Detectores de Partículas - Fundamentos

G. Alves
COHEP/CBPF
gilvan@cern.ch

Sumário

I - Conceitos Básicos

II - Partículas & Detectores

III - Métodos Experimentais

ESTRUTURA ELEMENTAR DA MATÉRIA

PARTÍCULAS MEDIADORAS

Interação Eletromagnética

FÓTON

Interação Fraca

W^+ Z^0 W^-

Interação Forte

GLÚON

Interação Gravitacional

GRÁVITON

QUARKS

u (up)	c (charm)	t (top)
d (down)	s (strange)	b (bottom)

LÉPTONS

ν_e (neutrino e)	ν_μ (neutrino μ)	ν_τ (neutrino τ)
e (elétron)	μ (múon)	τ (tau)

Léptons

Léptons são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética e fraca. Há três famílias de léptons, cada uma composta por um lépton carregado, que interage eletromagnética e fracamente, e por um neutrino, que interage apenas fracamente.

Os **elétrons** (e) são estáveis e compõem a eletrosfera que envolve o núcleo dos átomos, sendo os responsáveis pelas ligações químicas entre os elementos. Em movimento, produzem a corrente elétrica e geram campos magnéticos. Os léptons **múon** (μ) e **tau** (τ) possuem características similares às do elétron, mas são muito mais pesados e instáveis, decaindo rapidamente em partículas mais leves.

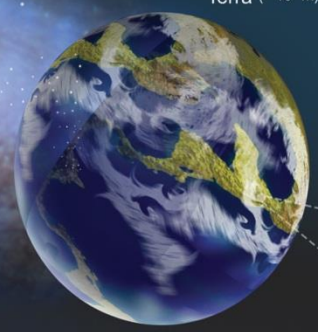
Os **neutrinos** (ν) são extremamente leves, não possuem carga elétrica e interagem muito fracamente, a ponto de serem capazes de atravessar toda a Terra sem se chocar com nenhuma partícula. São produzidos em decaimentos nucleares e na fusão nuclear que ocorre no Sol, a qual é responsável pelo seu brilho.

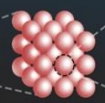
Quarks

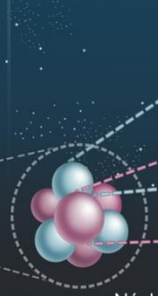
Quarks são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética, fraca e forte, e possuem carga elétrica fracionária (+2/3 e -1/3), além das "cargas de cor" relativas à interação forte. Eles formam os hádrons (três quarks ou um quark e um antiquark) e permanecem confinados dentro deles, não sendo observados em estado livre.

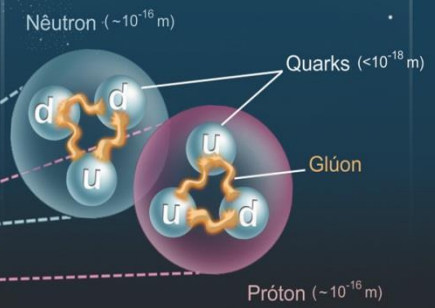
Os quarks da primeira família, **up (u)** e **down (d)**, formam os prótons (uud) e nêutrons (udd) e, portanto, toda a matéria usual, além de diversos mésons, como o pion π^+ ($u\bar{d}$) e o káon K^0 ($d\bar{s}$).

As outras duas famílias de quarks, compostas pelo **strange (s)** e **charm (c)**, e pelo **bottom (b)** e **top (t)**, não formam a matéria usual, sendo apenas produzidas como resultado de colisões entre outras partículas.









Interação Eletromagnética (γ)

O fóton (γ) é o quantum do campo eletromagnético. Toda radiação **eletromagnética**, desde as ondas de rádio e televisão, passando pela luz visível, até os raios ultravioleta e gama, é formada por fótons. Partículas sem massa ou carga, os fótons são responsáveis pela transmissão da interação entre as partículas eletricamente carregadas.

Interação Gravitacional (G)

A interação gravitacional atua sobre todas as partículas e seria intermediada pelo gráviton. No entanto, no mundo subatômico, ela não tem nenhuma influência, já que ela é uma centena de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão (10^{-38}) de vezes mais fraca que as outras três interações.

Interação Fraca (W e Z)

A **interação fraca** é intermediada pelos bósons carregados **W^+** e **W^-** e pelo bóson neutro **Z^0**. A interação fraca é de curtíssimo alcance, agindo em distâncias 1.000 vezes menores que o núcleo atômico, sendo 10.000 mais fraca que a interação eletromagnética. A interação fraca afeta tanto léptons como quarks e é responsável pelo decaimento beta, quando um nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e seu antineutrino. Ela também desempenha importante papel na geração da energia das estrelas como o Sol.

Interação Forte (g)

O glúon **(g)** desempenha para a **interação forte** papel semelhante ao dos fótons para a interação eletromagnética. Eles são trocados entre partículas que possuem "cargas de cor", como os quarks. As três "cores" são as "cargas fortes" equivalentes às cargas elétricas positiva e negativa. A interação forte é 100 vezes mais intensa que a interação eletromagnética e seu alcance não vai além do núcleo atômico. Ela é responsável por manter os quarks ligados, formando prótons e nêutrons, e seu efeito residual de longa distância mantém prótons e nêutrons unidos, formando o núcleo atômico.

Antipartículas

Toda partícula possui sua antipartícula, com mesma massa e spin, mas com carga oposta. Para diferenciar as antipartículas das partículas, as correspondentes antipartículas são denotadas com uma barra sobre seu símbolo ou então pela troca de carga (+ ↔ −). A matéria formada por antipartículas é chamada de antimatéria.

Para obter mais informações sobre os conceitos apresentados neste cartaz, acesse o site:

http://www.sprace.org.br/eem/

Se você quiser fazer perguntas sobre o tema para especialistas na área ou discutir com seus colegas, acesse o Fórum de Discussão no site:

http://www.sprace.org.br/forum/

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

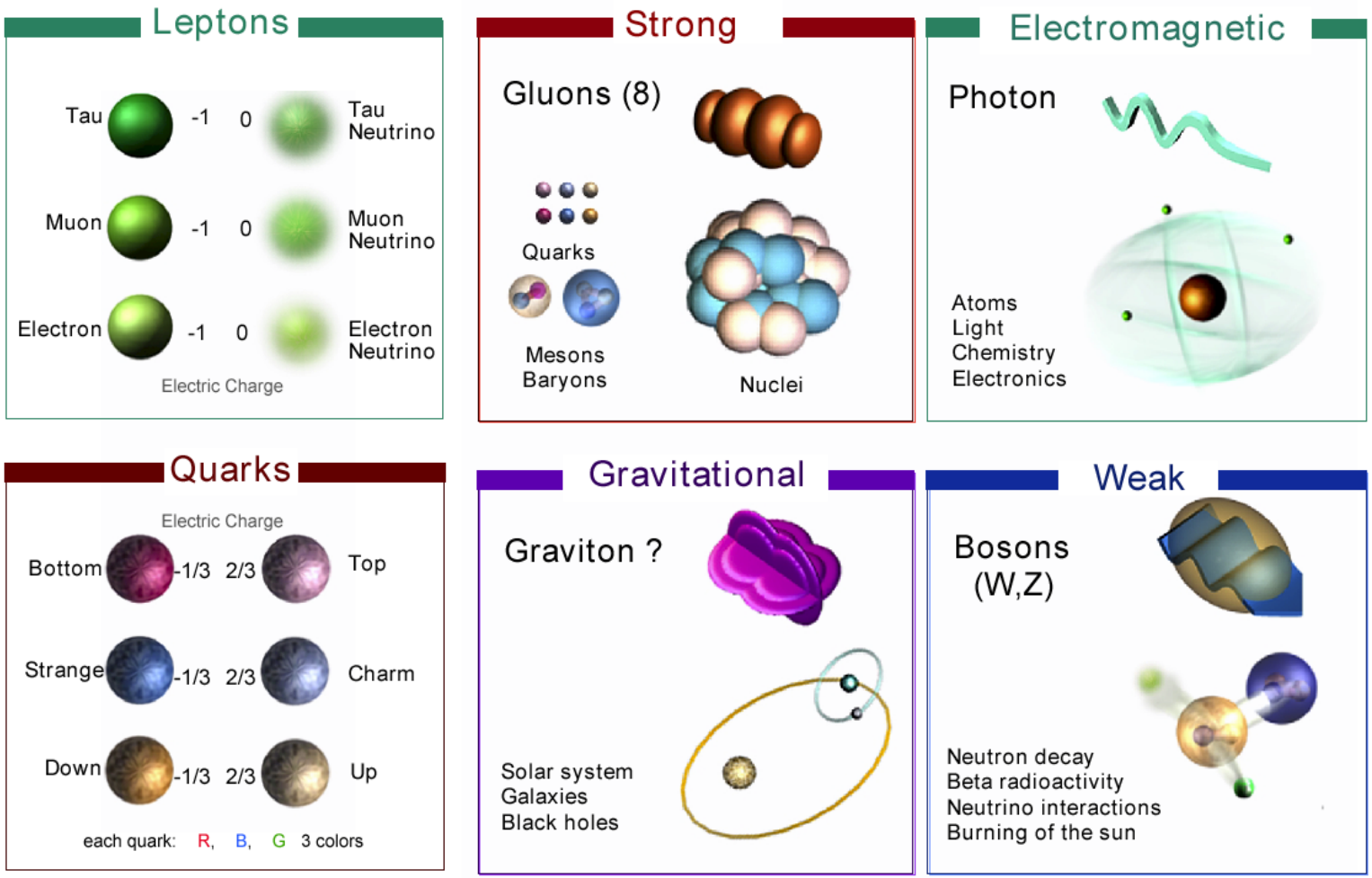
SPRACE

UFABC Universidade Federal do ABC

Modelo Padrão

Lafex/CBPF

- 6 quarks e léptons (+ antipartículas)
- 4 interações (mediadores - γ, g, W/Z, graviton?)
- Todas partículas fundamentais (sem estrutura)



Sistema de Unidades

SI padrão não é adequado para os sistemas microscópicos

M=kg, L=m, t=s => E=J

- **Sistema Natural $\hbar=c=1$**

Grandezas fundamentais E=eV, v=c, mom. ang.= $\hbar$

$1eV = 1.6 \times 10^{-19}$ J

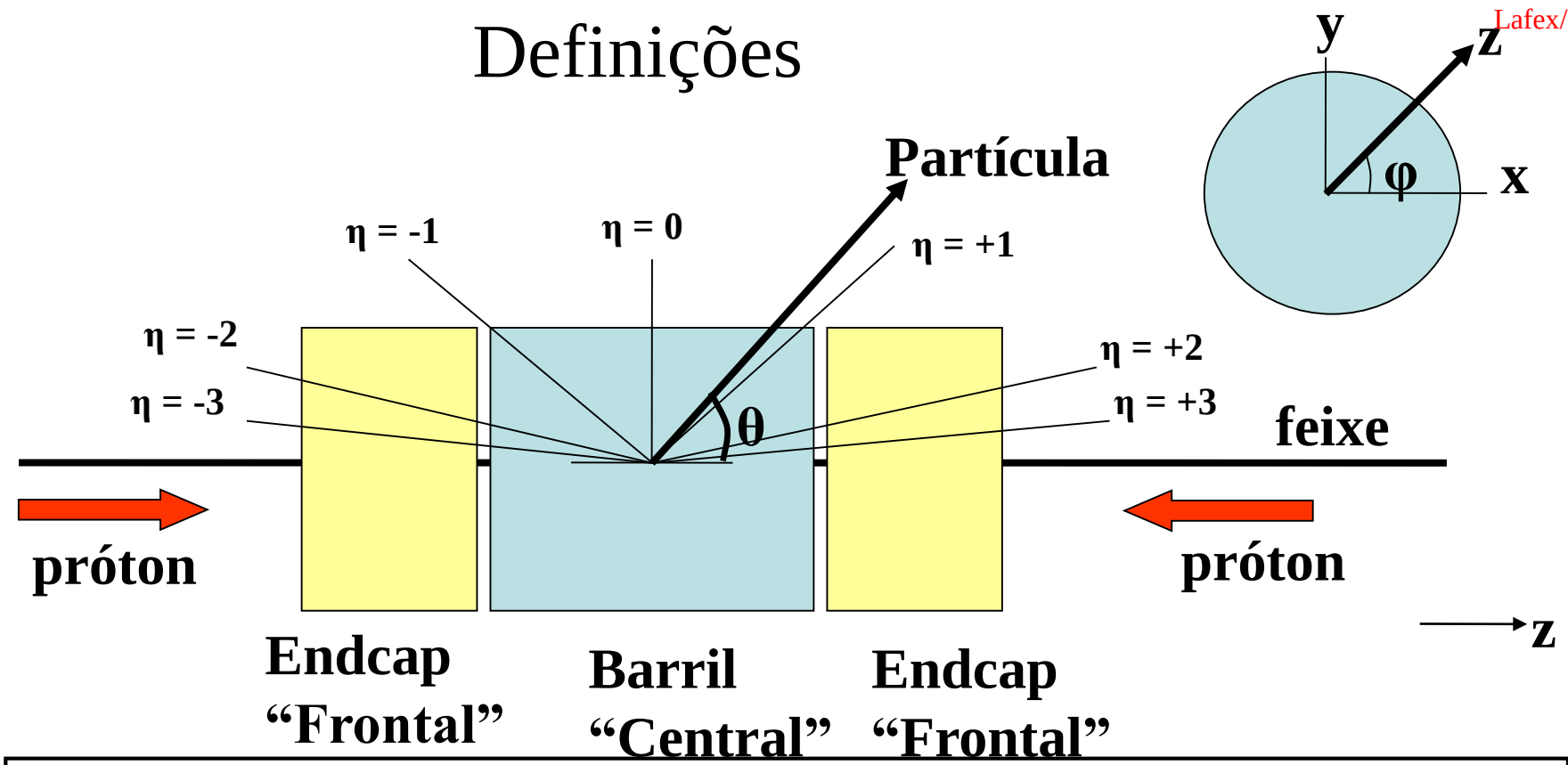
$M_p = 1.6726219 \times 10^{-27}$ kg = 0.938 GeV

M_{top} = 175 GeV

Raios Cósmicos ≈ 10^{20} eV (Lab)

Aceleradores ≈ 10^{12} eV (CM)

Definições



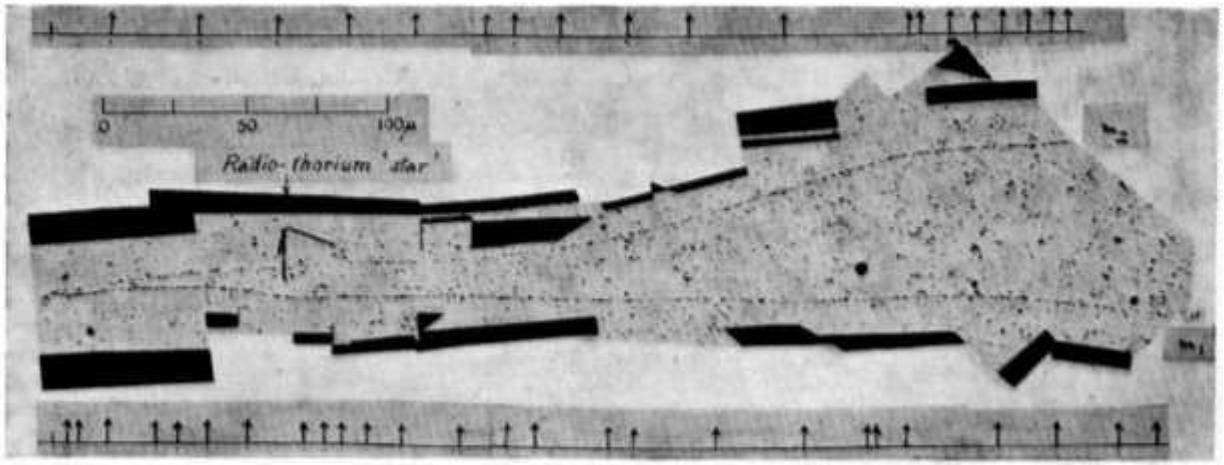
Rapidez: $y = \frac{1}{2}\log\frac{E+p_z}{E-p_z}$ **Diferenças em rapididez são conservadas numa transf. de Lorentz na direção z** *

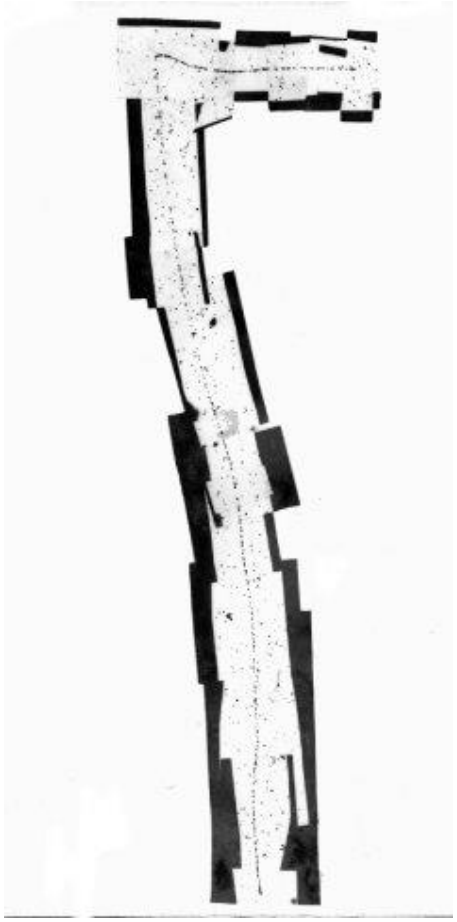
Pseudorapidez: $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ **Boa aproximação da rapididez se E>>m** *

"Momentum Transverso" $p_T = (p_x, p_y)$ $|p_T| = \sqrt{(p_x^2, p_y^2)}$

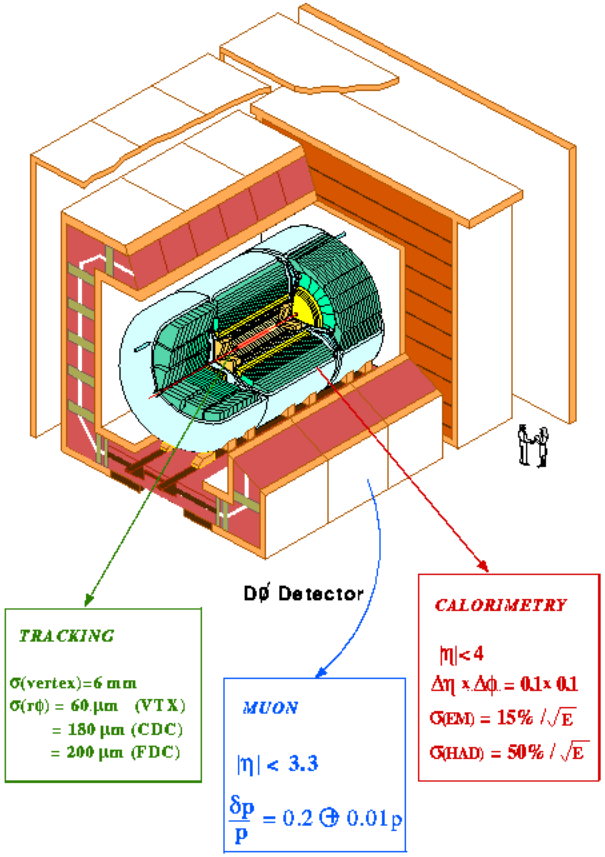
Detector

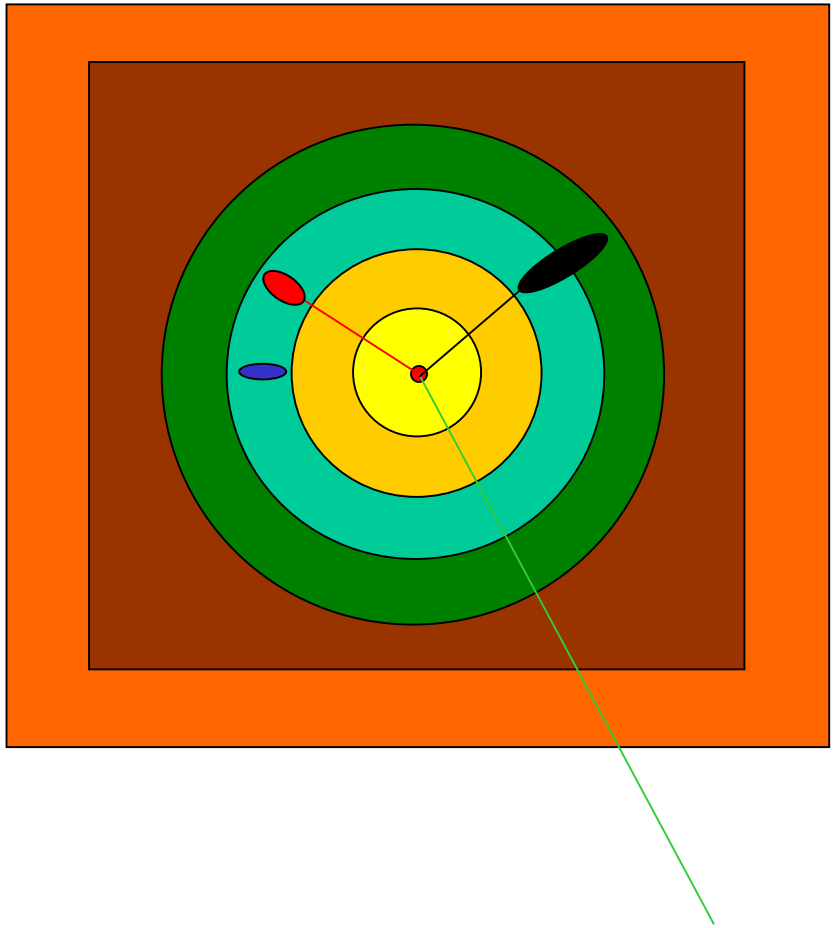
- Dispositivo que muda de estado assinalando a presença de um corpo/substância
- Ex. Emulsão fotográfica $\pi \rightarrow \mu$





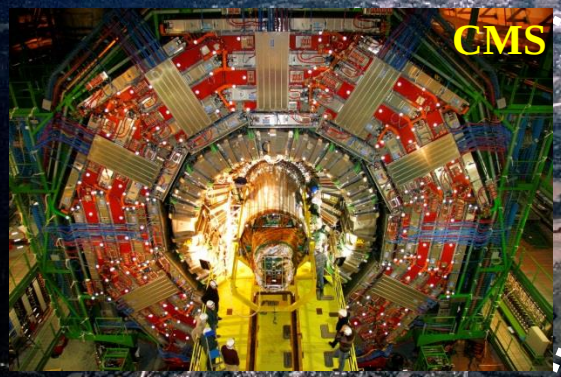
Detector Típico em Colisores

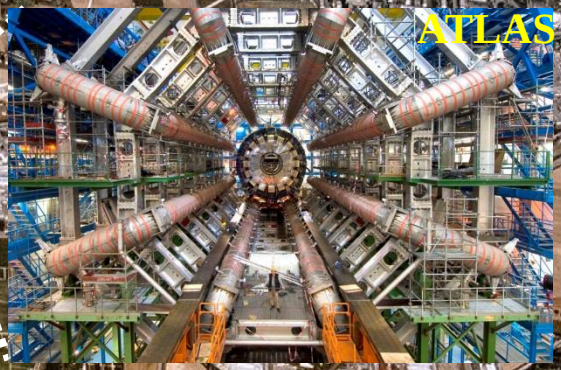




Os Experimentos do LHC

Os experimentos do LHC formam um conjunto de projetos científicos globais, um dos maiores empreendimentos da física atual.





Detecção das Partículas

⇔ **Detecção == Interação**
A observação de uma partícula se dá através de sua interação com a matéria

⇔ **Partículas Carregadas**
Principal forma de detecção - Interação EM
Medidas - Posição
- Momentum
- Identificação

⇔ **Partículas Neutras - detecção destrutiva**
Interação EM - ex. $\gamma \rightarrow e^+e^-$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\,\gamma$
Interação Forte - ex. $np \rightarrow pp\pi^-$
Interação Fraca - ex. $\upsilon p \rightarrow ne^+$

⇔ **Para observar o que ocorre em uma colisão em Altas Energias necessitamos de diferentes métodos de detecção.**

⇔ **Precisamos medir a posição, momentum, energia e identificar os produtos de uma colisão.**

Medida de Posição

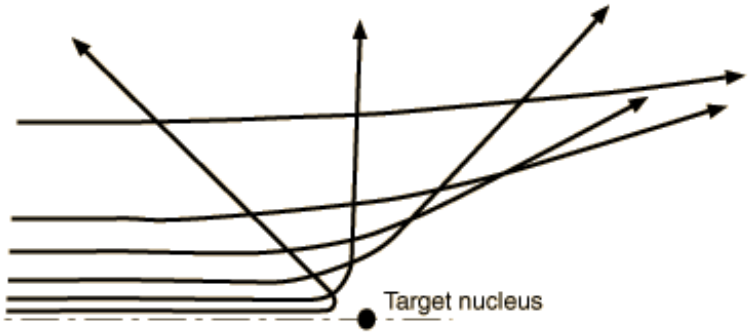
• Devido ao caráter destrutivo na detecção das partículas neutras, a medida de sua posição fica comprometida em termos de precisão.
• Vamos nos concentrar na medida de posição de partículas carregadas.

• **Processos Físicos envolvidos:**
Partículas carregadas relativísticas interagem com a camada eletrônica e núcleos do material através de 3 processos básicos:
• Ionização - Dominante exceto para elétrons e fótons
• Espalhamento Coulombiano Múltiplo
• Irradiação (bremsstrahlung)

Espalhamento Coulombiano Múltiplo -

$$d\sigma/d\Omega = \frac{q^2 Q^2 F_n(\theta)}{4p^2\beta^2 \sin^4(\theta/2)}$$

Não provoca perda de energia apreciável
Efeito apreciável na trajetória da partícula
Perda de resolução em detectores



Processos Físicos I

- **Irradiação - Ocorre quando há aceleração de uma partícula carregada (bremsstrahlung) $\Delta E \approx E^4/m^4$ somente apreciável para elétrons.**

$$-(dE/dx)_{brems} \doteq E/X_0 \qquad 1/X_0 = \frac{4\alpha N_A Z(Z+1)\, r_e^2 \log(183\, Z^{-1/3})}{A}$$

- **X_0 - Comprimento de radiação - Probabilidade de irradiação**
  - **α - constante de estrutura fina ≈ 1/137**
  - **N_A - Número de Avogadro**
  - **Z - Número atômico do material**
  - **A - Peso atômico do material**
  - **r_e - raio clássico do elétron = $e^2/4\pi\varepsilon_o mc^2$**

Material	Z	Density (g/cm^3)	Critical Energy (Mev)	X_0 (cm)
Liquid H_2	1	0.071	340	887
Liquid He	2	0.125	220	745
C	6	1.5	103	28
Al	13	2.7	47	9.0
Fe	26	7.87	24	1.77
Pb	82	11.35	6.9	0.56
Air		0.0012	83	30870
Water		1.0	93	36.4

Processos Físicos II

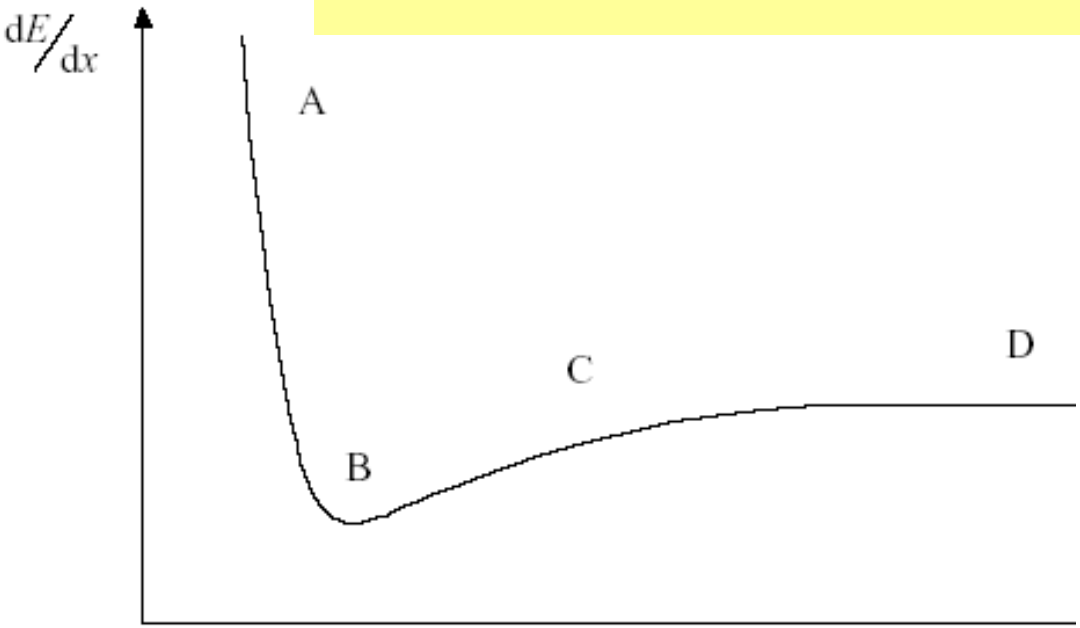
- **Ionização -interação com a camada eletrônica.**
  Processo dominante para todas as partículas carregadas(exceto elétrons)

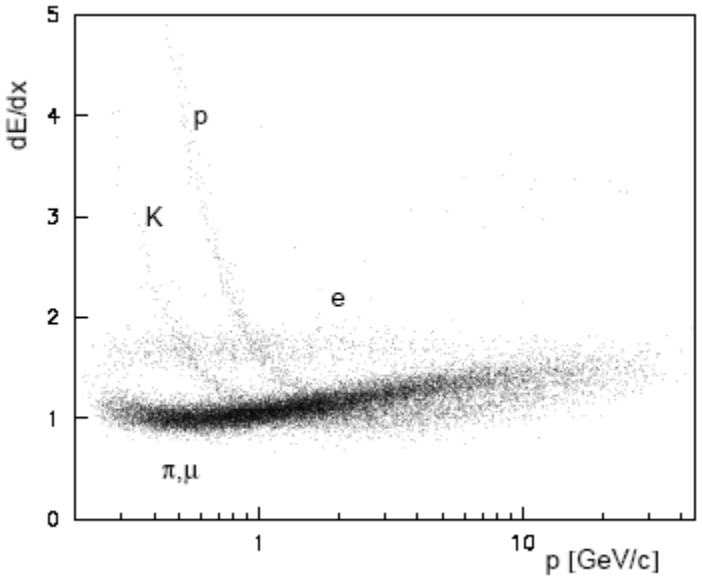
$$\overline{\Delta E} = C\frac{m_e c^2}{\beta^2}\frac{Z z^2}{A}\rho\,\Delta x\left[\ln\left(\frac{2\gamma^2\beta^2 m_e c}{I_0}\right) - \beta^2 - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2}\right]$$

- **$C = -4\pi N_A r_e^2$**
- **Z, A - Número Atômico e Peso Atômico do material**
- **z - carga da partícula (múltiplo de e^-)**
- **ρ - densidade do meio**
- **I_0 - potencial de ionização do meio**
- **ε - correção de blindagem das camadas eletrônicas**
- **δ - correção de densidade, polarização do meio**

- **Para um dado material, depende quase exclusivamente na velocidade da partícula**

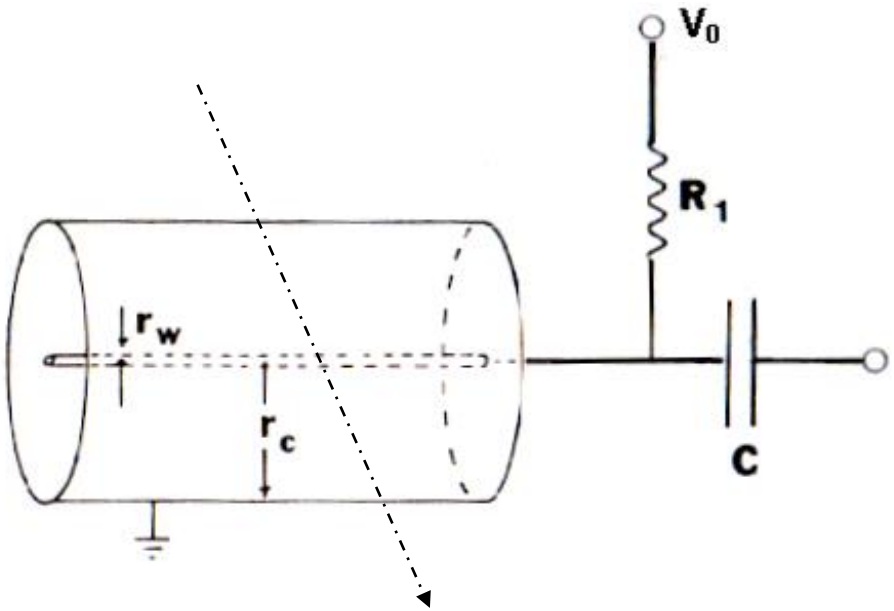
$$\overline{\Delta E} = C\frac{m_e c^2}{\beta^2}\frac{Z z^2}{A}\rho\,\Delta x\left[\ln\left(\frac{2\gamma^2\beta^2 m_e c}{I_0}\right) - \beta^2 - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2}\right]$$





- **A - $1/v^2$ não relativística**
- **B - mínimo $\gamma \approx 3$**
- **C - aumento relativístico logarítmico**
- **D - plateau devido a correção de densidade**

Câmaras Proporcionais

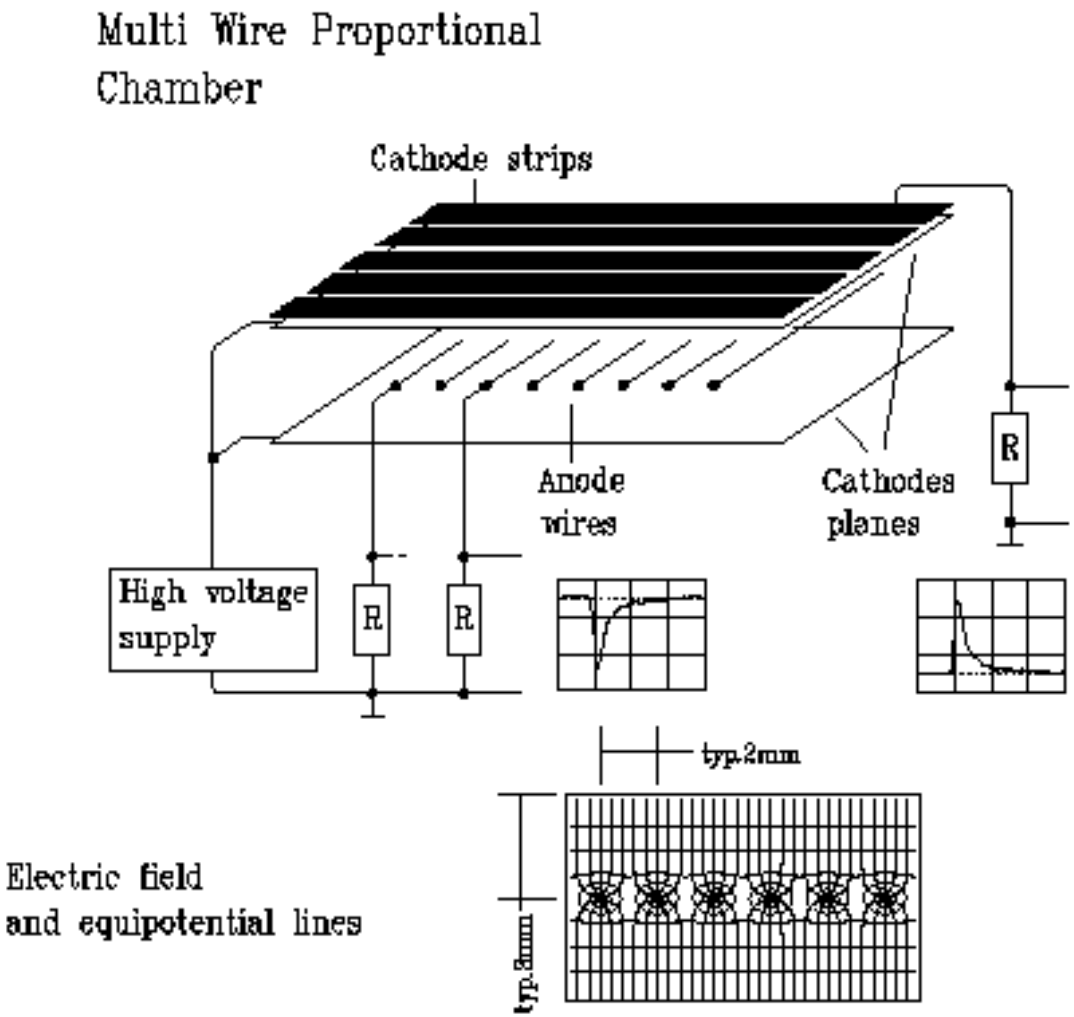


⇔ **A diferença de potencial entre o fio ($+V_0$) e a câmara leva a separação das cargas criadas pela ionização, e sua migração aos eletrodos, induzindo um sinal**

$$\Delta V = [Mze/CV_0]\ dV/dr\ .\ dr$$

⇔ **M - fator de amplificação do gas ≈ ke^{CV_0} 10^4 - 10^6 no regime proporcional**

Câmaras Proporcionais a Multifios

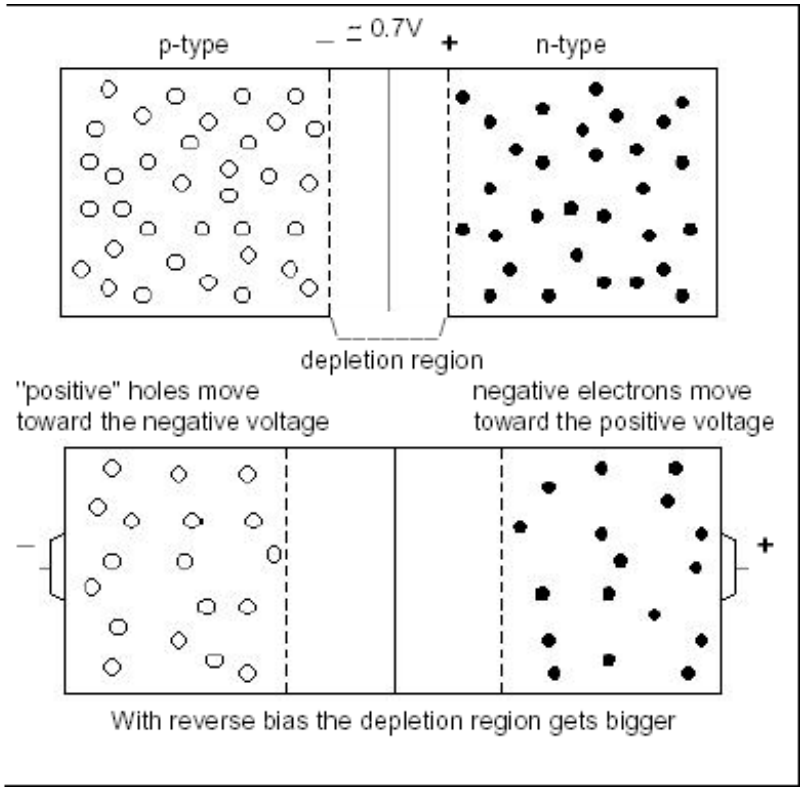


- catodo dividido em tiras fornece 2 coordenadas
- resoluções ≈ 100μm em ambas cordenadas
- sinais induzidos em cada fio ≈ 100mV (10 μA) - V_0 ≈ 4kV

- Outros detectores de posição operam sob o mesmo princípio mas usando potenciais mais elevados: câmaras de centelha(spark chambers), streamer chambers, etc.

- Detectores Semicondutores

Princípio de operação = câmara de ionização
Energia de ionização = 1.1eV Si, 0.7eV Ge (30eV para gases)
Maior densidade => maior probabilidade de interação
≈ 25000 pares e^--buraco criados em 300μm de Si
≈ 4fC tempo de coleta ≈ 10ns => requer uso de pre-amplificadores
Na prática consistem em junções p-n polarizadas reversamente.



- A região de depleção, onde se dá a criação de pares, deve ser máxima.

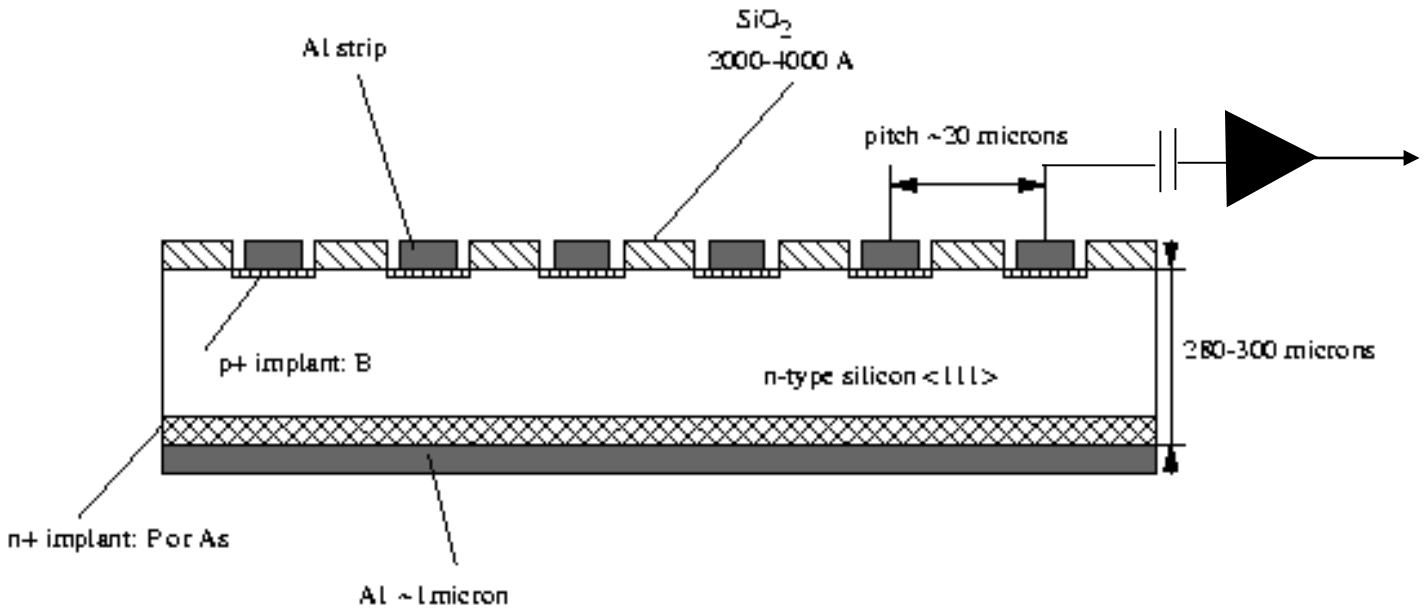
- $X_D = [2\varepsilon\mu_e\rho(V_0+V_B)]^{1/2}$

ε - permissividade do material
μ_e - mobilidade dos elétrons
ρ - densidade do dopante

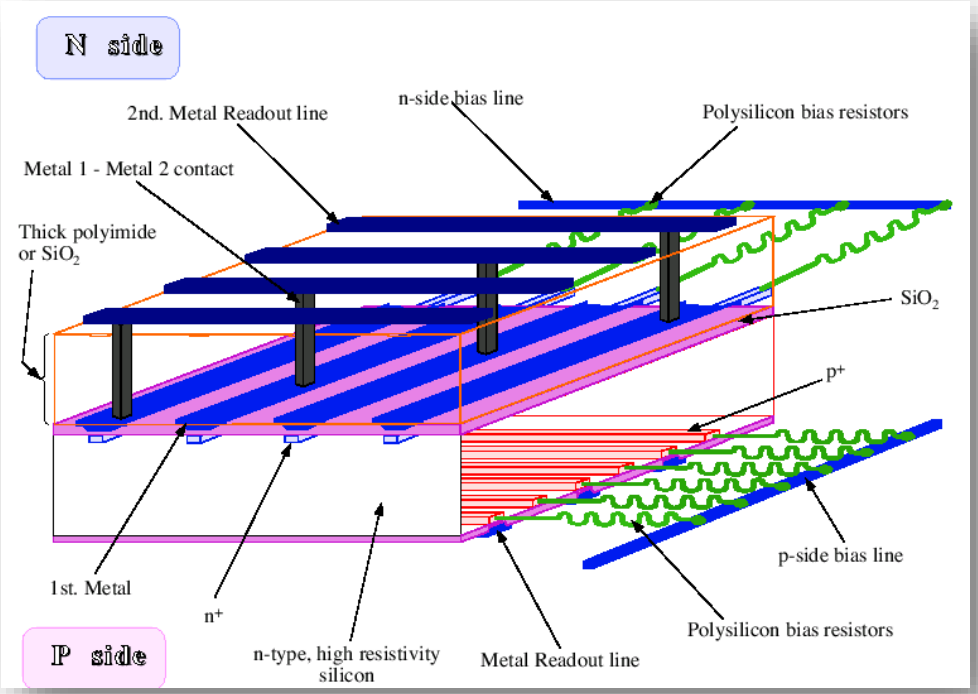
$V_B \sim 100V$

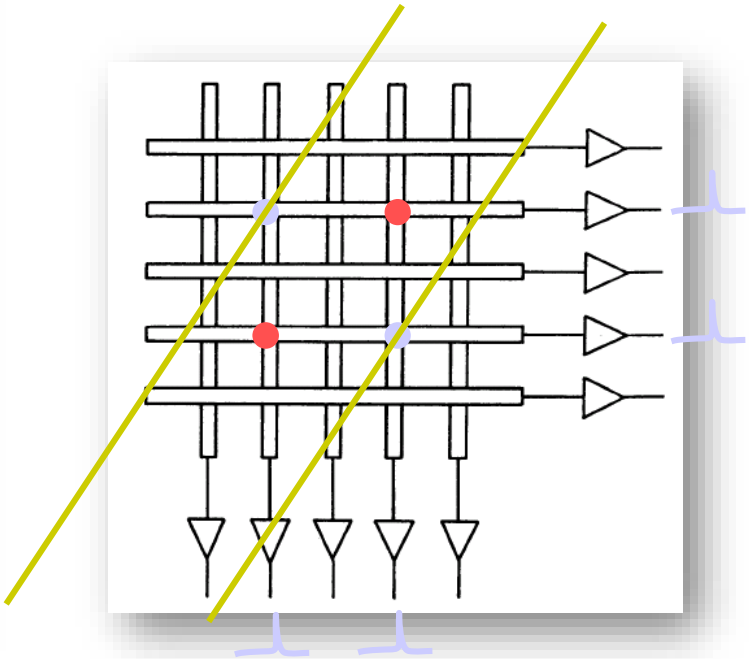
- **Detector de Microtiras de Silício - mesmas características resolução espacial de 5-10μm perpendicular a trilha.**

- **Amplificação para cada canal ou usando divisão de cargas**



Double-sided silicon microstrips





2× 1D information generates ambiguities:

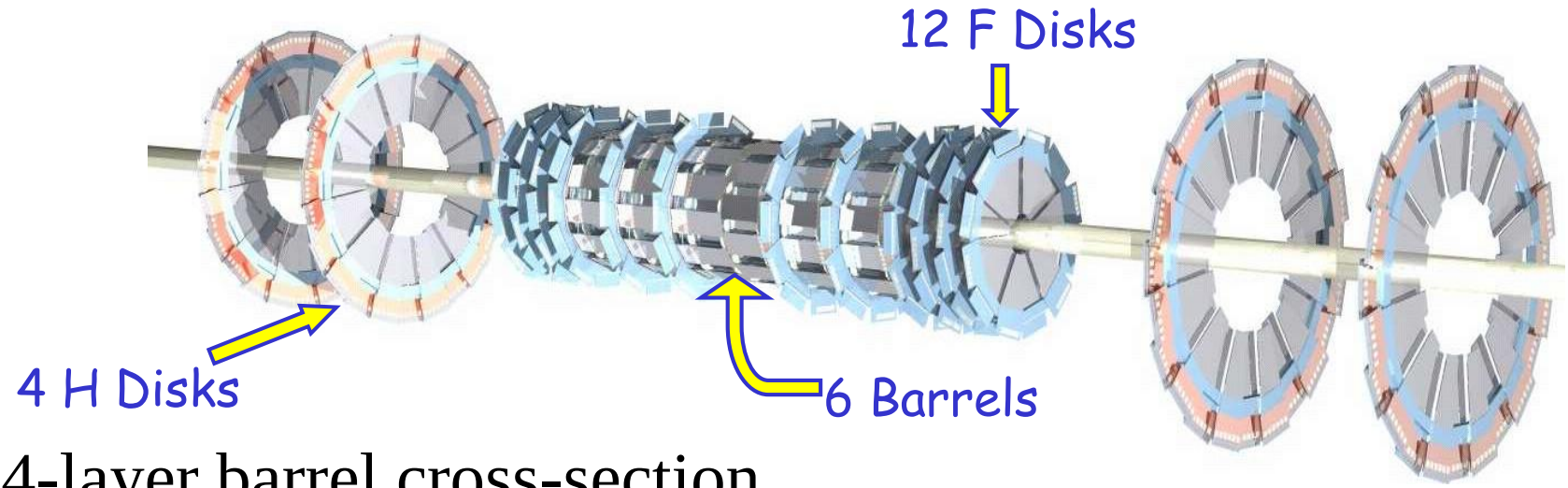
n hits give n^2 combinations of which n^2-n are ghosts

Pattern recognition of 2 particle tracks on double-sided microstrips

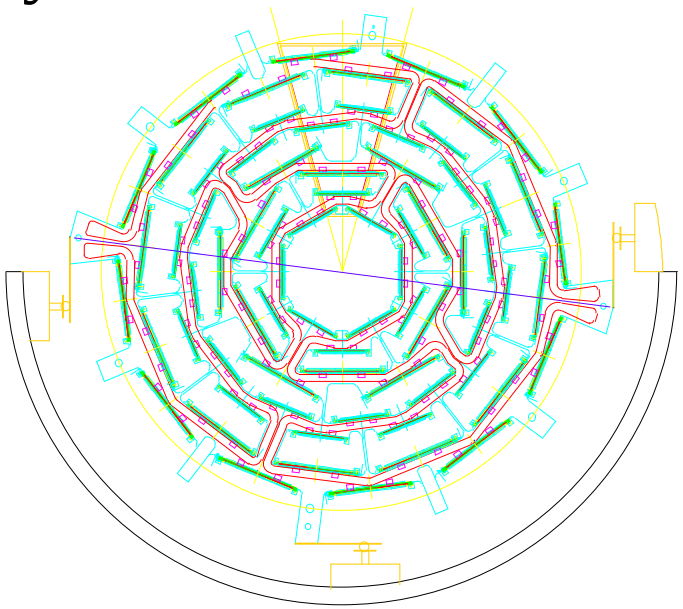
<u>Need real 2D info</u>: from strip to pixel

SMT Design

Lafex/CBPF



4-layer barrel cross-section



	Barrels	F-Disks	H-Disks
sngl/dbl	sngl + dbl	double	single
Stereo	0, 2, 90	+/-15	+/-7.5
Channels	387072	258048	147456
Modules	432	144	96
Rin/Rout	2.7/9.4cm	2.6/10.5cm	9.5/26cm

• Detectores de Píxel - Charge Coupled Devices(CCD), Active Pixel Sensor(APS)

Os CCDs são circuitos integrados que consistem em uma matriz densa de fotodiodos que operam convertendo energia incidente em cargas. Os elétrons gerados pela interação com átomos de silício são armazenados em uma barreira de potencial e podem ser transferidos subseqüentemente pelo chip por registradores e depois para um amplificador.

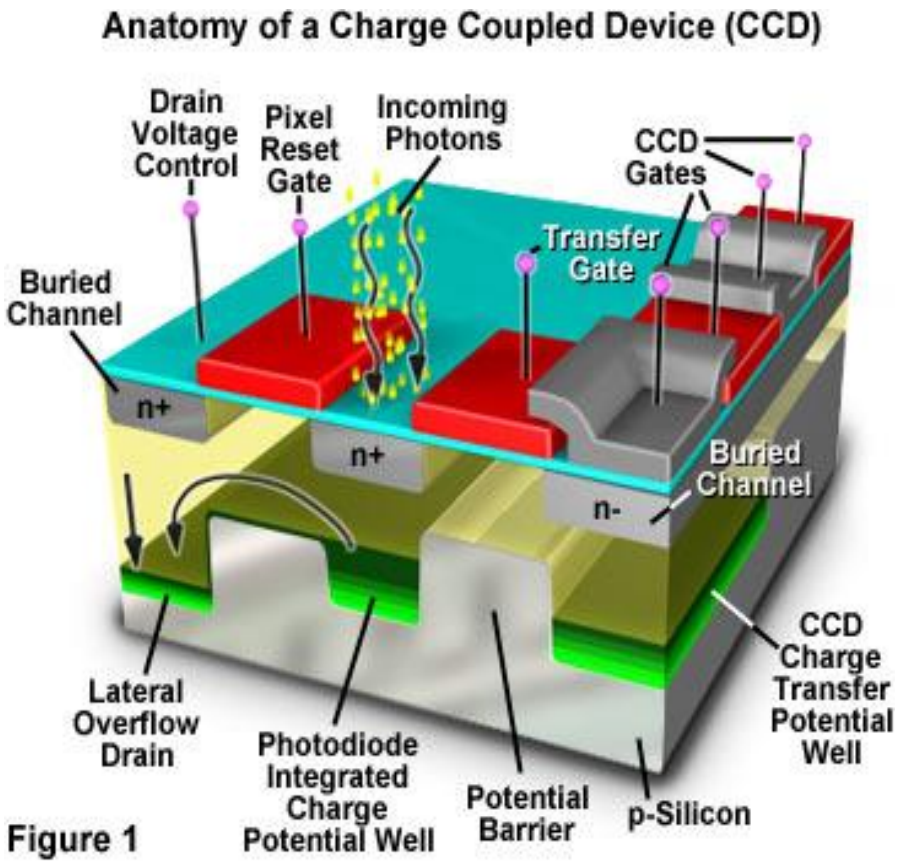
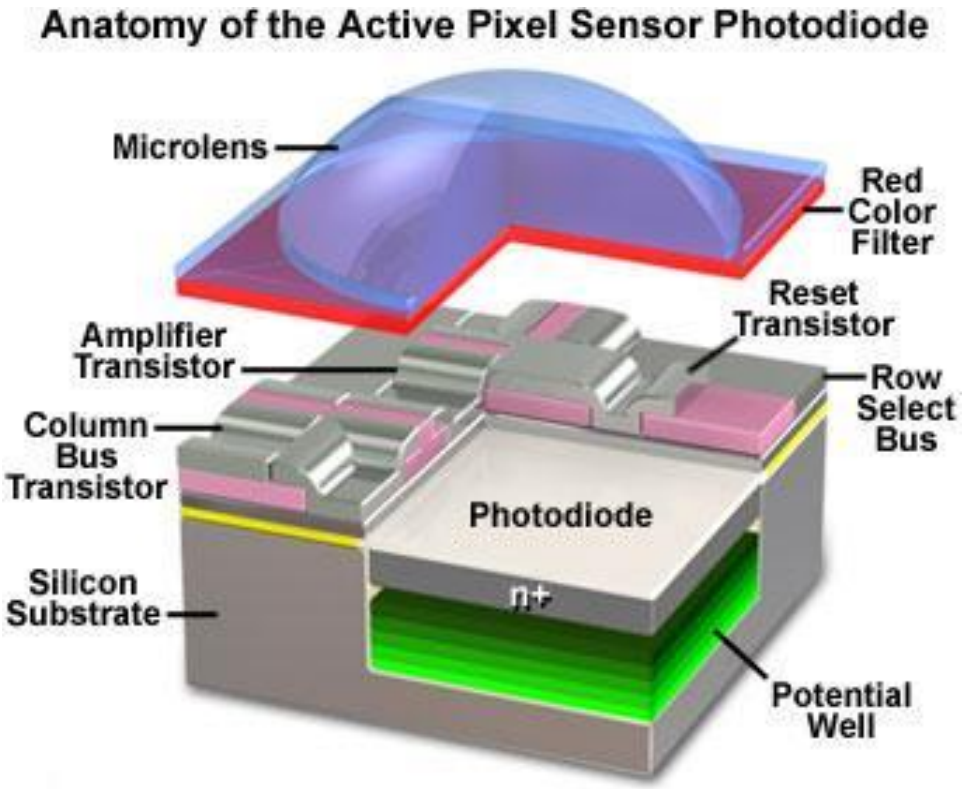


Figure 1

OsAPSs são basicamente idênticos aos CCDs, com excessão de que a eletrônica de processamento se encontra no próprio chip.



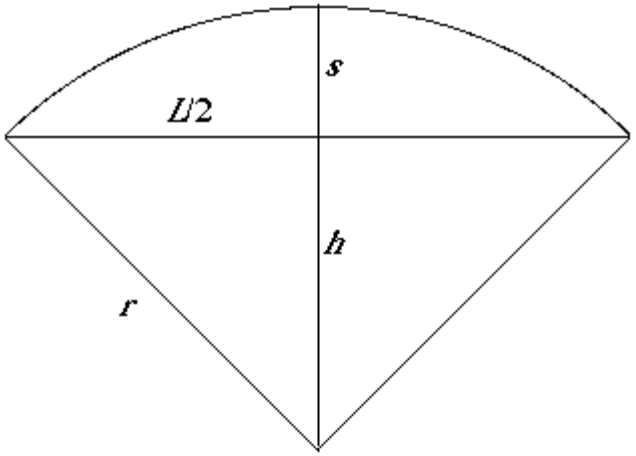
Medida de Momentum

- **Partículas Carregadas em uma campo magnético estão sujeitas a uma força**

$$F = Q\vec{v} \times \vec{B}$$

perpendicular a sua trajetória e ao campo $\vec{B}$

$$p = \frac{L^2 Q B}{8 s}$$



p = 0.3Br

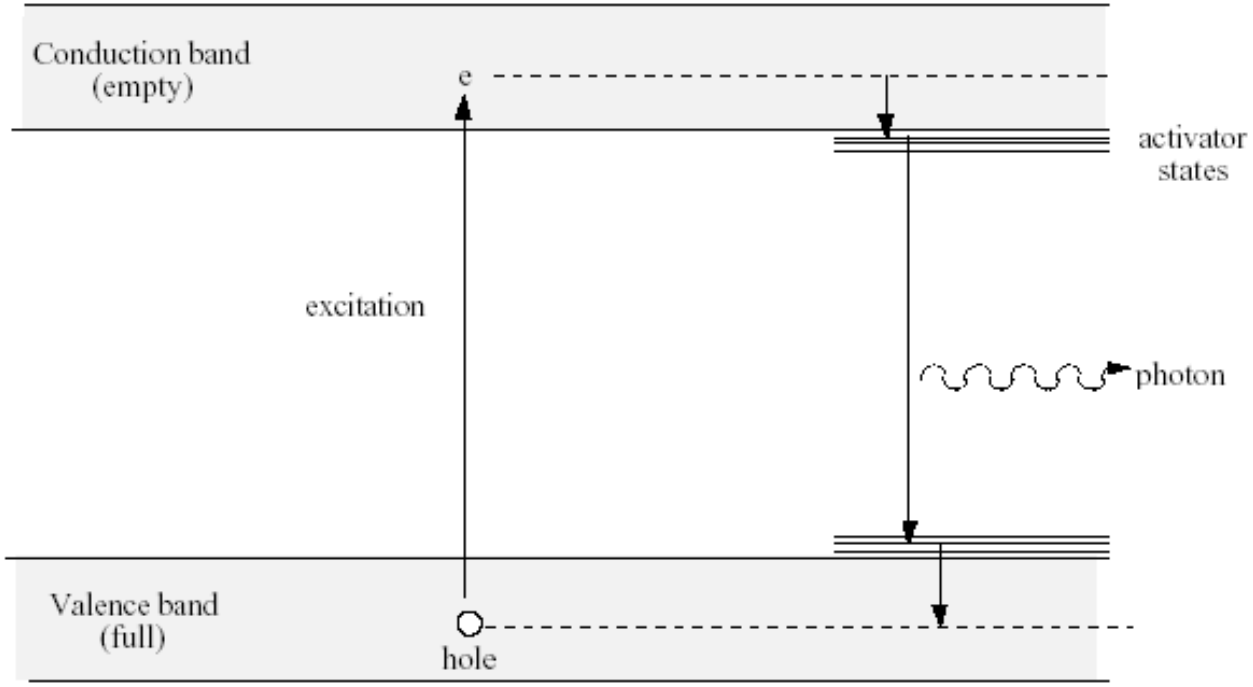
- **Deve-se medir vários pontos da trajetória da partícula para se obter um valor preciso do momentum p.**

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{p}{p_0}$$

Medida de Tempo

- Muitos detectores precisam de um tempo de referência
- Altas taxas de colisão requerem tempos precisos ~ 10^{-12} s

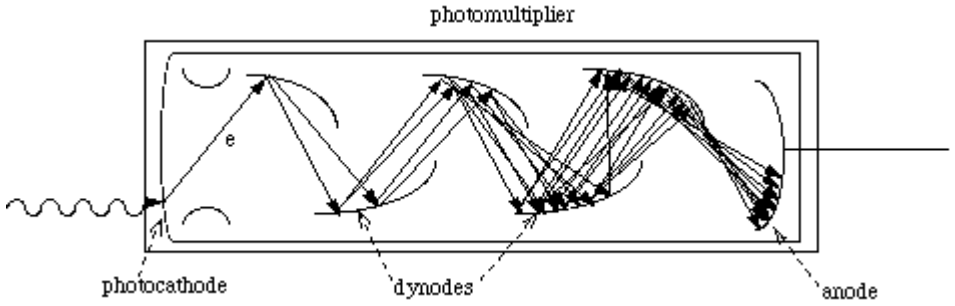
- Materiais Cintiladores oferecem rápida resposta à passagem de partículas
- Princípio => Utilizam excitação molecular ao invés de ionização



(Energy gap about 4 eV)

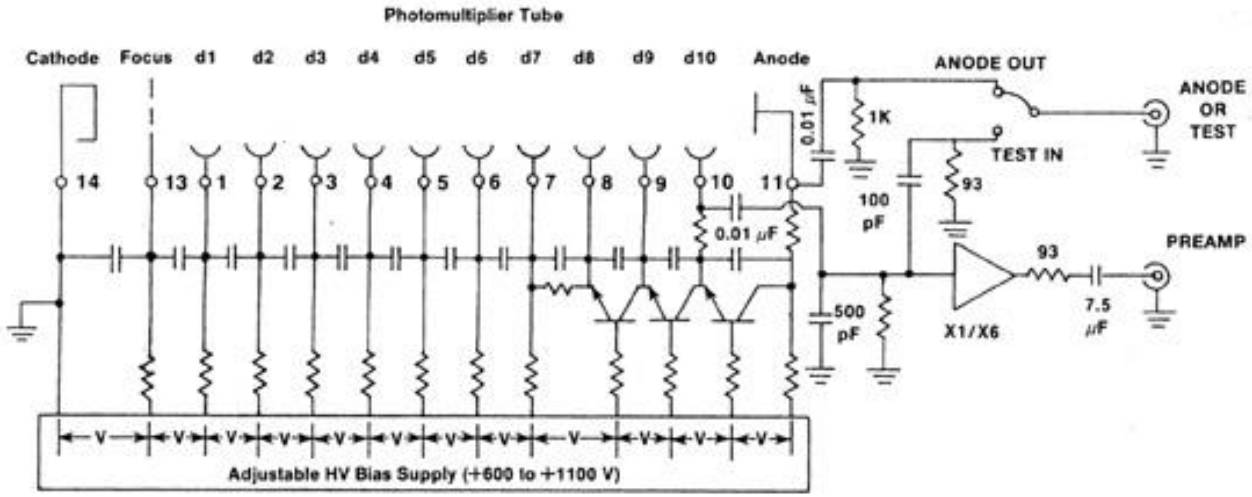
Cintiladores

- **Inorgânicos(NaI, CsI, BGO) - $\tau \approx 200$ns**
  Mais usados em Calorímetros EM - resposta mais uniforme => resolução E
  Propriedades dependem da forma cristalina(pureza)
- **Orgânicos(Antraceno, Naftaleno, etc.) - $\tau \approx 1.5$ --20ns**
  Grande versatilidade - podem ser adicionados a plásticos ou líquidos
  - fibras cintilantes
  Baixa eficiência ≈ 3% - reabsorção
  Adição de compostos que reemitem os fótons absorvidos em diferentes comprimentos de onda (wavelength shifter) aumentam sua eficiência
- **Baixa eficiência => amplificação do sinal => CCD, APD, Fotomultiplicador**

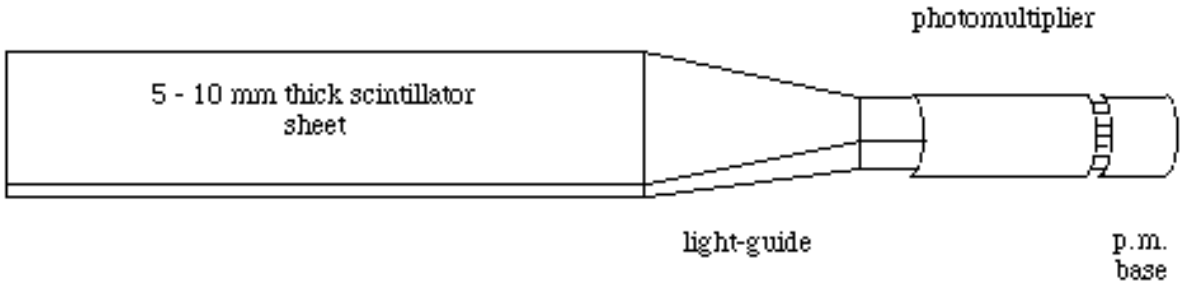


- **Utilizam metais alcalinos fotosensíveis como revestimento do cátodo**
- **Dinodos são revestidos com material (BeO) com boa emissão de elétrons secundários**
- **Todo o sistema opera em vácuo e submetido a alto potencial ≈ 3kV**

- **Eficiência quântica ≈ 20% - Ganhos ≈ 10^7 - sinais ≈ 100 mV**
- **Divisores resistivos fornecem o potencial adequado aos elementos**



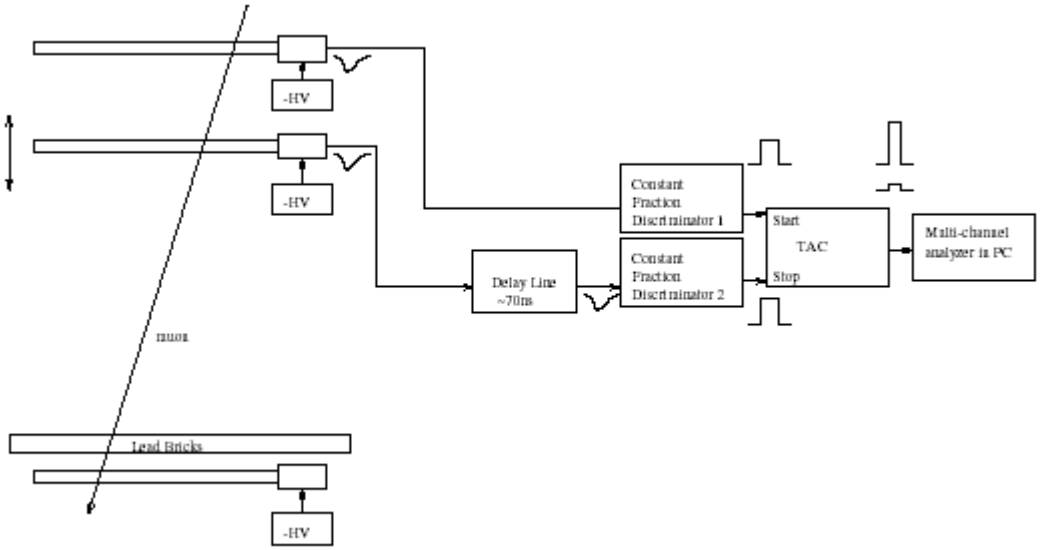
- **Na prática se faz uso de montagens do tipo cintilador-guia de luz-fotomultiplicador**

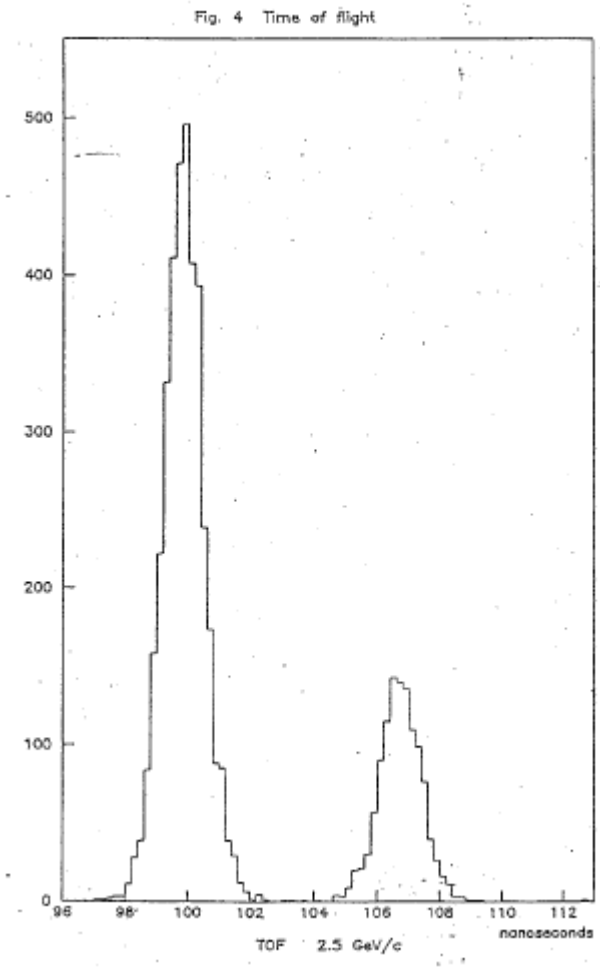


Métodos de Identificação

Lafex/CBPF

- **Tempo de vôo da partícula $v = L/\Delta t$**
- **Sabendo-se $p=mv\gamma$ obtemos a massa da partícula**



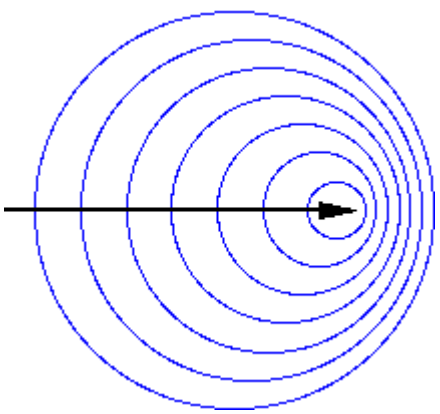


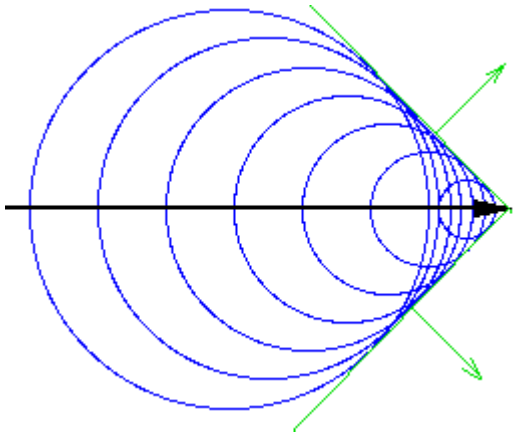
- **Δt para π e prótons com p=2.5GeV L=30m**
- **resolução em Δt ~ 1ns**

Métodos de Identificação II

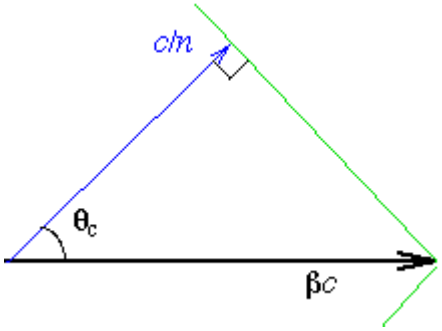
Lafex/CBPF

- **Efeito Cherenkov (Pavel A. Cherenkov - Nobel 1958) => Efeito coletivo de polarização**
- **semelhante a onda de choque supersônica**
- **ocorre para partículas com velocidade v > c/n**





- **Radiação emitida em um ângulo θ_c dado por:**



$$\cos\theta_C = \frac{c/n}{\beta c/c} = \frac{1}{\beta n}$$

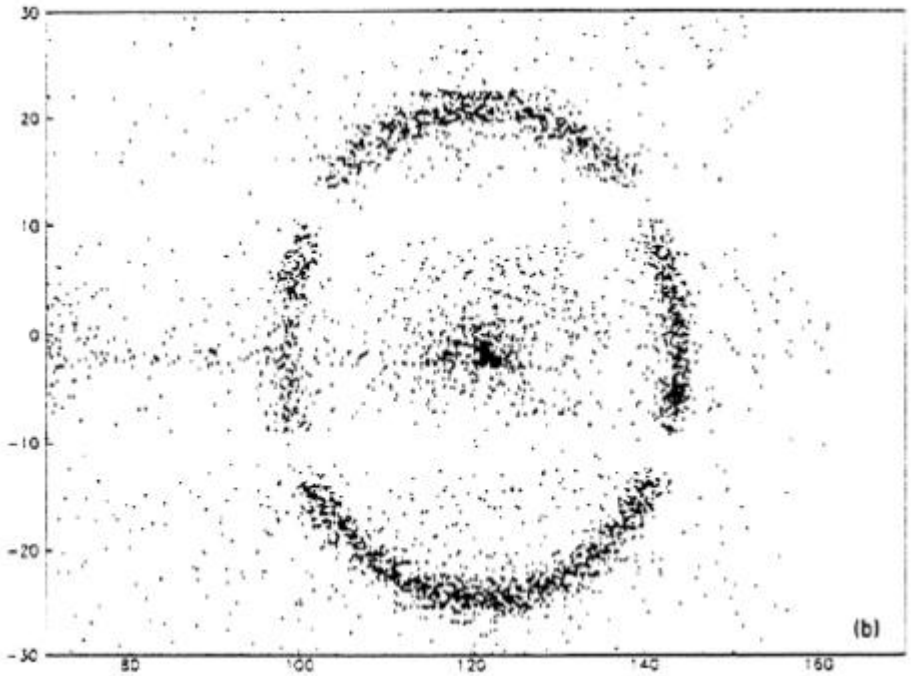
$$N_\gamma = \frac{\alpha z^2}{c}\int\left(1-\frac{1}{\beta^2 n^2}\right)2\pi\nu\, d\nu$$

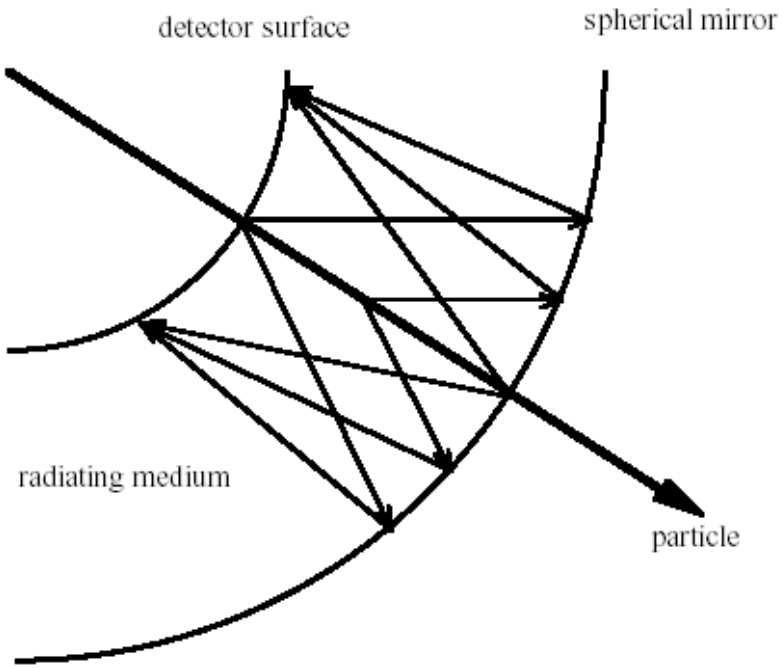
$$= \frac{\alpha z^2}{c}\int \sin^2\theta_C\, 2\pi\nu\, d\nu$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$$

- **$N_\gamma \sim 500 \sin^2\theta_c$**

- **Detectores de Anéis Cherenkov (RICH)**
- **Utilizam uma combinação de espelhos e detectores de radiação para medida direta do ângulo θ_c**
- **Muito usado em colisores**





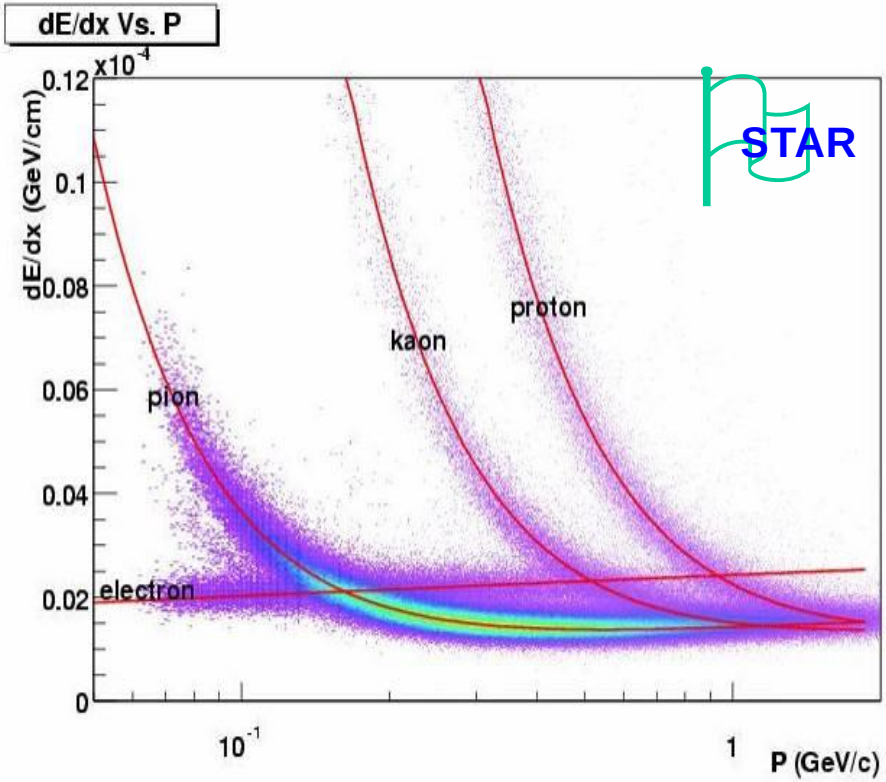
Métodos de Identificação IV

Lafex/CBPF

- **Perda de Energia por Ionização – Função do momentum da partícula**
- **A medida ao longo da trajetória da partícula permite sua identificação**
- **TPC são os detectores mais adequados à esta medida.**

Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \ln(\ldots)$$

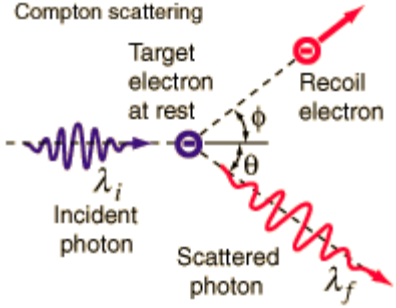


Medida de Energia

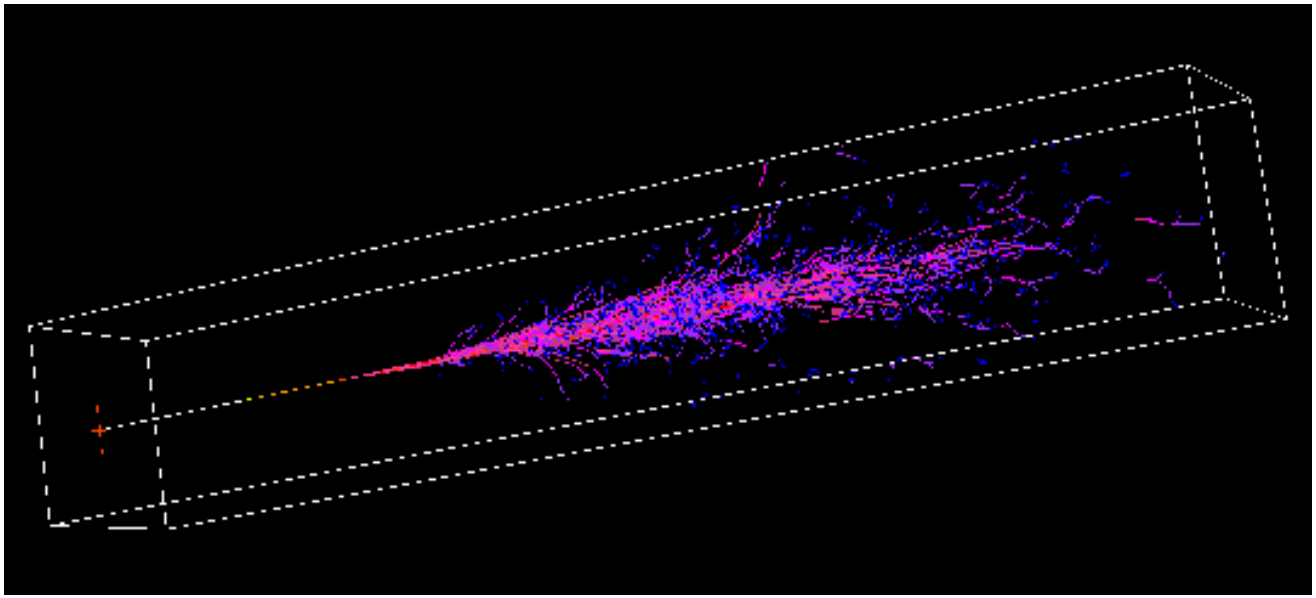
- **Calorimetria**
  Para medir-se a energia total de uma partícula, é necessária sua total absorção em um meio. No processo de interação com o meio a partícula primária é destruída, gerando uma série de outras cujas energias são medidas pelos processos físicos já vistos.
- **Precisão na medida da energia aumenta com o número de partículas secundárias, ou seja com a energia da partícula primária:**
  $\delta E/E \approx 1/\sqrt{E}$ ==> Maior precisão a altas energias $\delta p/p \approx p$

☂ **O Processo de geração de partículas secundárias(chuveiros) pode ser dividido quanto aos processos físicos envolvidos:**
☂ **Chuveiros Eletromagnéticos - interação EM(irradiação, criação de pares)**
☂ **Chuveiros Hadrônicos - interação forte**

- **Chuveiros Eletromagnéticos - iniciados por e^-, γ, $\pi^0 \rightarrow \gamma\,\gamma$**
  $e^- \rightarrow e^-\,\gamma$ -- $\gamma \rightarrow e^-\,e^+$ => Chuveiro se desenvolve até $E=E_c \approx 550/Z$ MeV
  => Não há mais multiplicação, energia perde-se por ionização($e^-\,e^+$) e espalhamento Compton (γ)



- **Conforme o chuveiros se desenvolve há uma expansão transversal devido ao expalhamento coulombiano múltiplo**

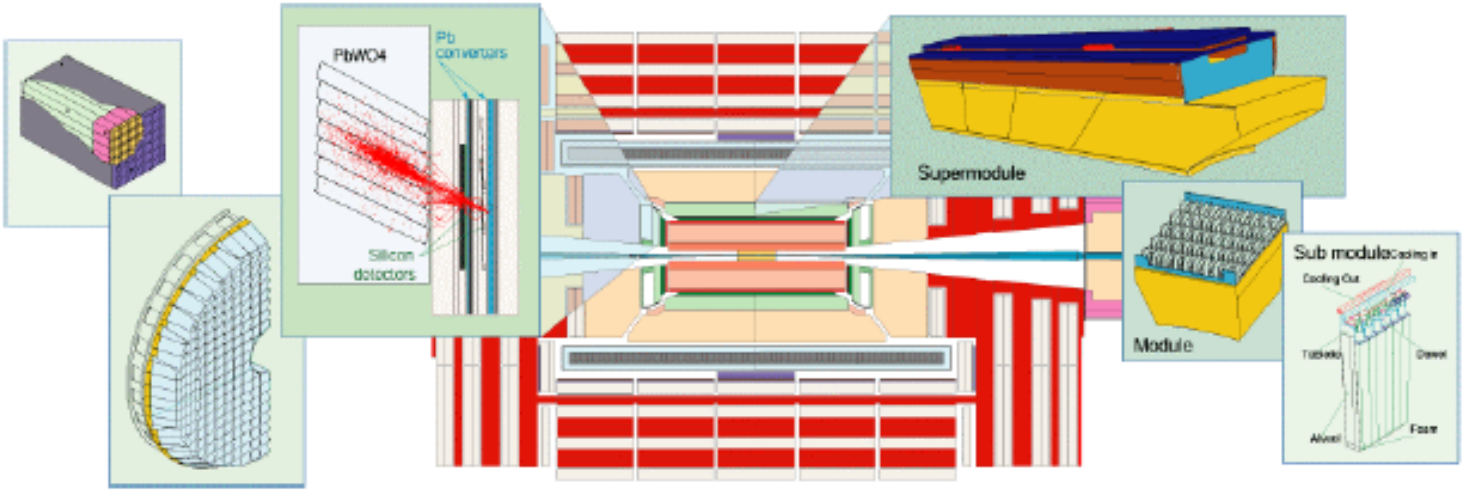


- **20 GeV e^- em Fe**

- **Calorímetros Eletromagnéticos Homogêneos x Amostragem**

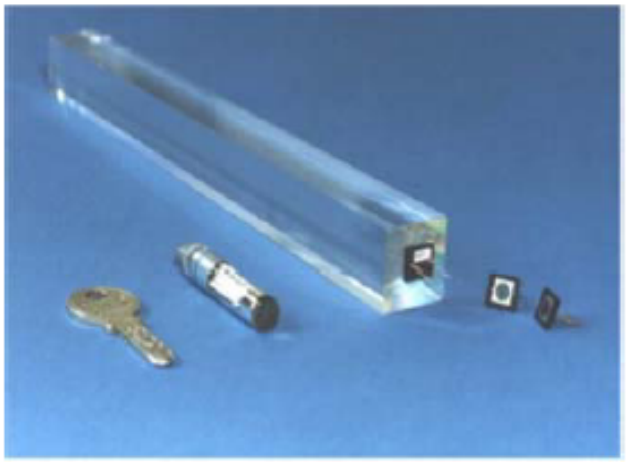
  - **Homogêneos - O mesmo meio material é usado tanto para produção como para detecção do chuveiro de partículas. Os mais usados são**
    - Lead Glass($PbO+SiO_2$) detecção por radiação Cherenkov
    $\delta E/E = 0.05/\sqrt{E}$
    - Cristais cintiladores inorgânicos(NaI, CsI, BGO) detecção direta da luz do cintilador. $\delta E/E = 0.015/(E)^{1/4}$

CMS Project for LHC



- 80,000 lead-tungstate ($PbWO_4$)
  - 22x22x230 mm^3 (barrel) $\Leftrightarrow$ $1R_M x 1R_M x 26X_0$
  - 30x30x220 mm3 (end cap)
- magnetic field of 4T
- radiation dose of ~ 1-2 kGy/year

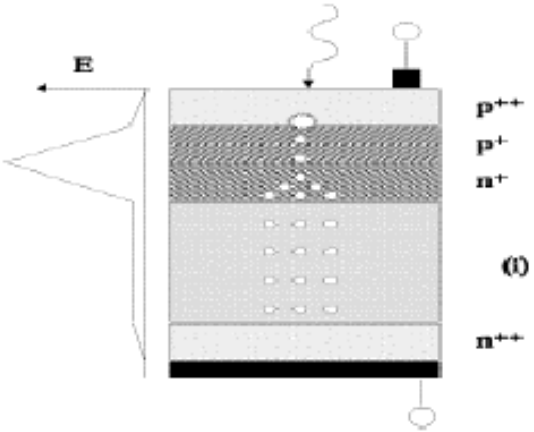
PWO crystals and avalanche photodiodes



Zeff	73
Density	8.28 g/cm^3
X_0	0.9 cm
RM	2.1 cm
Refraction index	2.2
lmax	450 nm
Decay time	10 ns
Light output	200 photons/MeV

NaI=9.49

Signal: > 4 photoel./ MeV ×(gain=50)



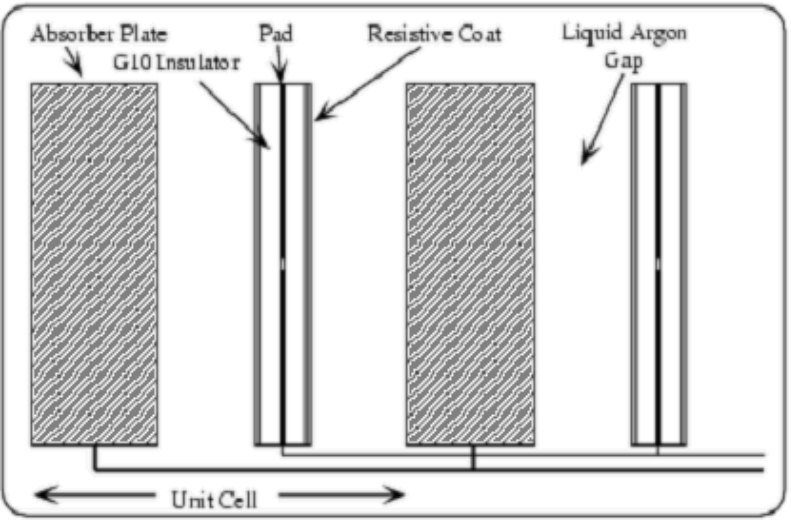
- available size:5x5 mm^2 x 2/per cr.
- C ~ 100pF @ U_W ~ 300V
- Gain ~ 50
- ENF ~ 2
- High rad.tolerance
- Low nuclear counter effect

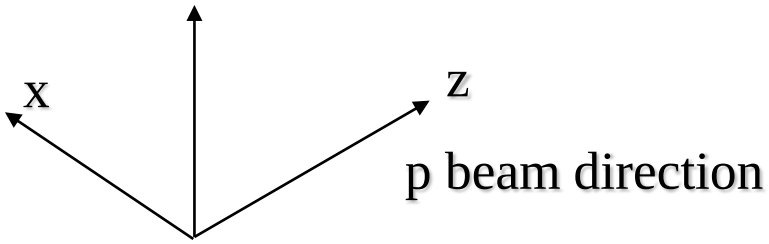
- **Amostragem - Um material de alto Z(onde ocorre a interação e produção de partículas) é intercalado ao detector(cintilador, câmara de ionização, câmara proporcional, etc.) onde se dá a formação do sinal. Várias camadas deste tipo são utilizadas para se obter a contenção completa dos chuveiros.**
  - A utilização de câmaras a fios fornece também informação precisa da localização do chuveiro.
  - Detectores mais compactos porém $\delta E/E = 0.15/\sqrt{E}$

- **Calorímetros Eletromagnéticos em conjunto com outros detectores são úteis na identificação de elétrons, fótons e π^0**

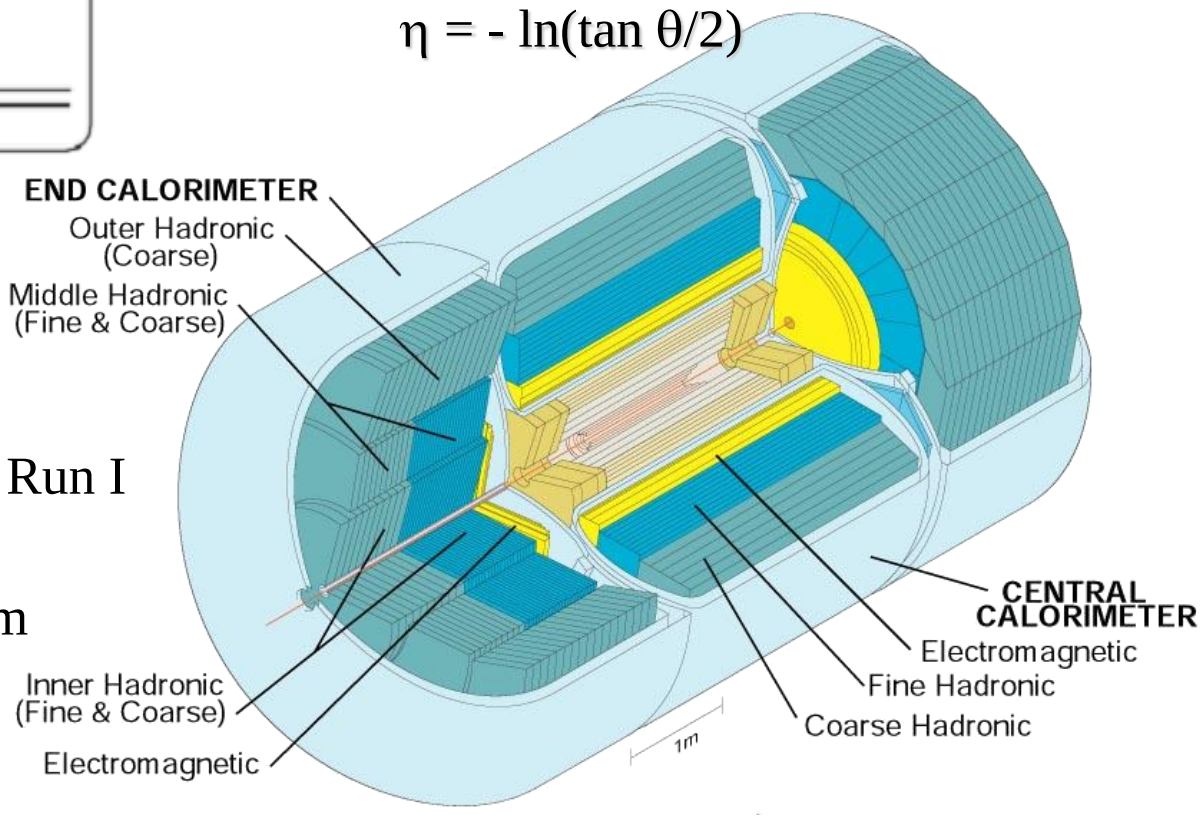
Calorímetro de U/LAr do D0

Lafex/CBPF



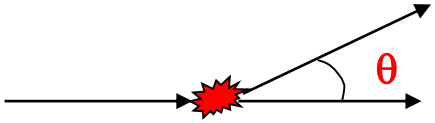


$\eta = - \ln(\tan \theta/2)$



- Calorimeter retained from Run I
- Uranium-Liquid Argon Calorimeter stable, uniform response, radiation hard

- **Chuveiros Hadrônicos - iniciados por partículas que sofrem interação forte**
  nêutrons, prótons, píons, etc.
  ≈ metade da energia da colisão é convertida em energia cinética dos produtos e o restante na produção de pions -- $pp \rightarrow pn\ \pi^+\ \pi^-\ \pi^+$
  Devido a diferença no processo físico o desenvolvimento dos chuveiros hadrônicos difere dos eletromagnéticos pelo maior desenvolvimento transversal:



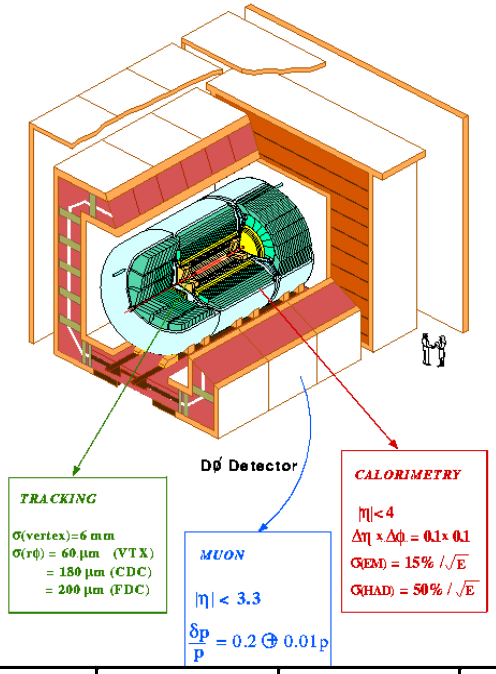
$P_T = P\,sen\theta \approx$ 350 MeV

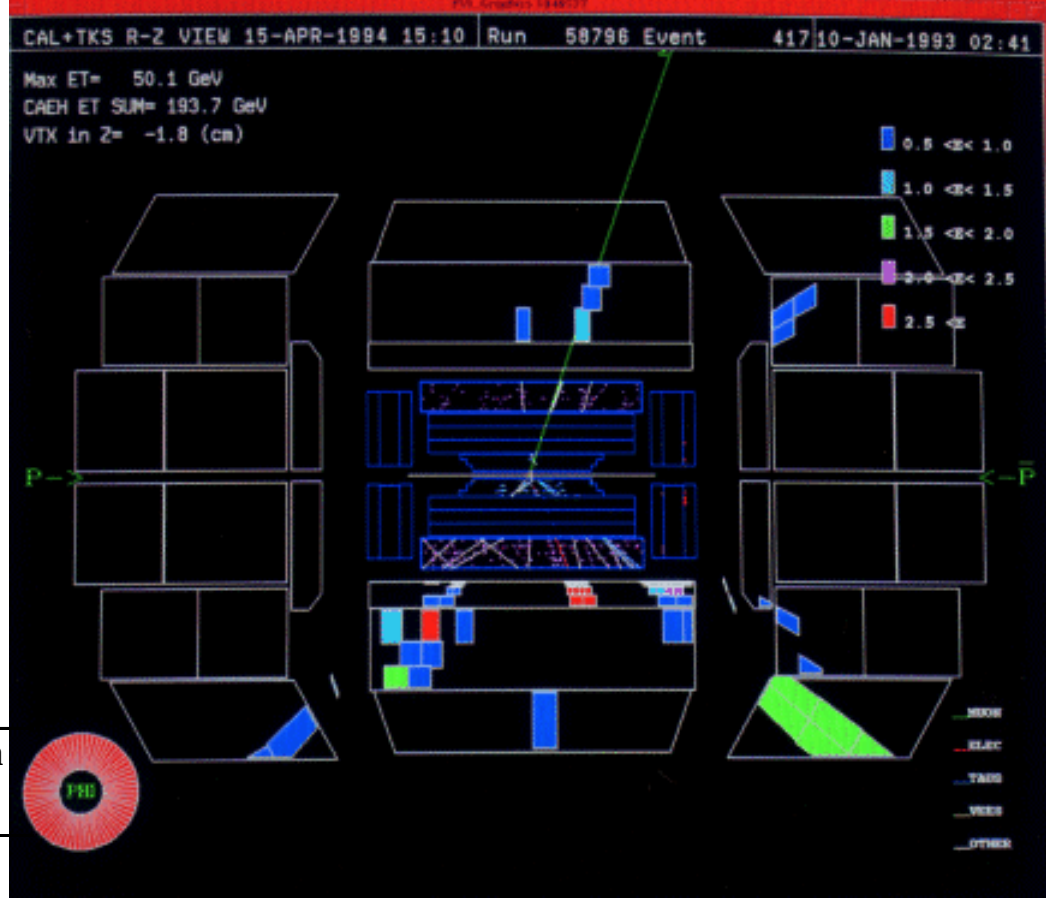
- **Devido a produção de $\pi^0 \approx 20\%$ da energia aparece na forma de chuveiro EM dentro do Hadrônico.**
- **≈ 30% da energia total do chuveiro é perdida**
  - **excitação/fissão nuclear**
  - **captura de neutrons**
  - **produção de neutrinos/múons**
- **Chuveiros Hadrônicos podem ser caracterizados pela variável:**

$\lambda = A/N_A\ \sigma_{in}$ == comprimento de interação(absorção) nuclear
>> comprimento de radiação(tabela)
dependência em σ_{in} => λ depende da energia e tipo da partícula incidente

- **Calorímetros Hadrônicos**
  Devido ao alto valor de λ para materiais utilizados em calorímetros homogêneos, na prática somente calorímetros de amostragem se tornam viáveis para chuveiros hadrônicos.
- **Como nos caso EM, um material de alto Z(onde ocorre a interação e produção departículas) é intercalado ao detector(cintilador, câmara de ionização, câmara proporcional, etc.) onde se dá a formação do sinal.**
- **Todavia devido a flutuações no processo de formação do chuveiro (captura de neutrons, excitação nuclear, etc.) a resolução fica prejudicada $\delta E/E \approx 0.5/\sqrt{E}$**

- **Dois métodos são utilizados para amenizar estes efeitos:**
  - **"weighting" - identifica-se os chuveiros EM dentro dos hadrônicos e atribui-se um peso diferenciado a esta componente.**
  - **Compensação - utiliza-se urânio empobrecido de forma que os nêutrons capturados provoquem sua fissão, e em consequência recupera-se parte do sinal perdido.**
- **Usualmente o Calorímetro Hadrônico está disposto após o EM devido a diferença entre X_0 e λ - A maioria dos hádrons atravessa a parte EM com pouca interação.**





Partícula	Tracking	ECAL	HCAL	Muon
γ				
e				
μ				
Hadron				
neutrinos				