Introdução à Física de Partículas

G. Alves
Lafex/CBPF

Parte I Sumário

I - Conceitos Básicos

II - Partículas Elementares

III - Métodos Experimentais

G02 - Física de Partículas
Professor: Gilvan Augusto Alves (CBPF)

Ementa:

- **Conceitos básicos**
  - **Breve introdução histórica**
  - **Sistema de unidades**
- **Partículas elementares**
  - **Léptons**
  - **Quarks**
- **Métodos experimentais**
  - **Aceleradores**
  - **Detectores**
- **Regras de Feynman**
  - ***Toy model* (partículas sem spin)**
  - **Construção das amplitudes**
  - **Seção de choque**
  - **Decaimento;**
- **Interações fundamentais**
  - **Eletrodinâmica quântica**
  - **Interação forte**
  - **Interação fraca**
  - **Unificação eletrofraca**
- **O LHC e questões em aberto**
  - **Os experimentos do LHC**
  - **Quebra espontânea de simetria (Higgs, etc.)**
  - **Grande unificação**
  - **Supersimetria**
  - **Oscilação de neutrinos**

Referências

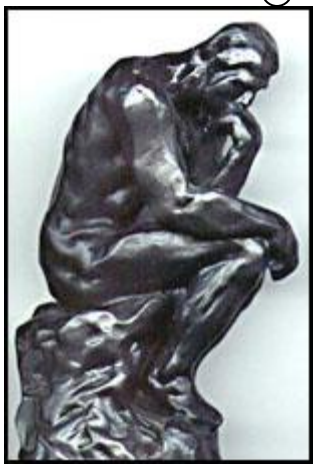
Martin & Shaw, Particle Physics, Wiley (1992)
Halzen & Martin, Quarks and Leptons, Wiley (1984)
Fernow, Introduction to Experimental Particle Physics, CUP (1986)
Griffiths, Intr. to Elementary Particles, Wiley (1987)

O Objetivo da Física de Partículas





Do que o mundo é feito??



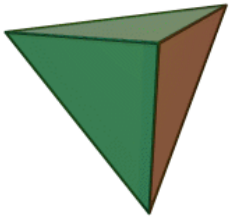
Leucipo (Demócrito – 400AC)
Átomos e Vazio

Empédocles (450 AC)
4 Elementos e Éter

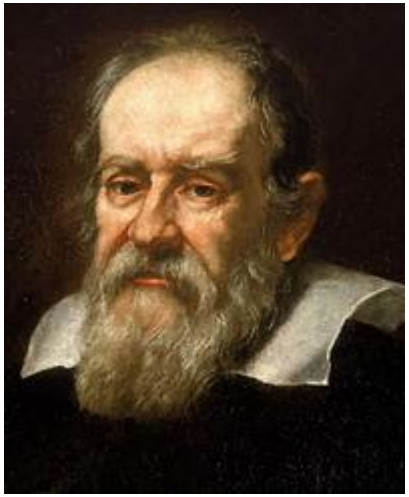
Platão e Aristóteles (350 BC)



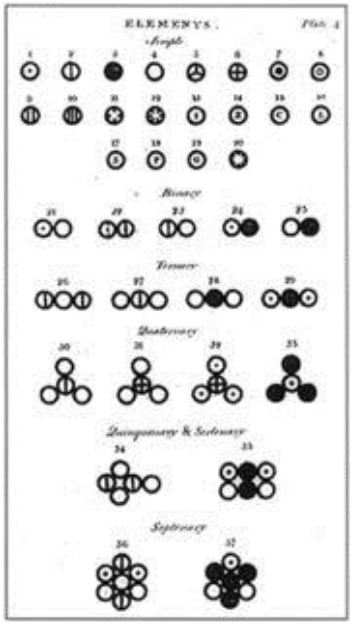
- Rejeitam o atomismo
  - Vazio não natural
- Adotam o pluralismo
  - Elementos ⇔ Sólidos regulares
- Domina o pensamento até o fim da idade média



Galileu Galilei (1600)



- Método científico
  - Experimentos quantitativos
  - Análise matemática
  - Contesta Aristóteles
  - Atomismo (parcialmente)



John Dalton (1808)

- Estabelece as Bases da Teoria Atômica Moderna
  - Síntese dos Experimentos
  - Lavoisier
    - Conservação das Massas
  - Proust
    - Lei das proporções definidas

- Os elementos são constituídos de átomos
- Os átomos não podem ser criados ou destruídos
- Átomos de diversos elementos podem se combinar em substâncias compostas

Dmitri Mendeleyev (1869)

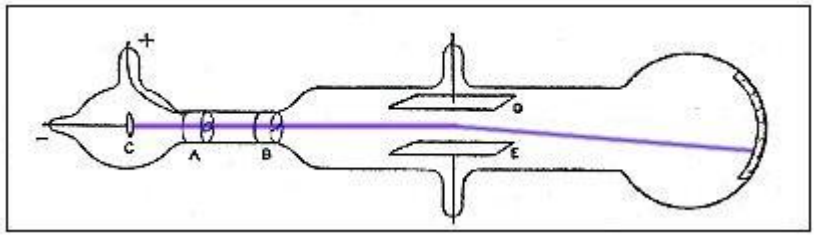
- Criou a 1ª Tabela Periódica

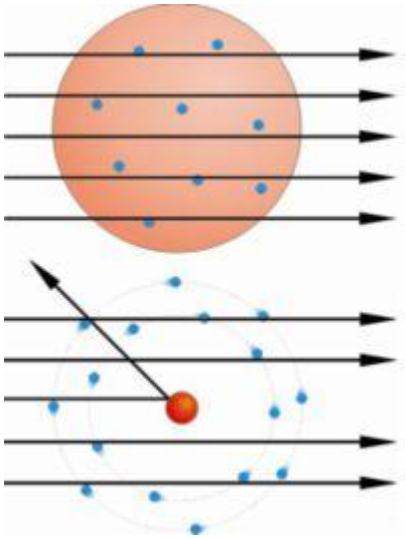
- Previu a existência de novos elementos

Period	Group I a	b	II a	b	III a	b	IV a	b	V a	b	VI a	b	VII a	b	VIII a	b	(0)
1	H 1.0																He 4.0
2	Li 6.9		Be 9.0		B 10.8		C 12.0		N 14.0		O 16.0		F 19.0				Ne 20.2
3	Na 23.0		Mg 24.3		Al 27.0		Si 28.1		P 31.0		S 32.1		Cl 35.5				Ar 39.9
4	K 39.1		Ca 40.1		Sc 45.0		Ti 47.9		V 50.9		Cr 52.0		Mn 54.9		Fe 55.8	Co 58.9 Ni 58.7	
		Cu 63.5		Zn 65.4		Ga 69.7		Ge 72.6		As 74.9		Se 79.0		Br 79.9			Kr 83.8
5	Rb 85.5		Sr 87.6		Y 88.9		Zr 91.2		Nb 92.9		Mo 95.9		Tc		Ru 101.1	Rh 102.9 Pd 106.4	
		Ag 107.9		Cd 112.4		In 114.8		Sn 118.7		Sb 121.8		Te 127.6		I 126.9			Xe 131.3
6	Cs 132.9		Ba 137.3		La* 138.9		Hf 178.5		Ta 180.9		W 183.9		Re 186.2		Os 190.2	Ir 192.2 Pt 195.1	
		Au 197.0		Hg 200.6		Tl 204.4		Pb 207.2		Bi 209.0		Po		At			Rn
7	Fr		Ra		Ac**												

*	Ce 140.1	Pr 140.9	Nd 144.2	Pm	Sm 150.4	Eu 152.0	Gd 157.3	Tb 158.9	Dy 162.5	Ho 164.9	Er 167.3	Tm 168.9	Yb 173.0	Lu 175.0
**	Th 232.0	Pa	U 238.0	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

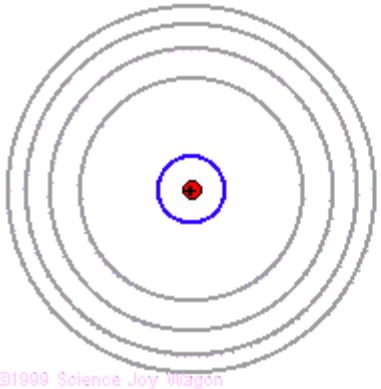
- Problemas, problemas...
  - Centenas de “Átomos”
  - Estados excitados
- J.J.Thompson (1897)
  - Início da Física de Partículas
    - Descoberta do elétron
  - Modelo de Thompson

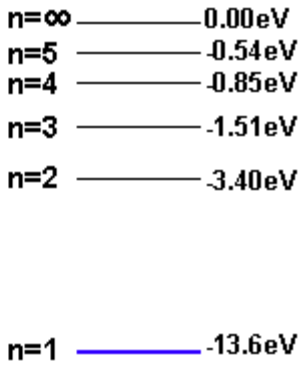




- Ernest Rutherford (1911)
  - Modelo nuclear
  - Mais problemas
    - irradiação

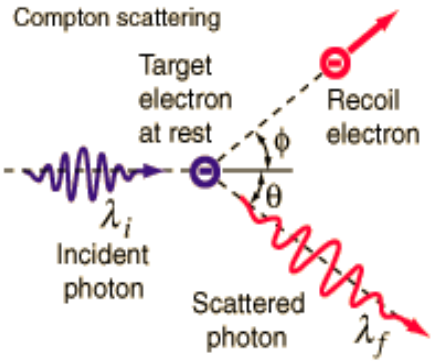
- Niels Bohr (1913)
  - Modelo pré-quântico



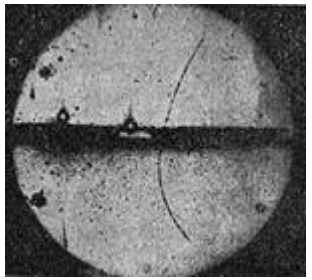


Rutherford (1918) e Chadwick (1932)
- prótons e nêutrons

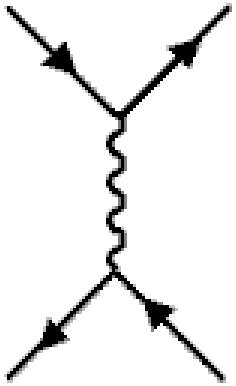
Partículas Elementares – novos átomos
- p, n, e^- , γ → espalhamento Compton
- breve simplicidade
- Anderson (1932) – pósitron (e^+) →Dirac



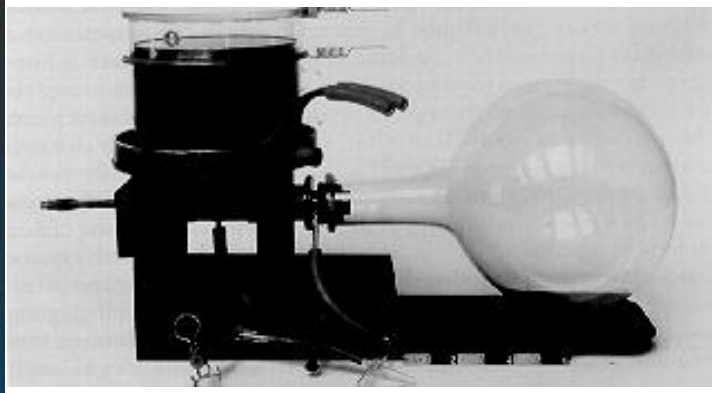
- Problemas (de novo) – Estabilidade nuclear
  - Magnitude das Interações Fundamentais
    - EM x Gravitacional
    - k e^2/R x G m^2/R
    - 1 x 10^{-38} !!

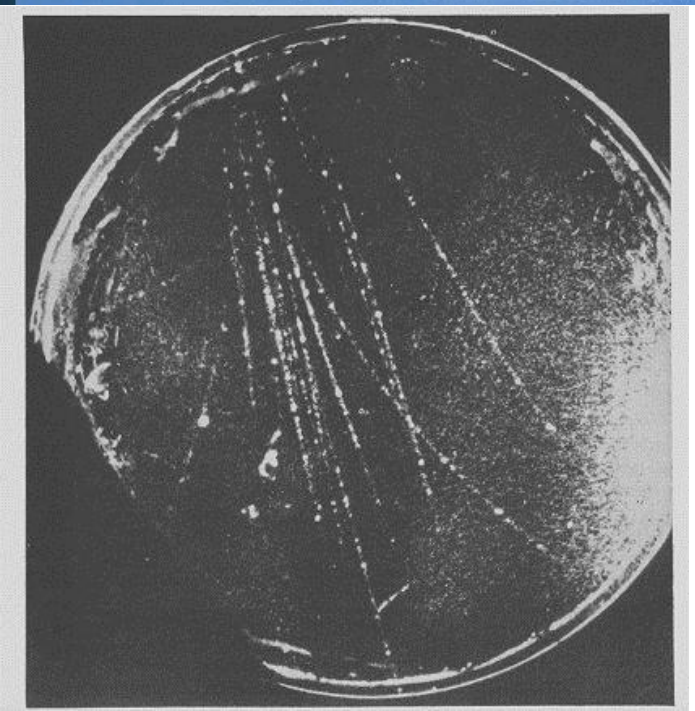


- Nova força (interação forte)
  - Curto alcance – restrita a escala nuclear
  - O que determina o alcance de uma força???
    - TQC – Interação ←→ troca de "mensageiro"
    - Massa do mensageiro → alcance
      - **$\Delta E \Delta t = mc^2 \Delta R v^{-1} \sim \hbar$**
    - $\Delta R \approx 10^{-15}$m → m ≈ 200 m_e - Potencial de Yukawa





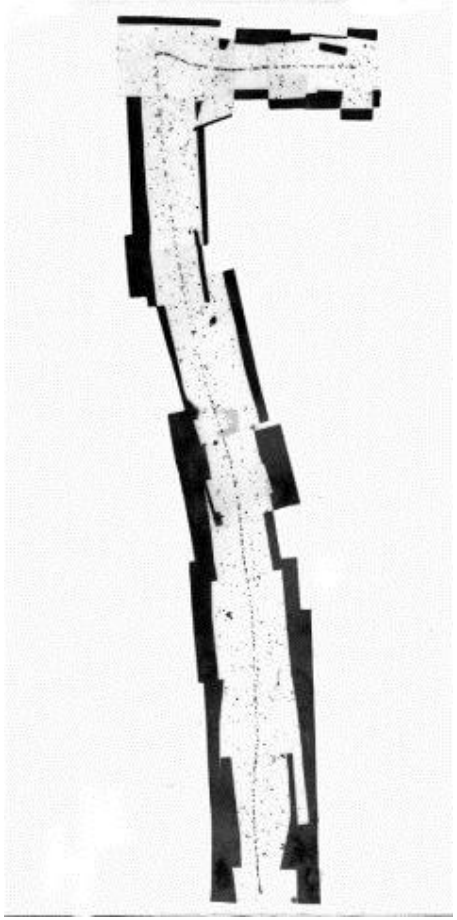




1937 – 1947 procura pelo méson de Yukawa em Raios Cósmicos

- A grande "pegadinha" da natureza
- 1937 – Anderson → "méson" ~ 200 m_e – raios cósmicos
- 1945 – Conversi, Pancini & Piccioni – Interação fraca **$\tau \approx 10^{-6}$ s !!**
- 1946 – Perkins – dois tipos de mésons

- 1947 - Lattes, Occhialini & Powell
  decaimento $\pi \rightarrow \mu$
- μ (Anderson) == elétron pesado
- "Who ordered that??" I.I.Rabi

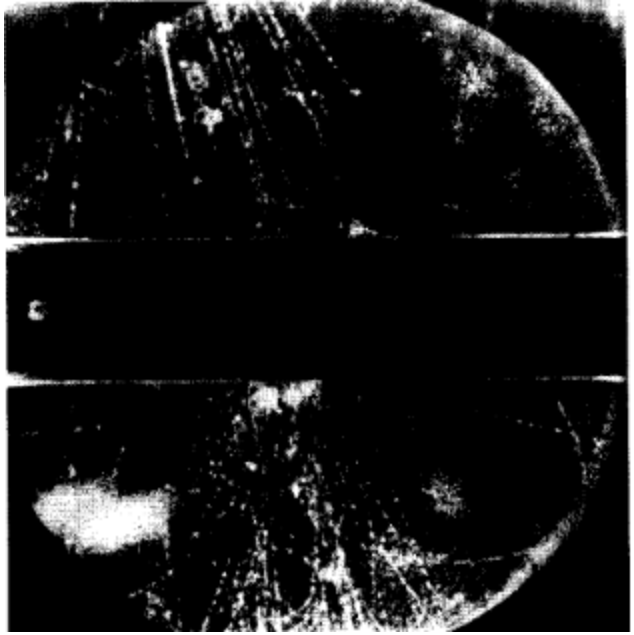


- Falta alguma coisa...
  - $\pi \rightarrow \mu$ + ?

- W. Pauli (1930) Decaimento beta
  - partícula neutra (neutrino - υ)
- Seria a mesma partícula??

- Frederick Reines & Clyde Cowan (1956)
  - 1ª observação direta $\upsilon \mp p \rightarrow n + e^{+}$
- Leon Lederman (1962)
  - $\upsilon_{\mu} \neq \upsilon_{e}$

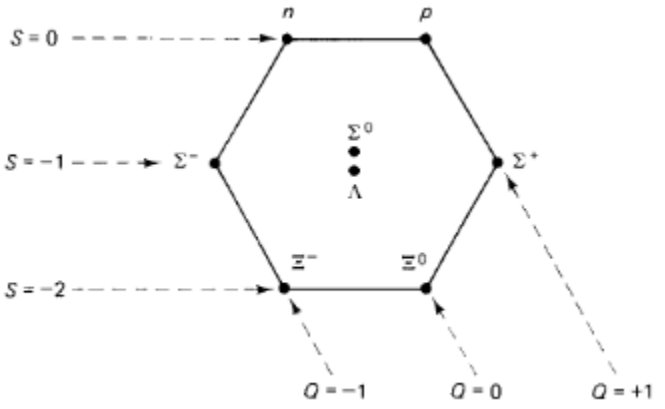




- (1947-1950) Partículas estranhas (mesmo)
  - Produzidas em pares
  - Vida média extremamente elevada
    - $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $(\tau \approx 10^{-10}\ s)$
    - $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $(\tau \approx 10^{-23}\ s)$
  - Uma família de partículas estranhas
    - $K^0, K^+, K^-, \Lambda, \Sigma^+, \Xi^+, \Sigma^-, \Xi^-, ...$

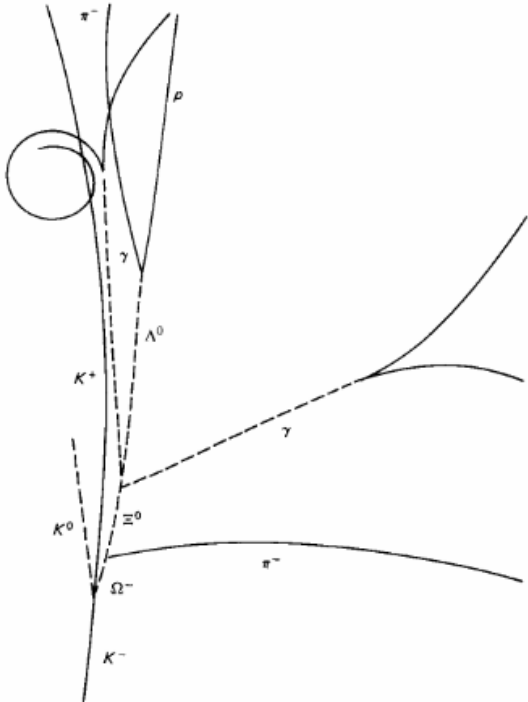
- Abraham Pais & Murray Gell-Mann (1953) → novo número quântico – s
  - Conservado pela Interação forte
    - Produção em pares
  - Partículas estranhas decaem via Interação fraca (decaimento beta)
    - Vida média

- (1960) Física de Partículas está uma enorme confusão
  - Centenas de partículas
    - bárions, mésons, léptons, ...
  - Nenhuma ordem aparente



- Murray Gell-Mann & Yuval Ne'eman (1961)
  - regra do octeto (simetria SU(3))
  - classificação das partículas – Q, S, J
  - nova tabela periódica
  - prevê a existência de novas partículas (Ω^-)





- O sucesso da regra do octeto levanta novamente a questão
  - São essas partículas elementares?
  - "Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist" E. Fermi
- Kazuhiko Nishijima, Murray Gell-Mann & George Zweig (1964)
  - Hádrons compostos por férmions (spin ½) fundamentais (quarks)
    - "Three quarks for Muster Mark" – Finnegans Wake (James Joyce)
  - Bárions → três quarks
  - Mésons → quark-antiquark

qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^{+}
udd	0	0	Δ^{0}
ddd	−1	0	Δ^{-}
uus	1	−1	Σ^{*+}
uds	0	−1	Σ^{*0}
dds	−1	−1	Σ^{*-}
uss	0	−2	Ξ^{*0}
dss	−1	−2	Ξ^{*-}
sss	−1	−3	Ω^{-}

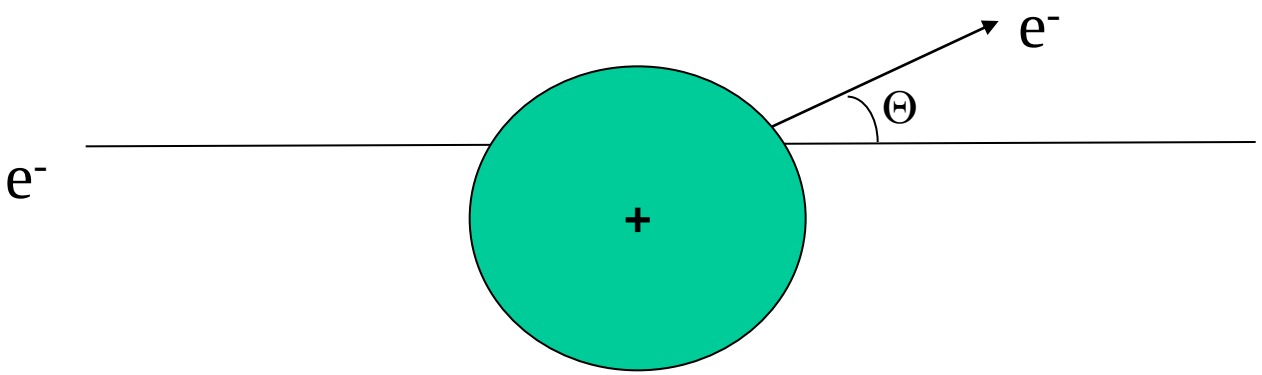
$q\bar{q}$	Q	S	Meson
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	−1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	−1	−1	K^-
$s\bar{d}$	0	−1	$\bar{K}^0$
$s\bar{s}$	0	0	??

- Mais Problemas (não tem fim)
  - Não se observam quarks livres
  - quarks tem carga fracionária
  - Violam o princípio de Pauli??
    - Ω^- (s↑ s↑ s↑) Δ^- (d↑ d↑ d↑), Δ^{++} (u↑ u↑ u↑)

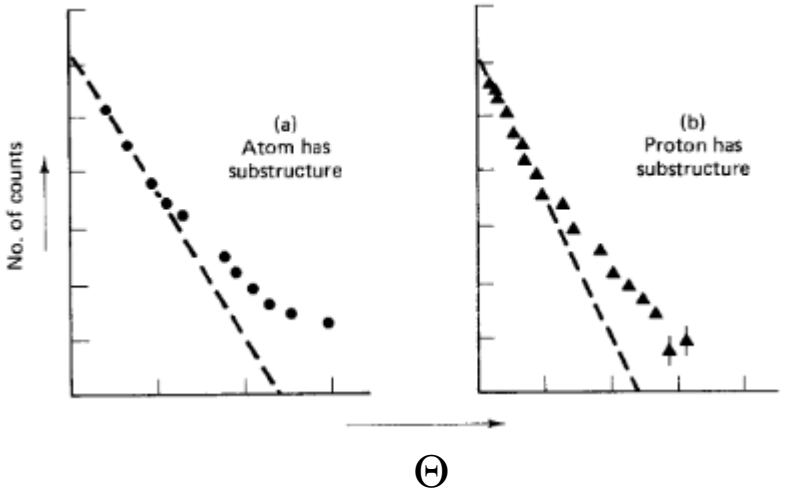
- Até hoje não foram observados quarks livres ou carga fracionária

- Oscar Greenberg (1964)
  - quarks tem um novo nº quântico (cor)
  - três cores fundamentais (R, G, B)
  - partículas observáveis não tem cor ⇒ confinamento
  - Ω^- (s↑ s↑ s↑)

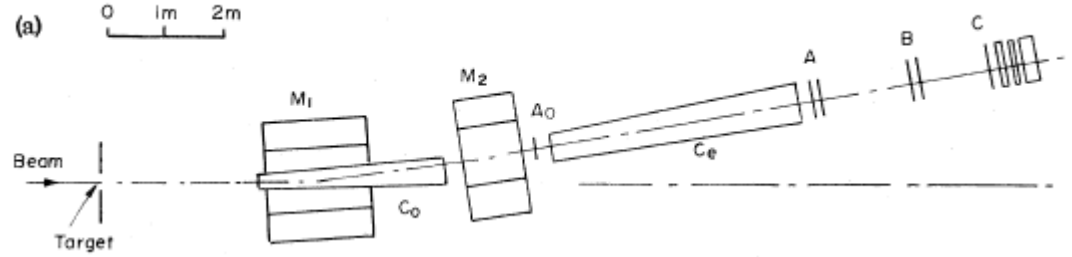
  - Socorro!!

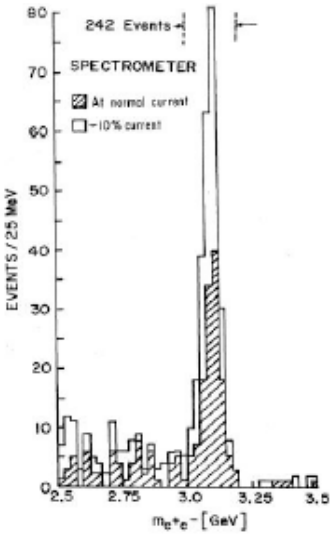


- (1969) espalhamento e^-p a altas energias → Rutherford
  - partons = quarks??



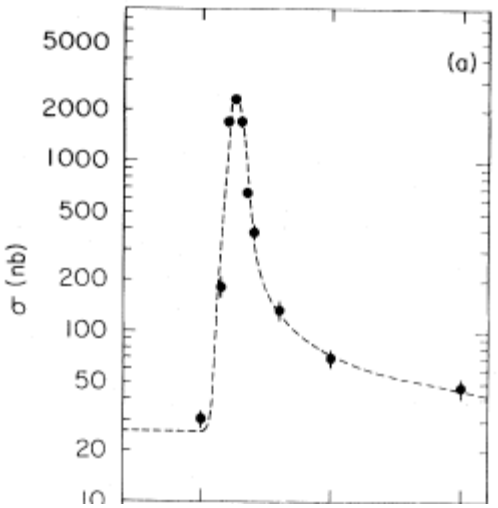
- (1974) Descoberta de uma partícula com propriedades incomuns
  - Revolução de Novembro
- Samuel Ting (Brookhaven) pp → e^+e^-





- Burton Richards (SLAC) e^+e^- → pp

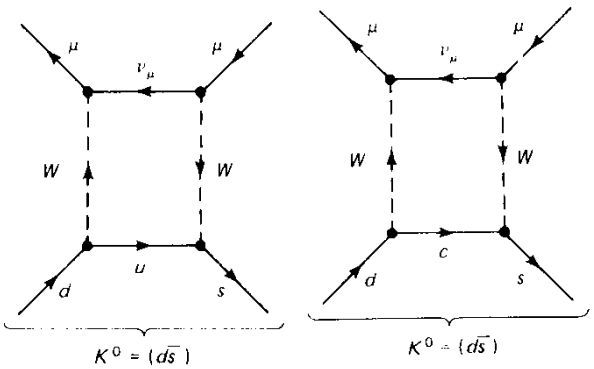




- propriedades incomuns
  - Massa elevada ≈ 3.1 GeV (próton ≈ 1 GeV)
  - Vida média elevada (≈ 1000x)
    - Semelhante as partículas estranhas
- Novo número quântico – c (charme)
- Proposto por Glashow, Iliopoulus & Maiani (1970)
  - simetria quarks ⇔ léptons

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \\ s \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \upsilon_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \upsilon_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$

  - Anomalias no decaimento $K^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$



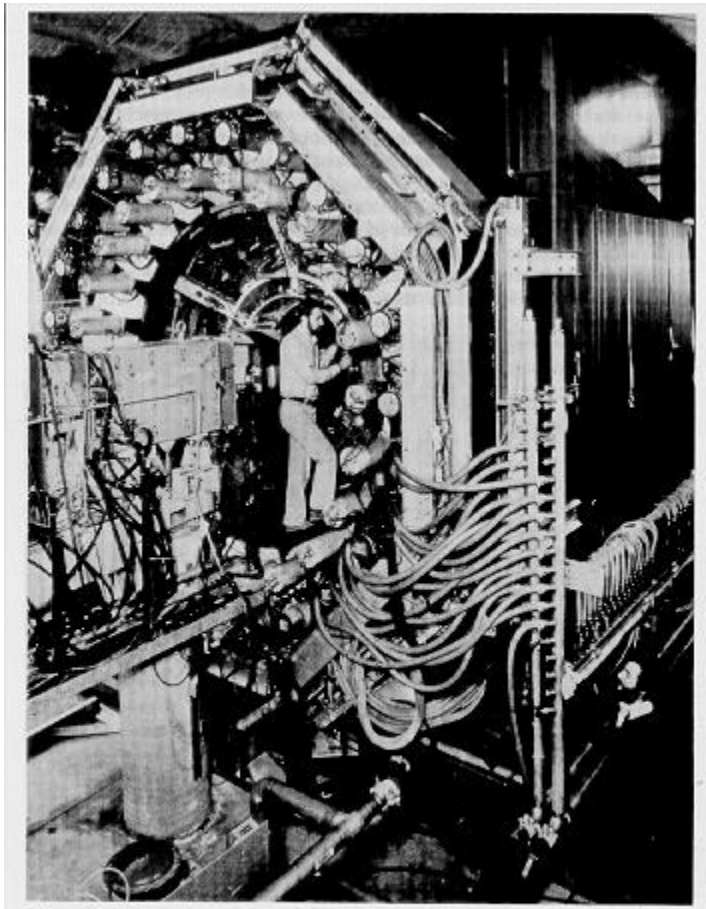
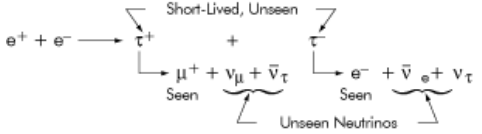
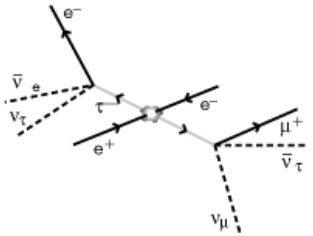
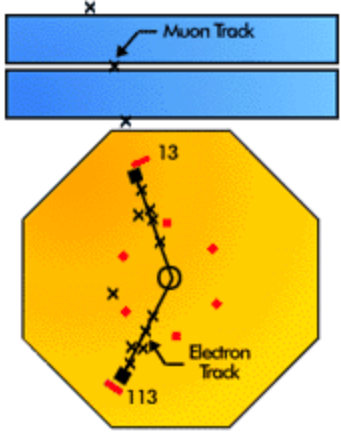


Photo 9B *Detecting the results of electron–positron annihilation at SPEAR* After the electron and positron have annihilated, new matter and antimatter can be created. This is detected by the array of electronic devices shown. Electrons enter at one end and positrons at the other end, the annihilation occurring in the tunnel behind Roy Schwitters. In this way the J/Ψ and charmed particles were discovered. (*Courtesy SLAC*)





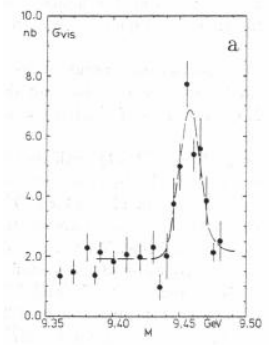


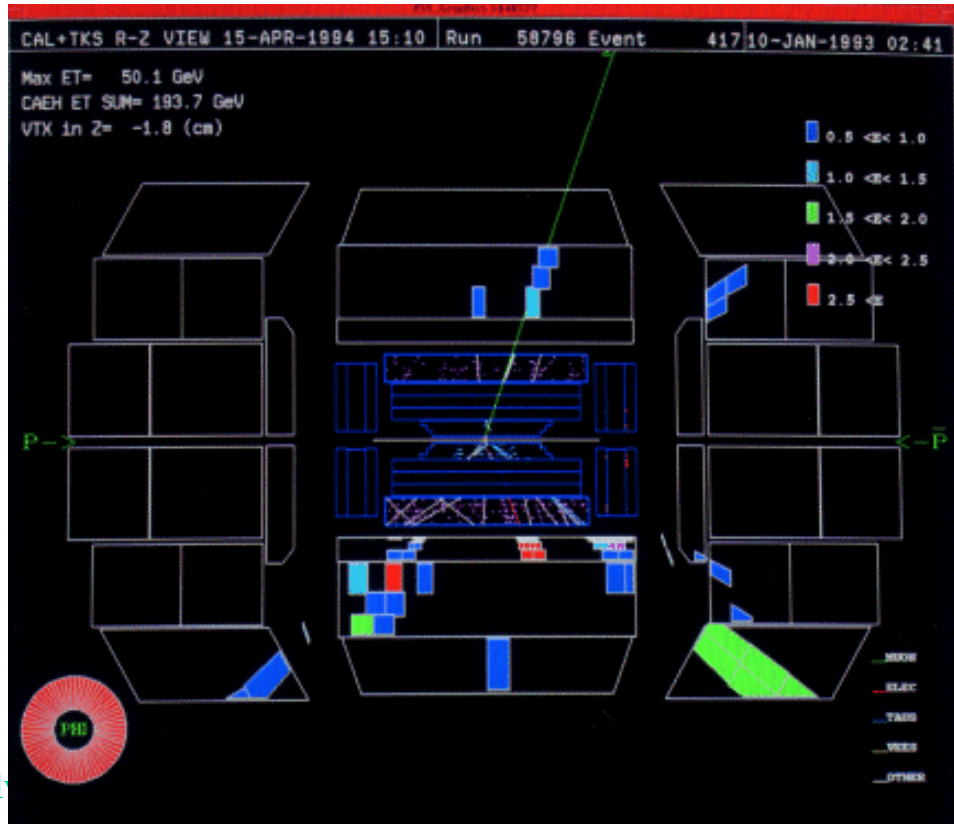
- O maior problema foi achar um nome...
  - Ting – méson J
  - Richter – méson ψ
  - no fim – méson J/ψ

- Novas partículas contendo charme (1975)
- Mas antes outra "pegadinha"

- Descoberta do lépton τ (1975)
- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ? \\ ? \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \upsilon_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \upsilon_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \upsilon_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

- 1977 – Lederman et al. → ϒ
- 1995 – DØ & CDF → top quark





Introdução Histórica - Mediadores

- 1923 – γ
- 1975 – gluon – eventos com 3 Jatos
- 1983 – W, Z
- Evidências de cor

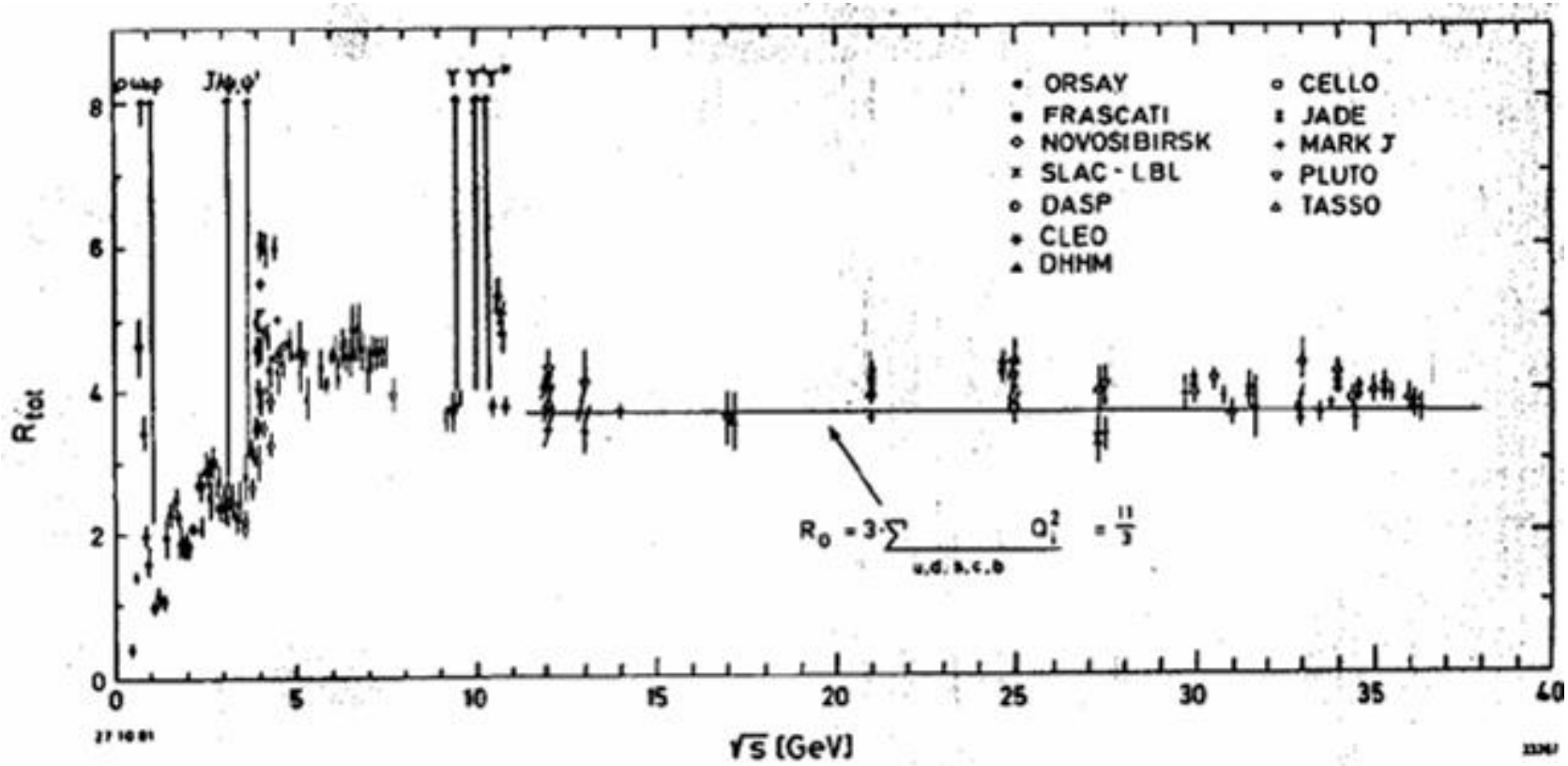


FIG. 1-9. The ratio $R \equiv \sigma(e^+e^- \to \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$. [Compiled by B. Wiik.]

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.

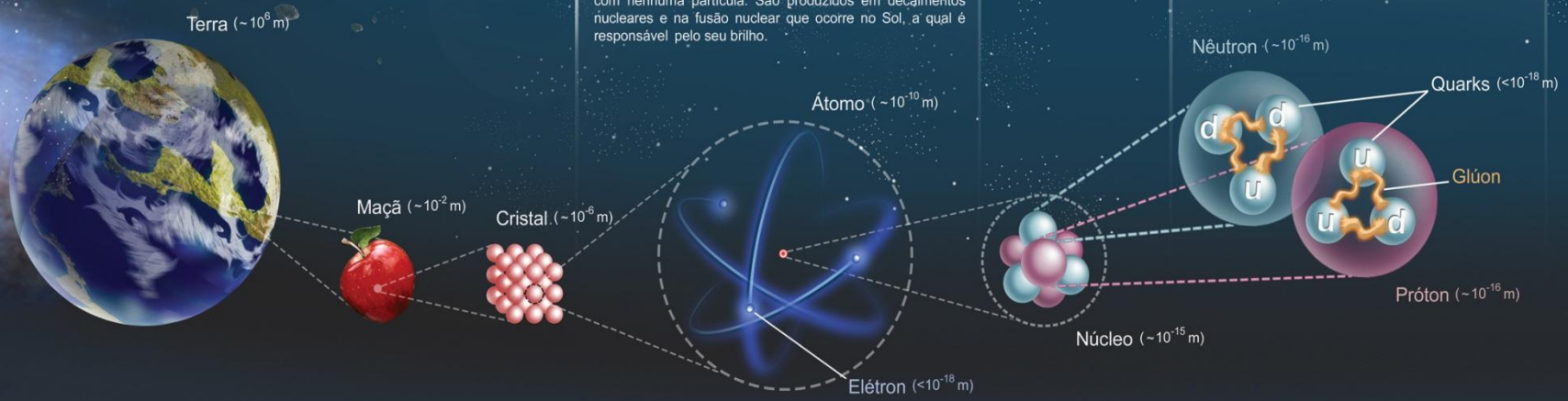
Os **neutrinos** (ν) são extremamente leves, não possuem carga elétrica e interagem muito fracamente, a ponto de serem capazes de atravessar toda a Terra sem se chocar com nenhuma partícula. São produzidos em decaimentos nucleares e na fusão nuclear que ocorre no Sol, a qual é responsável pelo seu brilho.

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°**. 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/

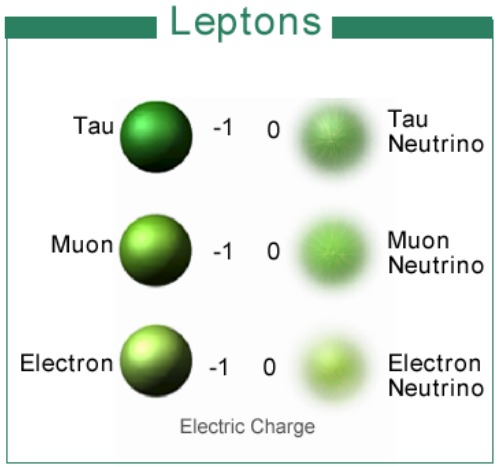
CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

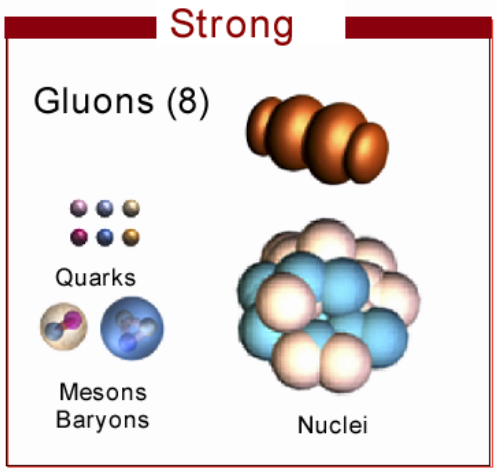
SPRACE

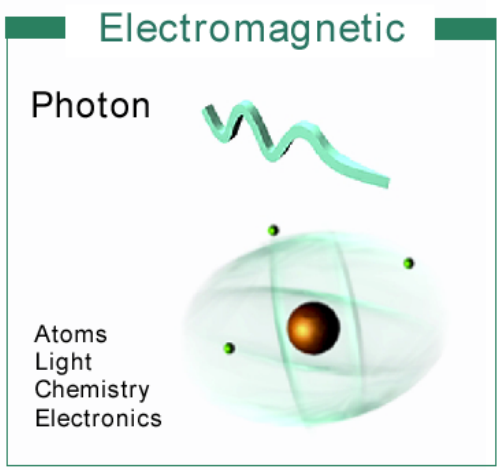
UFABC Universidade Federal do ABC

Modelo Padrão

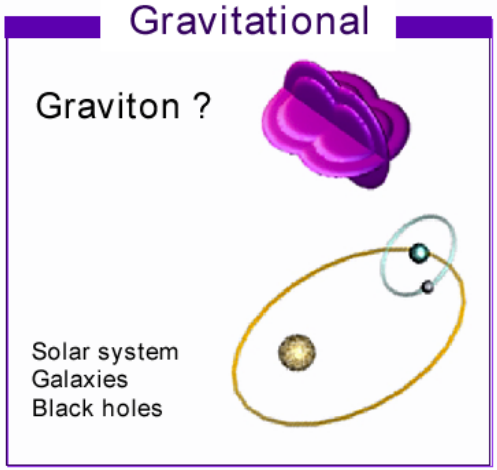
- 6 quarks e léptons (+ antipartículas)
- 4 interações (mediadores - γ, g, W/Z, graviton?)
- Todas partículas fundamentais (sem estrutura)

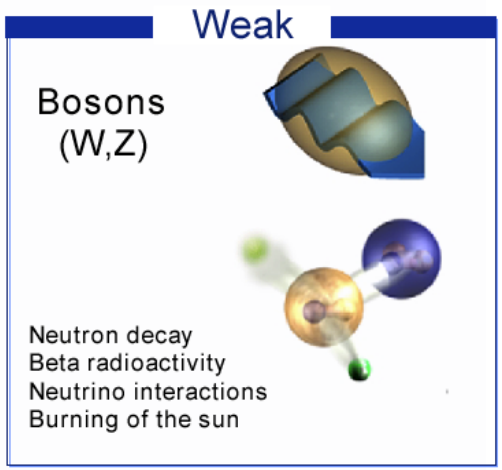










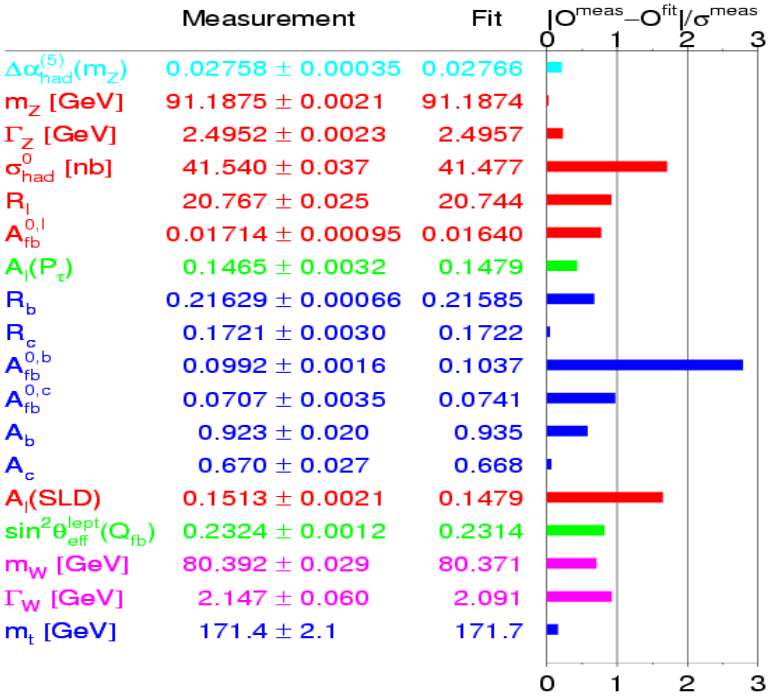


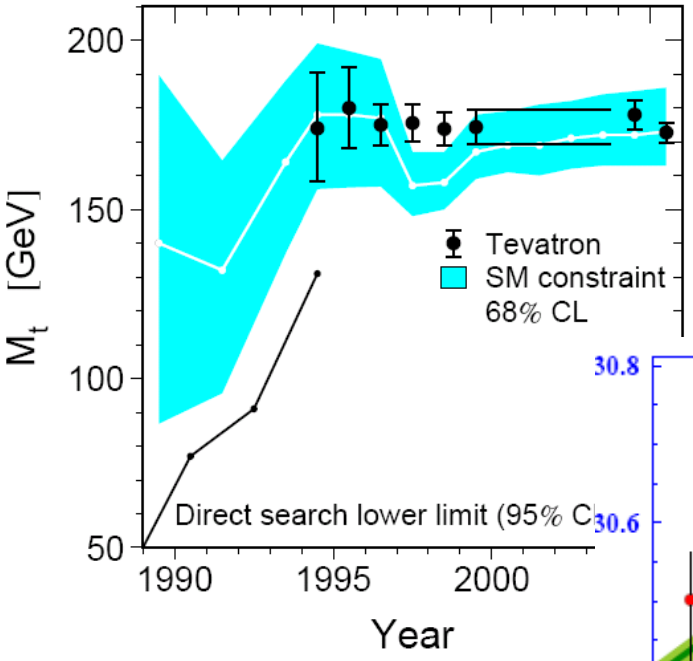
Vitórias do Modelo Padrão

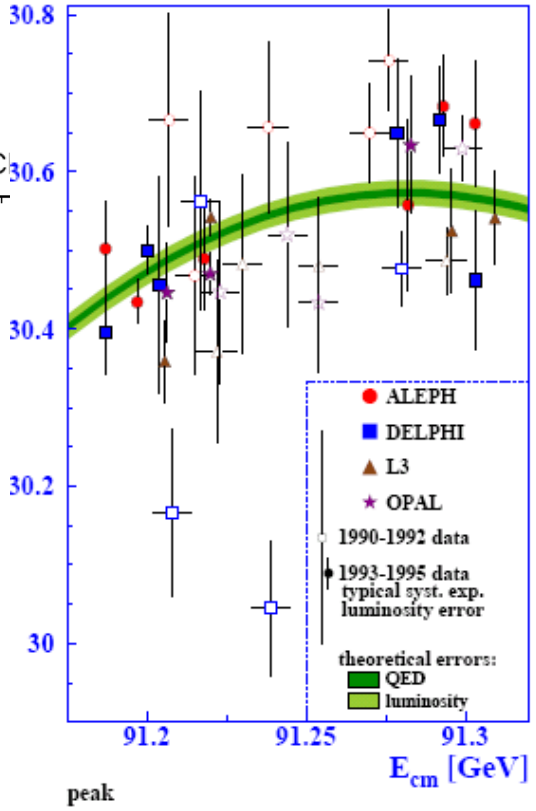
Lafex/CBPF

- Impressionante acordo com dezenas de medidas experimentais
  - Incluindo a massa do top
  - Produção de quarks pesados
  - Jatos
  - Assimetrias W, Z
  - ...

	Measurement	Fit
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}(m_Z)$	0.02758 ± 0.00035	0.02766
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1874
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4957
σ^0_{had} [nb]	41.540 ± 0.037	41.477
R_l	20.767 ± 0.025	20.744
$A^{0,l}_{fb}$	0.01714 ± 0.00095	0.01640
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1479
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21585
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1722
$A^{0,b}_{fb}$	0.0992 ± 0.0016	0.1037
$A^{0,c}_{fb}$	0.0707 ± 0.0035	0.0741
A_b	0.923 ± 0.020	0.935
A_c	0.670 ± 0.027	0.668
A_l(SLD)	0.1513 ± 0.0021	0.1479
$\sin^2\theta^{lept}_{eff}(Q_{fb})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314
m_W [GeV]	80.392 ± 0.029	80.371
Γ_W [GeV]	2.147 ± 0.060	2.091
m_t [GeV]	171.4 ± 2.1	171.7







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

  $M_p = 0.938$ GeV $M_{top} = 175$ GeV

  Raios Cósmicos $\approx 10^{20}$ eV (Lab)

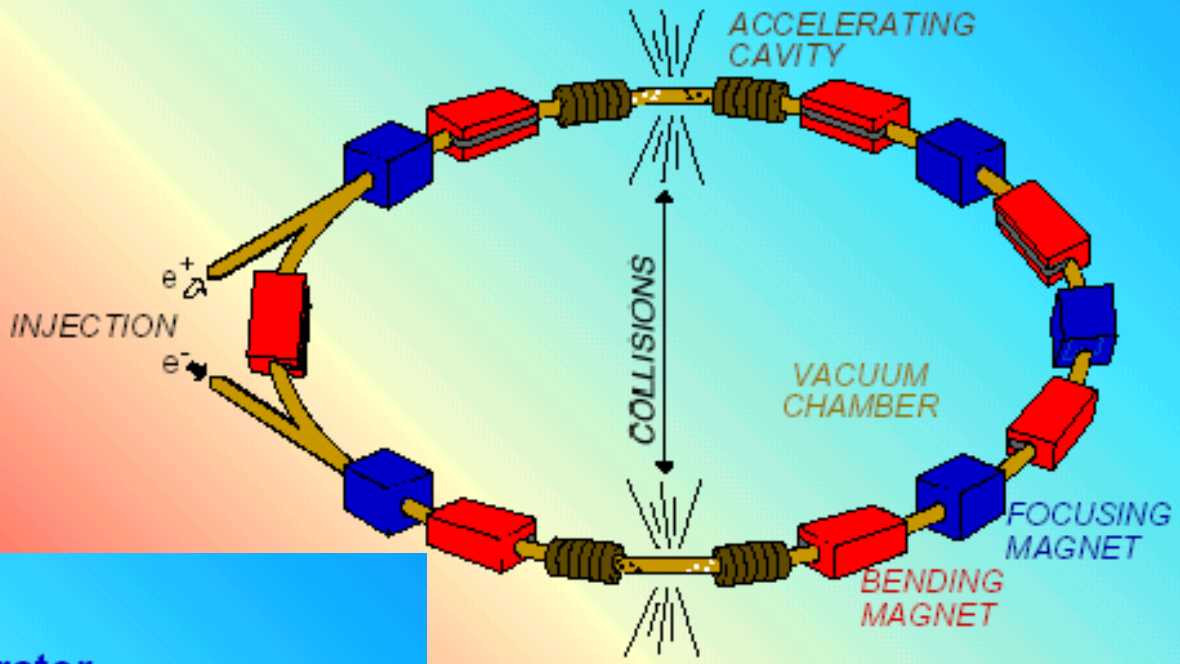
  Aceleradores $\approx 10^{12}$ eV (CM)

Aceleradores X Raios Cósmicos

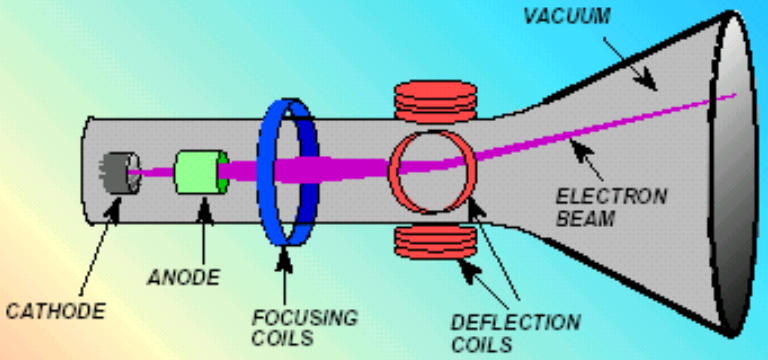
Energia limitada pela tecnologia ≈ 14 TeV	Energia limitada pela fonte cósmica ≈ 400 TeV**
Alta Taxa de eventos	Baixa taxa de eventos $1/km^2/ano$
Controle sobre as condições da interação (E, feixe, …)	Sem controle
Maior controle sobre fontes de erro	Menor controle

**** Energia disponível no sitema de centro de massa**

Accelerator Ring

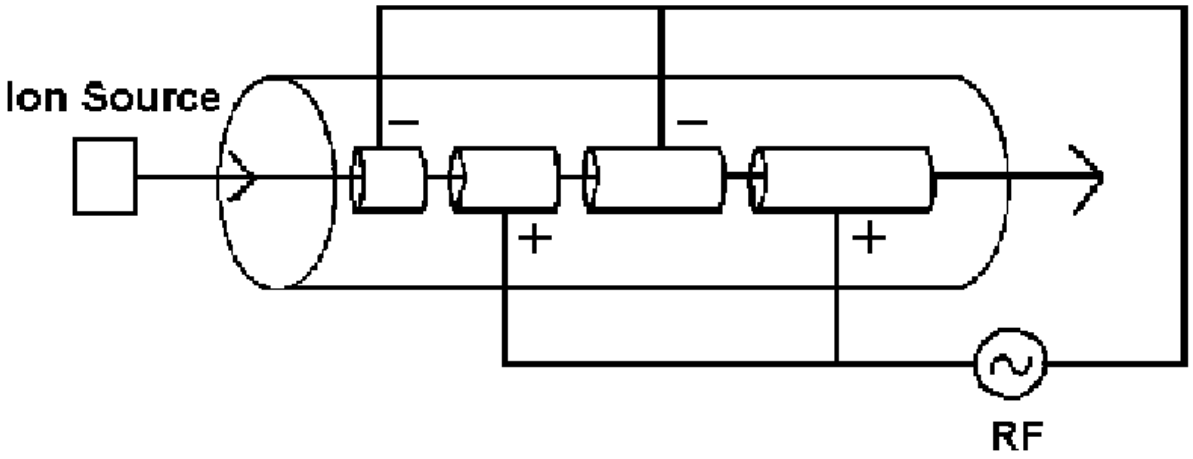


A Particle Accelerator

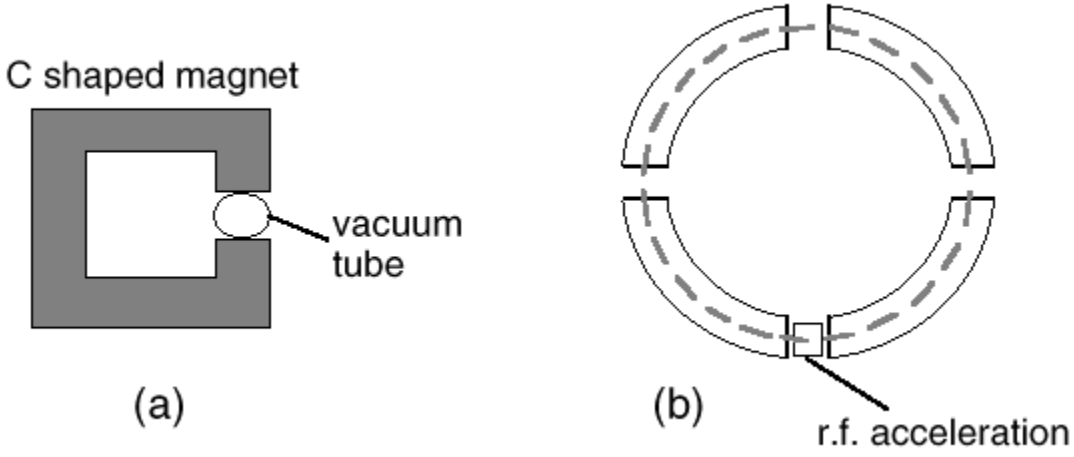


- the voltage in a T.V. is typically 20kV
- i.e. the energy of each electron is 20keV
- LEP electrons are 50 billion eV (50 GeV)
- 50 Gigavolts --> circular machine

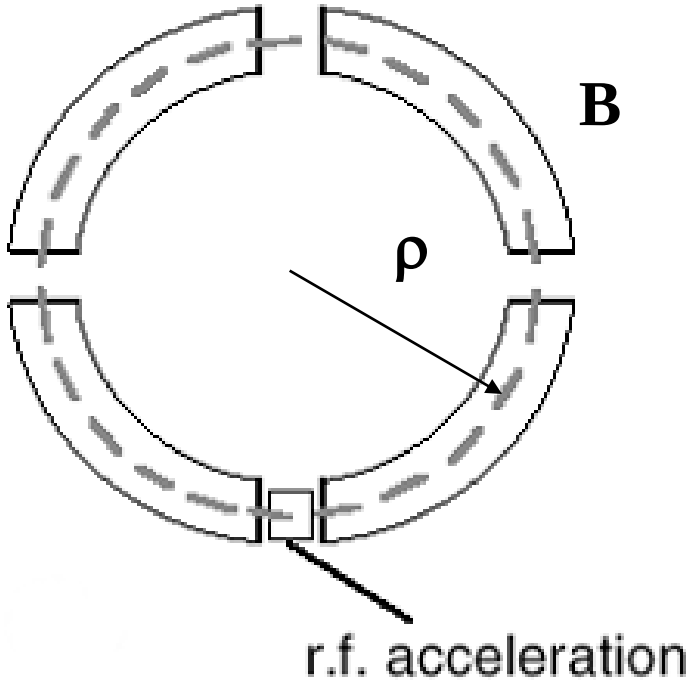
Aceleradores Lineares x Circulares



Limitados pelo comprimento radiação síncrotron≈Ø

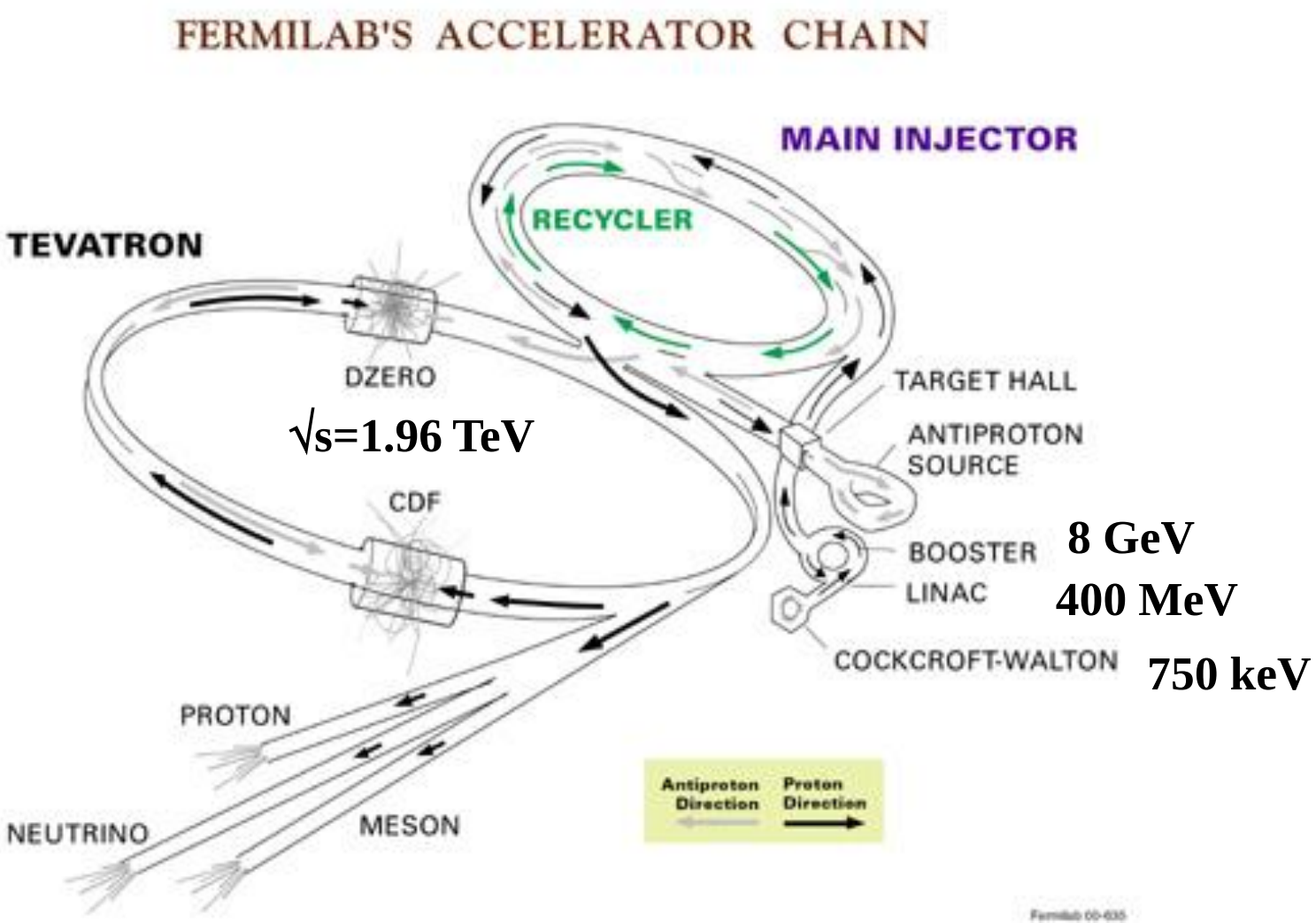


Limitados pelo campo magnético radiação síncrotron principalmente $e^{\pm}$ ($\Delta E \approx E^4/m^4$)

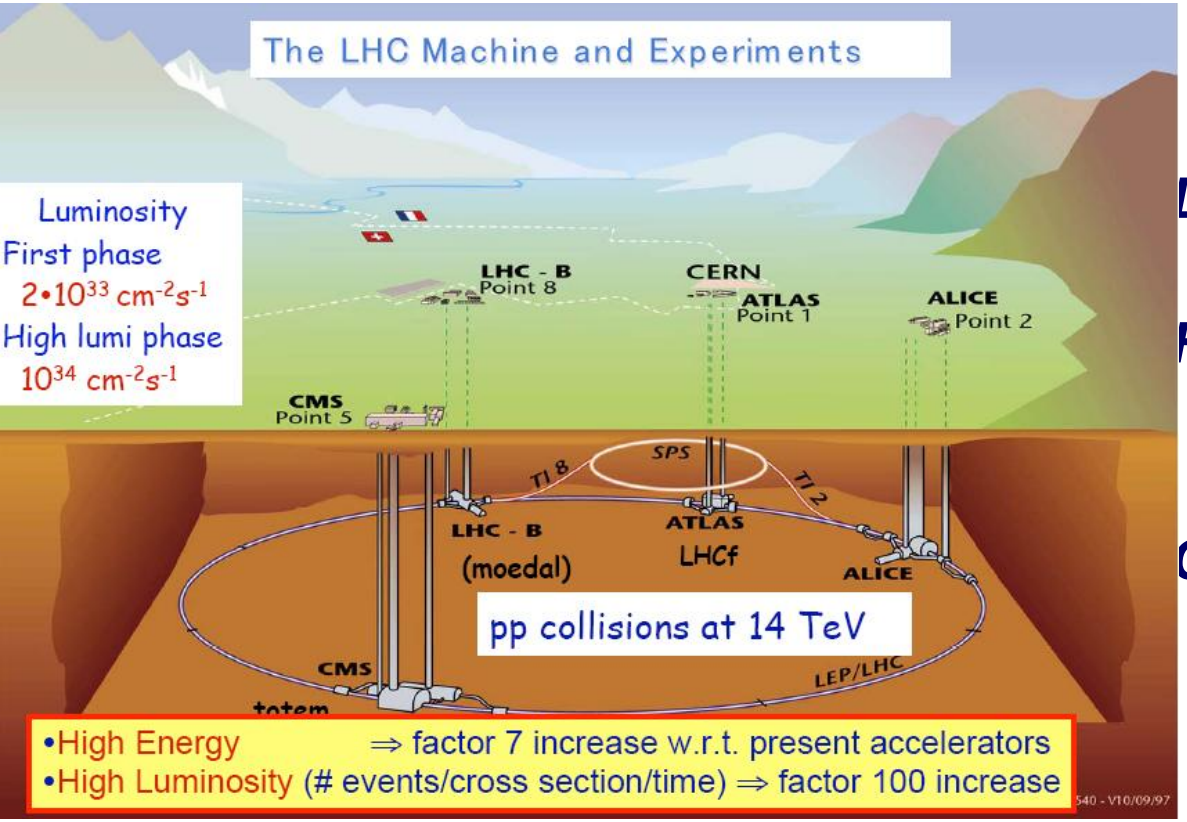


A cada ciclo a partícula é acelerada na cavidade de RF aumentando sua velocidade (momentum=p).
Para mante-la na órbita deve-se aumentar o campo magnético B de forma que $p = 0.3B\rho$

Utilizando-se partículas de mesma massa e cargas opostas, é possível utilizar o mesmo esquema para se criar um colisor. Os modernos aceleradores fazem uso de mais de um sistema de aceleração para se obter a energia desejada.



The Large Hadron Collider



Large
- 27 km de circunferência

Hadron
- prótons
- ions

Collider
- ~ 7 x mais energia
- ~ 100 x mais luminosidade
- Comparado ao Tevatron

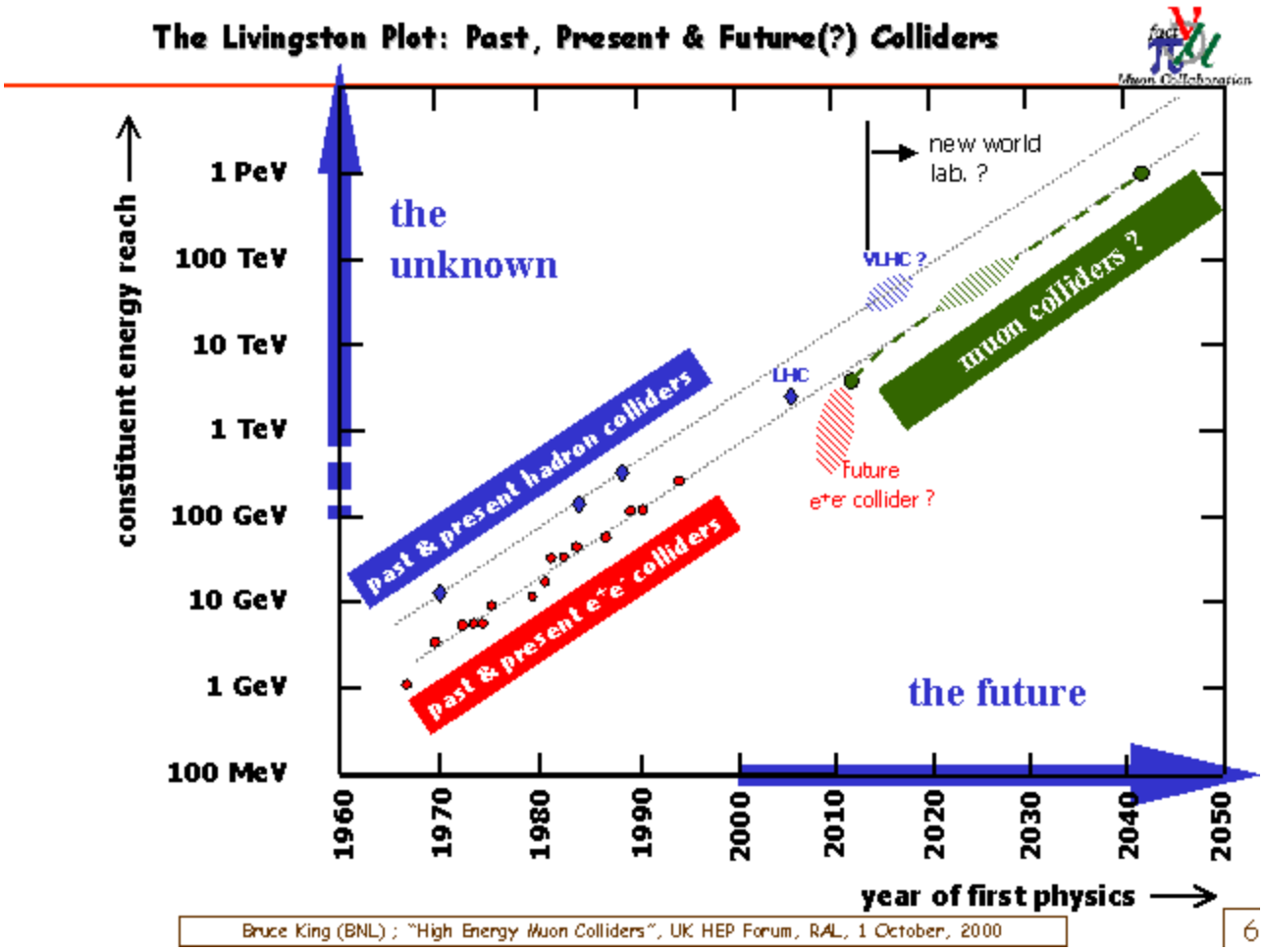
Próton - Próton
a √s = 14 TeV (**a partir de 2014/15)**

Luminosidade ~
~100 fb^{-1} / expt / Ano (**a partir de 2014/15)**

Aceleradores Lineares x Circulares II

⇔ Já vimos que a energia disponível para produção de novas partículas $\sqrt{2E}$ <=> 2E (alvo estacionário x colisão frontal)

⇔ Dai a utilização cada vez mais frequente de colisores de partículas



Detecção das Partículas

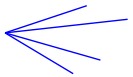
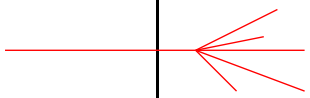
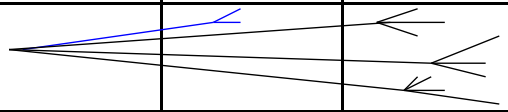
⇔ **Detecção == Interação**
A observação de uma partícula se dá através de sua interação com a matéria

⇔ **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. $\upsilon p \rightarrow ne^+$

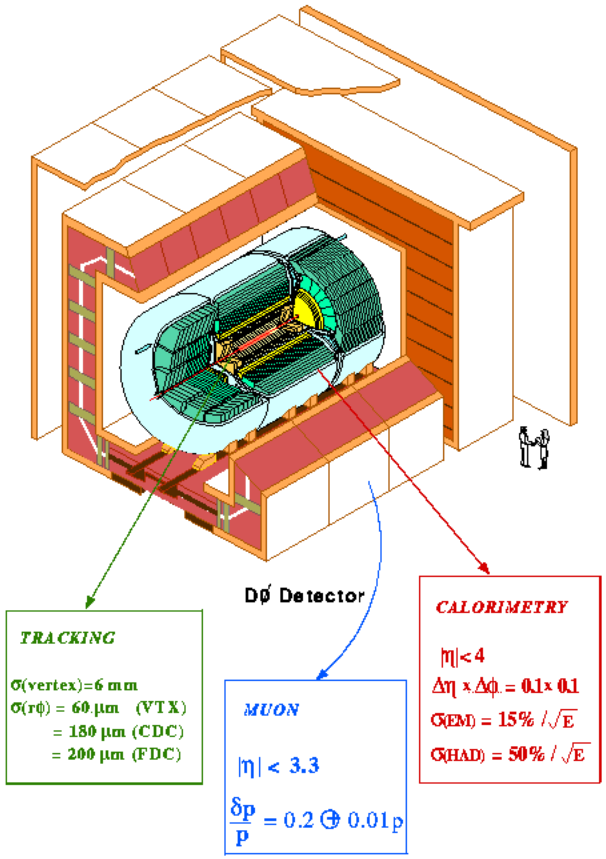
⇔ **Para observar o que ocorre em uma colisão em Altas Energias necessitamos de diferentes métodos de detecção.**

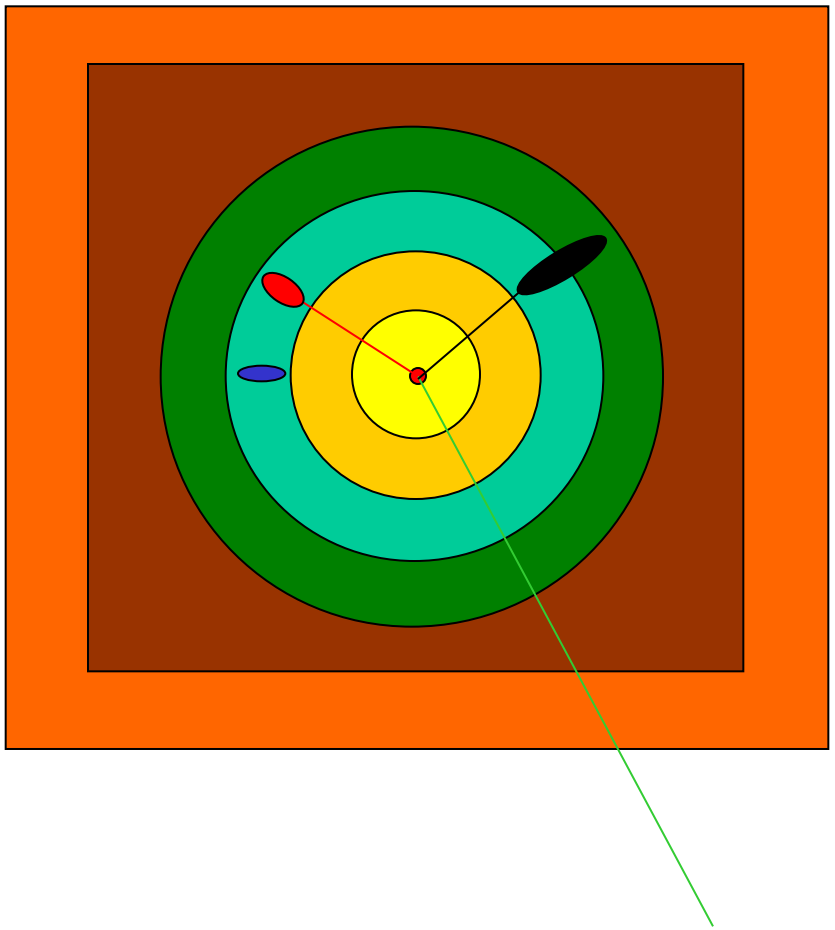
Subsistemas Detectores

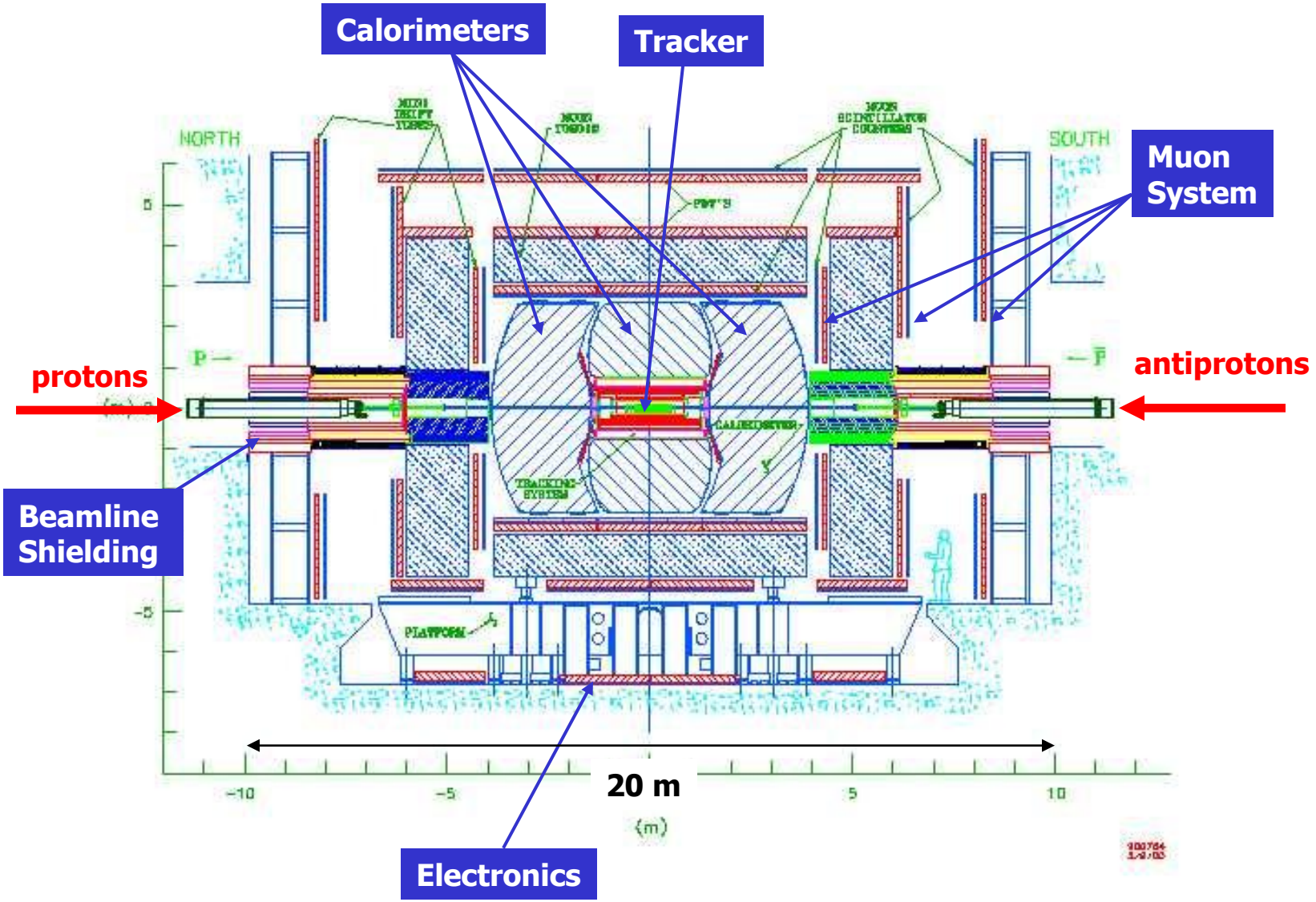
Partícula	Tracking	ECAL	HCAL	Muon
γ				
e				
μ				
Hadron				
neutrinos				

Usamos diferentes tipos de detectores para identificar uma determinada partícula.

Detector Típico em Colisores






Calorimeters
Tracker
Muon System
protons
antiprotons
Beamline Shielding
Electronics
NORTH
SOUTH
20 m
(m)

Medida de Posição

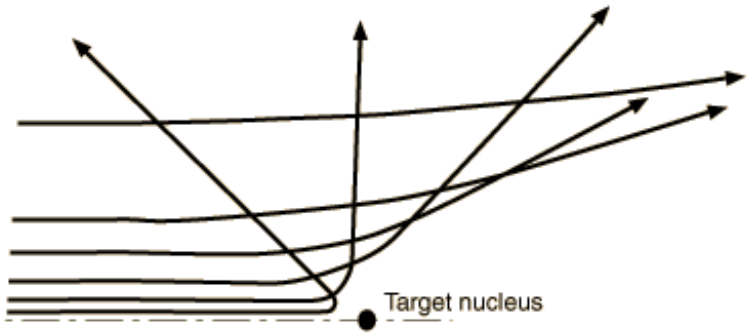
• Devido ao caráter destrutivo na detecção das partículas neutras, a medida de sua posição fica comprometida em termos de precisão.
• Vamos nos concentrar na medida de posição de partículas carregadas.

• **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 -

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

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.**

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

- **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

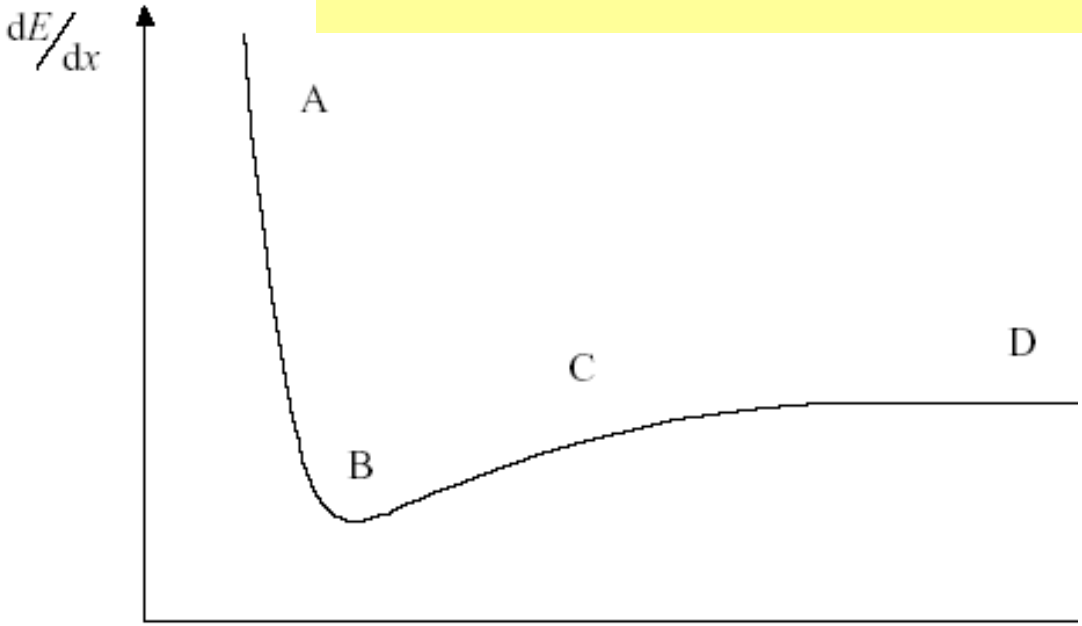
- **Ionização -interação com a camada eletrônica.**
  Processo dominante para todas as partículas carregadas(exceto elétrons)

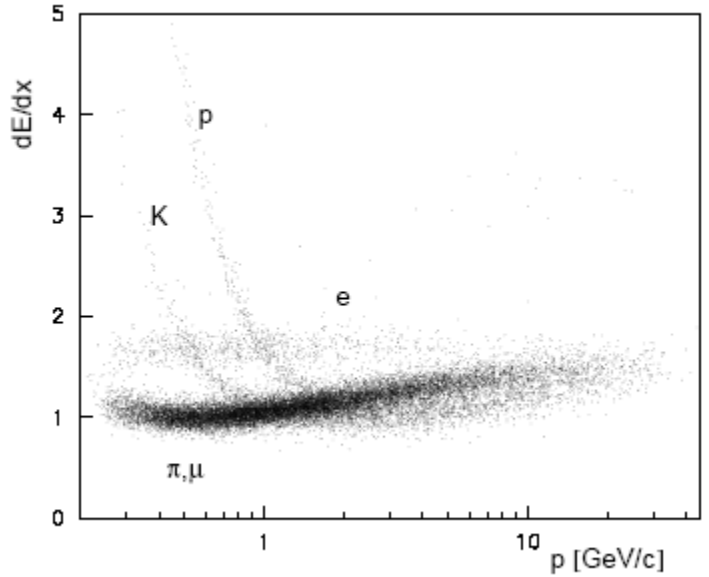
$$\overline{\Delta E} = C\frac{m_e c^2}{\beta^2}\frac{Z z^2}{A}\rho\Delta x\left[\ln\left(\frac{2\gamma^2\beta^2 m_e c}{I_0}\right) - \beta^2 - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2}\right]$$

- $C = -4\pi N_A r_e^2$
- 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

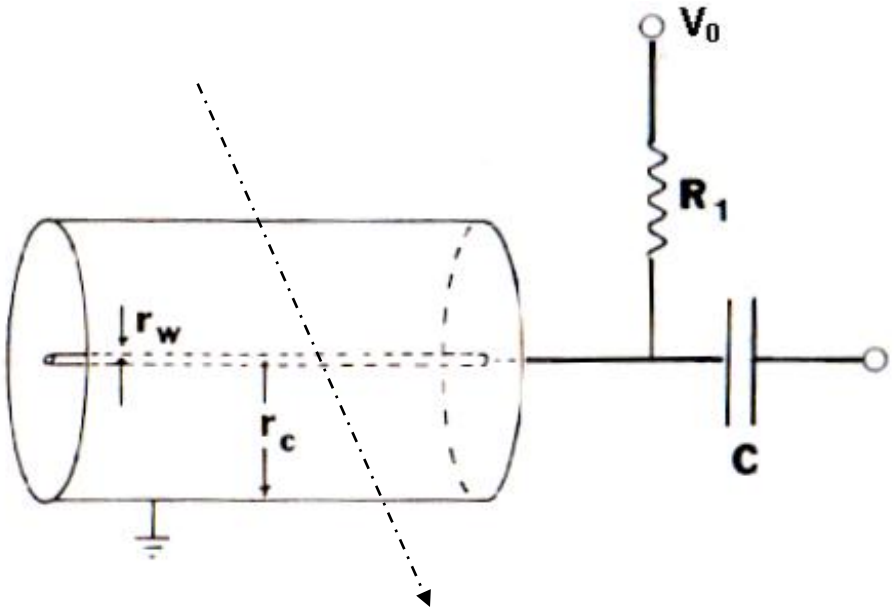
$$\overline{\Delta E} = C\frac{m_e c^2}{\beta^2}\frac{Z}{A}\rho\Delta x\left[\ln\left(\frac{2\gamma^2\beta^2 m_e c}{I_0}\right) - \beta^2 - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2}\right]$$





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

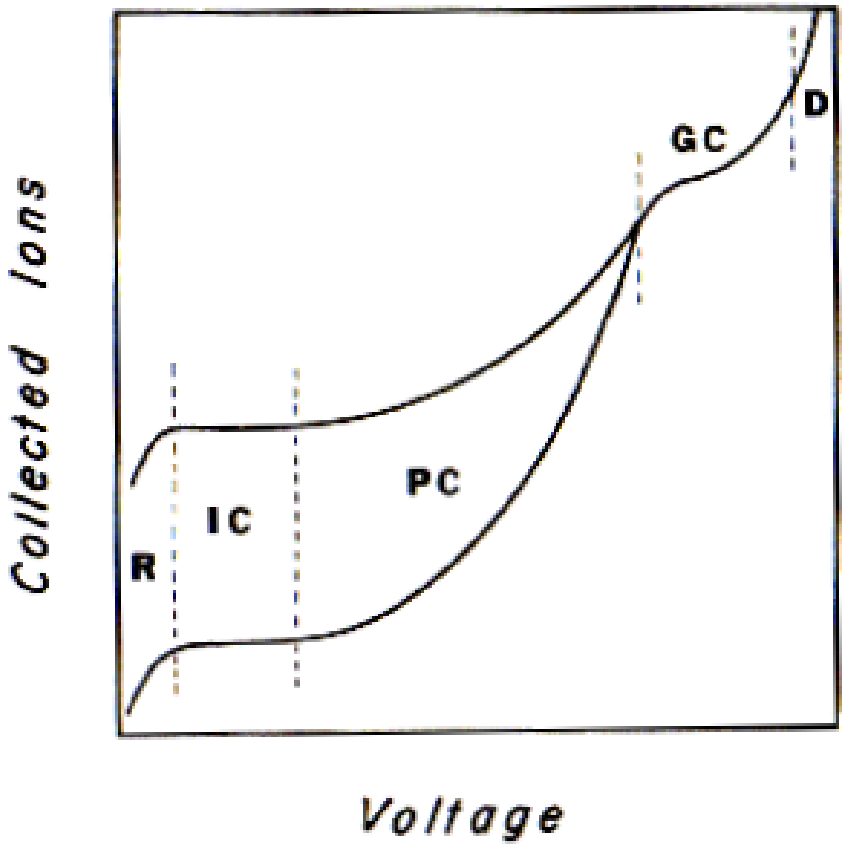
Câmaras Proporcionais



⇔ 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

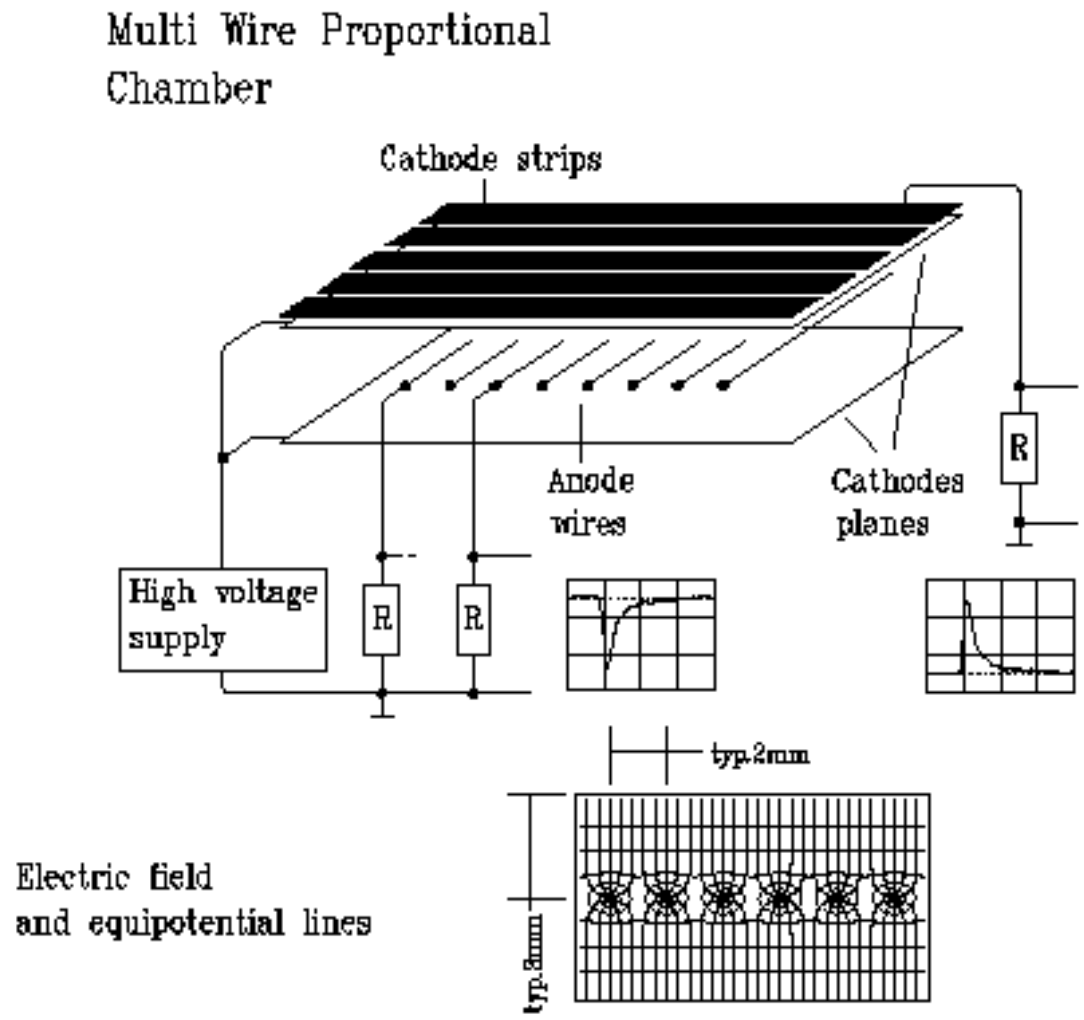
$$\Delta V = [Mze/CV_0]\, dV/dr \,.\, dr$$

⇔ M - fator de amplificação do gas $\approx k e^{CV_0}$ 10^4 - 10^6 no regime proporcional



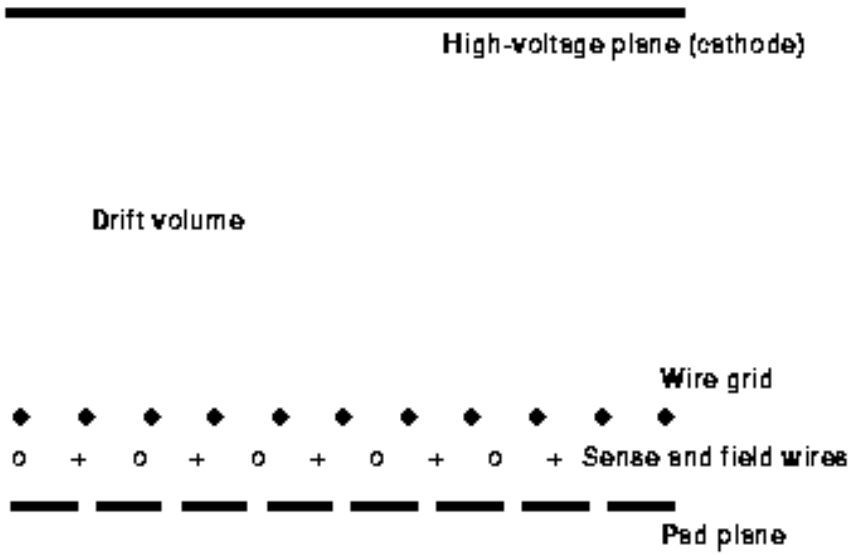
- R - regime de recombinação dos ions
- IC - regime de ionização
- PC - regime proporcional
- GC - regime Geiger

Câmaras Proporcionais a Multifios



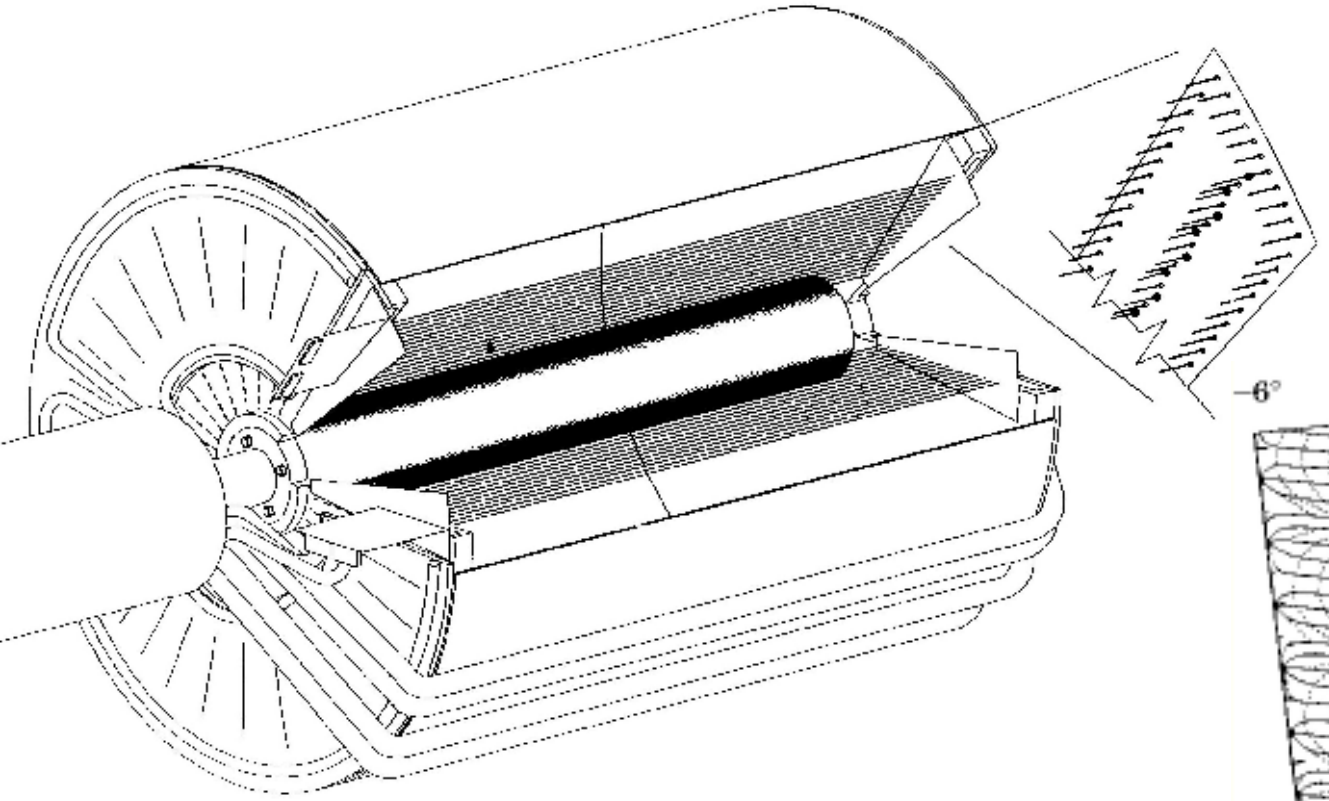
- catodo dividido em tiras fornece 2 coordenadas
- resoluções ≈ 100μm em ambas cordenadas
- sinais induzidos em cada fio ≈ 100mV (10 μA) - $V_0 \approx 4kV$

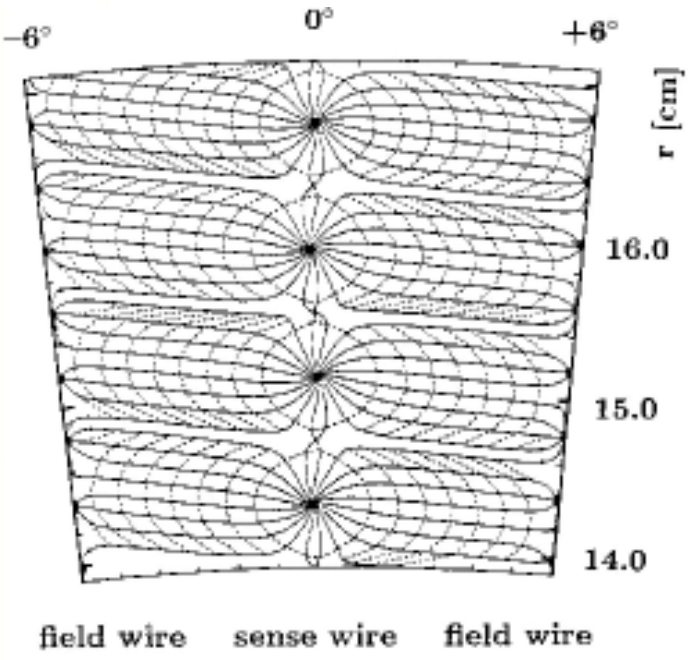
Câmaras de Arraste (Drift Chambers)



- semelhante às câmaras proporcionais - medida do tempo de migração dos e^-
- fios adicionais para melhorar a uniformidade do campo - velocidade dos e^-
- sinais induzidos ≈ câmaras proporcionais
- resoluções ≈ 100μm x 1mm
- permitem cobrir maiores áreas - menor custo
- adequadas para detectores em alvo fixo e colisores

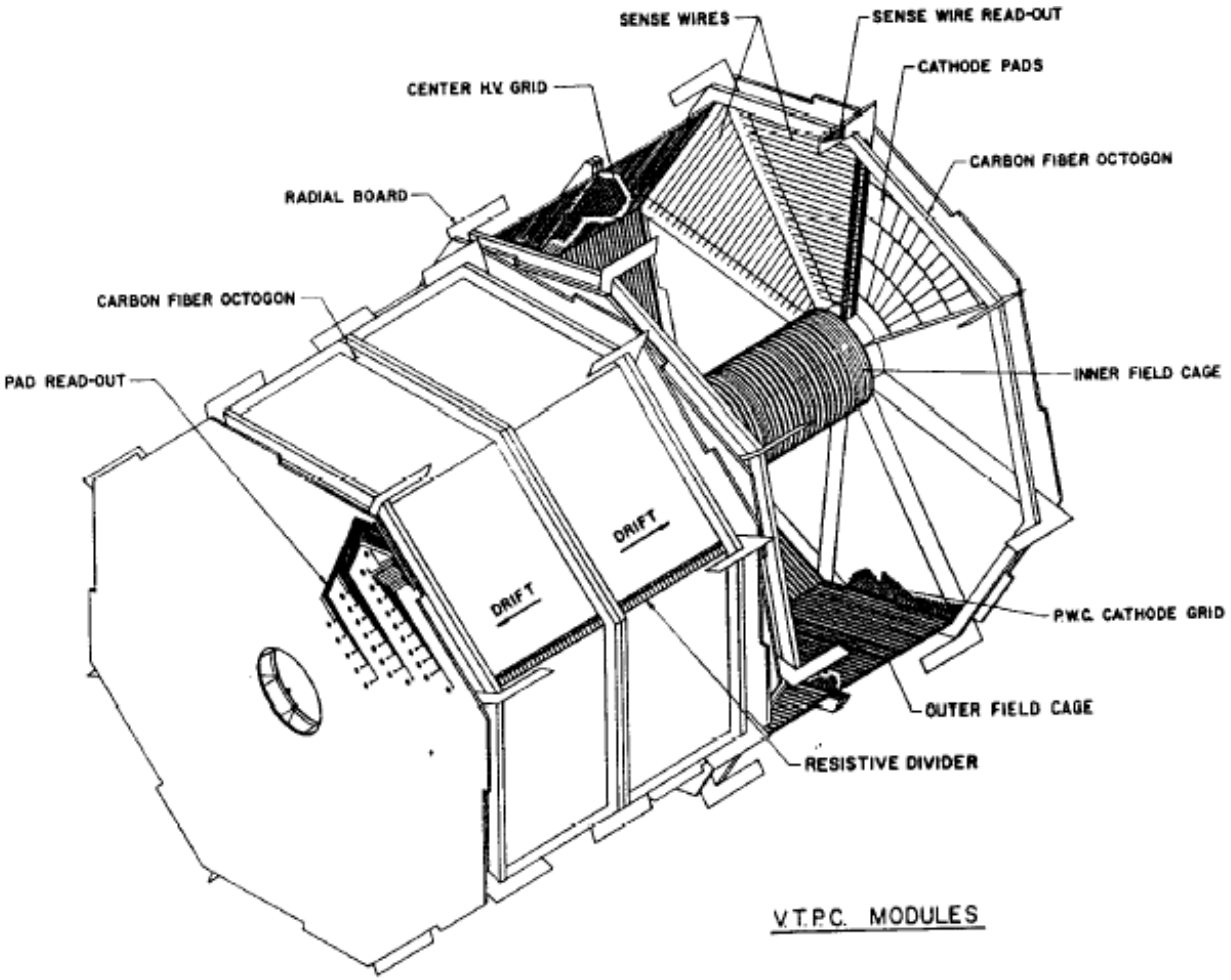
Esquema de uma Câmaras de Arraste em um experimento de colisor de partículas. Várias células individuais são agrupadas em umas estrutura cilíndrica.



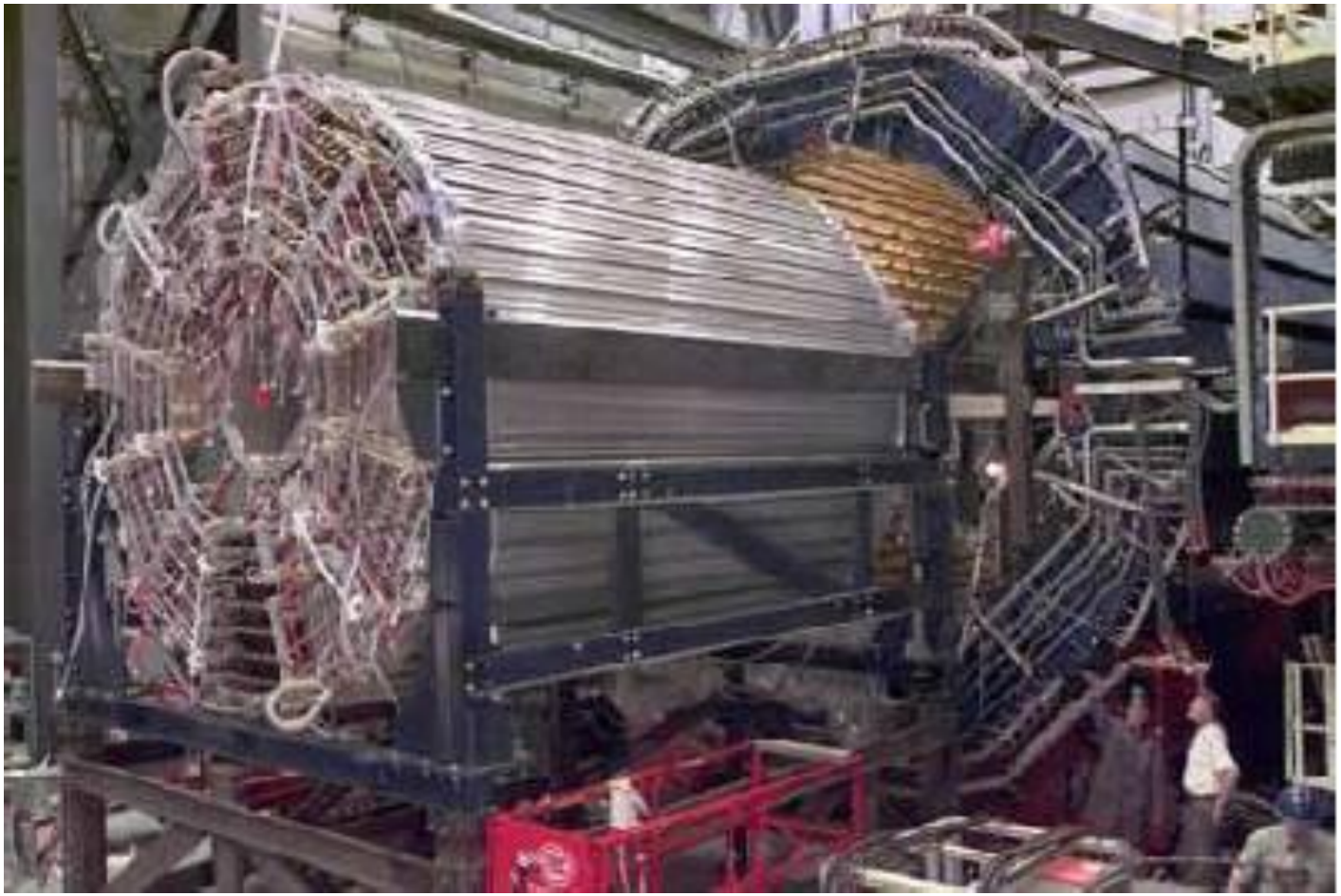


Câmaras de Projeção Temporal (TPC)

Tipo especializado de câmara de arraste que permite a determinação da posição 3D da partícula utilizando um grande volume de migração.



Câmaras de Projeção Temporal (TPC) do experimento STAR no RHIC



• 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

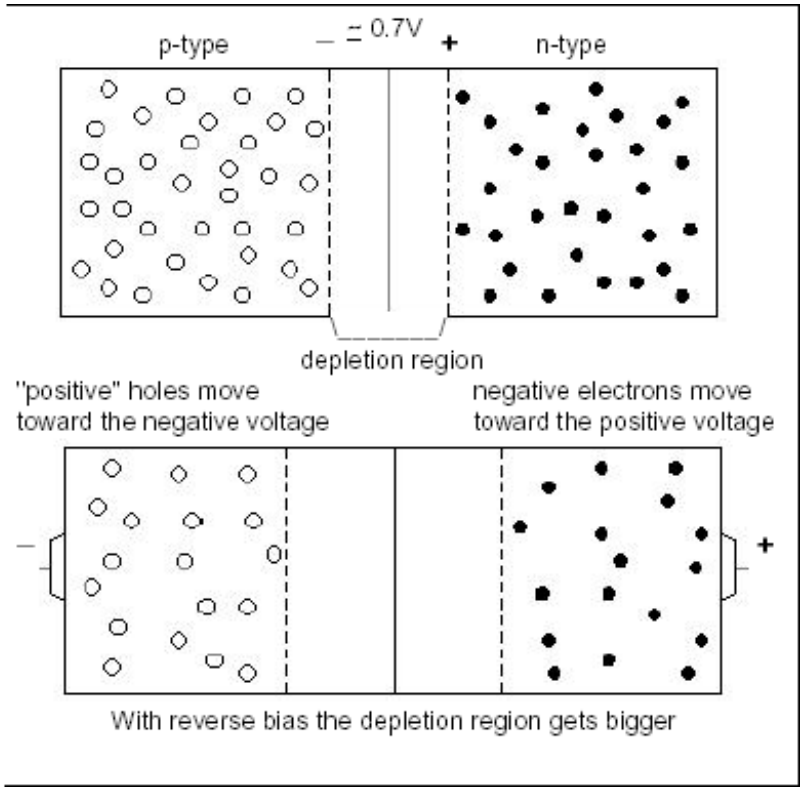
Energia de ionização = 1.1eV Si, 0.7eV Ge (30eV para gases)

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

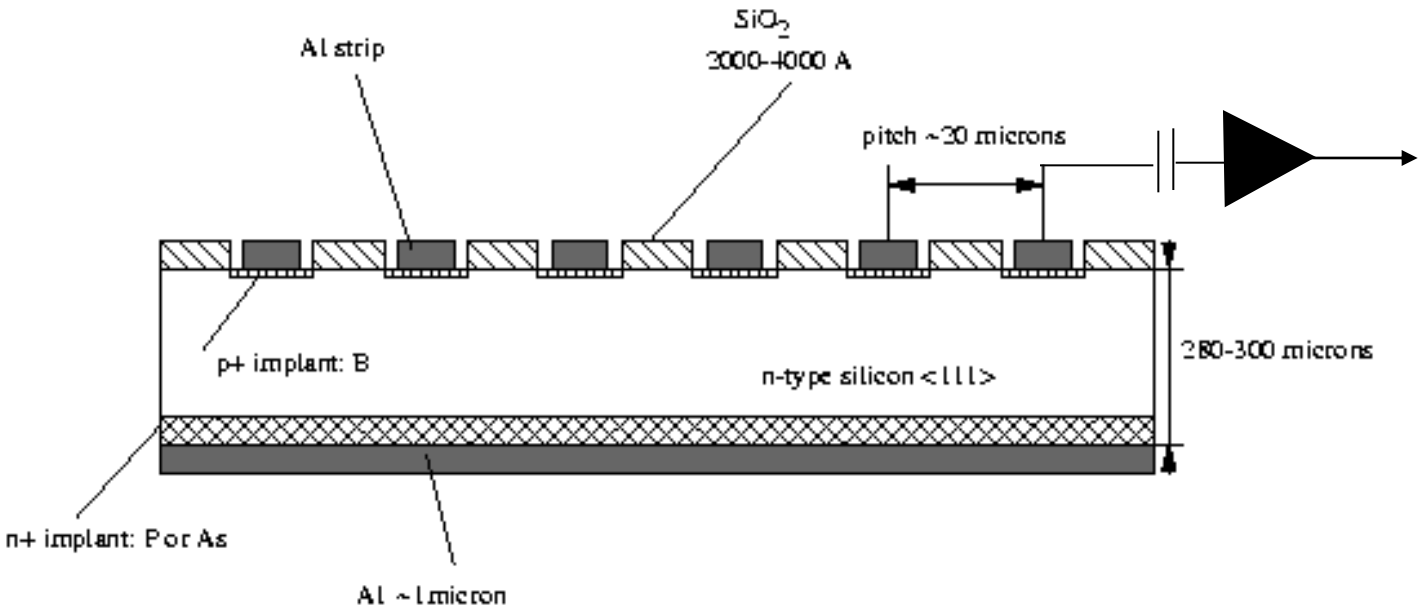
μ_e - mobilidade dos elétrons

ρ - densidade do dopante

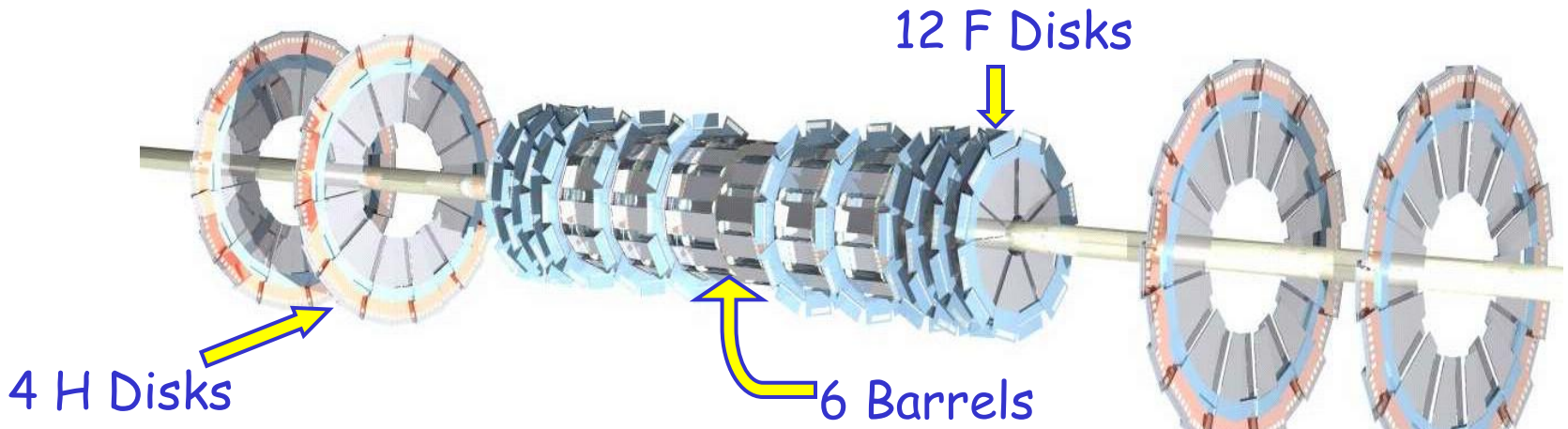
$V_B \sim 100V$

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

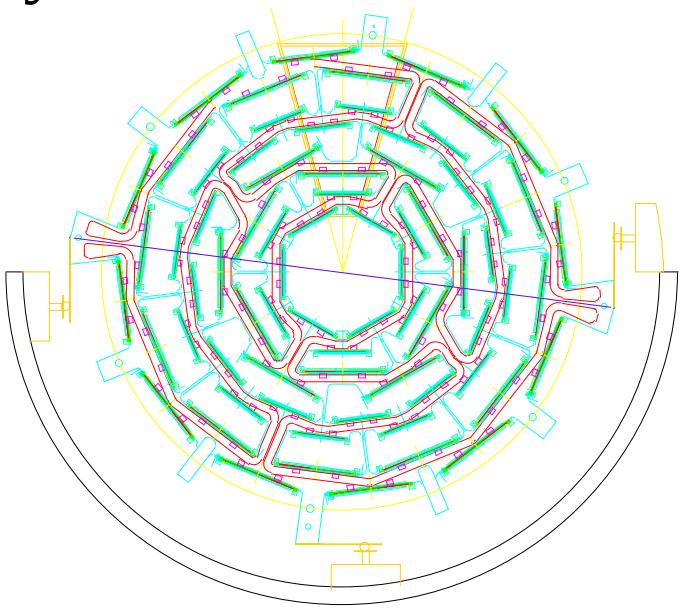
- **Amplificação para cada canal ou usando divisão de cargas**



SMT Design

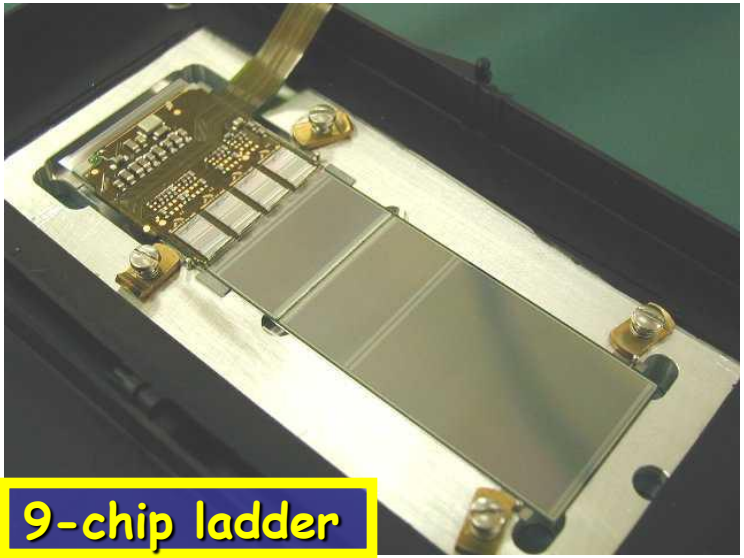


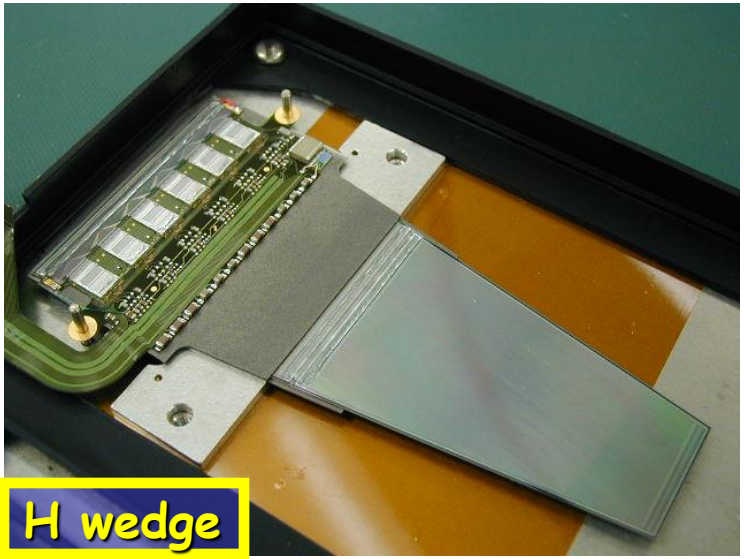
4-layer barrel cross-section



	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

SMT Design: Stereo Angles

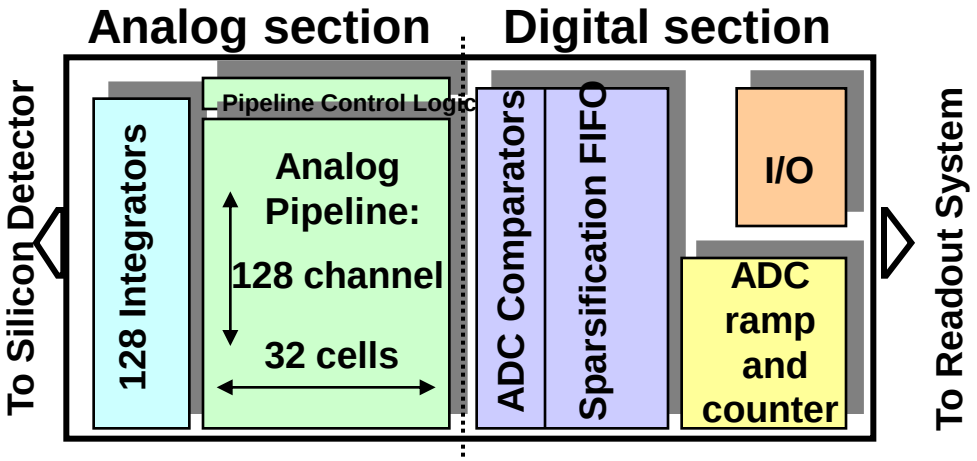




- Ladders
  - 3-chip: 72 single-sided, axial ladders in the two outer barrels
  - 6-chip: 144 double-sided, axial/90° ladders in the four inner barrels
  - 9-chip: 216 double-sided, axial/2° ladders in all barrels
- Wedges
  - F Disks: 144 double-sided, ±15°, 6+8 chip wedges
  - H Disks: 96×2 back-to-back single-sided, ±7.5°, 6 chip wedges

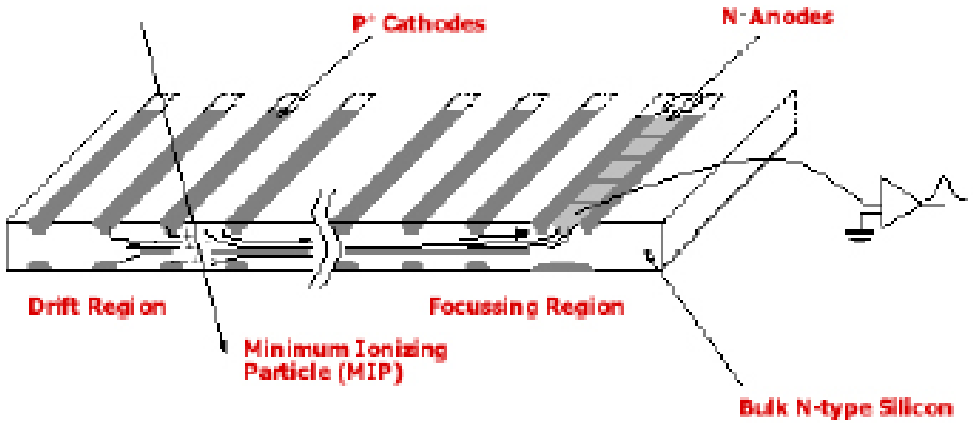
SMT Readout Electronics

- SVX IIe Chip
  - 128 channel, 32 pipeline cells
  - 8 bit ADC with sparsification
  - 106 MHz digitization, 53 MHz readout
  - Radiation hard
  - Developed by LBL/Fermilab group



- Interface Boards
  - Refresh signals and adjust timing
  - Power management and monitoring
- SEQencers
  - Management of SVX
  - Conversion to fiber optics
- VRB (VME Readout Buffer)
  - Data buffer pending L2 trigger decision
  - ~ 50 Mb/s/channel
  - 5-10 kHz L1 accept
  - →1 kHz L2 accept rate

- **Silicon Drift Detectors**
- **resoluções ≈ 10μm em ambas cordenadas = pixel**
- **redução no número de canais de eletrônica**



• 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.

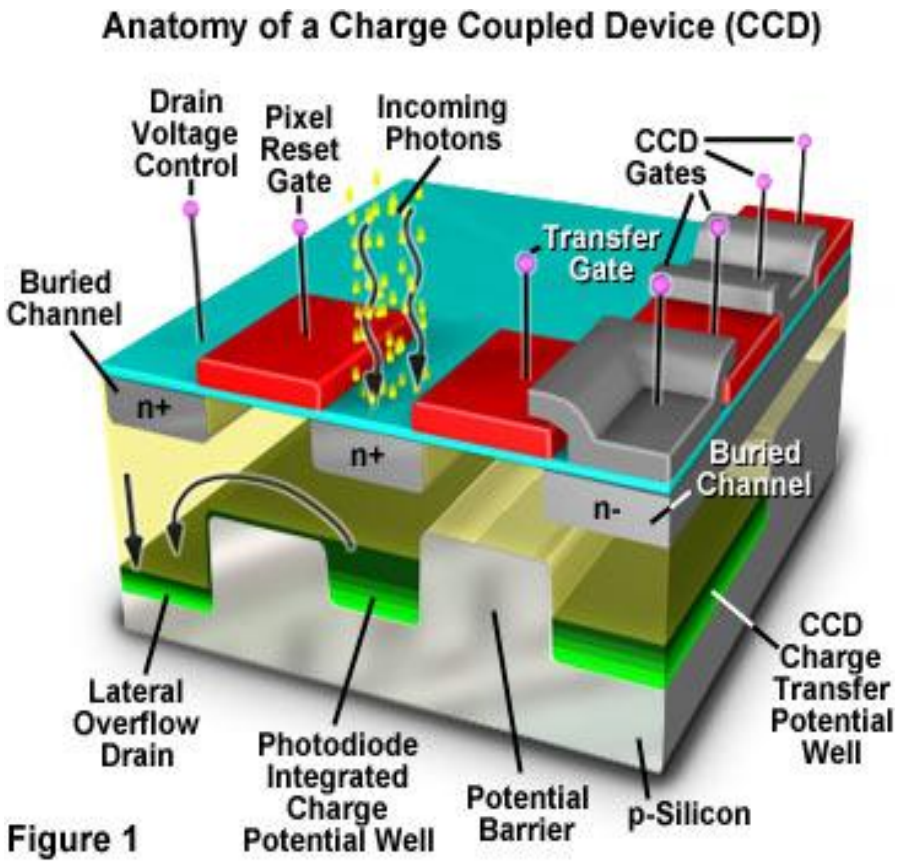
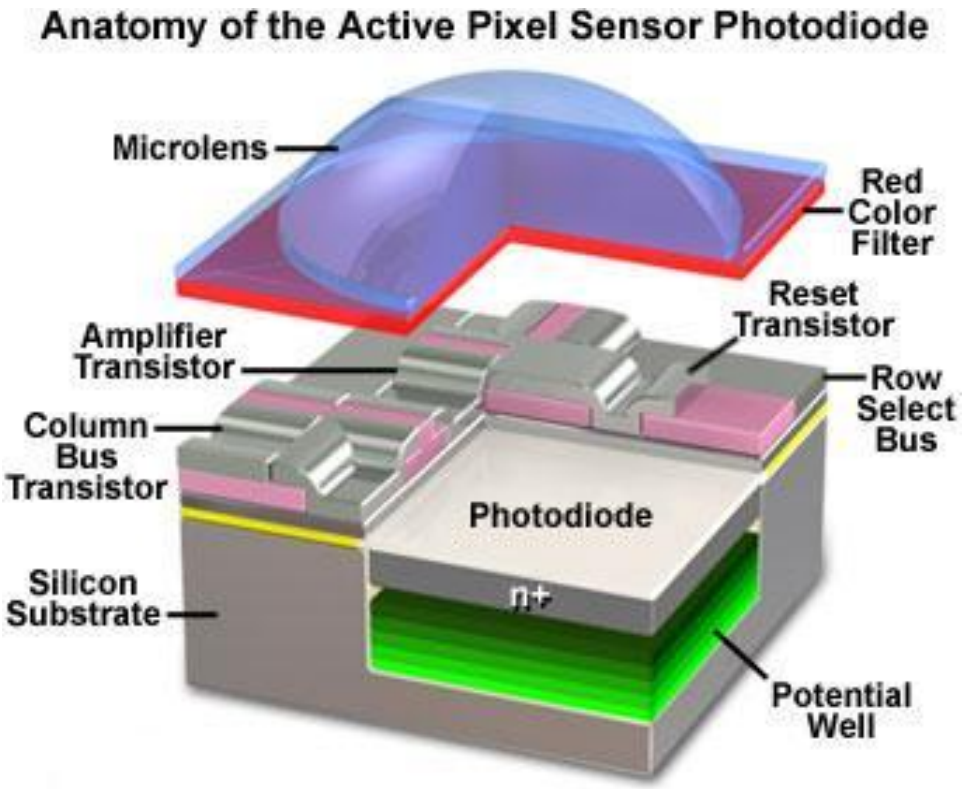


Figure 1

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



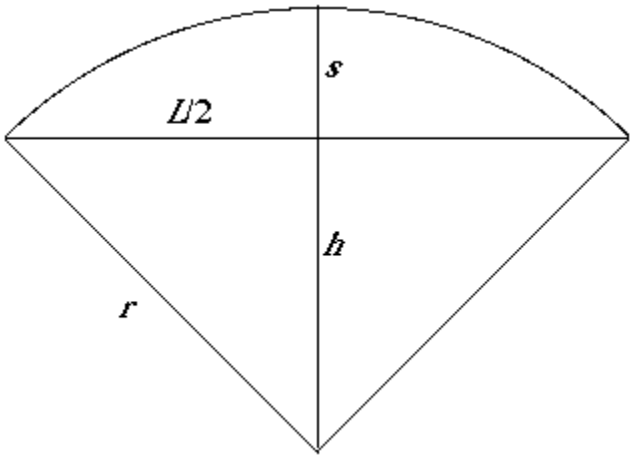
Medida de Momentum

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

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

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

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



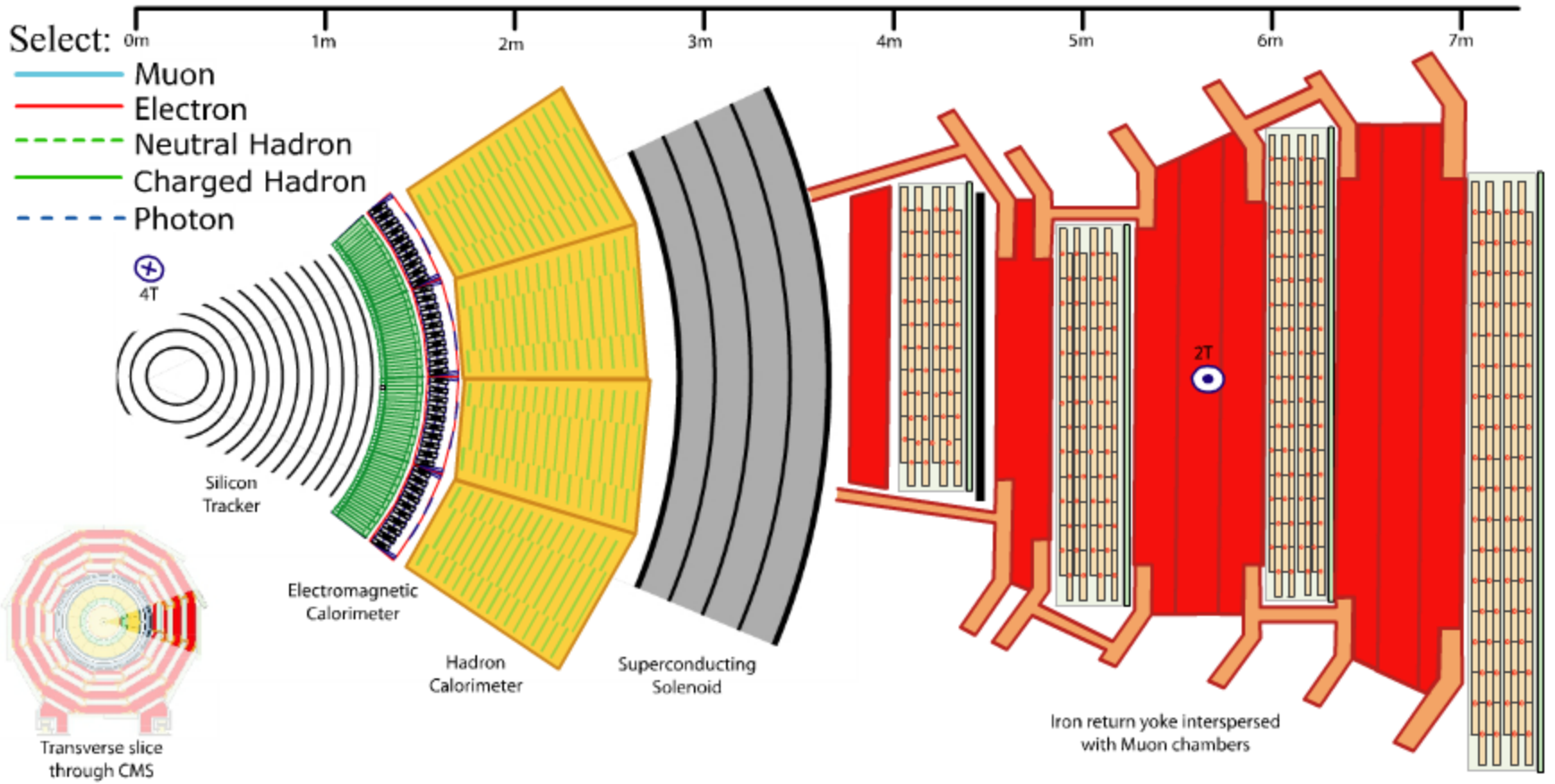
• **Deve-se medir vários pontos da trajetória da partícula para se obter um valor preciso do momentum p.**

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

Transverse slice through CMS detector

Click on a particle type to visualise that particle in CMS

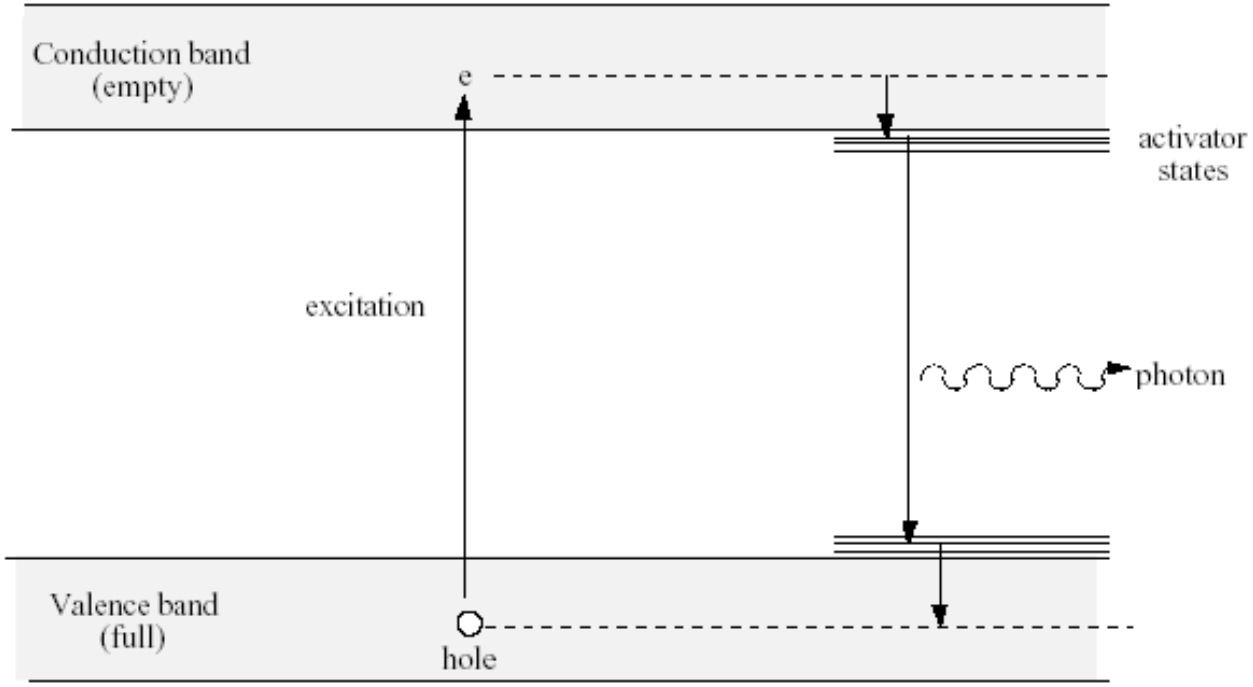
Press “escape” to exit



Medida de Tempo

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

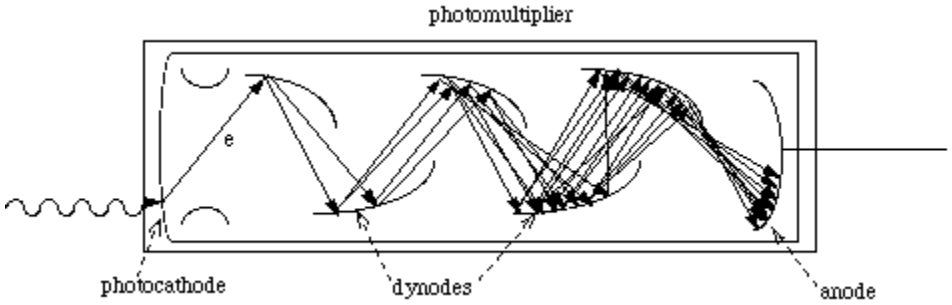
- Materiais Cintiladores oferecem rápida resposta à passagem de partículas
  - Princípio => Utilizam excitação molecular ao invés de ionização



(Energy gap about 4 eV)

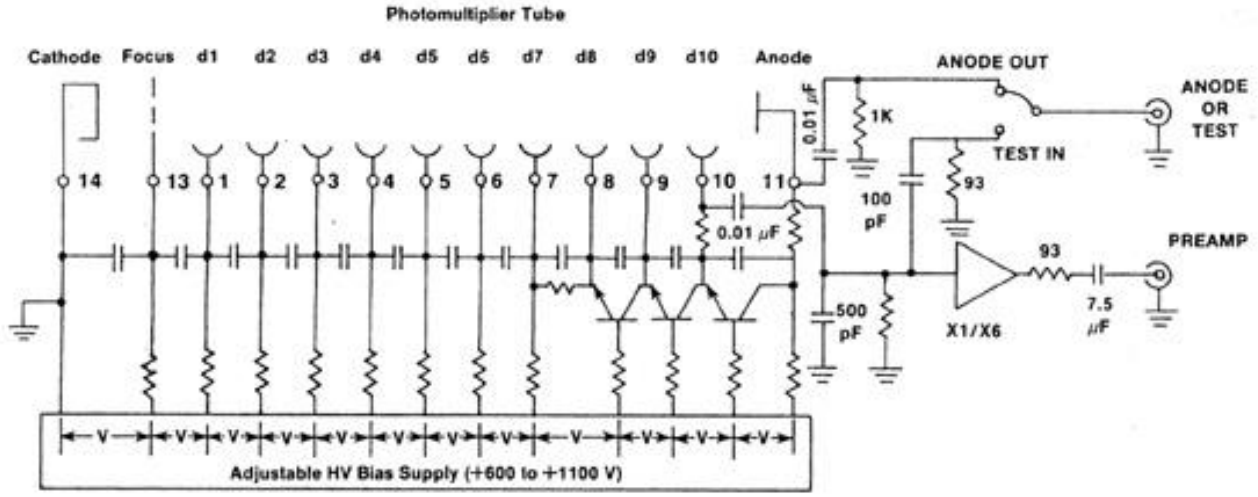
Cintiladores

- **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**

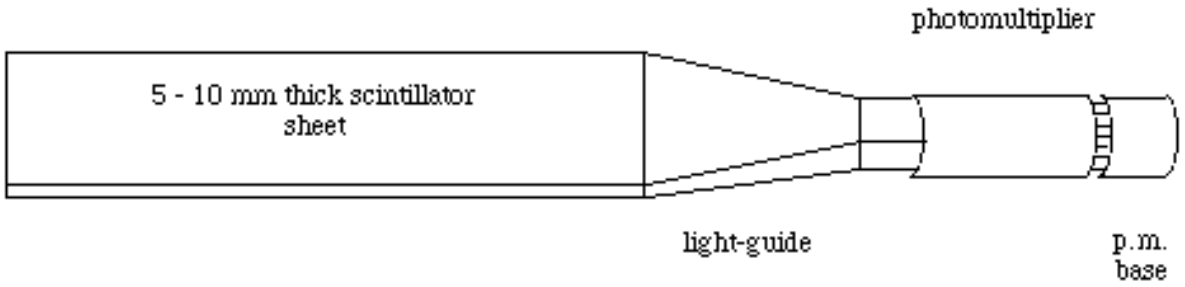


- **Utilizam metais alcalinos fotosensíveis como revestimento do cátodo**
- **Dinodos são revestidos com material (BeO) com boa emissão de elétrons secundários**
- **Todo o sistema opera em vácuo e submetido a alto potencial ≈ 3kV**

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

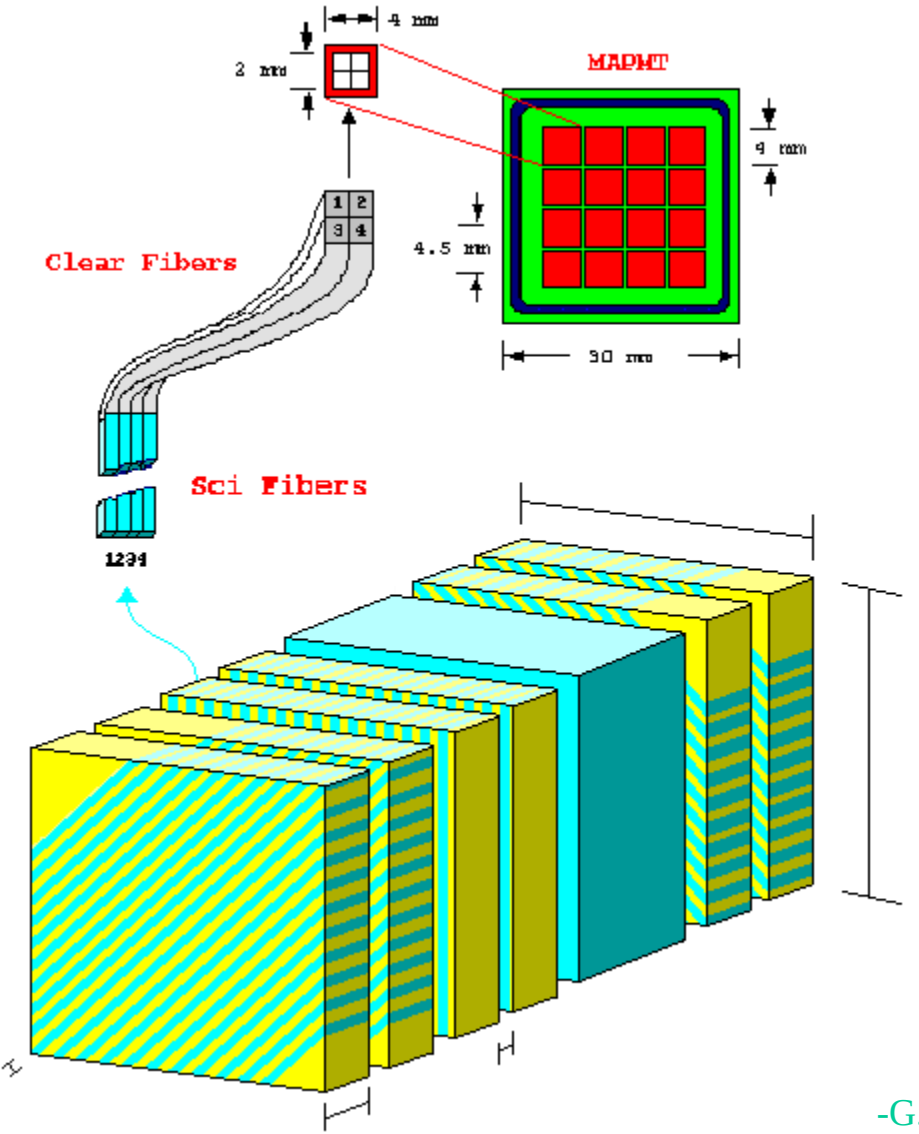


- **Na prática se faz uso de montagens do tipo cintilador-guia de luz-fotomultiplicador**



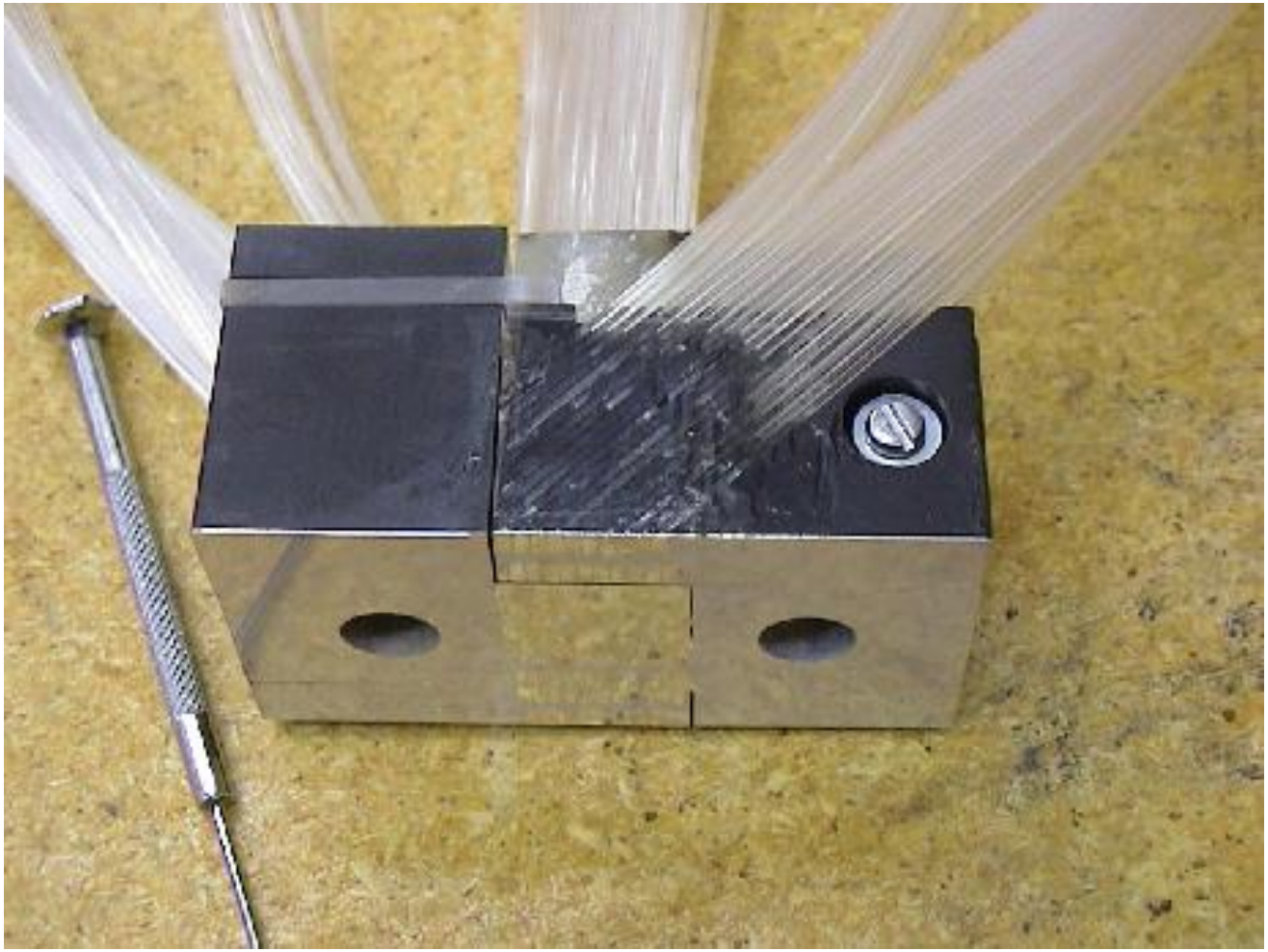
Fibras Cintilantes

- **Fibras Cintilantes são obtidas por extrusão de cintiladores plásticos**
- **Permitem obter boa resolução espacial além de temporal**

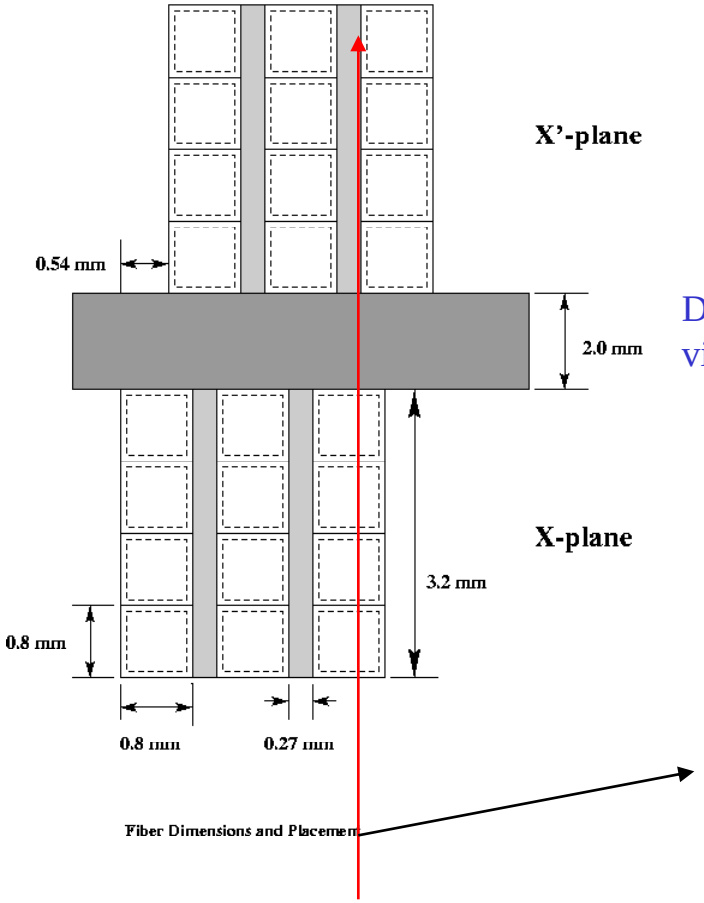


- 6 planes per detector in 3 frames and a trigger scintillator
- U and V at 45 degrees to X, 90 degrees to each other
- U and V planes have 20 fibers, X planes have 16 fibers
- Planes in a frame offset by ~2/3 fiber
- Each channel filled with four fibers
- 2 detectors in a spectrometer

Detector de Fibras Cintilantes



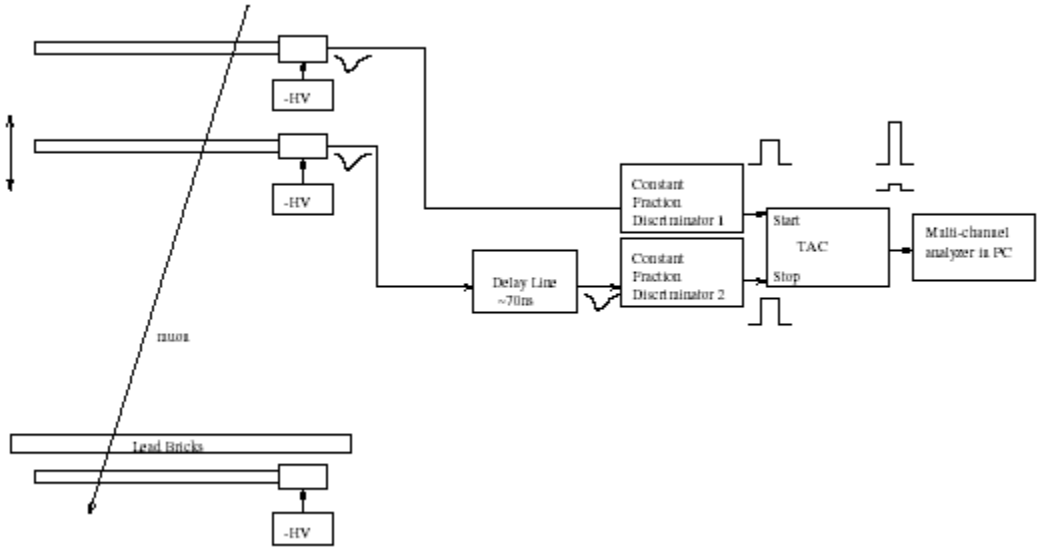
Detector de Fibras Cintilantes

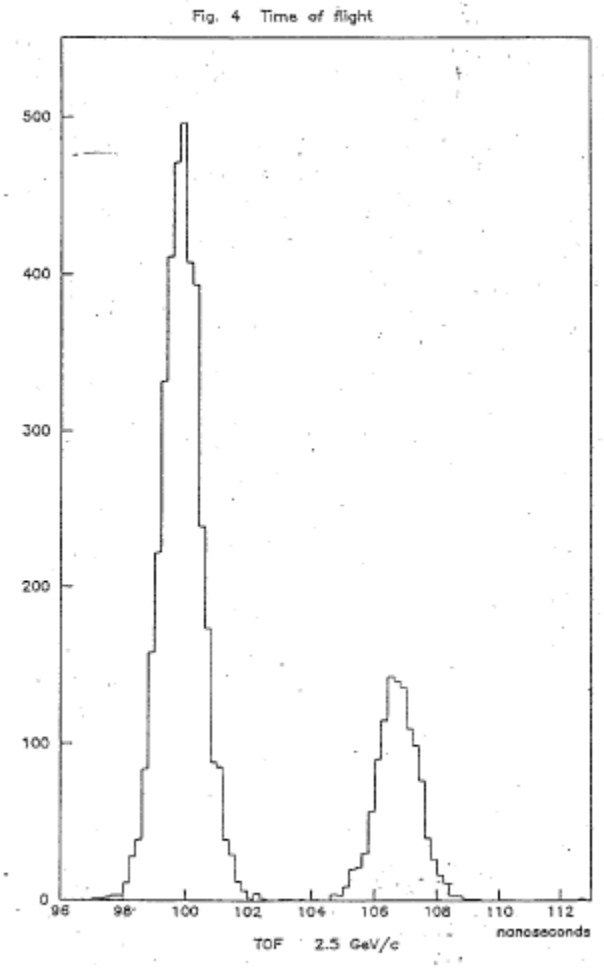


Detector de Fibras Cintilantes
visão de baixo para cima

Métodos de Identificação

- **Tempo de vôo da partícula v = L/ Δt**
- **Sabendo-se p=mvγ obtemos a massa da partícula**

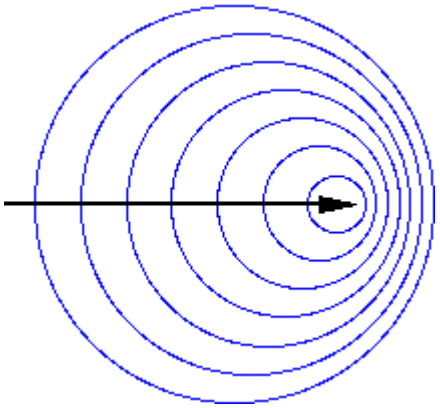


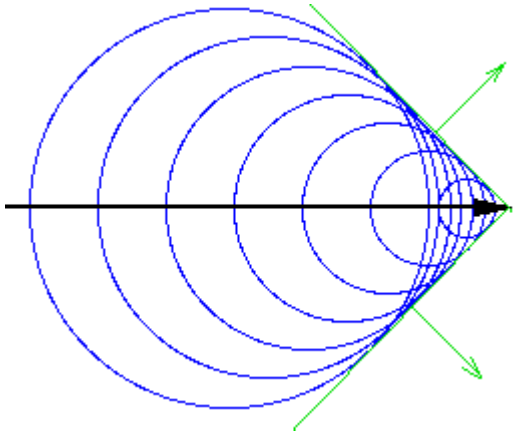


- **Δt para π e prótons com p=2.5GeV L=30m**
- **resolução em Δt ~ 1ns**

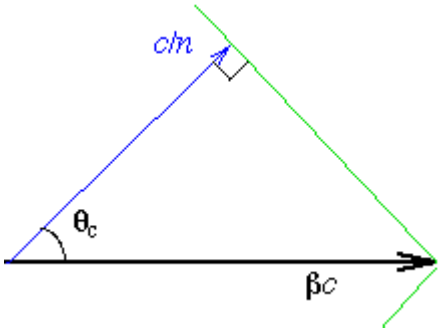
Métodos de Identificação II

- **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:**



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

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

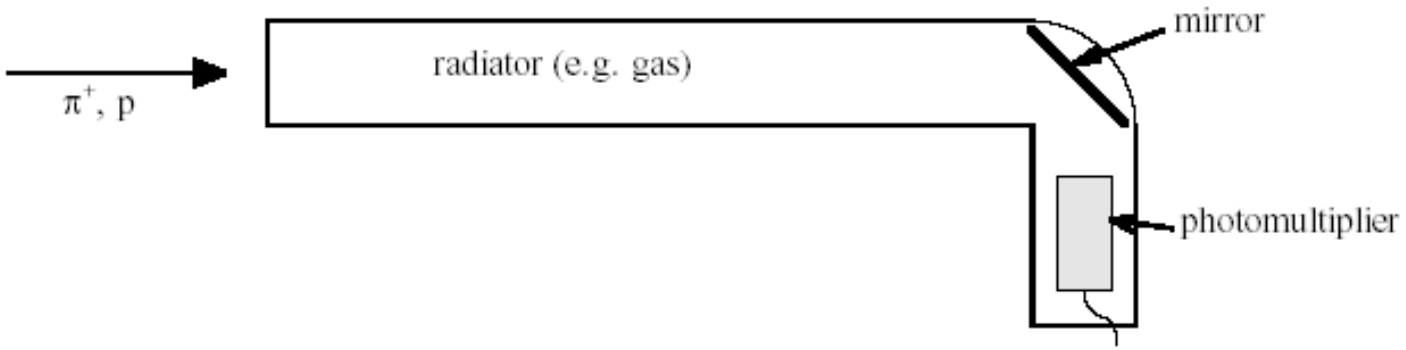
$$= \frac{\alpha z^2}{c}\int \sin^2\theta_C\, 2\pi\nu\,d\nu$$

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

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

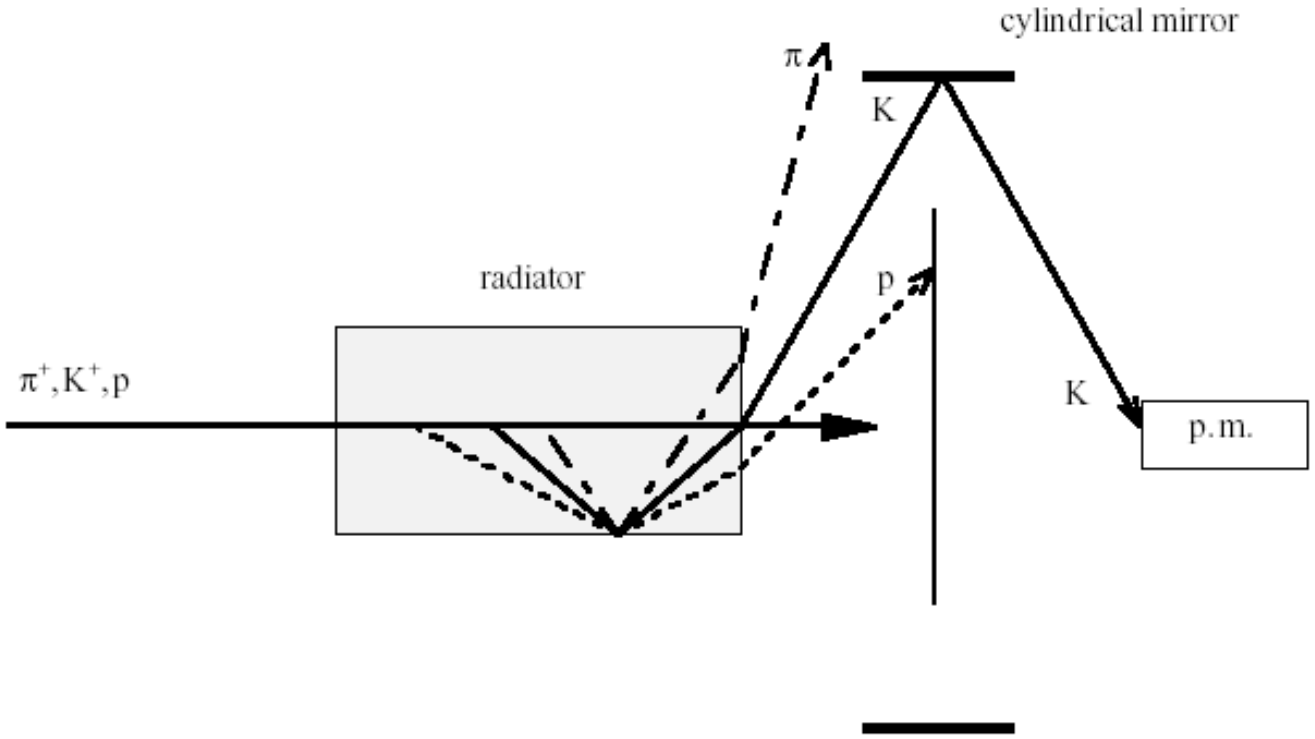
Detectores de Radiação Cherenkov

- **Detectores de Limiar (Threshold) só emitem radiação para $\beta(\gamma) > \beta_L = 1/n$**
- **Detectores Diferenciais**
- **Detectores de Anéis Cherenkov (RICH)**

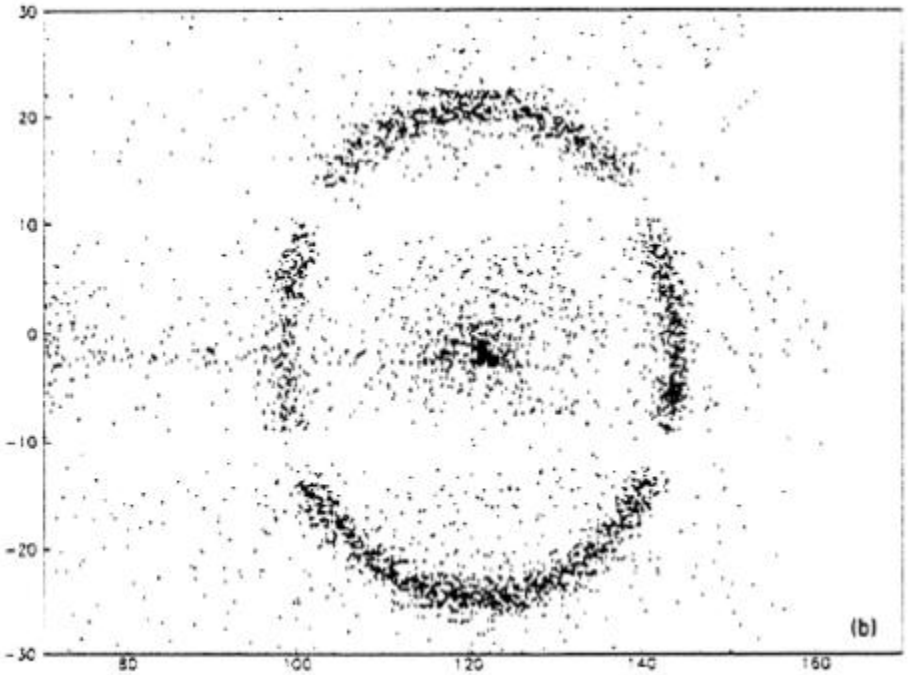


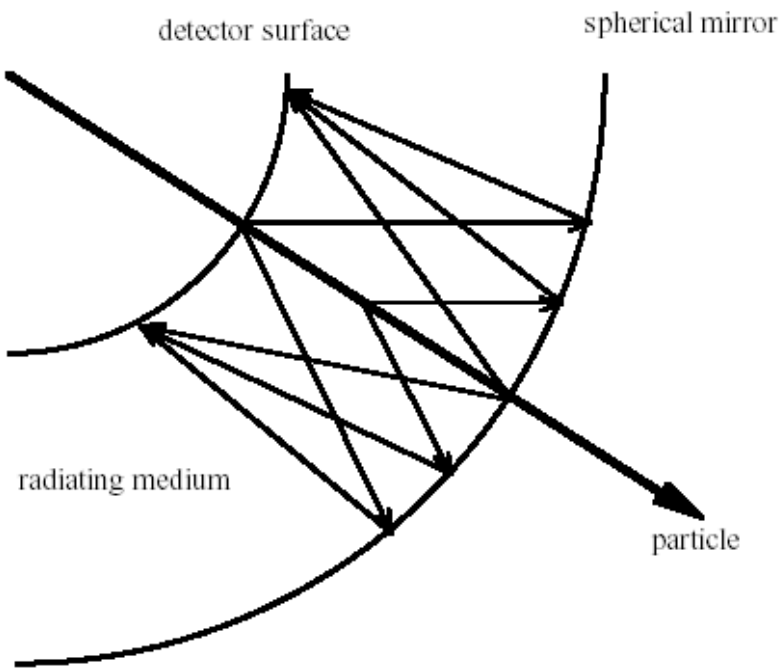
Material	n	γ_{Th}
glass	1.46 to 1.75	1.22 to 1.37
scintillator	1.4 to 1.6	1.3 to 1.4
water	1.33	1.52
silica aerogel	$1 + (2 \text{ to } 10 \times 10^{-2})$	2 to 5
pentane (at S.T.P.)	$1 + 1.7 \times 10^{-3}$	17
carbon dioxide (at S.T.P.)	$1 + 4.3 \times 10^{-4}$	34
helium	$1 + 3.3 \times 10^{-5}$	123

- **Detectores Diferenciais - Selecionam o ângulo de emissão para uma dada partícula**
- **Muito usados na identificação de feixes de partículas**



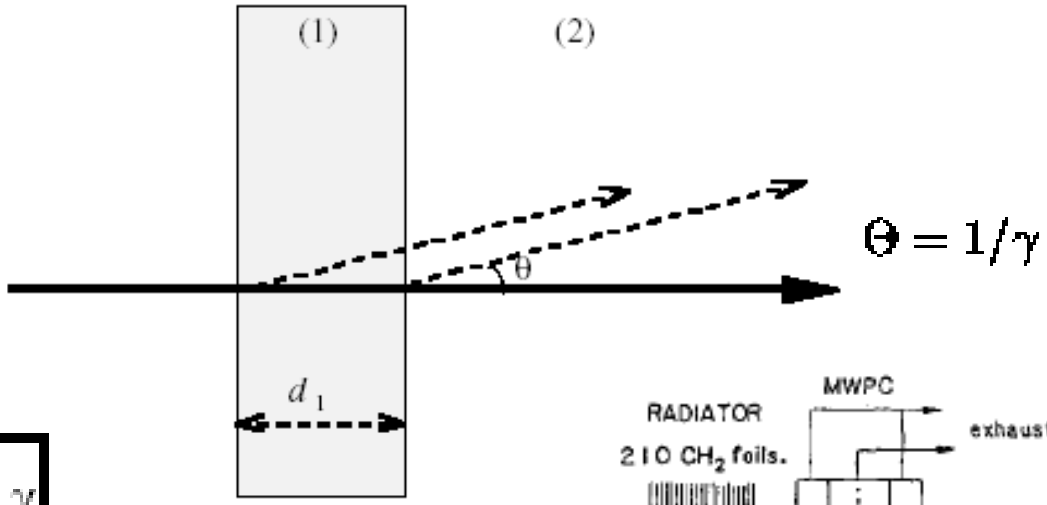
- **Detectores de Anéis Cherenkov (RICH)**
- **Utilizam uma combinação de espelhos e detectores de radiação para medida direta do ângulo θ_c**
- **Muito usado em colisores**





Métodos de Identificação III

- **Radiação de Transição - emitida na transição entre dois meios devido ao transiente na polarização**



$$E_{TR} = \frac{2}{3}\alpha \hbar \omega_{pl} \gamma$$

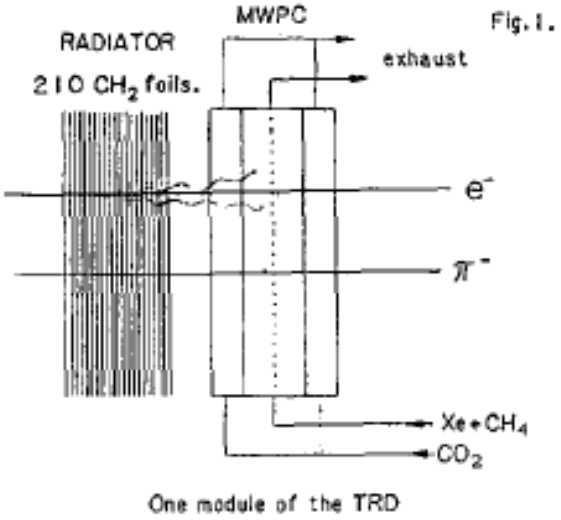


Fig. 1.
One module of the TRD

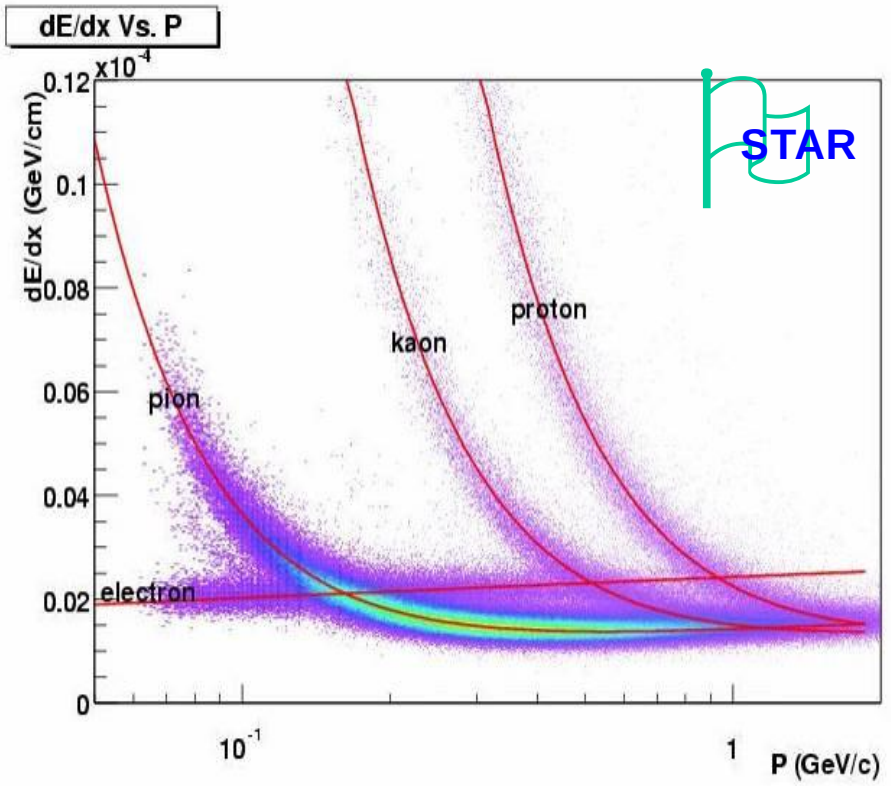
- ω_{pl} = frequência de plasma do meio
- Na prática somente elétrons emitem quantidades apreciáveis desta radiação

Métodos de Identificação IV

- **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

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



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:

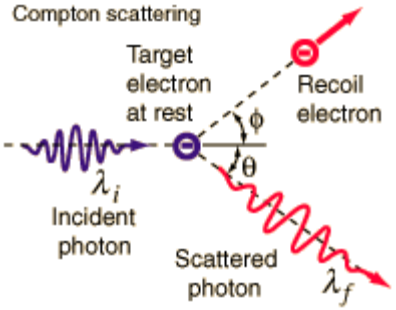
$\delta E/E \approx 1/\sqrt{E}$ **==> Maior precisão a altas energias** $\delta p/p \approx p$

☂ **O Processo de geração de partículas secundárias(chuveiros) pode ser dividido quanto aos processos físicos envolvidos:**

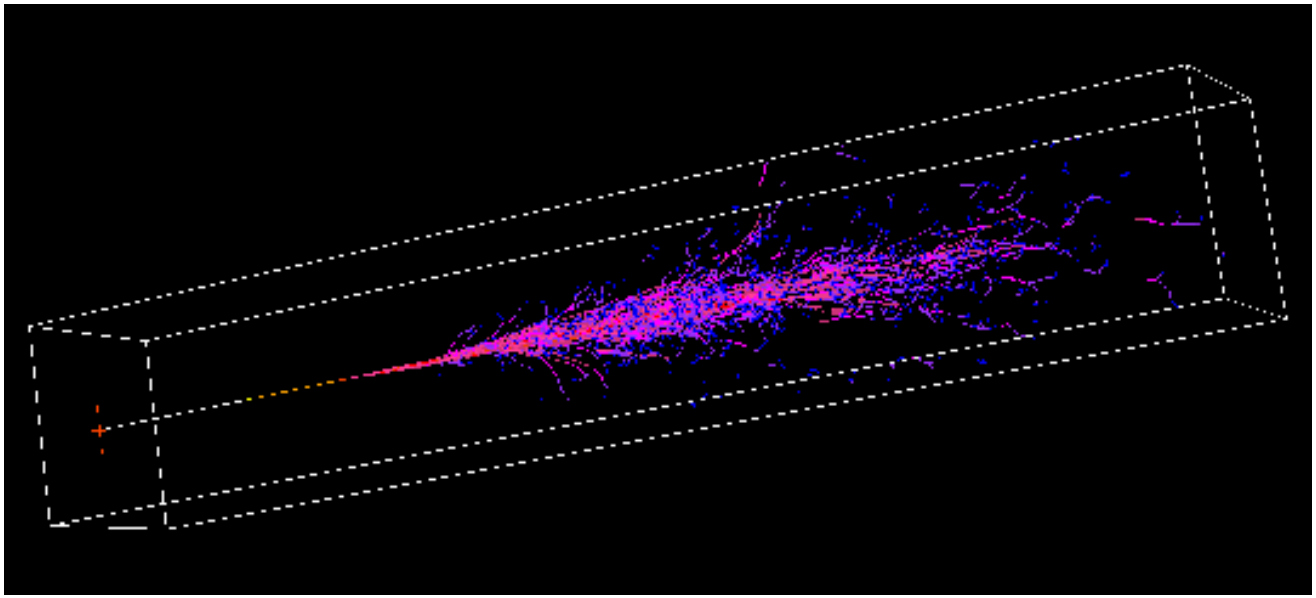
☂ **Chuveiros Eletromagnéticos - interação EM(irradiação, criação de pares)**

☂ **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**

- **A expansão máxima transversal do chuveiro é dada pelo Raio de Molière**

  $R_M = 0.0265\ X_0(Z+1.2)$

  que acontece a uma profundidade

  $L_M = [\ln(E/E_c) - a]\ X_0$

  $a = 1$ **para** $e^-\ e^+$, **0.5 para** γ

  sendo que a profundidade máxima é dada por:

  $L_{max} = L_M + 0.08Z + 9.6[X_0]$ **==> depende de lnE e Z**

- **Na prática materiais de alto Z são usados para se obter um detector compacto**

- **Calorímetros Eletromagnéticos Homogêneos x Amostragem**

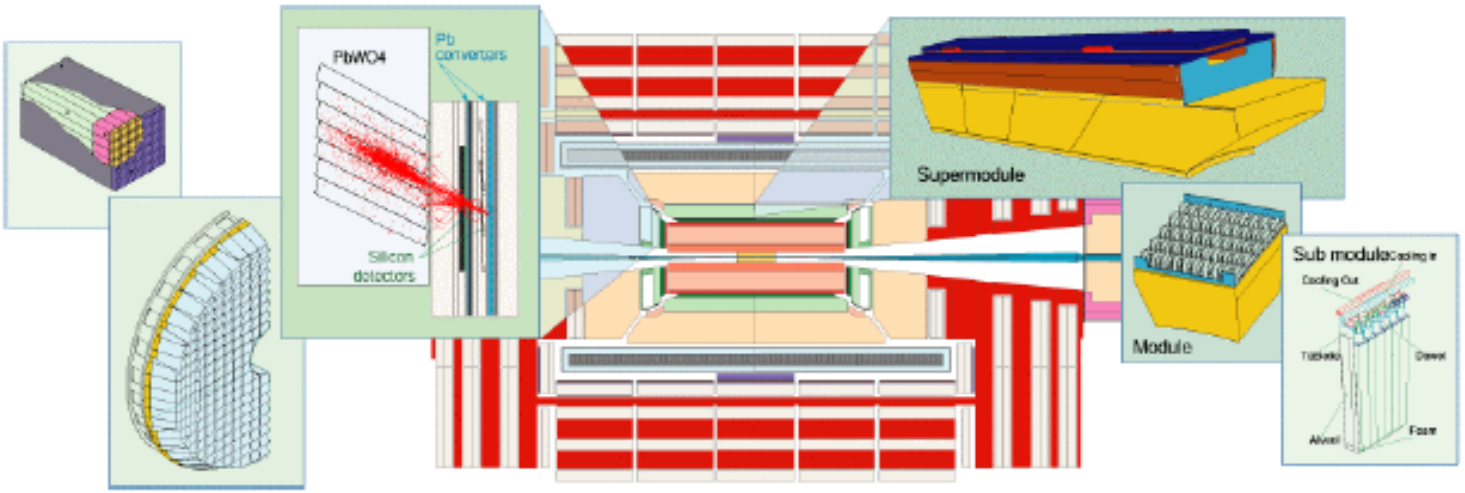
  - **Homogêneos - O mesmo meio material é usado tanto para produção como para detecção do chuveiro de partículas. Os mais usados são**

    - Lead Glass($PbO+SiO_2$) detecção por radiação Cherenkov

    $\delta E/E = 0.05/\sqrt{E}$

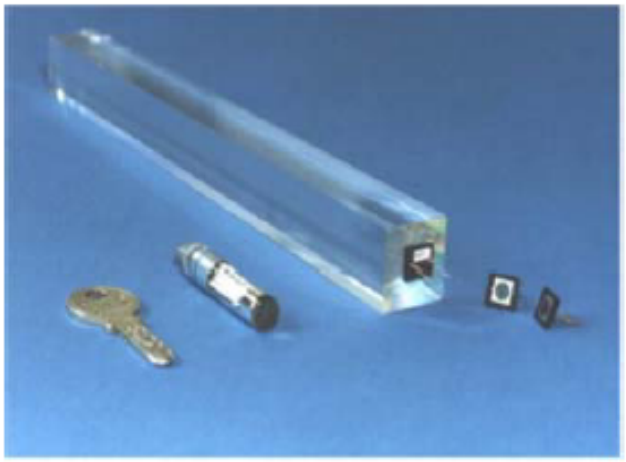
    - Cristais cintiladores inorgânicos(NaI, CsI, BGO) detecção direta da luz do cintilador. $\delta E/E = 0.015/(E)^{1/4}$

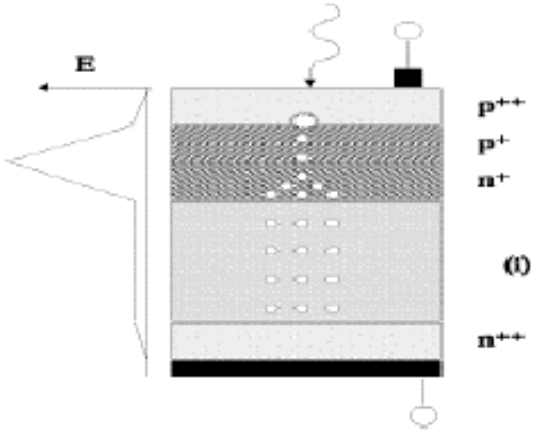
CMS Project for LHC



- 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	**NaI=9.49**
RM	2.1 cm	
Refraction index	2.2	
lmax	450 nm	
Decay time	10 ns	
Light output	200 photons/MeV	

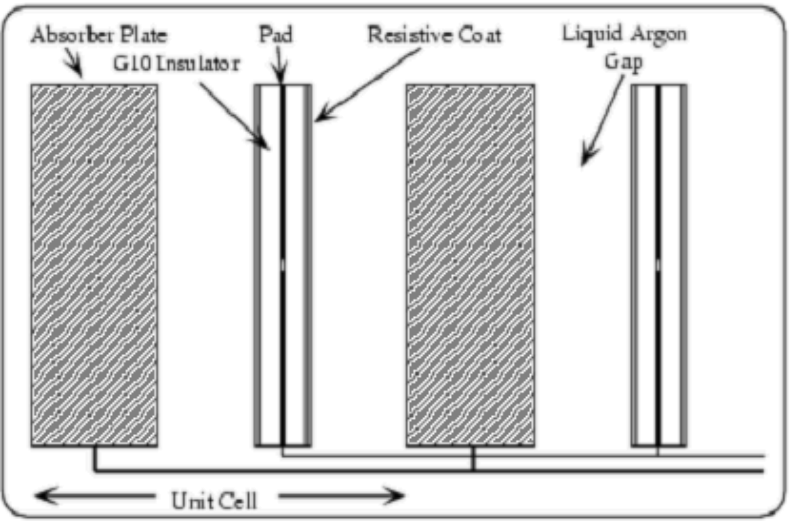
Signal: > 4 photoel./ MeV ×(gain=50)

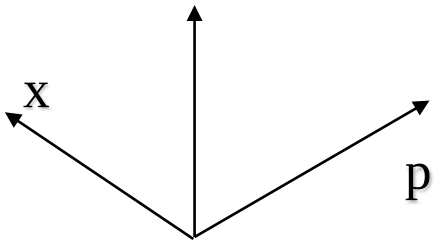
- available size:5x5 mm^2 x 2/per cr.
- C ~ 100pF @ U_W ~ 300V
- Gain ~ 50
- ENF ~ 2
- High rad.tolerance
- Low nuclear counter effect

- **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**

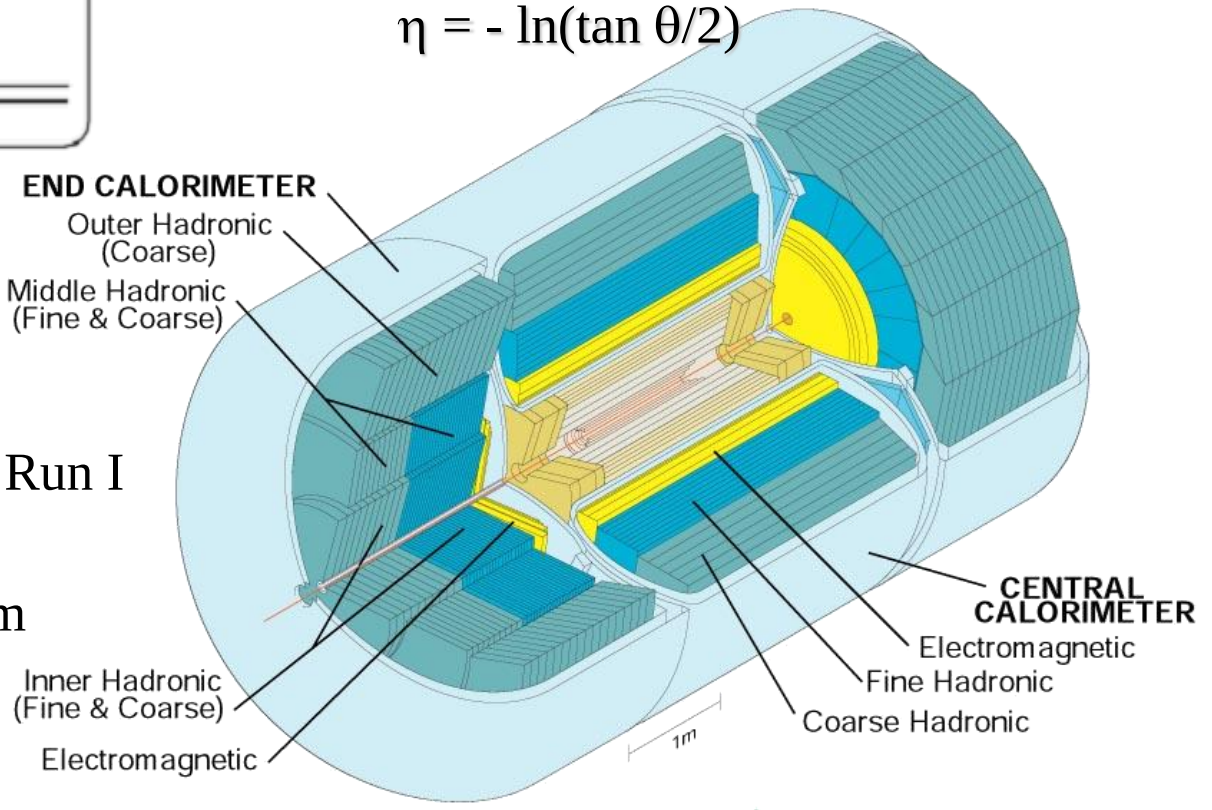
Calorímetro de U/LAr do D0



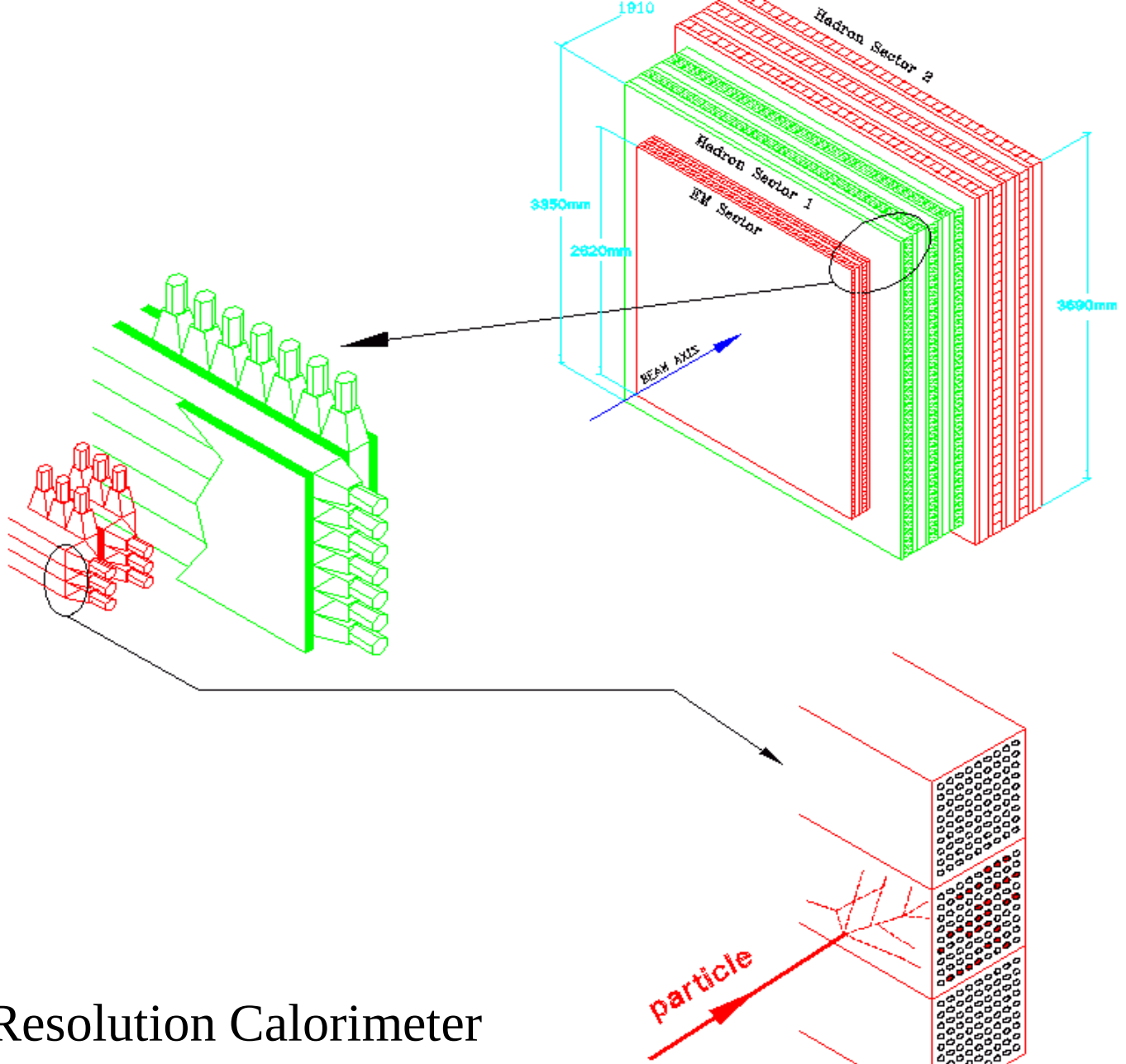


p beam direction

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



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

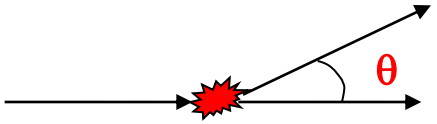


High Resolution Calorimeter

- **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

Material	Z	A	$\langle Z/A \rangle$	Nuclear [a] collision length λ_T $\{g/cm^2\}$	Nuclear [a] interaction length λ_I $\{g/cm^2\}$	$dE/dx\|_{min}$ [b] $\left\{\frac{MeV}{g/cm^2}\right\}$	Radiation length [c] X_0 $\{g/cm^2\}$	$\{cm\}$	Density $\{g/cm^3\}$ $(\{g/\ell\}$ for gas)
H_2 gas	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	(4.103)	61.28 [d]	(731000)	(0.0838)[0.0899]
H_2 liquid	1	1.00794	0.99212	43.3	50.8	4.034	61.28 [d]	866	0.0708
D_2	1	2.0140	0.49652	45.7	54.7	(2.052)	122.4	724	0.169[0.179]
He	2	4.002602	0.49968	49.9	65.1	(1.937)	94.32	756	0.1249[0.1786]
Li	3	6.941	0.43221	54.6	73.4	1.639	82.76	155	0.534
Be	4	9.012182	0.44384	55.8	75.2	1.594	65.19	35.28	1.848
Fe	26	55.845	0.46556	82.8	131.9	1.451	13.84	1.76	7.87
Cu	29	63.546	0.45636	85.6	134.9	1.403	12.86	1.43	8.96
Ge	32	72.61	0.44071	88.3	140.5	1.371	12.25	2.30	5.323
Sn	50	118.710	0.42120	100.2	163	1.264	8.82	1.21	7.31
Xe	54	131.29	0.41130	102.8	169	(1.255)	8.48	2.87	2.953[5.858]
W	74	183.84	0.40250	110.3	185	1.145	6.76	0.35	19.3
Pt	78	195.08	0.39984	113.3	189.7	1.129	6.54	0.305	21.45
Pb	82	207.2	0.39575	116.2	194	1.123	6.37	0.56	11.35
U	92	238.0289	0.38651	117.0	199	1.082	6.00	≈0.32	≈18.95
Polyethylene terephthlate (Mylar) [k]			0.52037	60.2	85.7	1.848	39.95	28.7	1.39
Polyethylene [l]			0.57034	57.0	78.4	2.076	44.64	≈47.9	0.92–0.95
Polyimide film (Kapton) [m]			0.51264	60.3	85.8	1.820	40.56	28.6	1.42
Lucite, Plexiglas [n]			0.53937	59.3	83.0	1.929	40.49	≈34.4	1.16–1.20
Polystyrene, scintillator [o]			0.53768	58.5	81.9	1.936	43.72	42.4	1.032
Polytetrafluoroethylene (Teflon) [p]			0.47992	64.2	93.0	1.671	34.84	15.8	2.20
Polyvinyltolulene, scintillator [q]			0.54155	58.3	81.5	1.956	43.83	42.5	1.032

- **Em termos de λ a profundidade máxima de um chuveiro hadrônico é dada por:**

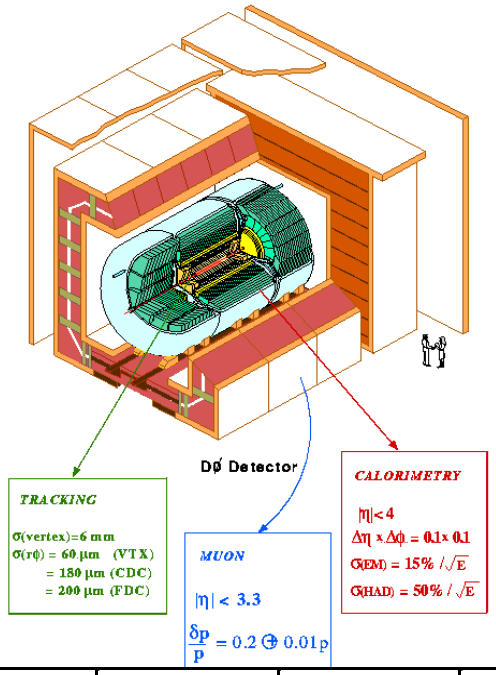
$$\lambda_{max} = 0.9 + 0.36 \ln E$$

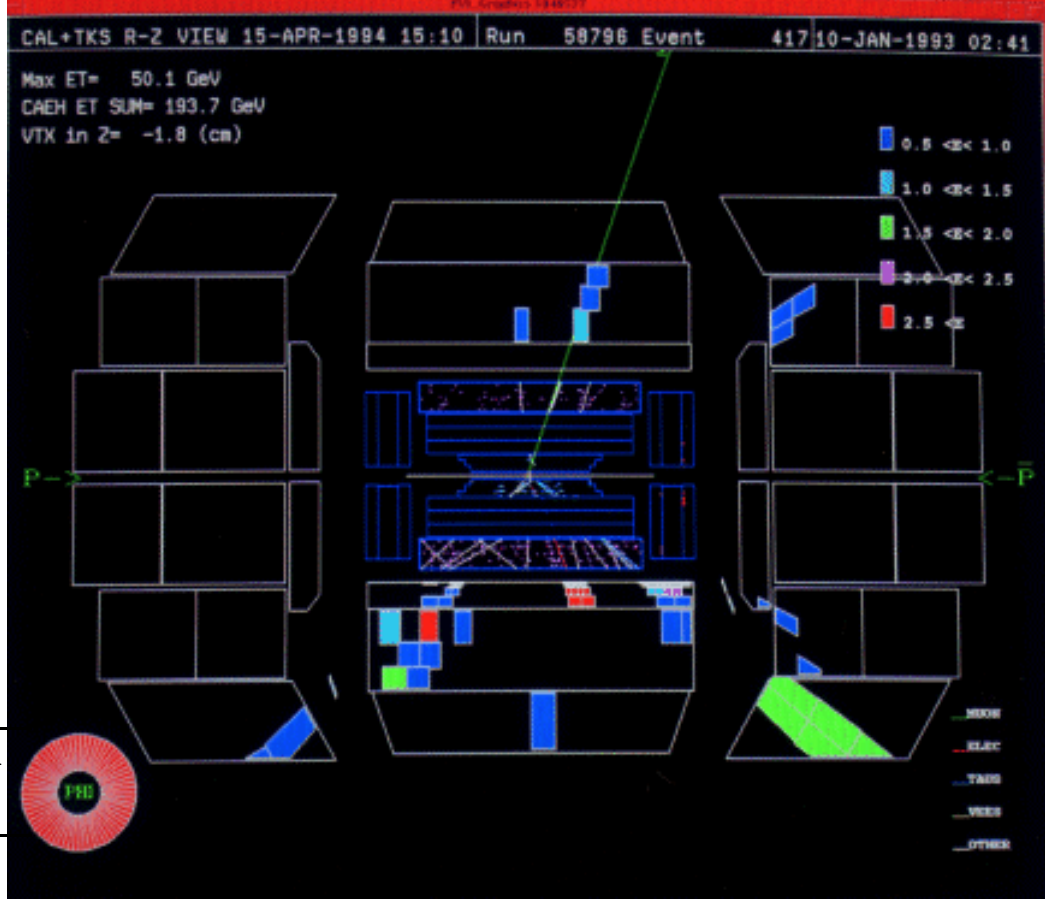
- **Sendo a máxima expansão transversal dada por:**

$$L_{max} = -17.3 + 14.3 \ln E$$

- **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				