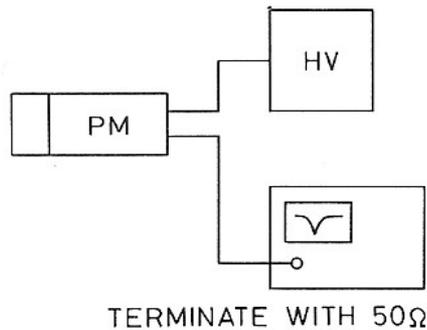
Detectores

Conjunto cintilador-fotomultiplicadora

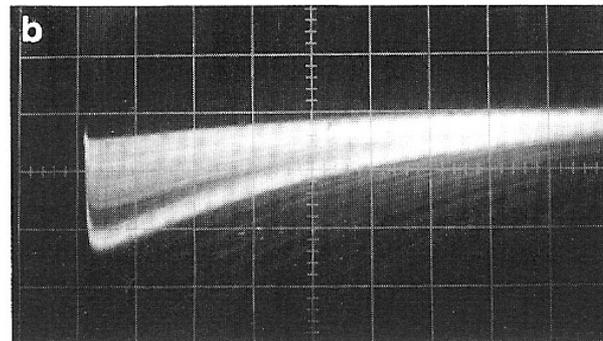


Detectors

Teste do detector cintilador



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



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

Detectores

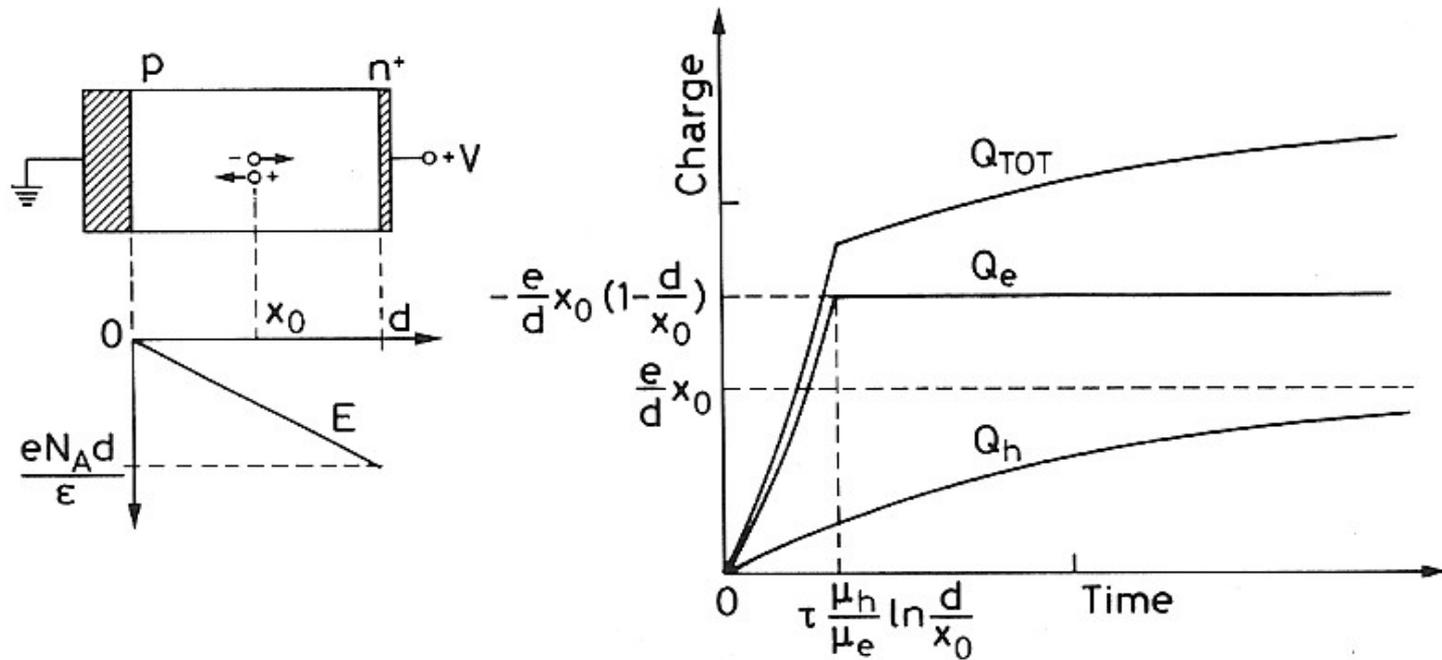
Semicondutores

- Princípio de funcionamento similar ao dos detectores a gás. Ao invés do gás, entretanto, o meio é um sólido semicondutor.
- A passagem de uma radiação cria pares elétron-buraco que são coletados por meio de um campo elétrico.
- Principal vantagem: a energia média necessária para criar um par elétron-buraco é **10 vezes menor** do que a requerida para ionizar um gás.
- Por essa razão, o número de ionizações produzidas a uma dada energia é uma ordem de grandeza superior, aumentando a resolução em energia.

Detectores

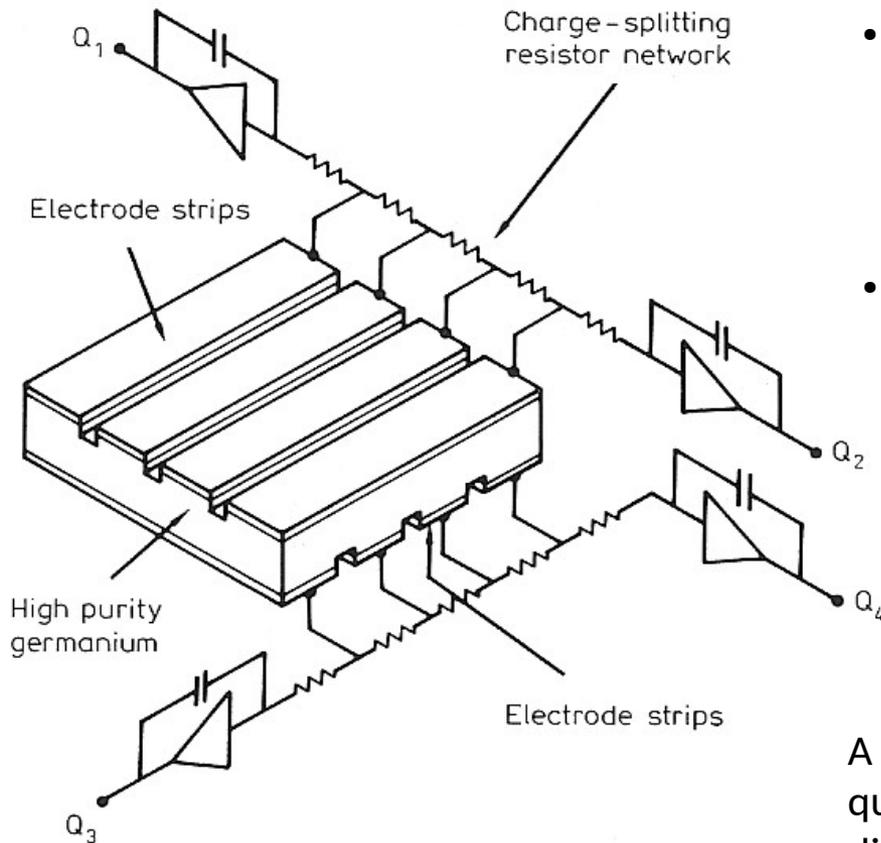
Semicondutores

Forma de Onda



Detetores Semicondutores

Detetores de posição

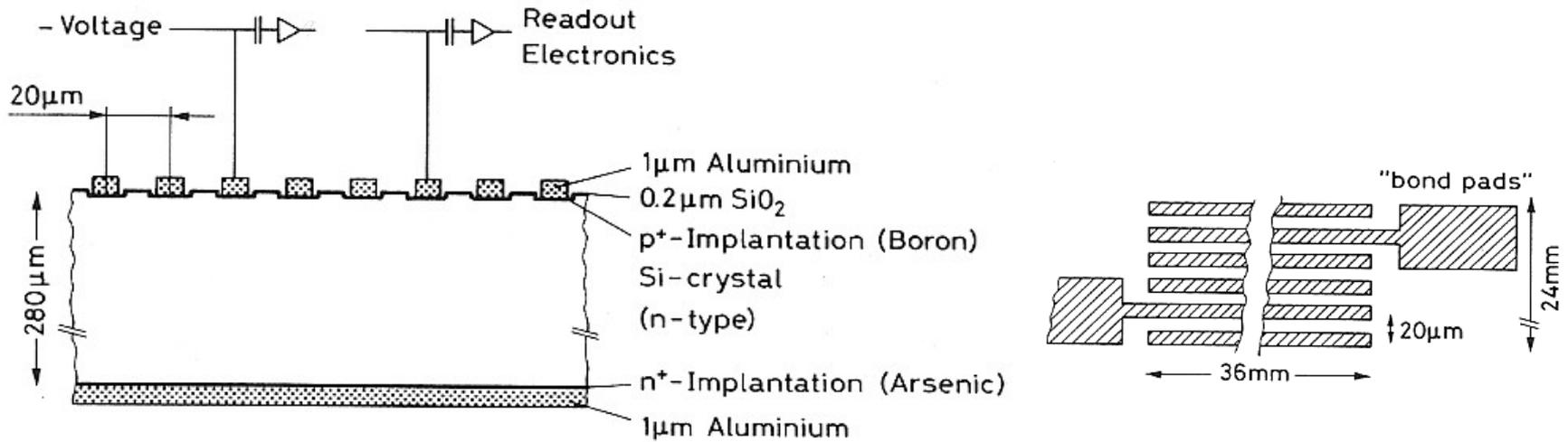


- Consiste de uma série de eletrodos (strips) colocados numa mesma base semicondutora. Cada strip age como um detector.
- A resolução espacial fica limitada ao tamanho das strips (0,2 - 0,4 mm).

A maior desvantagem fica por conta da quantidade de eletrônica necessária, o que gera dificuldades técnicas e gera alto custo.

Detetores Semicondutores

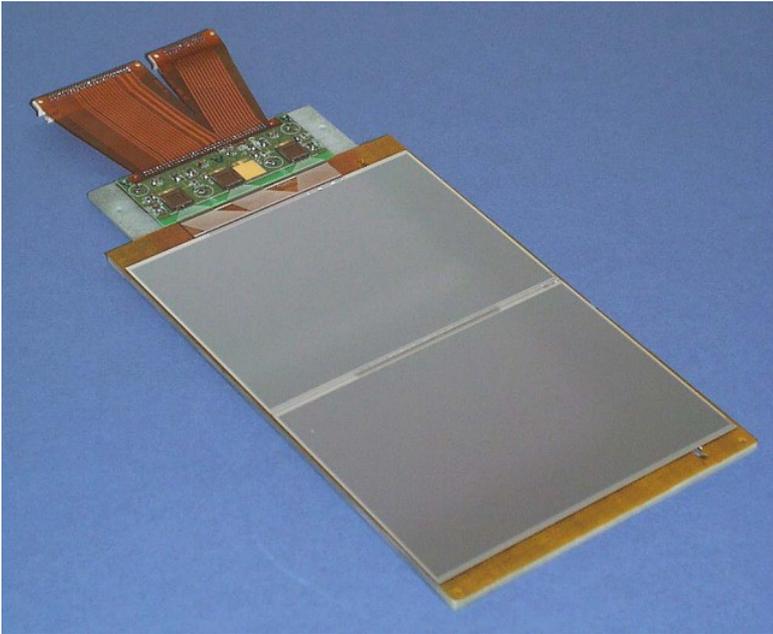
Detetores de micro-trilhas



Resolução típica de 5 μm , mas com possibilidade de atingir até 2 μm .

Detectores Semicondutores

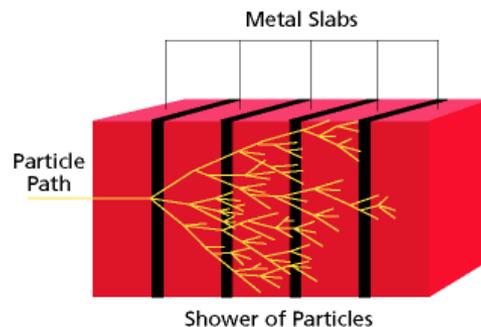
Implementações



Detectores

Calorímetros

- Dispositivos usados para medir a energia das partículas através de sua interação destrutiva com o meio.
- Usualmente, arranjos segmentados de um material denso (**meio passivo ou absorvedor**) e de um material que amostra a energia depositada (**meio ativo**).
- A interação da partícula incidente com o absorvedor dá origem a uma cascata de interações secundárias, denominada **chuveiro**.



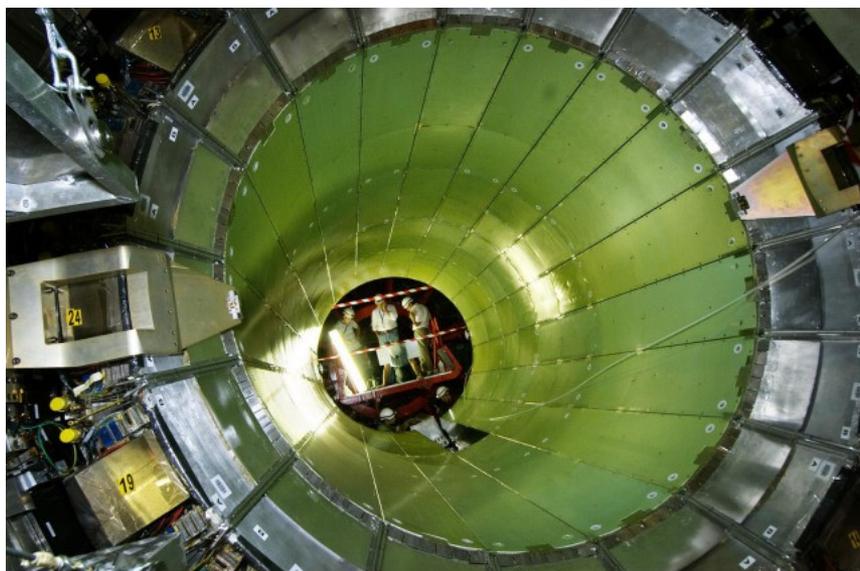
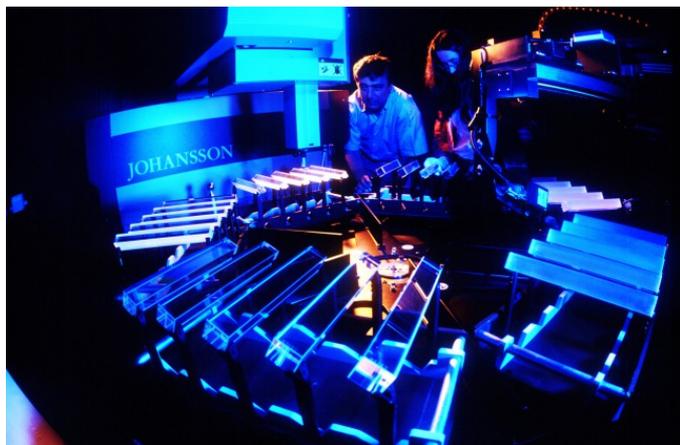
Detectores

Tipos de calorímetros

- Quanto à natureza da partícula:
 - **calorímetro eletromagnético**: otimizado para a medida da energia de chuviros desencadeados por elétrons/pósitrons ou fótons;
 - **calorímetro hadrônico**: otimizado para a medida da energia de chuviros iniciados por hádrons (píons, prótons, etc).
- Quanto à técnica de medida:
 - **calorímetro homogêneo**: todo o meio é sensível e contribui para a formação do sinal;
 - **calorímetro de amostragem**: utiliza um meio para induzir o desenvolvimento do chuviro e outro para produzir o sinal útil por amostragem.

Detectores

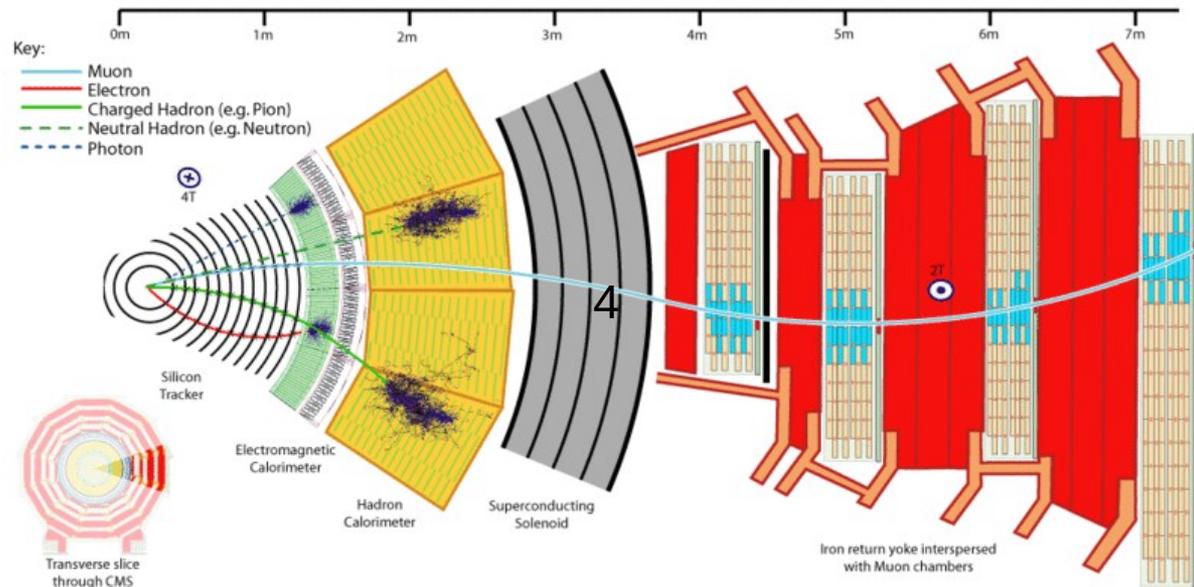
Implementações



Detectores

Espectrômetro

Identificação das partículas pelo uso combinado dos diferentes sistemas de detectores que compõem um grande experimento.



Detectores

Sistemas associados

Além dos detectores aqui descritos, há ainda os seguintes elementos associados aos detectores que não serão descritos por falta de tempo mas que são fundamentais para um experimento:

- Eletrônica associada
- Sistema de trigger
- Sistema de aquisição de dados

Bibliografia

[1] W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag (1994)

[2] K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation, Cambridge University Press, second edition (1998)

[3] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley, New York (1979)