

Introdução à Física de Partículas

G. Alves
Lafex/CBPF

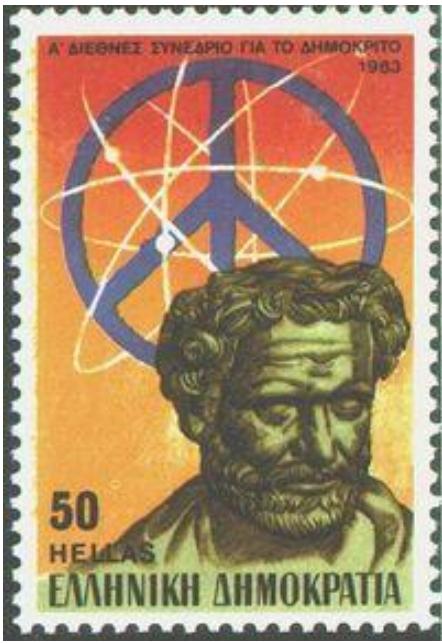
Parte I Sumário

I - Conceitos Básicos

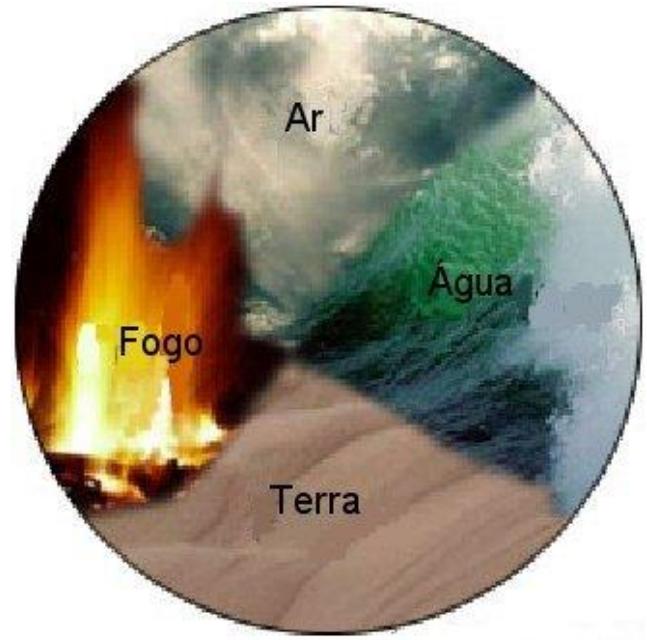
II - Partículas Elementares

III - Métodos Experimentais

O Objetivo da Física de Partículas



Leucipo (Demócrito – 400AC)
Átomos e Vazio

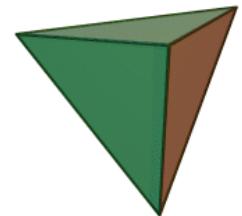


Empédocles (450 AC)
4 Elementos e Éter

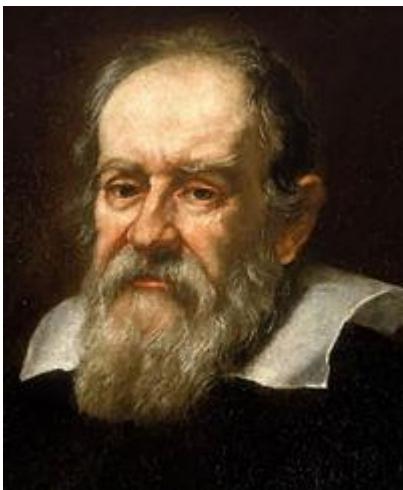
Platão e Aristóteles (350 BC)



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

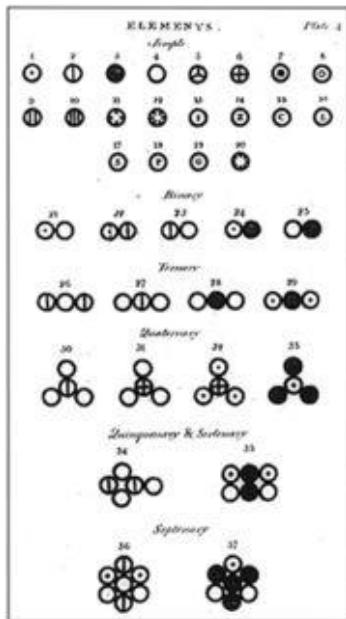


Galileu Galilei (1600)



- 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

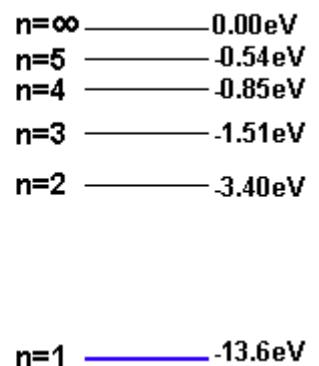
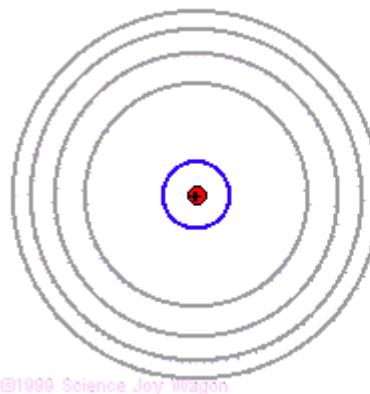
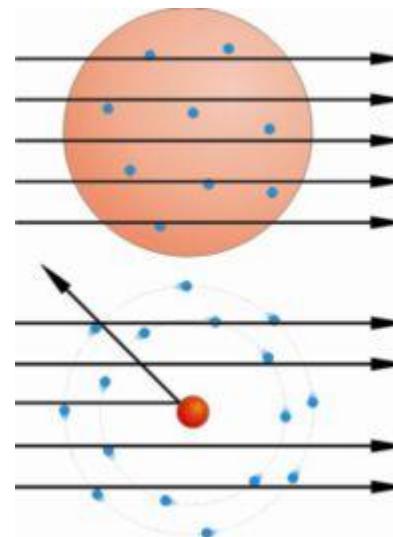
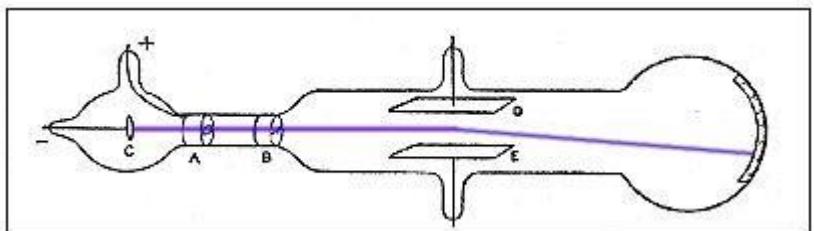
Dmitri Mendeleev (1869)

- Criou a 1ª Tabela Periódica
- Previu a existência de novos elementos

Period	Group										(0)
	I a	II a	III a	IV a	V a	VI a	VII a		VIII b		
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 101.1	Ru 102.9	Rh 106.4	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 210.0	At 211.0				Rn 219.0
7	Fr	Ra	Ac**								

* Ce 140.1	Pr 140.9	Nd 144.2	Pm 150.4	Sm 152.0	Eu 157.3	Gd 158.9	Tb 162.5	Dy 164.9	Ho 167.3	Er 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



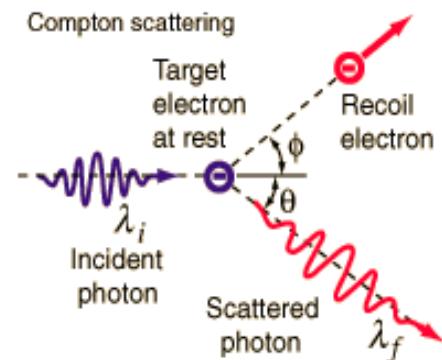
©1999 Science Joy Wagon

Rutherford (1918) e Chadwick (1932)

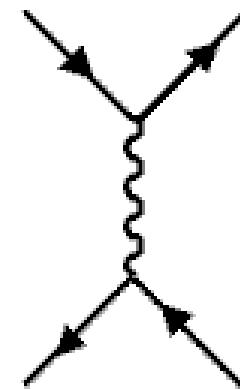
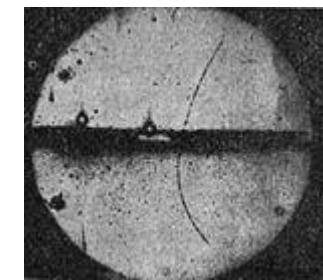
- prótons e nêutrons

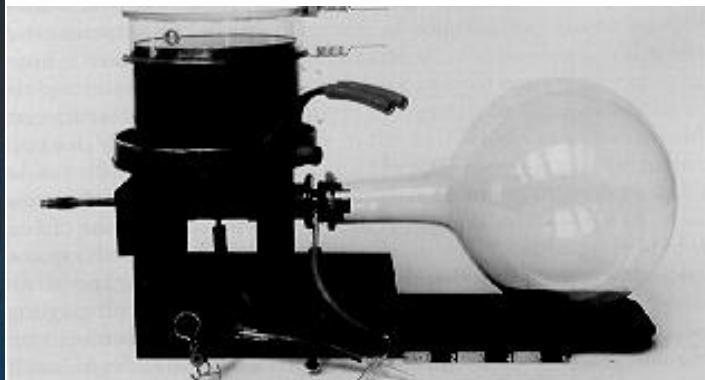
Partículas Elementares – novos átomos

- p, n, e^- , $\gamma \rightarrow$ espalhamento Compton
- breve simplicidade
- Anderson (1932) – pósitron (e^+) \rightarrow Dirac



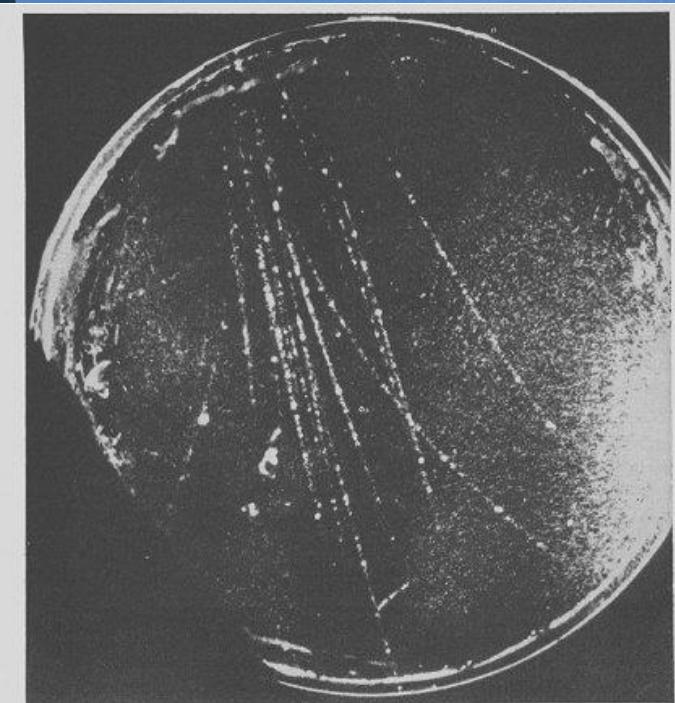
- Problemas (de novo) – Estabilidade nuclear
 - Radiatividade (Fermi 1933) e Repulsão Coulombiana
 - Magnitude das Interações Fundamentais
 - EM x Gravitacional
 - $k e^2/R \times G m^2/R$
 - $1 \times 10^{-38} !!$
- Nova força (interação forte)
 - Curto alcance – restrita a escala nuclear
 - O que determina o alcance de uma força???
 - TQC – Intereração \leftrightarrow troca de “mensageiro”
 - Massa do mensageiro \rightarrow alcance
 - $\Delta E \Delta t = mc^2 \Delta R v^{-1} \sim \hbar$
 - $\Delta R \approx 10^{-15} m \rightarrow m \approx 200 m_e$ - Potencial de Yukawa



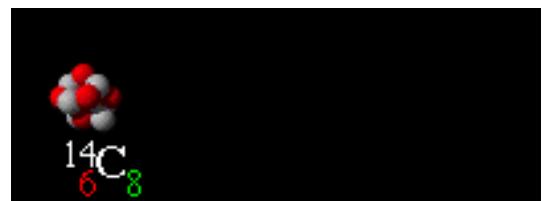
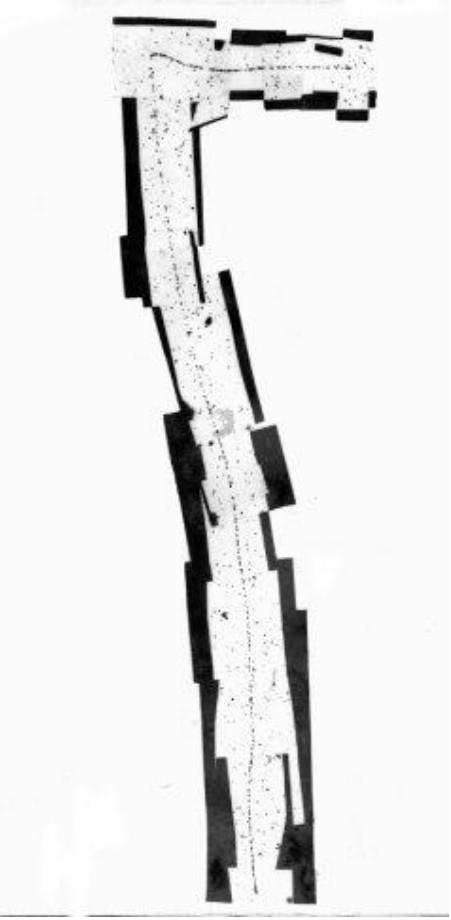


1937 – 1947 procura pelo méson de Yukawa em Raios Cósmicos

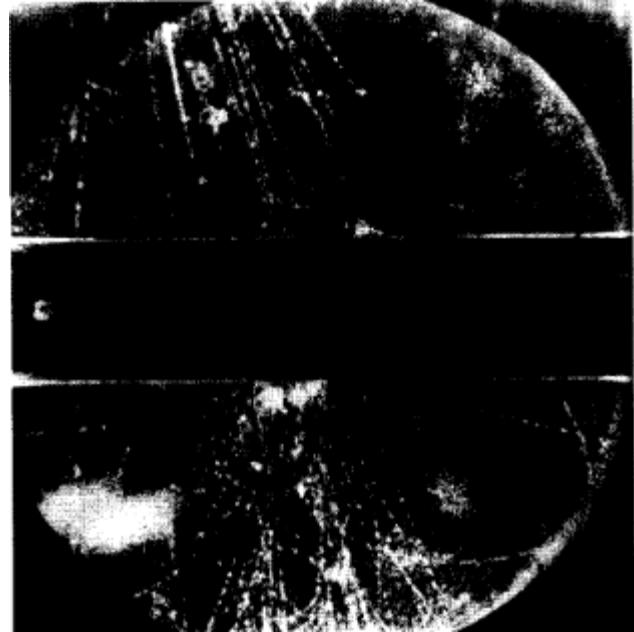
- A grande “pegadinha” da natureza
- 1937 – Anderson → “méson” $\sim 200 m_e$
– raios cósmicos
- 1945 – Conversi, Pancini & Piccioni –
Interação fraca $\tau \approx 10^{-6} s !!$
- 1946 – Perkins – dois tipos de mésons



- 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 - ν)
- Seria a mesma partícula??
- Frederick Reines & Clyde Cowan (1956)
 - 1ª observação direta $\nu \bar{+} p \rightarrow n + e^+$
- Leon Lederman (1962)
 - $\nu_\mu \neq \nu_e$

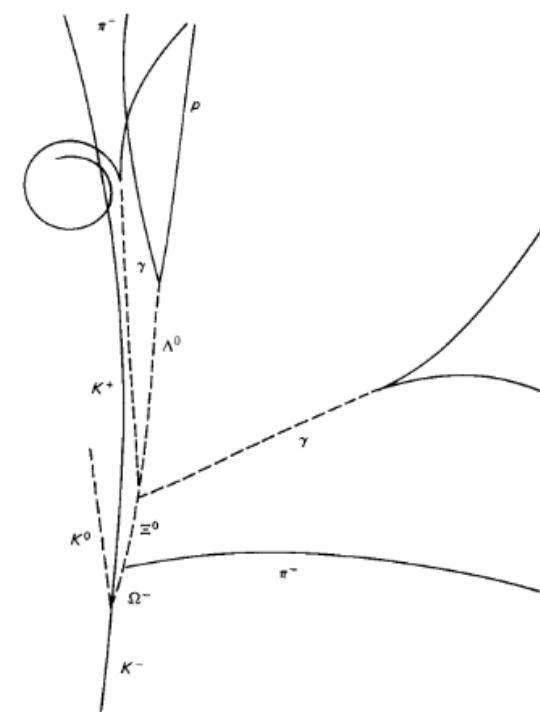
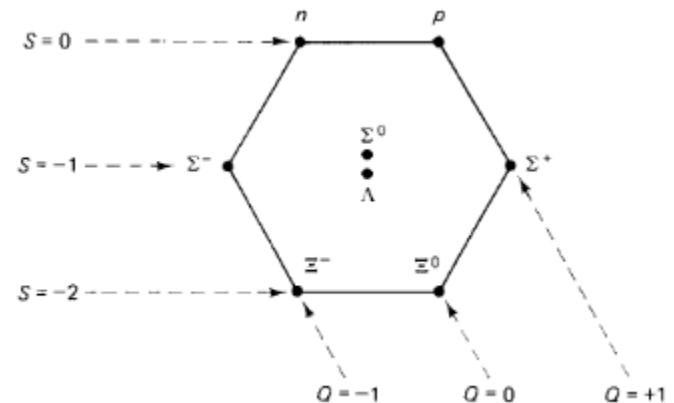


- (1947-1950) Partículas estranhas (mesmo)
 - Produzidas em pares
 - Vida média extremamente elevada
 - $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ($\tau \approx 10^{-10}$ s)
 - $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ($\tau \approx 10^{-23}$ s)
 - Uma família de partículas estranhas
 - $K^0, K^+, K^-, \Lambda, \Sigma^+,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



- 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^-)

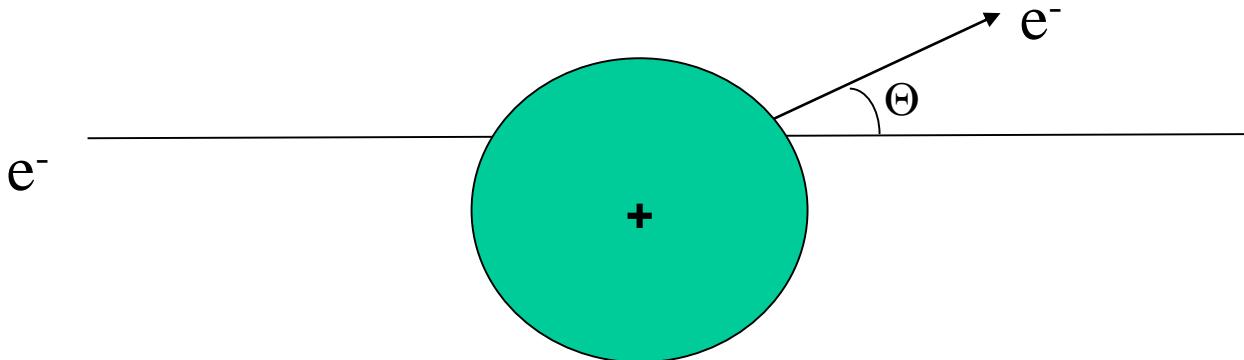


- O sucesso da regra do octeto levanta novamente a questão
 - São essas partículas elementares?
 - “Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist” E. Fermi
- Kazuhiko Nishijima, Murray Gell-Mann & George Zweig (1964)
 - H  dr ons compostos por férmions (spin $\frac{1}{2}$) fundamentais (quarks)
 - “Three quarks for Muster Mark” – Finnegans Wake (James Joyce)
 - B  r ions → tr  s quarks
 - M  s ons → quark-antiquark

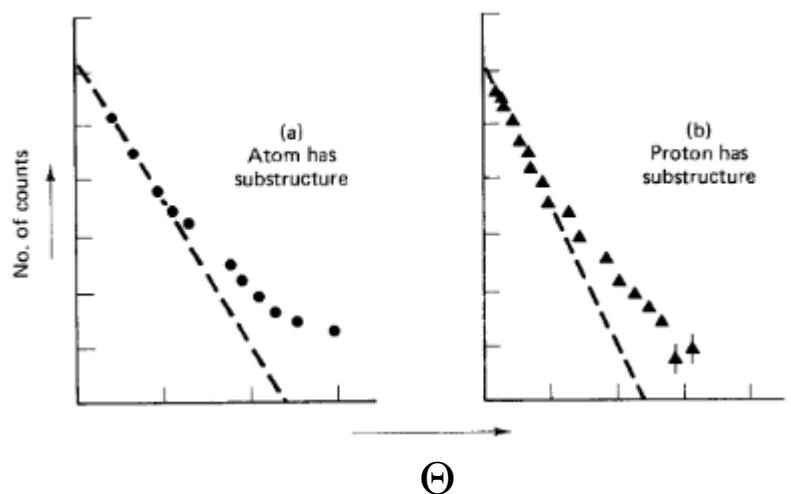
qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^{*+}
uds	0	-1	Σ^{*0}
dds	-1	-1	Σ^{*-}
uss	0	-2	Ξ^{*0}
dss	-1	-2	Ξ^{*-}
sss	-1	-3	Ω^-

$q\bar{q}$	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	??

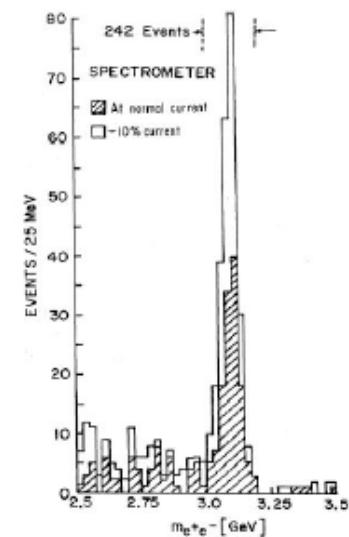
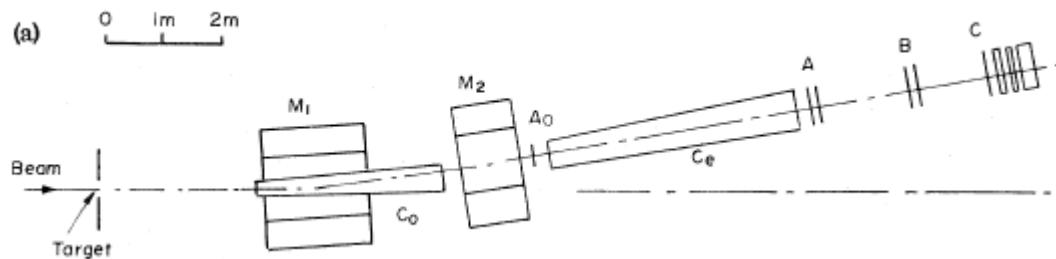
- Mais Problemas (não tem fim)
 - Não se observam quarks livres
 - quarks tem carga fracionária
 - Violam o princípio de Pauli??
 - $\Omega^- (s\uparrow s\uparrow s\uparrow)$ $\Delta^- (d\uparrow d\uparrow d\uparrow)$, $\Delta^{++} (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$
- Até hoje não foram observados quarks 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 \Rightarrow confinamento
 - $\Omega^- (\textcolor{red}{s}\uparrow \textcolor{green}{s}\uparrow \textcolor{blue}{s}\uparrow)$
 - Socorro!!



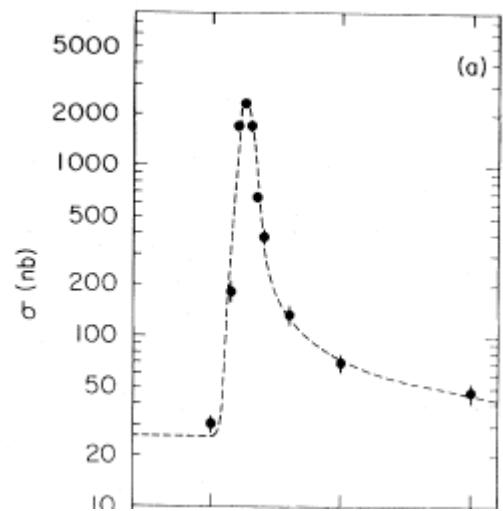
- (1969) espalhamento e^-p a altas energias → Rutherford
 - partons = quarks??



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



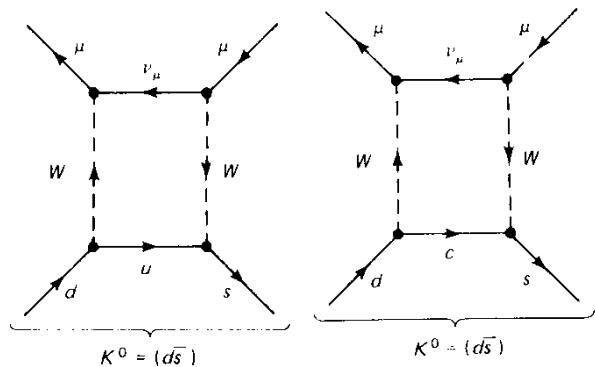
- Burton Richards (SLAC) $e^+e^- \rightarrow pp$



- propriedades incomuns
 - Massa elevada $\approx 3.1 \text{ GeV}$ (próton $\approx 1 \text{ GeV}$)
 - Vida média elevada ($\approx 1000x$)
 - Semelhante as partículas estranhas
- Novo número quântico – c (charme)
- Proposto por Glashow, Iliopoulos & Maiani (1970)
 - simetria quarks \Leftrightarrow léptons

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} v_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$

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

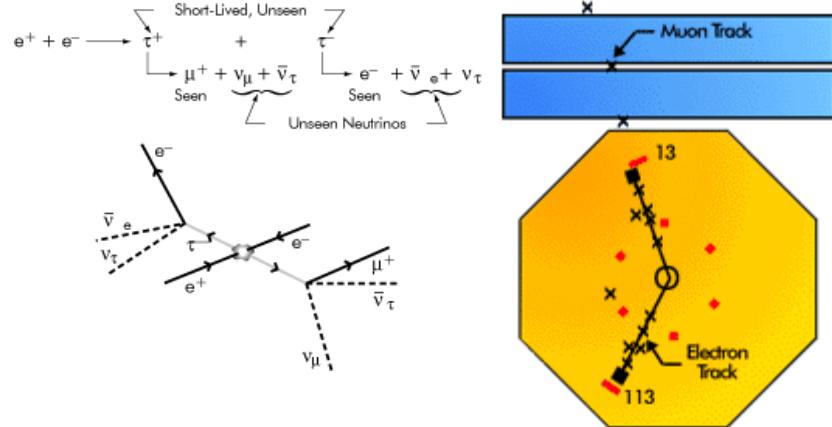


-G. Alves-



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

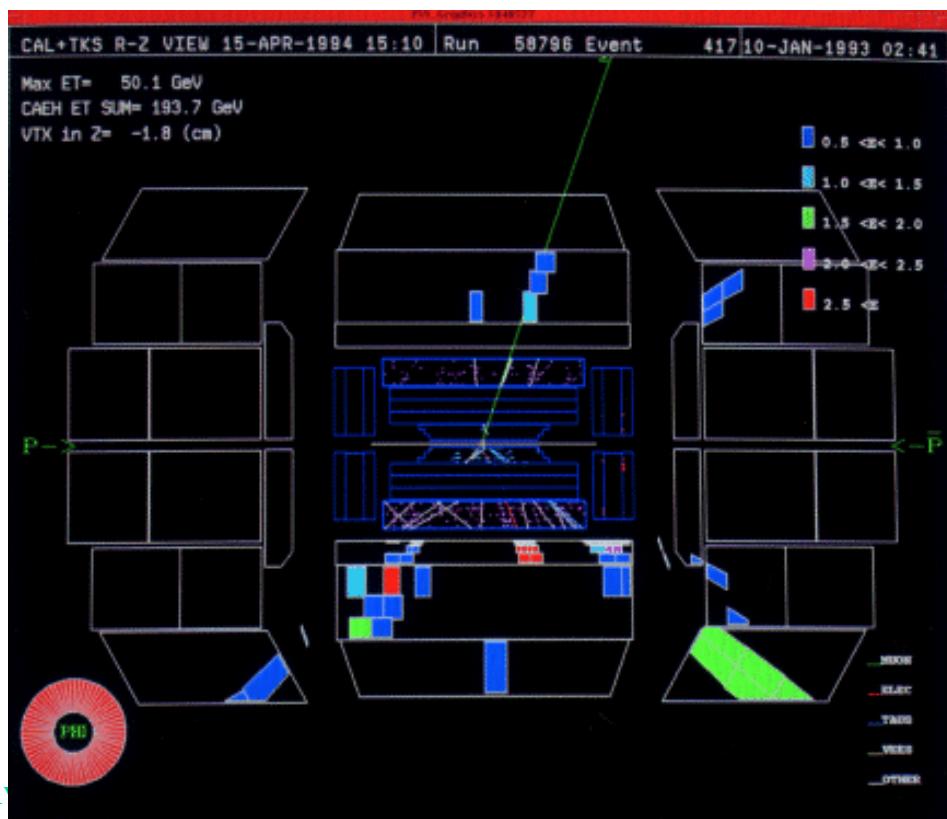
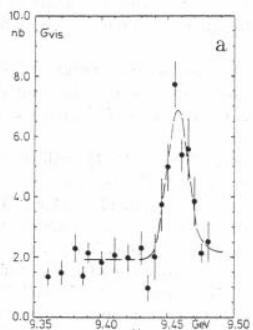


- Novas partículas contendo charme (1975)
- Mas antes outra “pegadinha”

- Descoberta do lépton τ (1975)

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ? \\ ? \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} v_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

- 1977 – Lederman et al. $\rightarrow \Upsilon$
- 1995 – DØ & CDF \rightarrow top quark



-G. Al

Introdução Histórica - Mediadores

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

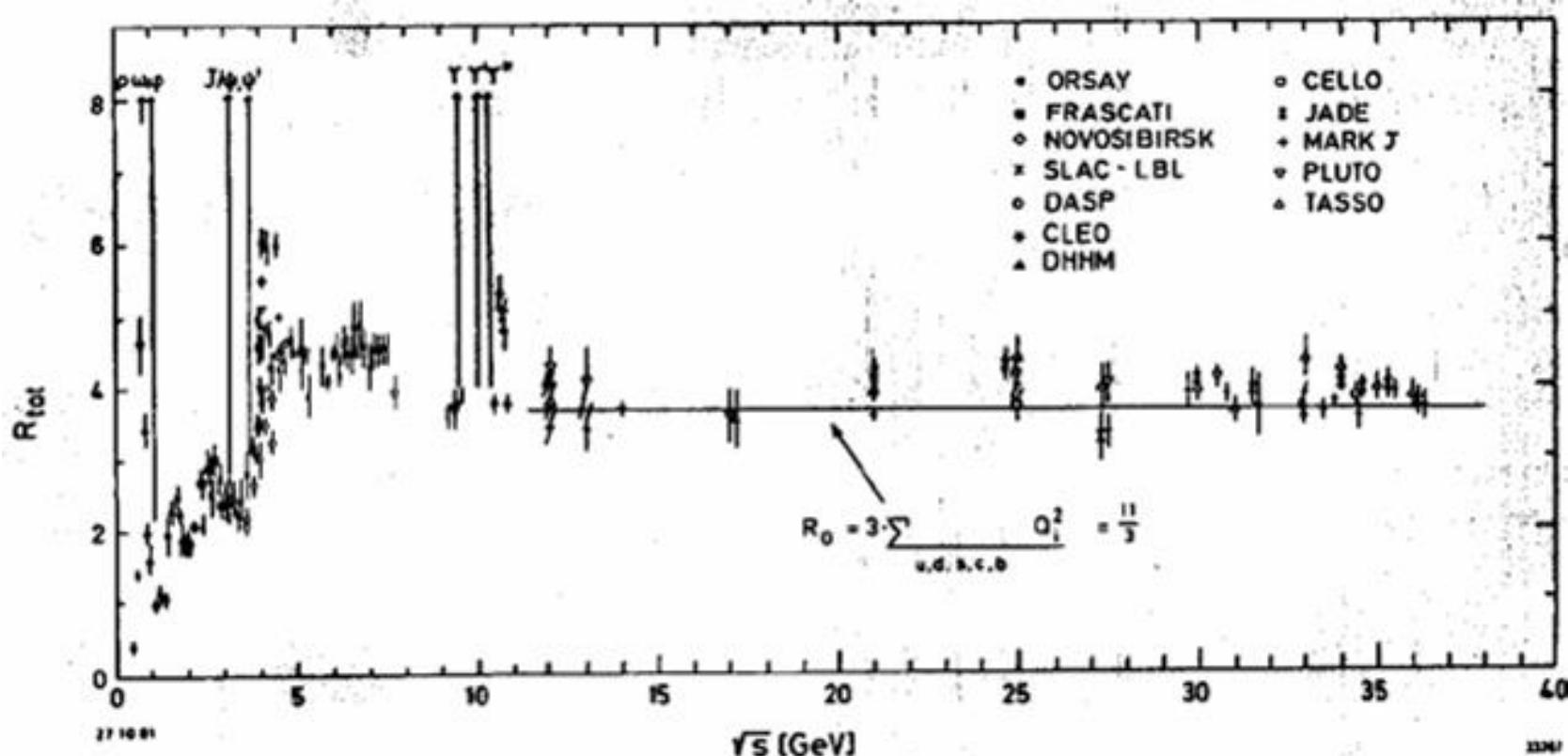
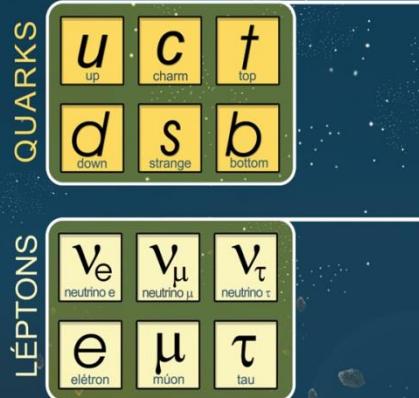


FIG. 1-9. The ratio $R \equiv \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$. [Compiled by B. Wiik.]

ESTRUTURA ELEMENTAR DA MATÉRIA

PARTÍCULAS MEDIADORAS

Interação Eletromagnética
FÓTON
Interação Fraca
W^+ Z^0 W^-
Interação Forte
GLÚON
Interação Gravitacional
GRÁVITON



Maçã (~10⁻² m)



Cristal (~10⁻⁸ m)

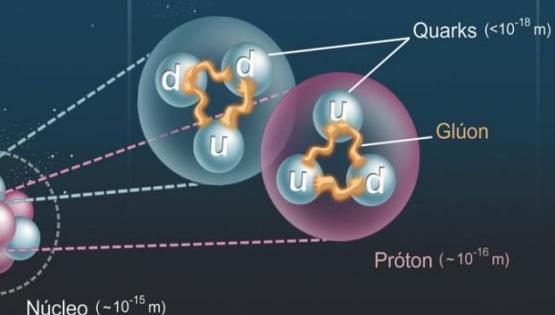


Átomo (~10⁻¹⁰ m)



Elétron (<10⁻¹⁸ m)

Nêutron (~10⁻¹⁶ m)



Próton (~10⁻¹⁶ m)

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/>

Interação Eletromagnética (γ)

O fôton (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 fôtons. Partículas sem massa ou carga, os fôtons são responsáveis pela transmissão da interação entre as partículas electricamente carregadas.

Interação Gravitacional (G)

A interação gravitacional atua sobre todas as partículas e seria mediada 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 (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 curto 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 leptonas 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)

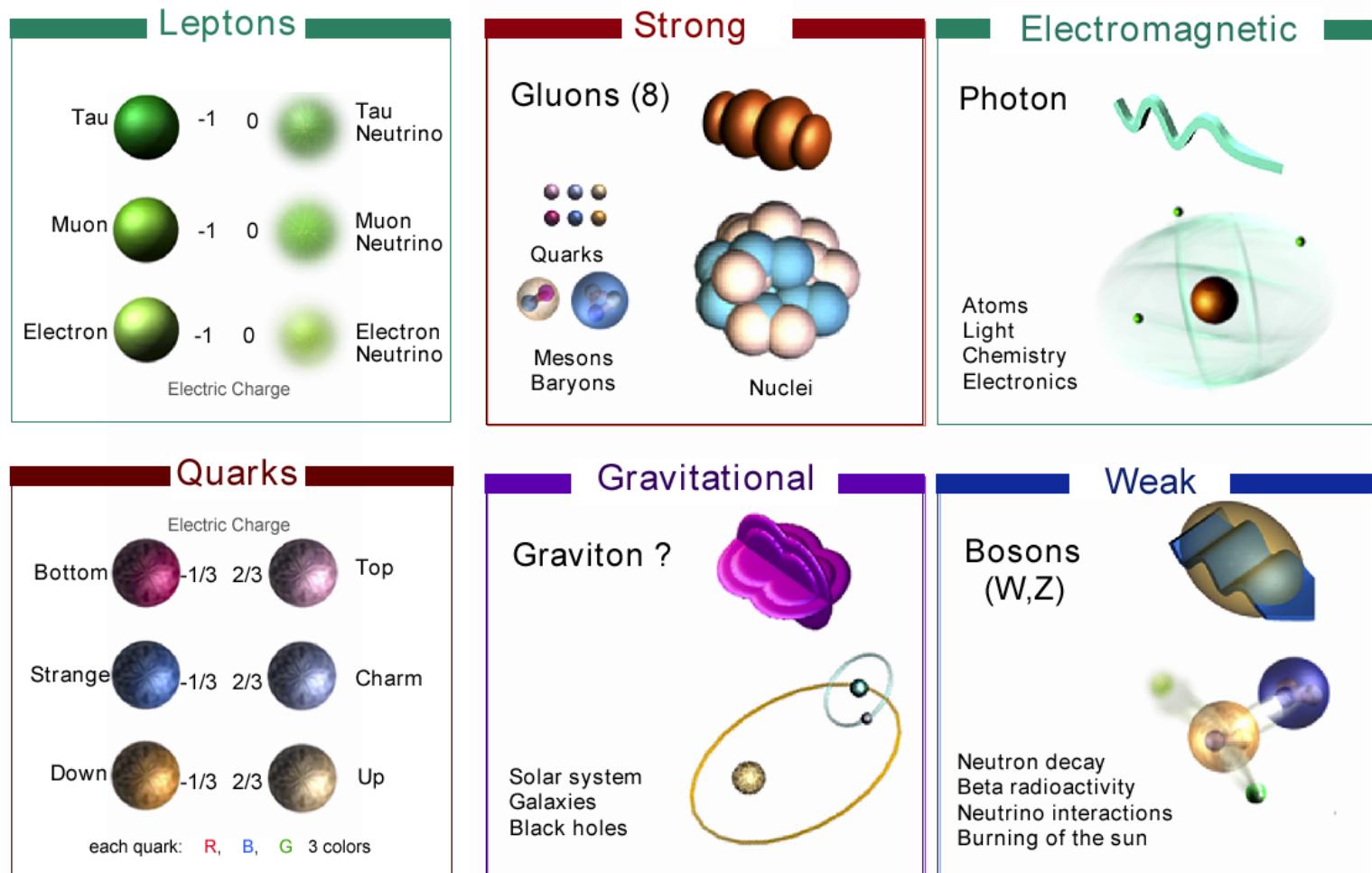
O glúon (g) desempenha para a interação forte papel semelhante ao dos fôtons para a interação eletromagnética. Eles são trocados entre partículas que possuem "cargas de cor", como os quarks. As três "cores" são as "cargas fortes" equivalentes às cargas elétricas positiva e negativa. A interação forte 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 ($+ \leftrightarrow -$). A matéria formada por antipartículas é chamada de antimateria.

Modelo Padrão

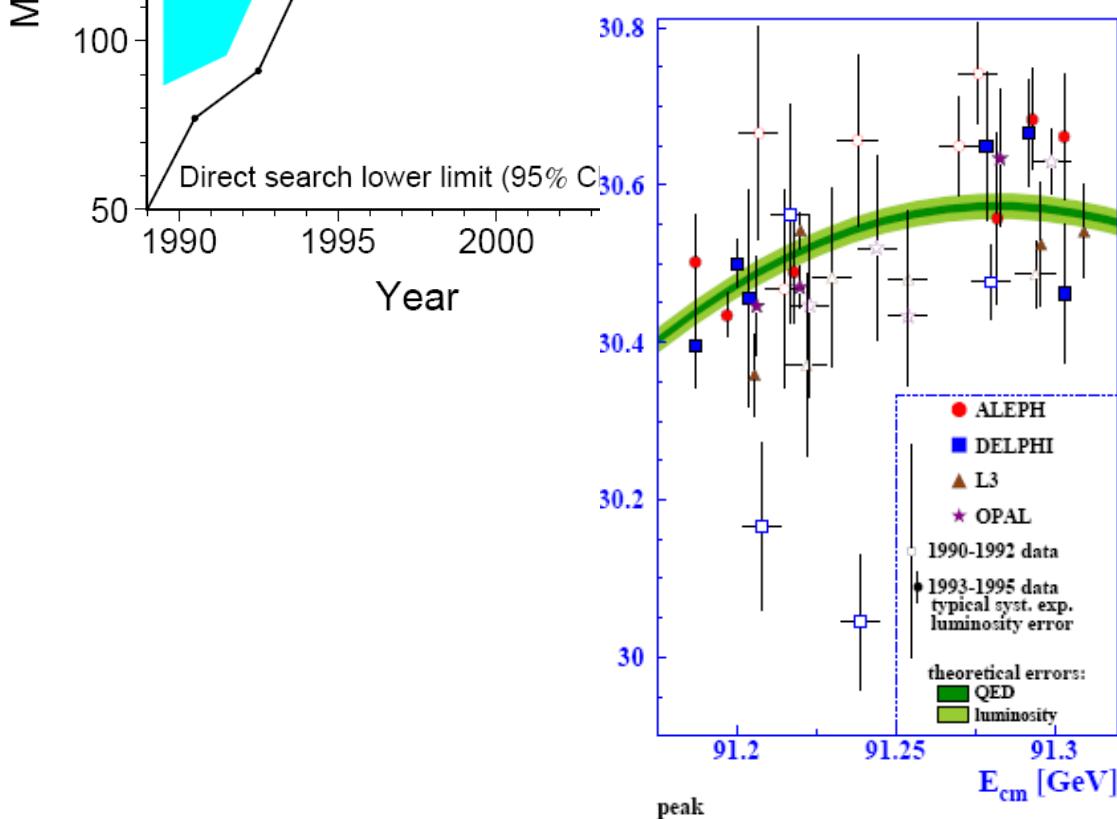
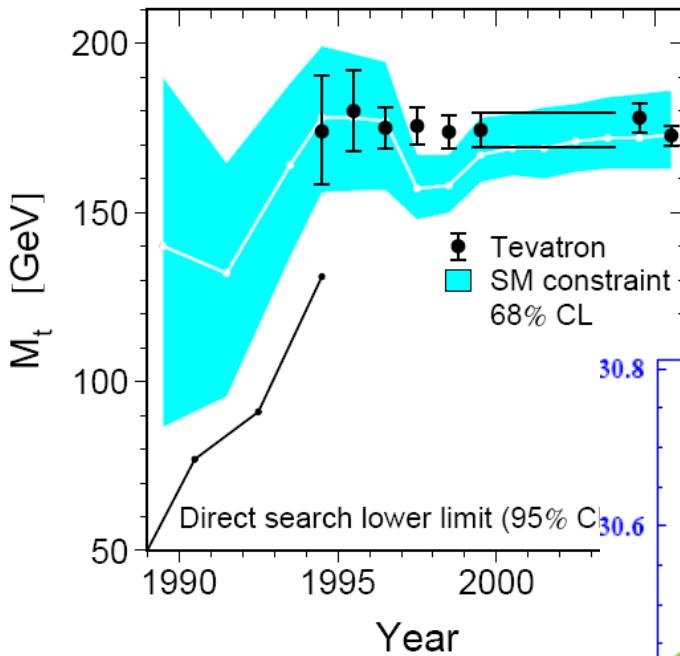
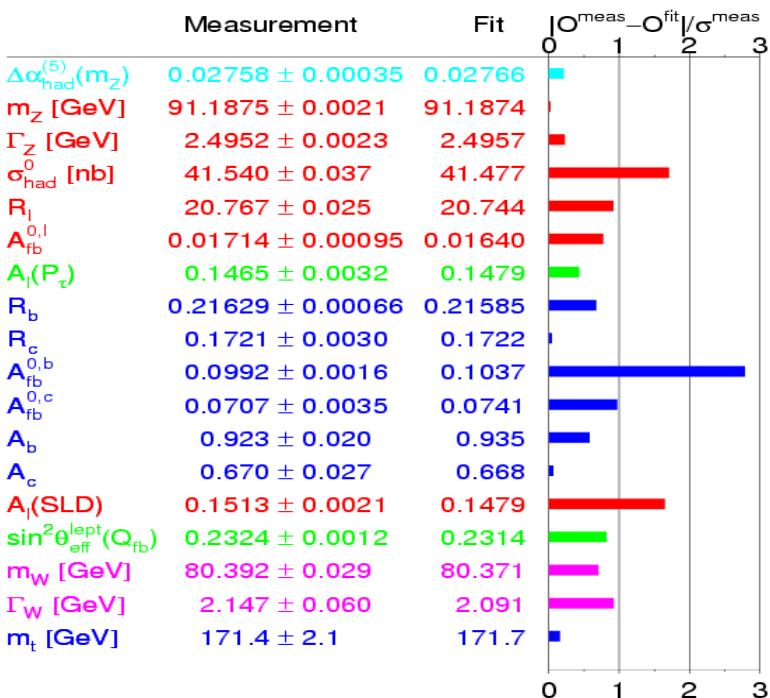
- 6 quarks e léptons (+ antipartículas)
- 4 interações (mediadores - γ , g, W/Z, graviton?)
- Todas partículas fundamentais (sem estrutura)



Vitórias do Modelo Padrão

- Impressionante acordo com dezenas de medidas experimentais

- Incluindo a massa do top
- Produção de quarks pesados
- Jatos
- Assimetrias W, Z
- ...



Problemas

- **Simetria Interna (calibre):** previne anomalias
- Qualquer massa quebra a simetria

$$\underbrace{\text{SU(3)}_{\text{C}} \times \text{SU(2)}_{\text{L}}}_{\text{CDQ}} \times \underbrace{\text{U(1)}_{\text{Y}}}_{\text{Eletrofraca}}$$

CDQ

Eletrofraca



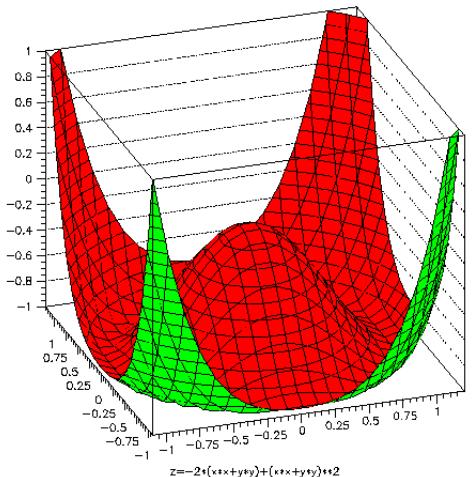
Quebra espontânea → **Mecanismo de Higgs**
EDQ + Fraca

Solução mais econômica

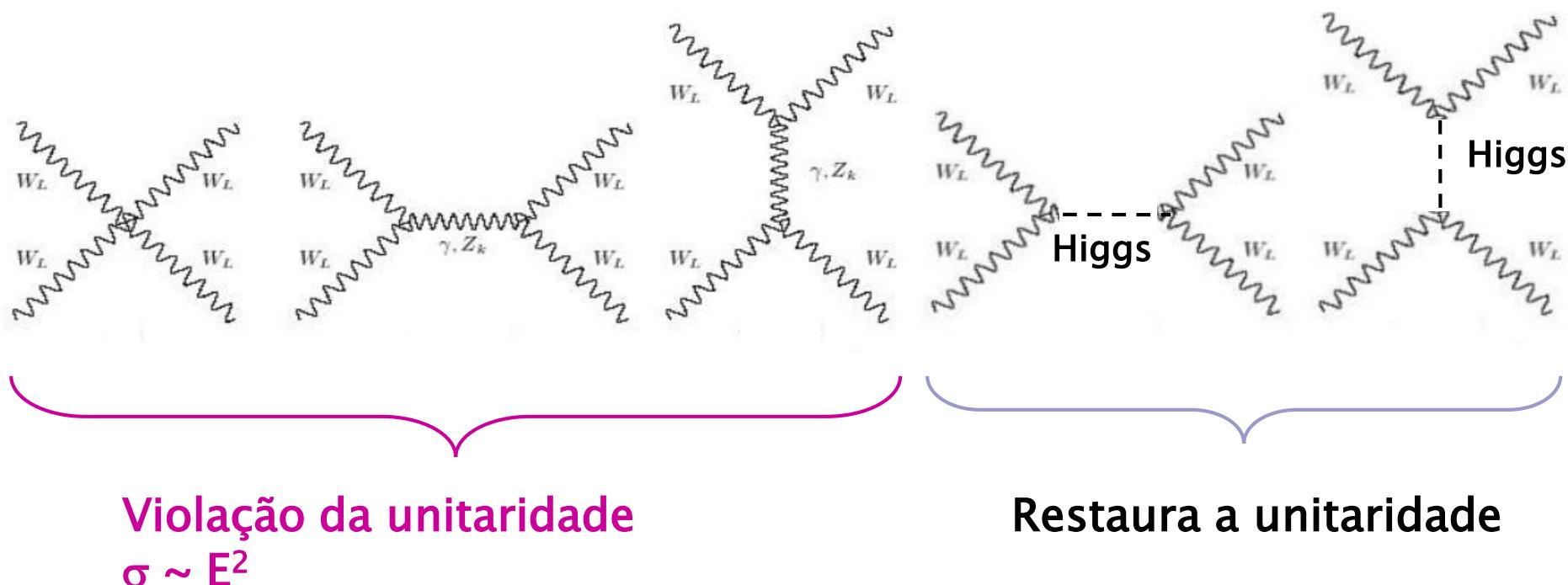
$$V(\phi) = \mu^2 \phi^2 / 2 + \lambda \phi^4 / 4 \quad (\text{vev} \neq 0)$$

- Um único escalar com massa = $\sqrt{2} \lambda v$
- Termos de massa para W^\pm , Z ($\propto v$)
- Interação com férmions → massa ($\propto v$)

Mas...

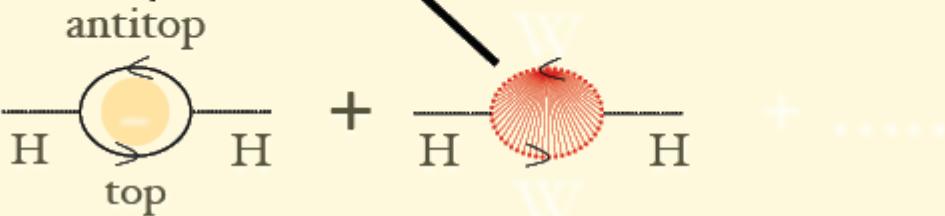


- Artificial: forma do potencial, acoplamento, etc.
- Massas não determinadas.
 - Massa do Higgs < 1 TeV para evitar anomalias

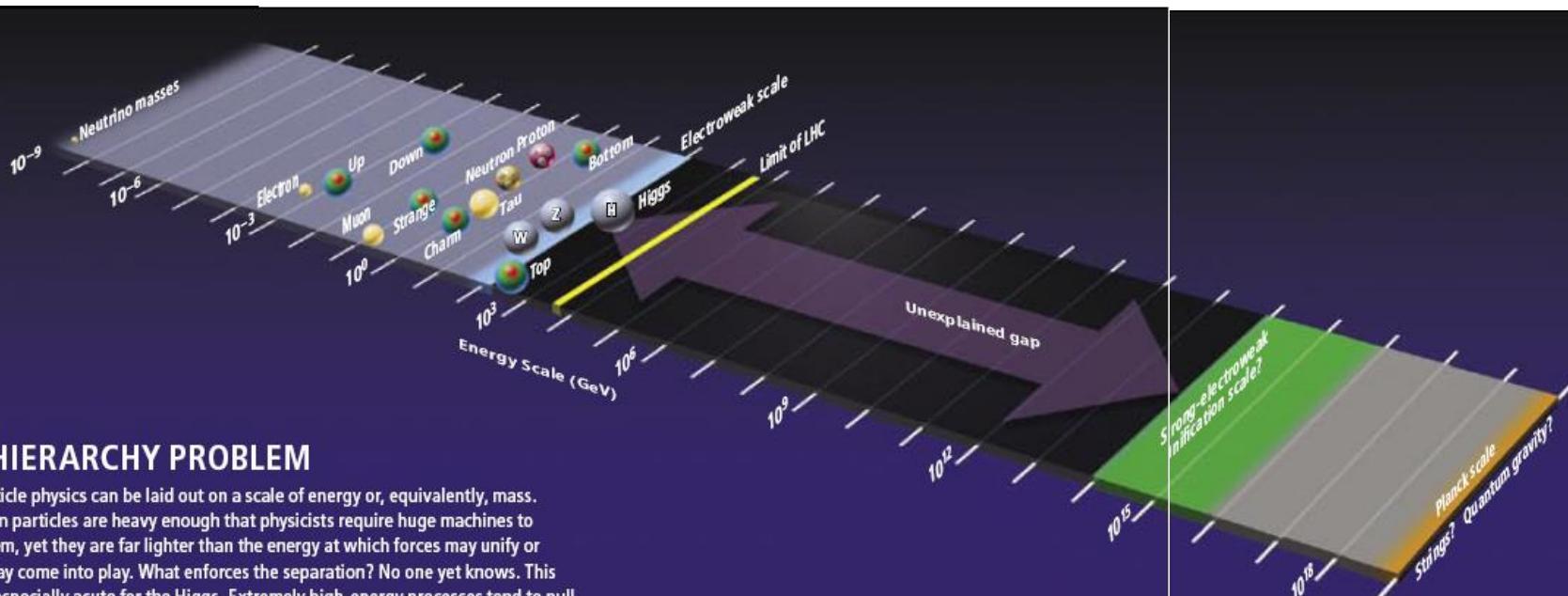


- Massa do Higgs sofre correções por sua interação
- $m_H < 1 \text{ TeV}$ exige ajuste preciso (artificial) $\Lambda \approx 10^{19} \text{ GeV}$
- Problema da hierarquia

$$m_H^2 = m_0^2 - \frac{6G_F}{\sqrt{2}\pi^2} \left(m_t^2 - \frac{1}{2}m_W^2 - \frac{1}{4}m_Z^2 - \frac{1}{4}m_H^2 \right) \quad \Lambda^2 \sim m_0^2 - (115 \text{ GeV})^2 \left(\frac{\Lambda}{400 \text{ GeV}} \right)^2$$



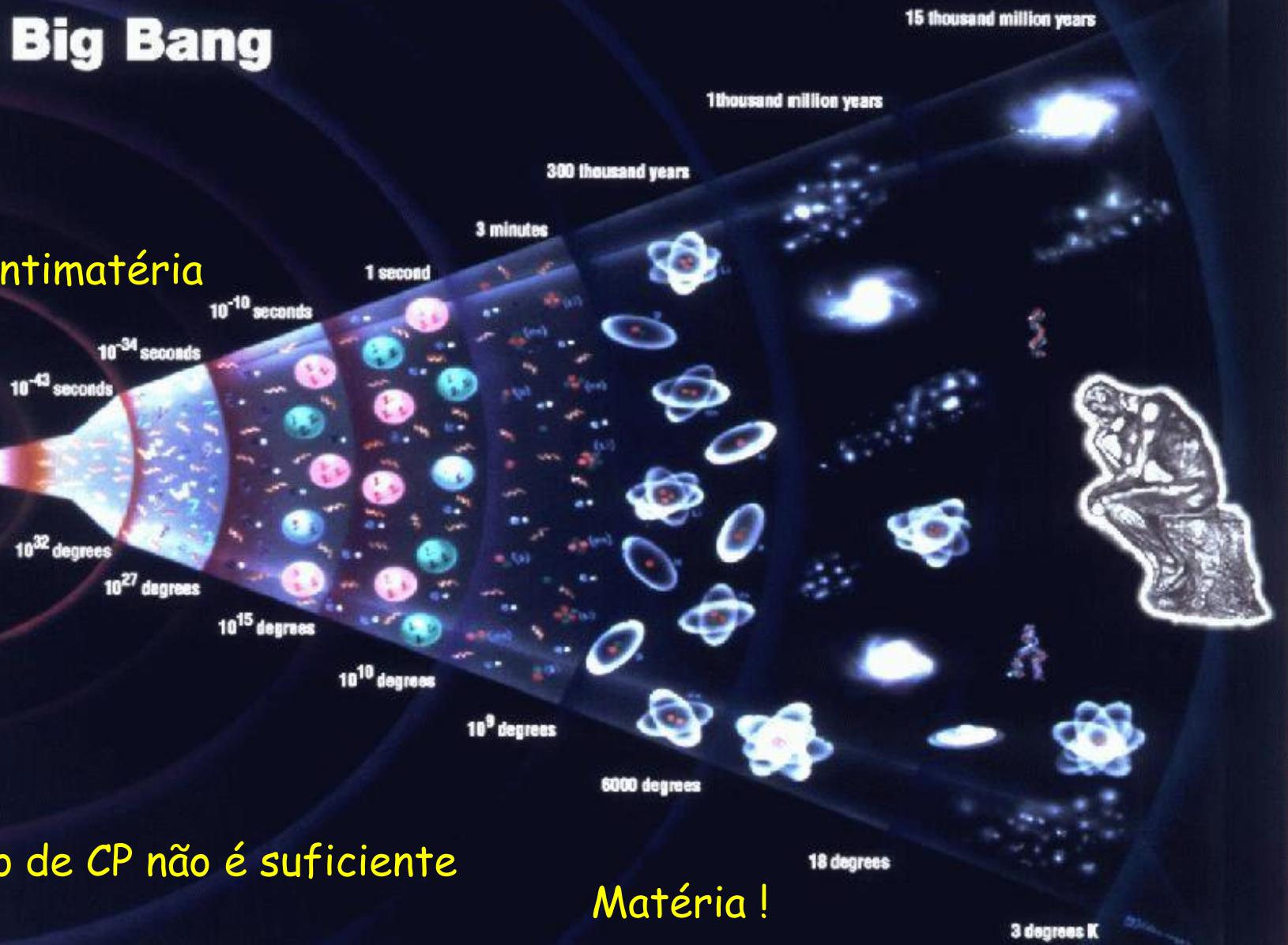
$\Lambda = \text{scale up to which the SM is valid}$



Existem mais Problemas

Big Bang

Matéria=Antimatéria



Violação de CP não é suficiente

Matéria !

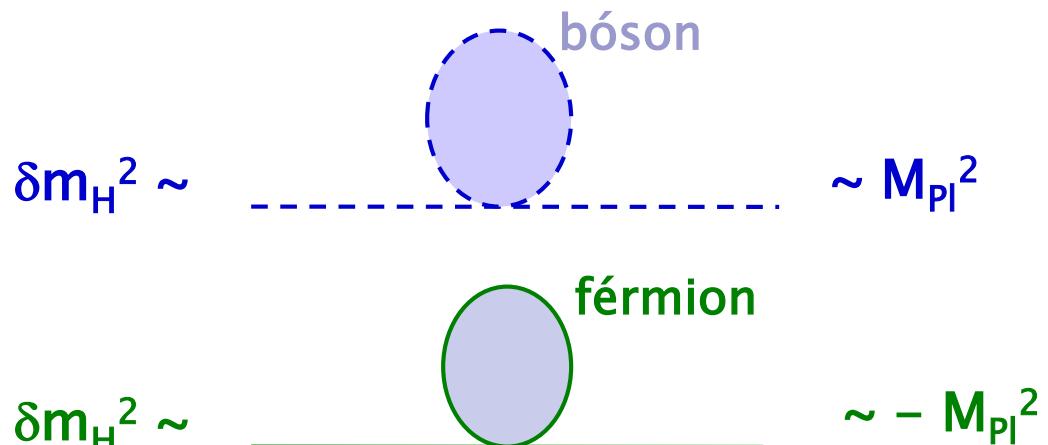
Matéria Escura



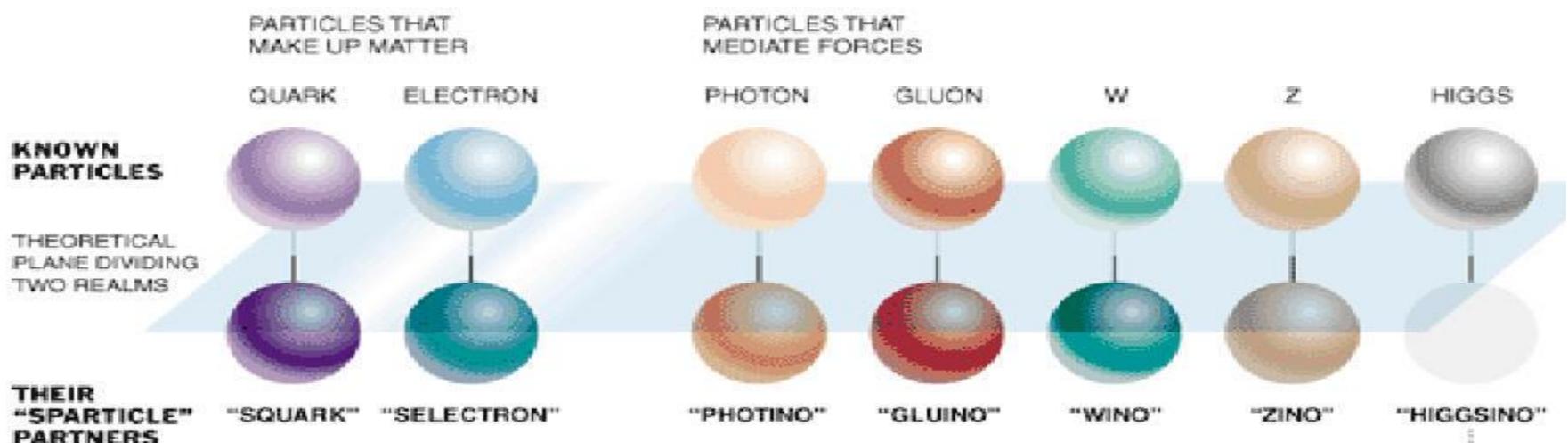
Não é compatível com partículas ordinárias
• Supersimétricas??

Como resolver esse dilema???

- Supersimetria
 - Perfeita simetria
 - férmions e bósons
 - cancelamento
 - Novas partículas

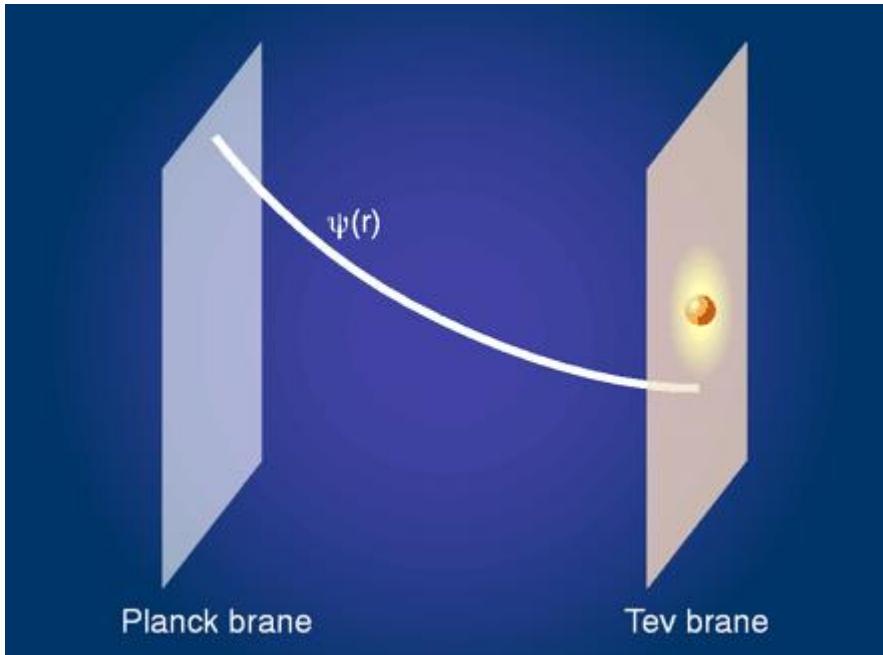


superparticles



Dimensões extras

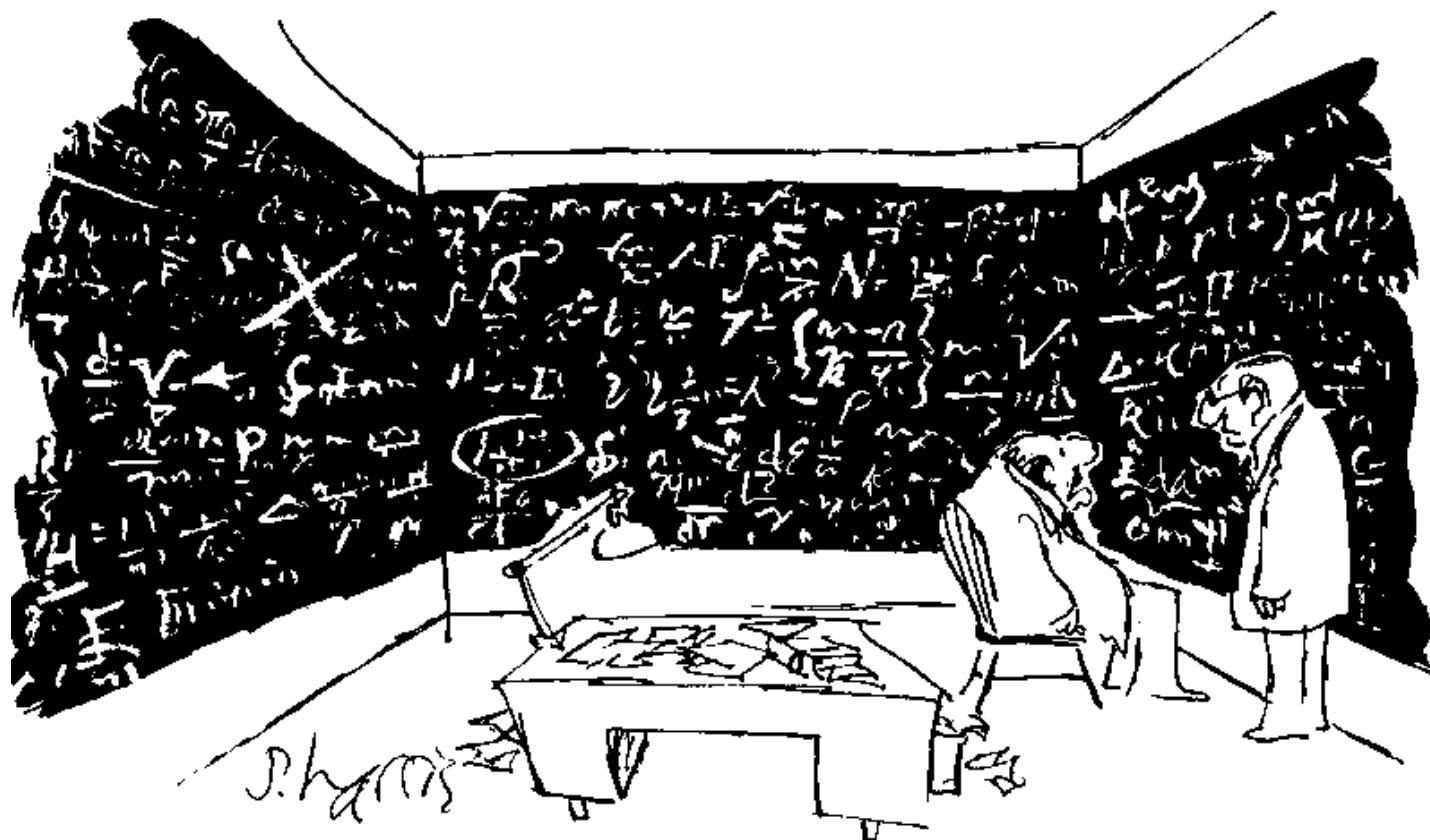
- Motivação - Supercordas
 - Gravitação \leftrightarrow D.E.
- Escala de unificação == Eletrofraca
- Muitos modelos
 - Muitos efeitos
 - Ressonâncias KK
 - Cordas
 - Gráviton
 - Mini-buracos negros
 - Energia perdida
 - ...



Parece confuso??

Qual a solução??

- Estudar a escala de energia TeV
- LHC



"Whatever happened to *elegant* solutions?"

Sistema de Unidades

SI padrão não é adequado para os sistemas microscópicos

$M=kg$, $L=m$, $t=s \Rightarrow E=J$

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

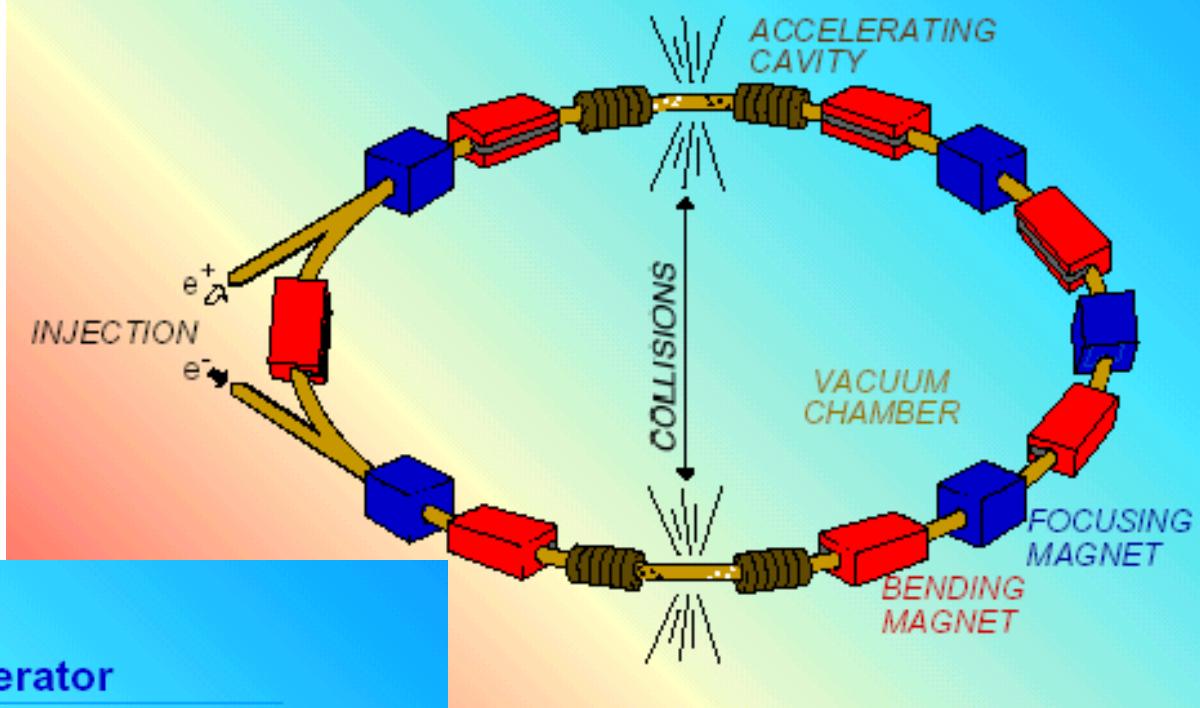
Aceleradores $\approx 10^{12} eV$ (CM)

Aceleradores X Raios Cósmicos

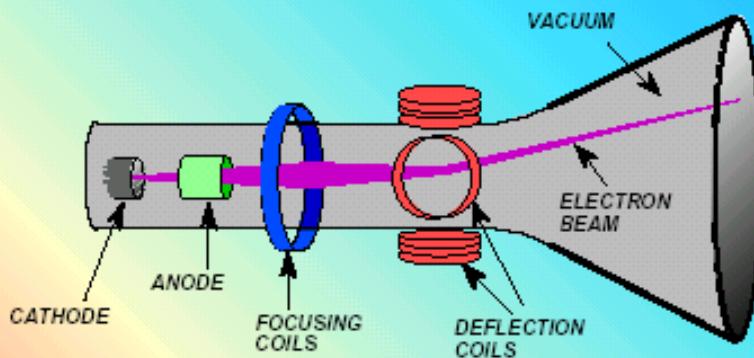
Energia limitada pela tecnologia $\approx 14 \text{ TeV}$	Energia limitada pela fonte cósmica $\approx 400 \text{ TeV}^{**}$
Alta Taxa de eventos	Baixa taxa de eventos $1/\text{km}^2/\text{ano}$
Controle sobre as condições da interação (E, feixe, ...)	Sem controle
Maior controle sobre fontes de erro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

**** Energia disponível no sistema de centro de massa**

Accelerator Ring

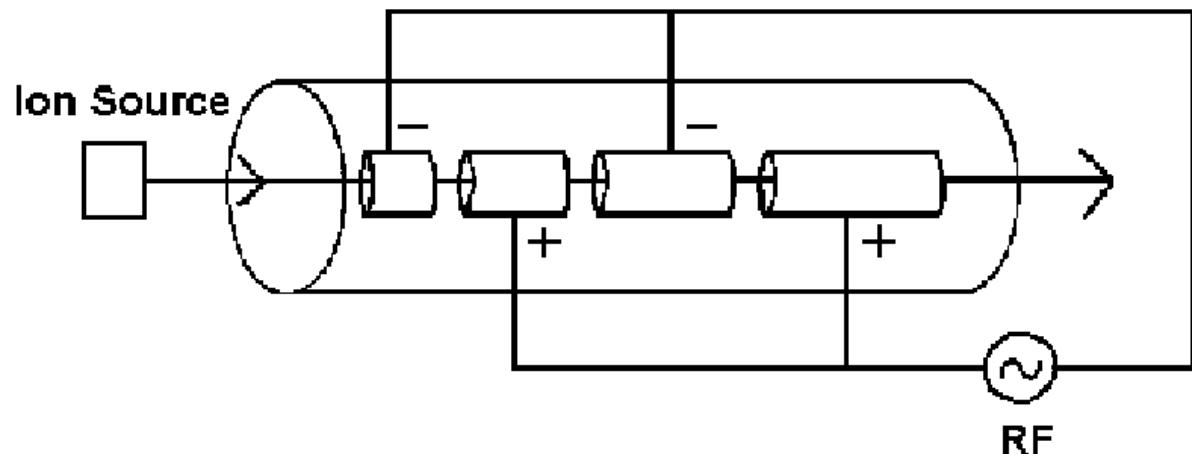


A Particle Accelerator

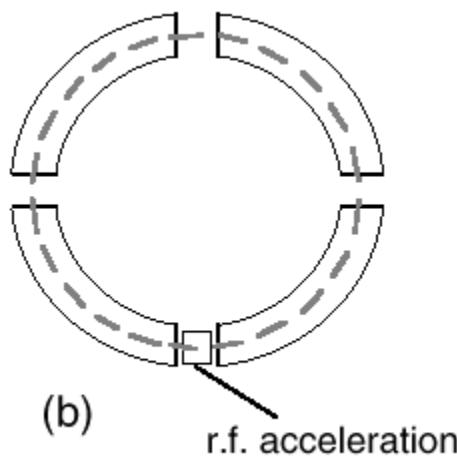
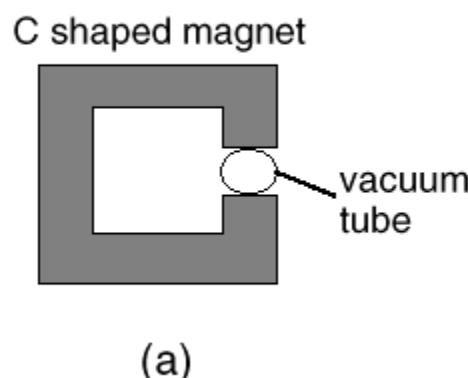


- the voltage in a T.V. is typically 20kV
- i.e. the energy of each electron is 20keV
- LEP electrons are 50 billion eV (50 GeV)
- 50 Gigavolts --> circular machine

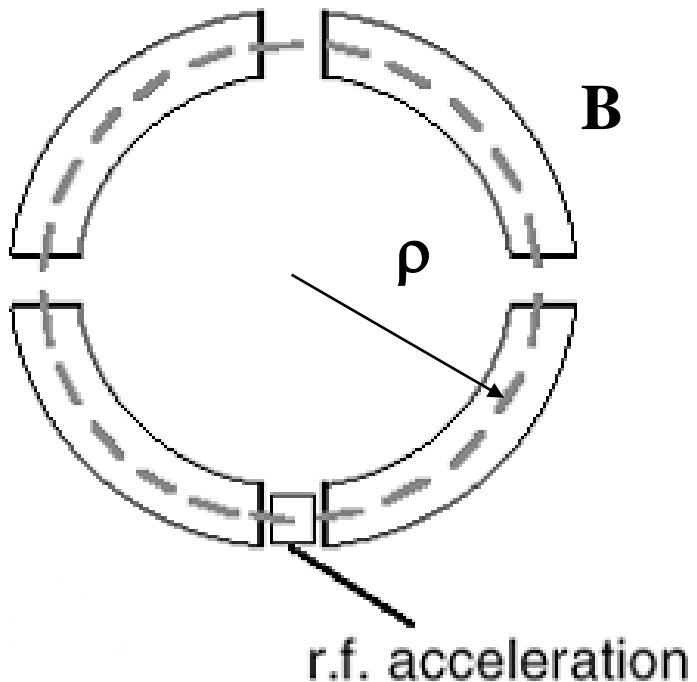
Aceleradores Lineares x Circulares



**Limitados pelo comprimento
radiação síncrotron $\approx \emptyset$**



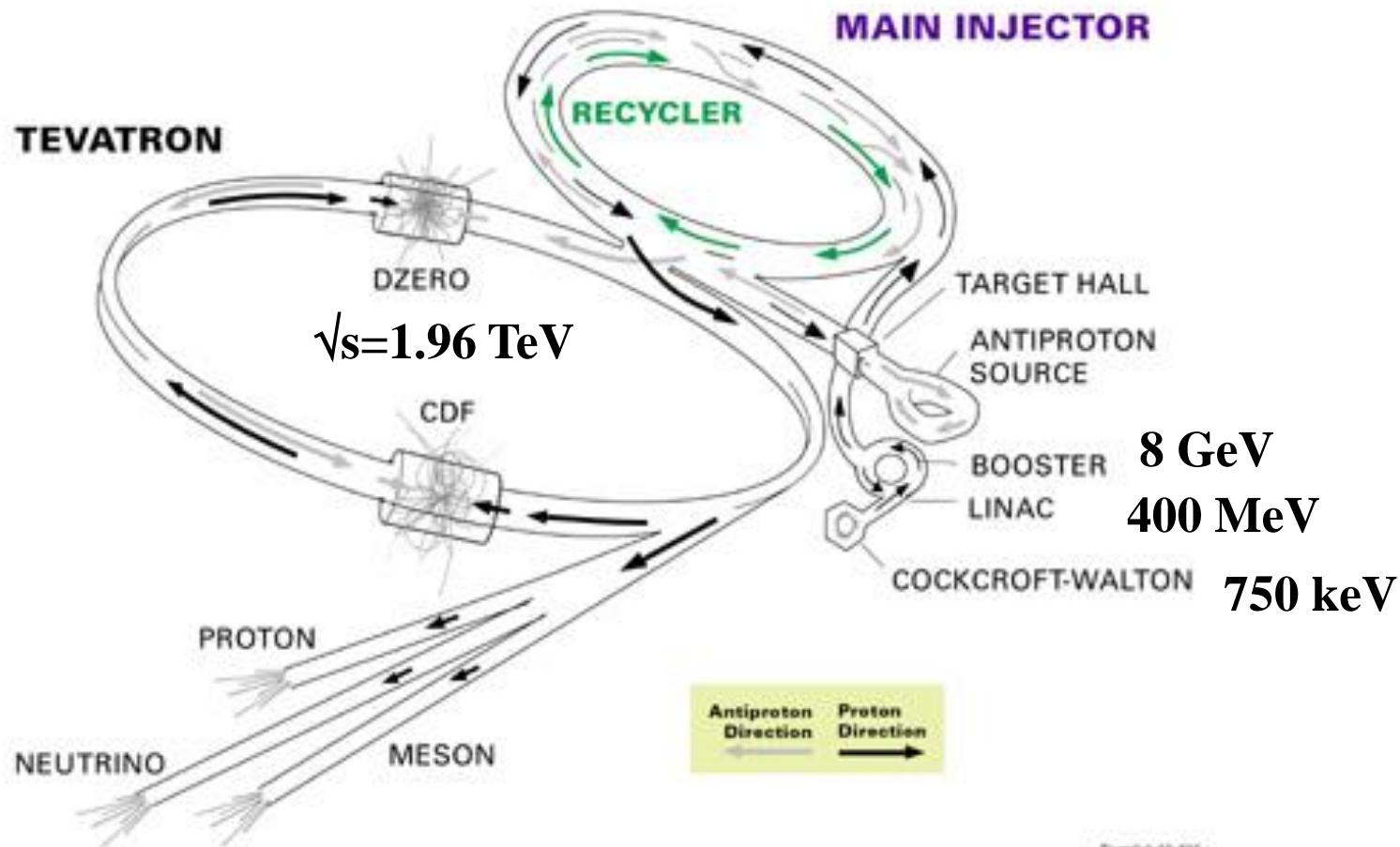
**Limitados pelo campo magnético
radiação síncrotron principalmente e^\pm
($\Delta E \approx E^4/m^4$)**



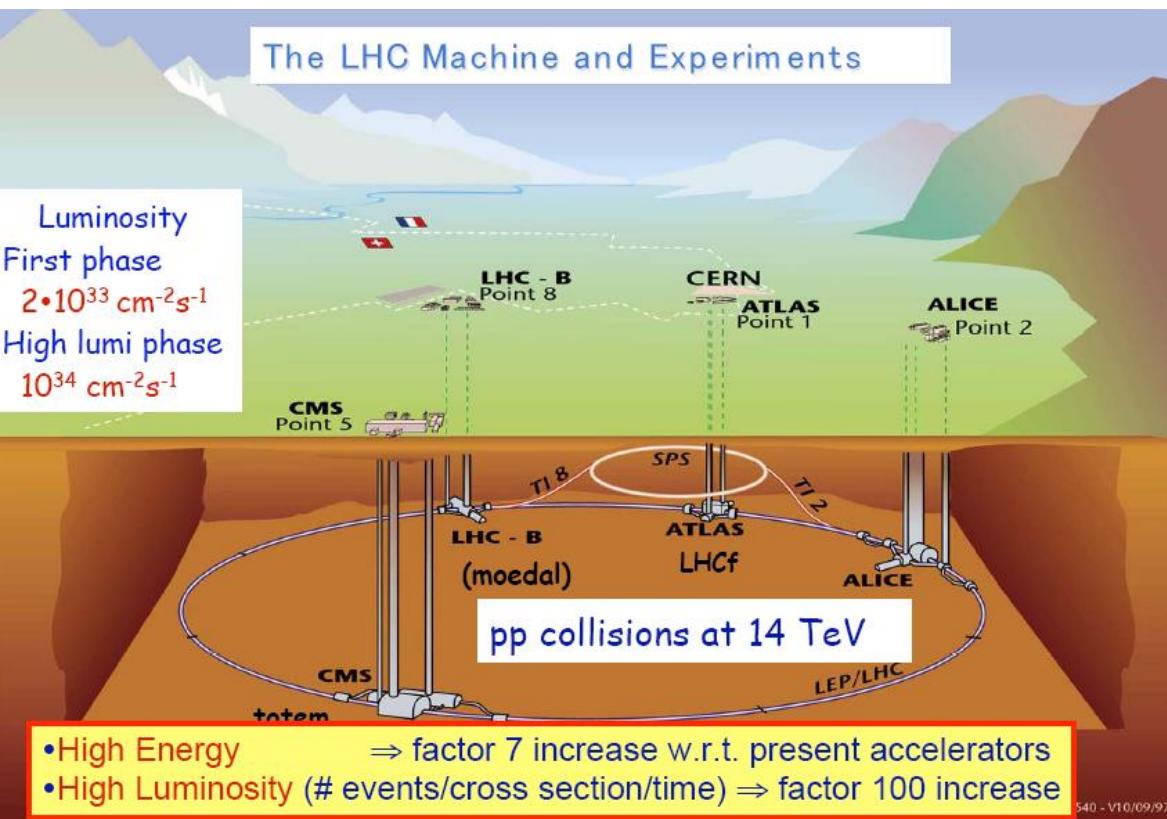
A cada ciclo a partícula é acelerada na cavidade de RF aumentando sua velocidade (momentum= p).
Para mante-la na órbita deve-se aumentar o campo magnético B de forma que $p = 0.3B\rho$

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.

FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



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 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}^{**} (**\text{a partir de 2019/20})$

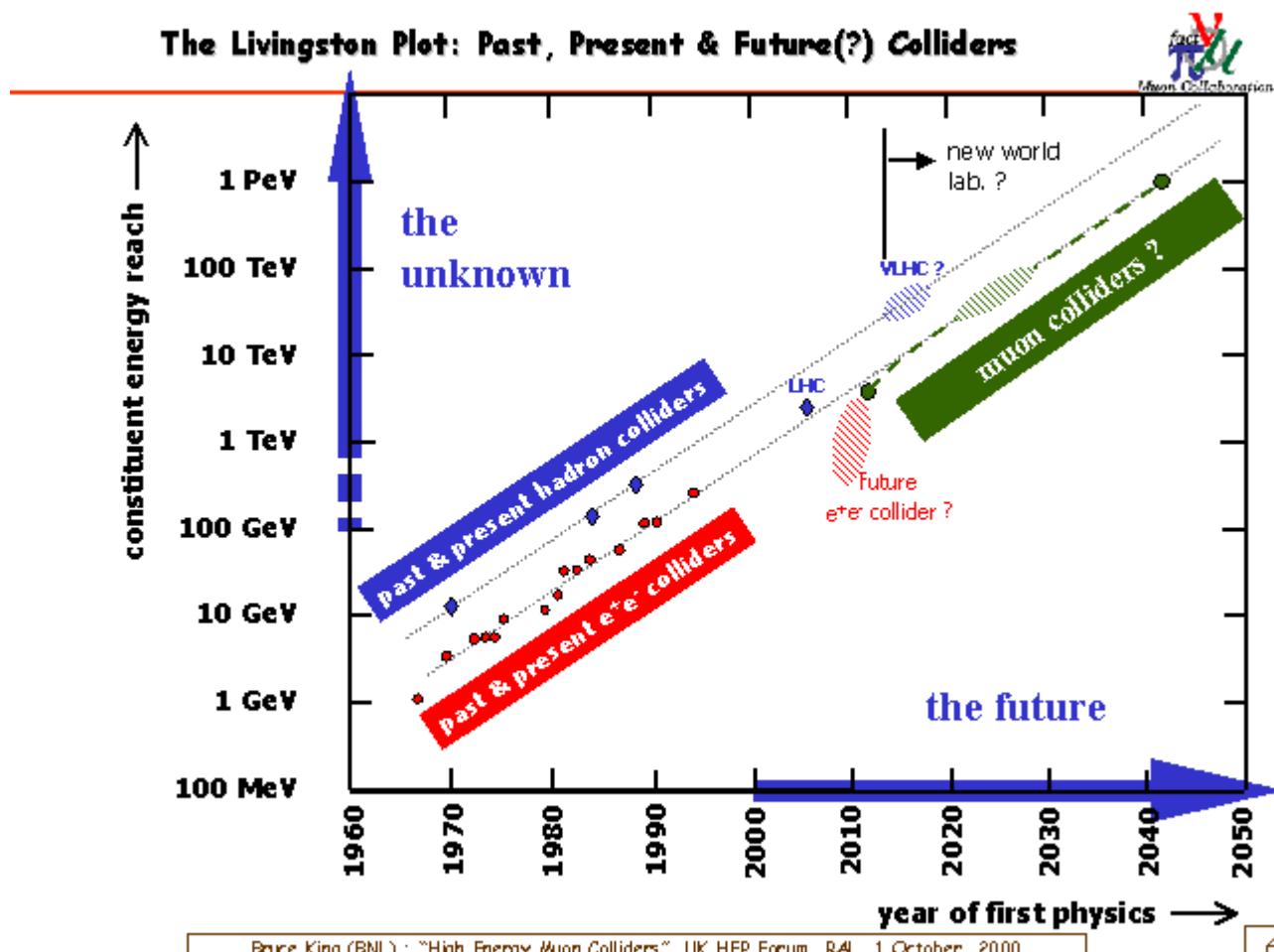
Luminosidade ~

$\sim 100 \text{ fb}^{-1} / \text{expt} / \text{Ano}^{**} (**\text{a partir de 2017/18})$

-G. Alves-

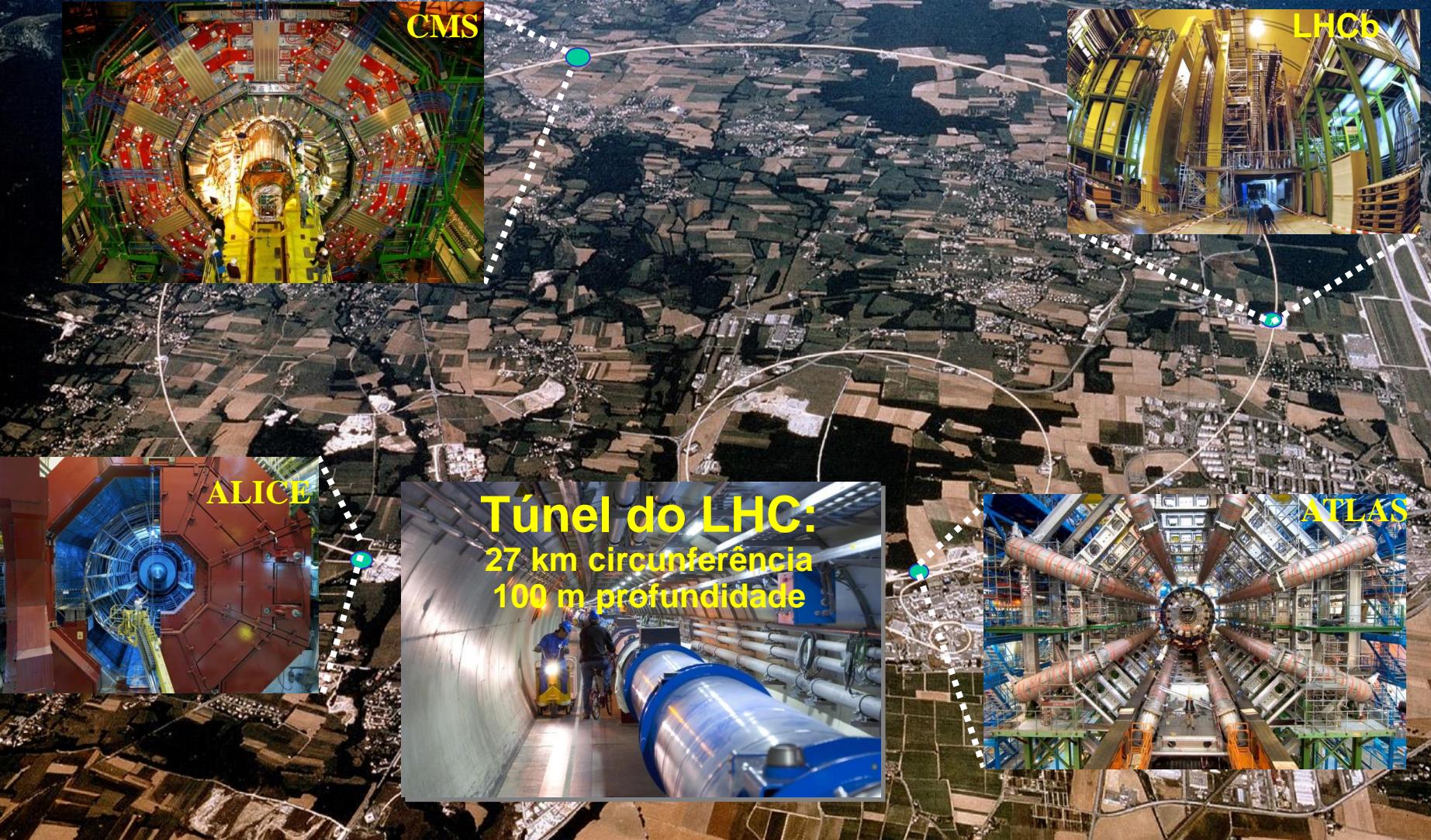
Aceleradores Lineares x Circulares II

- ↔ Já vimos que a energia disponível para produção de novas partículas $\sqrt{2}E \Leftrightarrow 2E$ (alvo estacionário x colisão frontal)
- ↔ Dai a utilização cada vez mais frequente de colisores de partículas

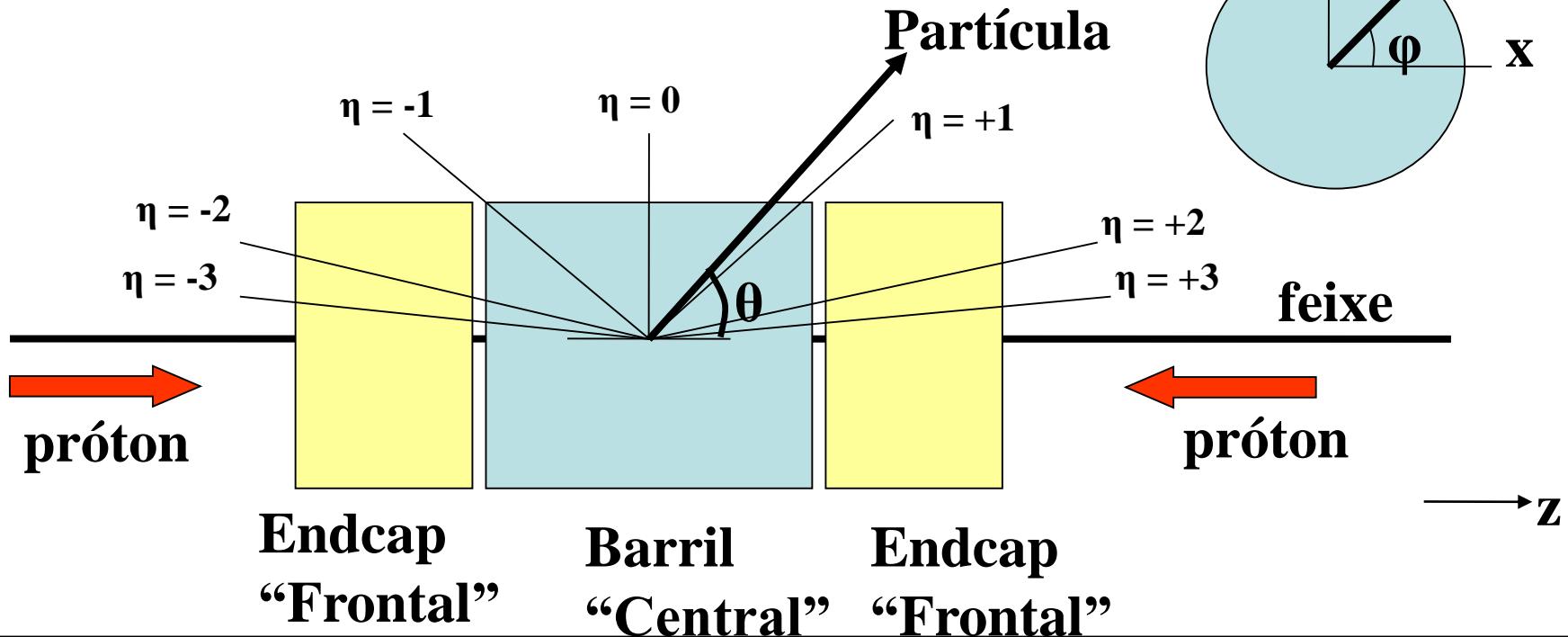


Os Experimentos do LHC

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



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

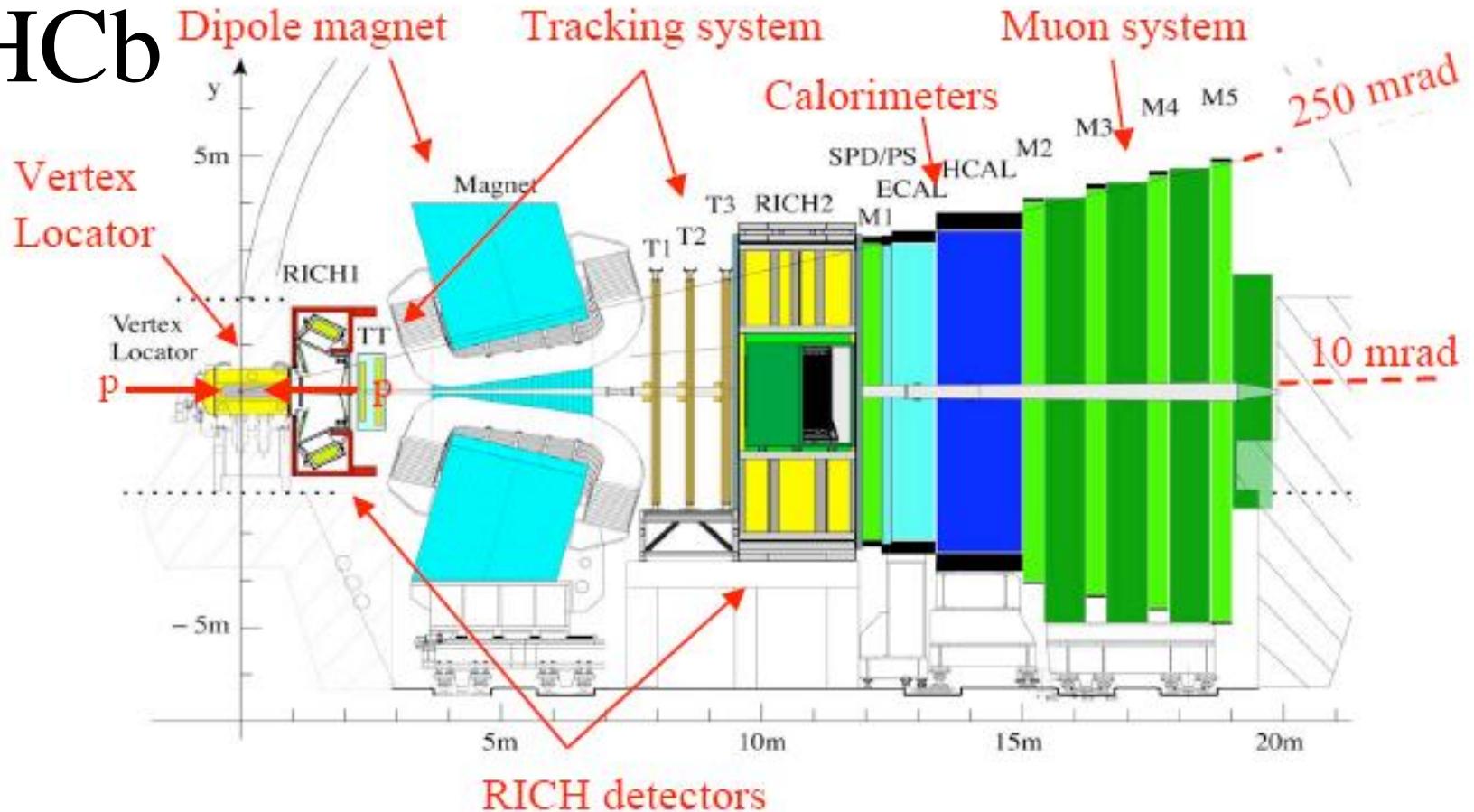
Pseudorapidez: $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$

Boa aproximação da
rapididez se $E \gg m$ *

“Momentum Transverso” $p_T = (p_x, p_y)$

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

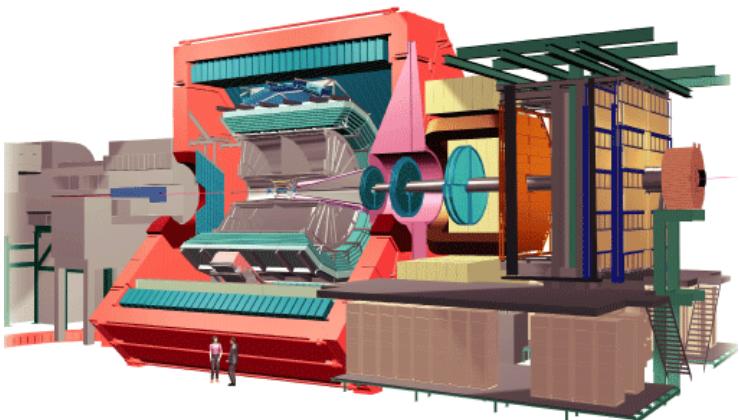
LHCb



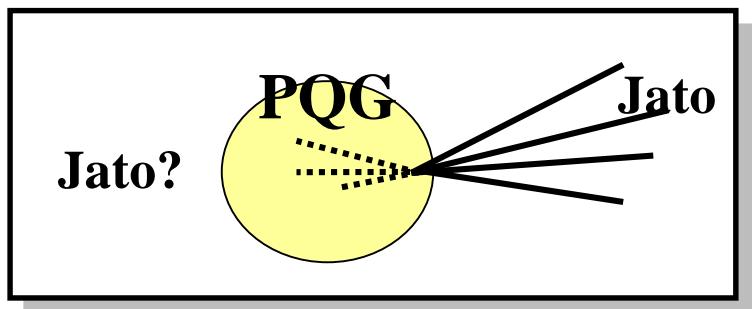
- Detector assimétrico para a física de mesons B
- Violação de CP

ALICE

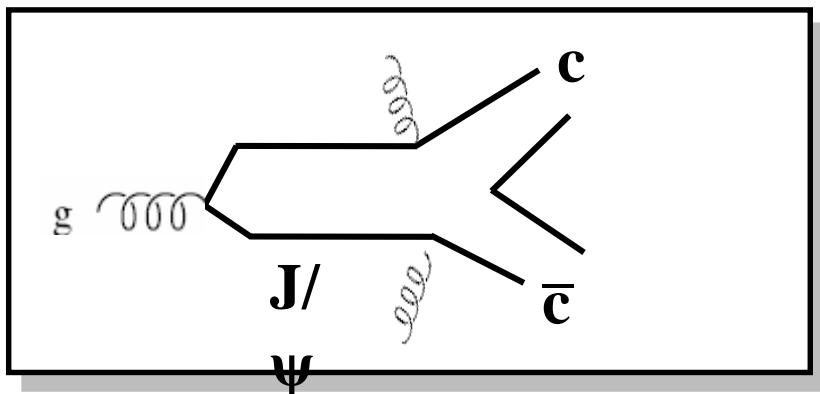
- Desenhado para estudar colisões de **ions pesados** (e.g. Pb-Pb ou Au-Au)
- Produção de um novo estado da matéria – o plasma de quarks-gluons
- Quarks não mais confinados no interior de hadrons sem cor



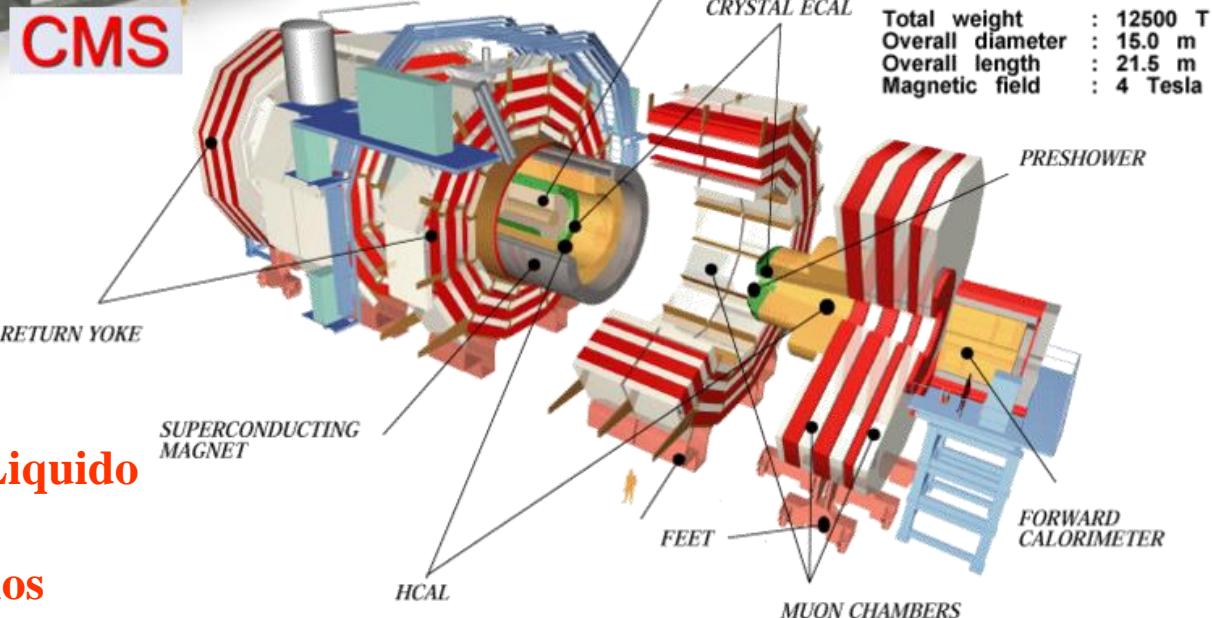
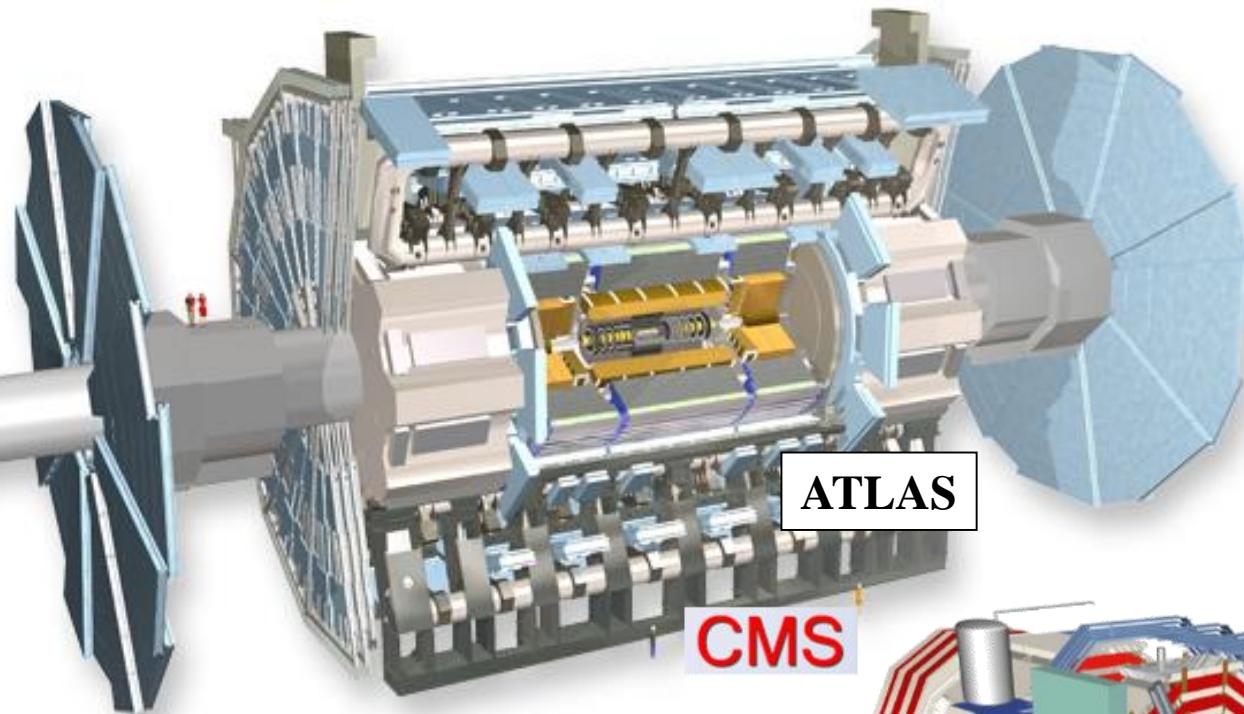
- Sinais de PQG:
 - Supressão de Jatos



- Supressão de Quarkônio (e.g. J/ψ)
("estados ligados")



Detectores Gerais



Diferenças:

Tamanho : CMS “compacto”

Campo Magnético

ATLAS tem um toróide

Calorímetro Eletromagnético:

CMS cristais. ATLAS Argônio Líquido

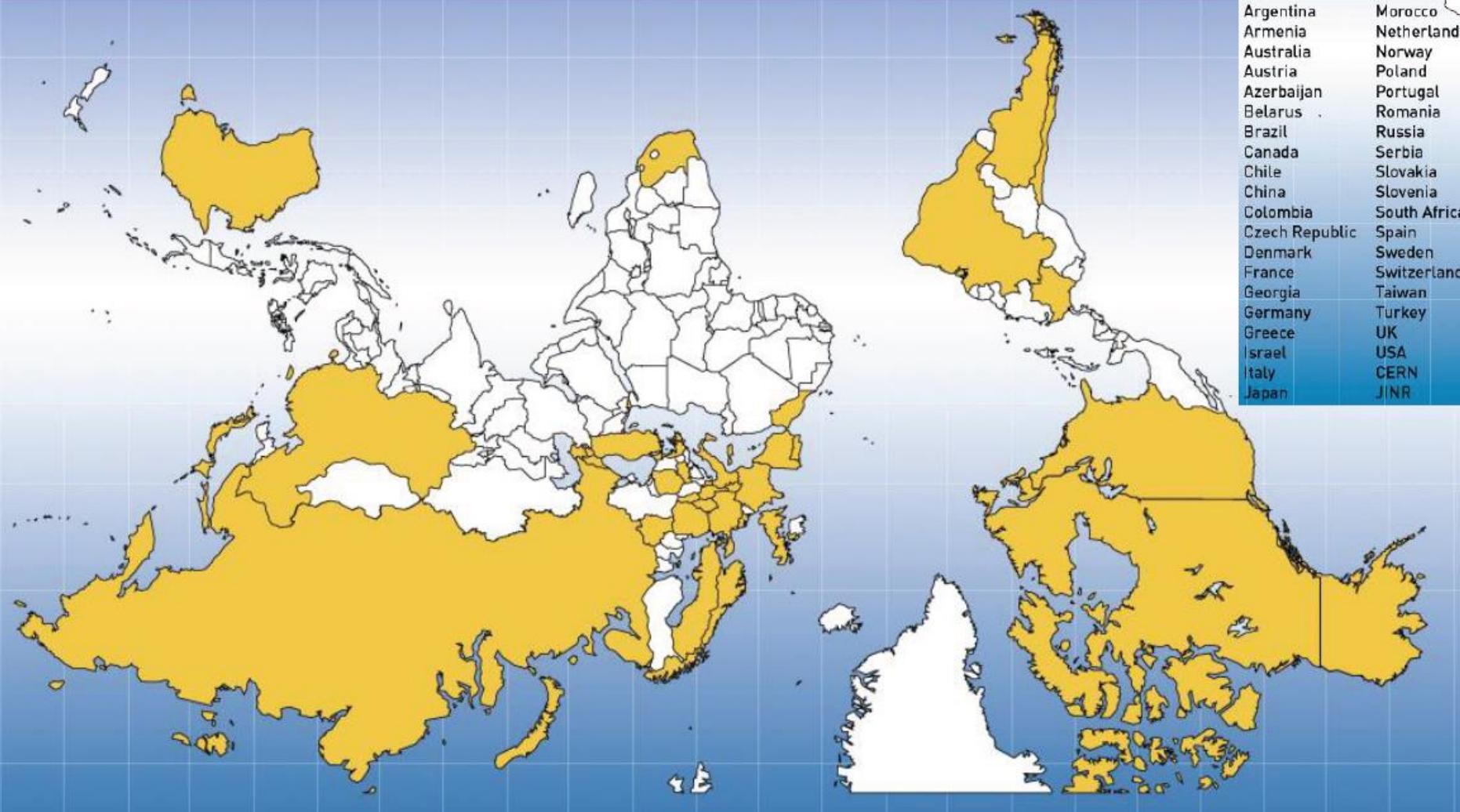
Det. De posição externos

CMS silício. ATLAS câmara a fios

A Colaboração CMS

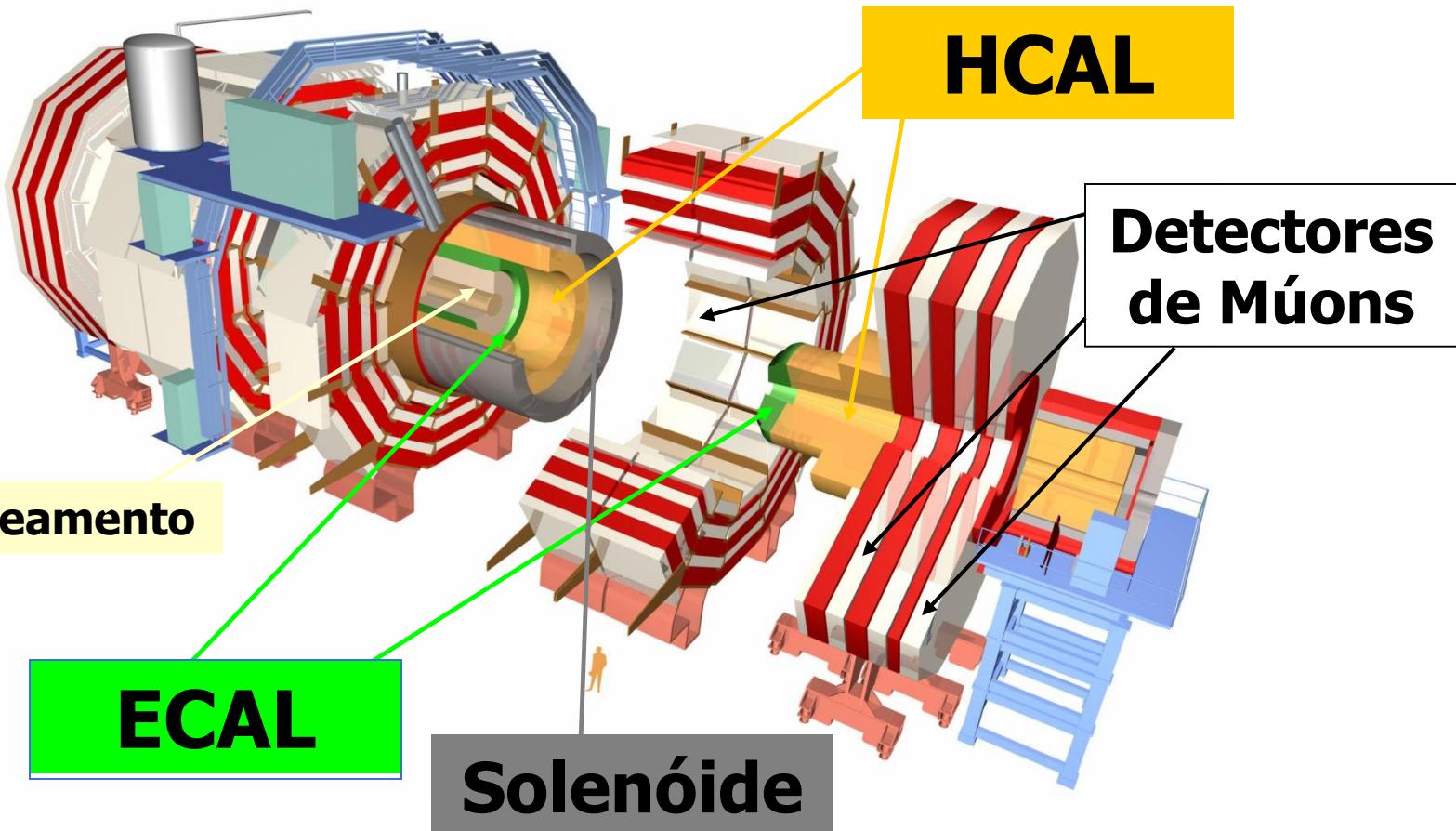


Lafex/CBPF

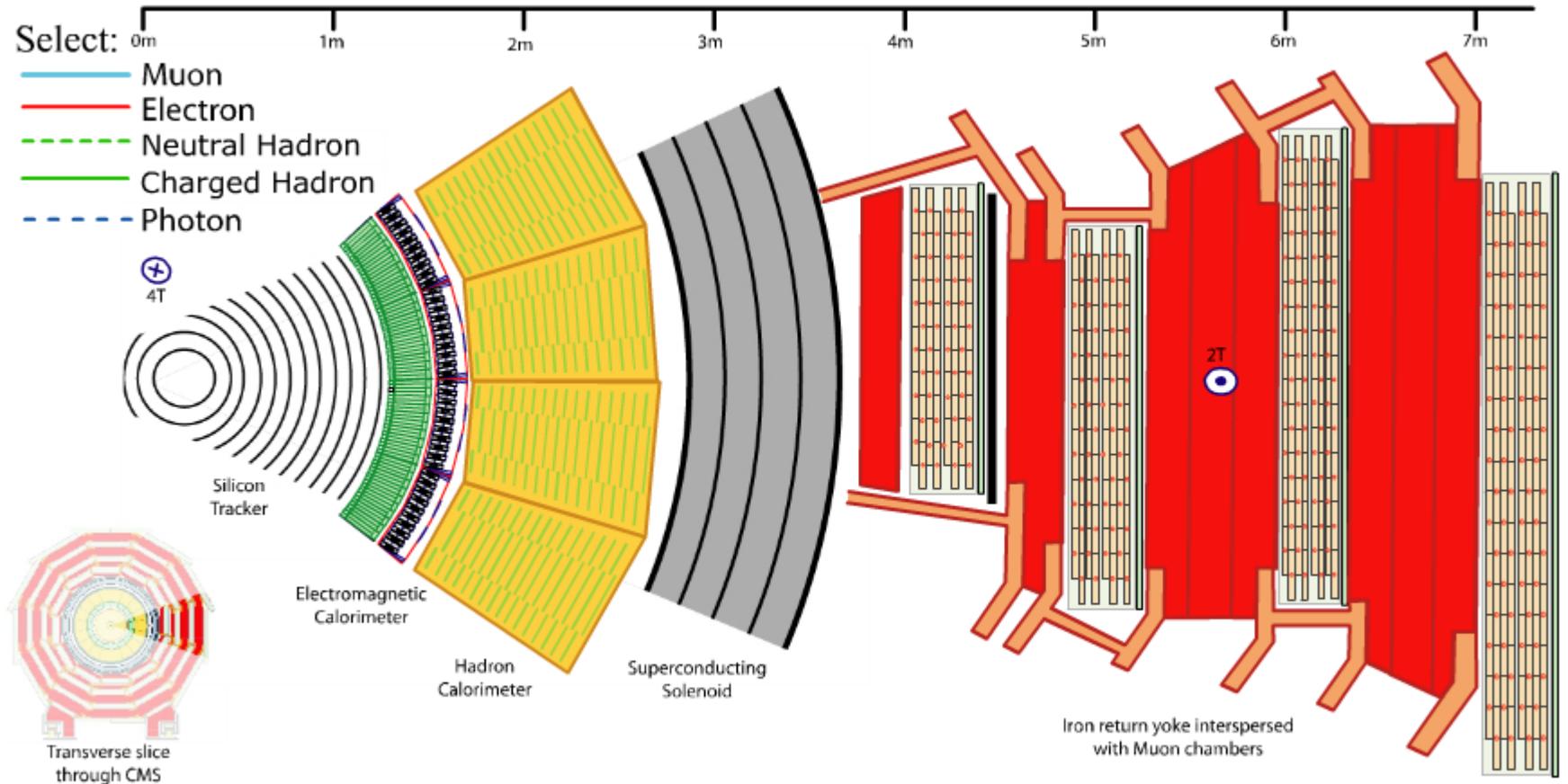


O Detector CMS

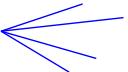
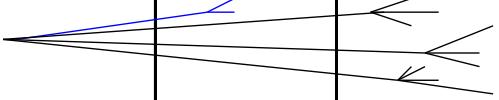
Lafex/CBPF



Corte Transversal do Detector

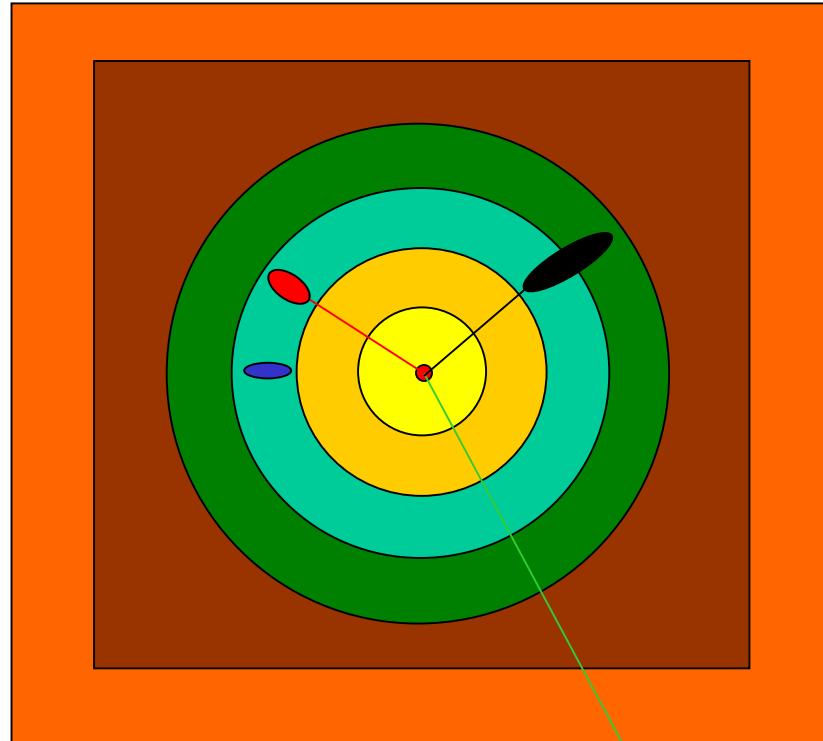
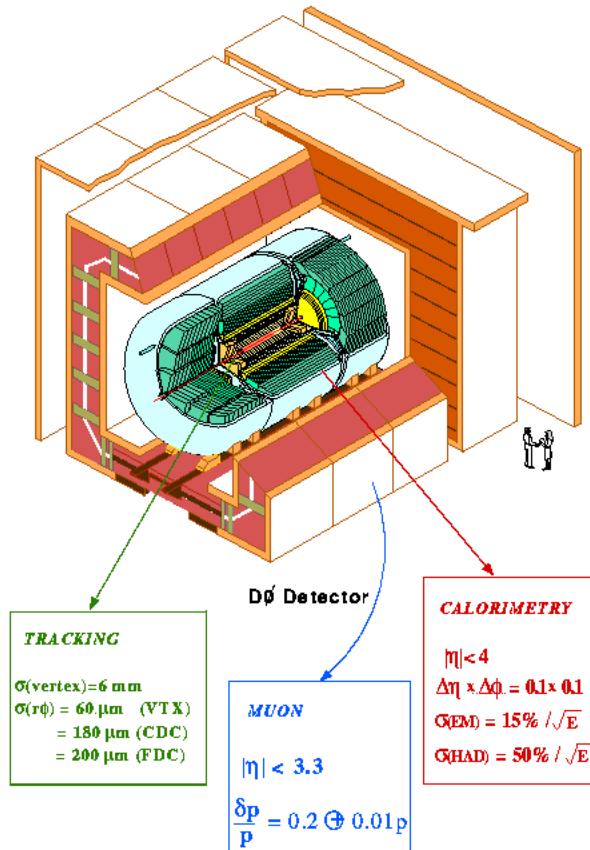


Subsistemas Detectores

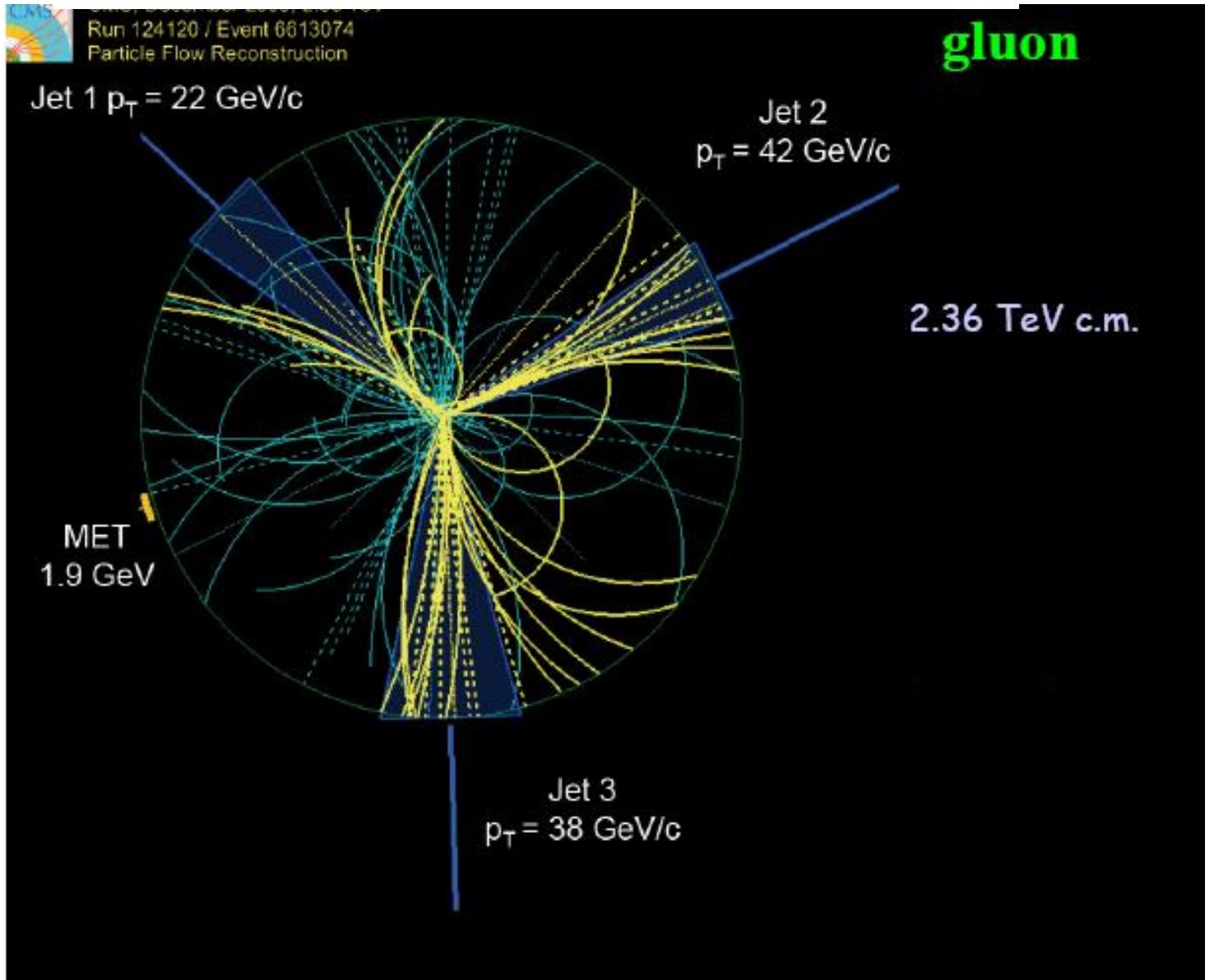
Partícula	Tracking	ECAL	HCAL	Muon
γ				
e				
μ				
Hadron				
neutrinos				

Usamos diferentes tipos de detectores para identificar uma determinada partícula.

Detector Típico em Colisões

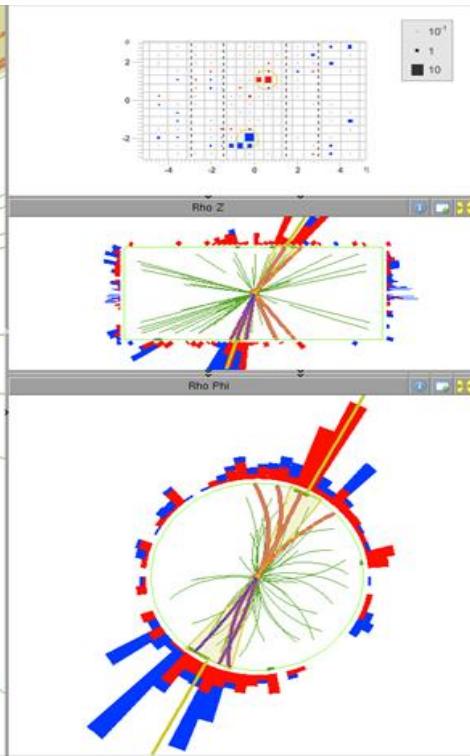
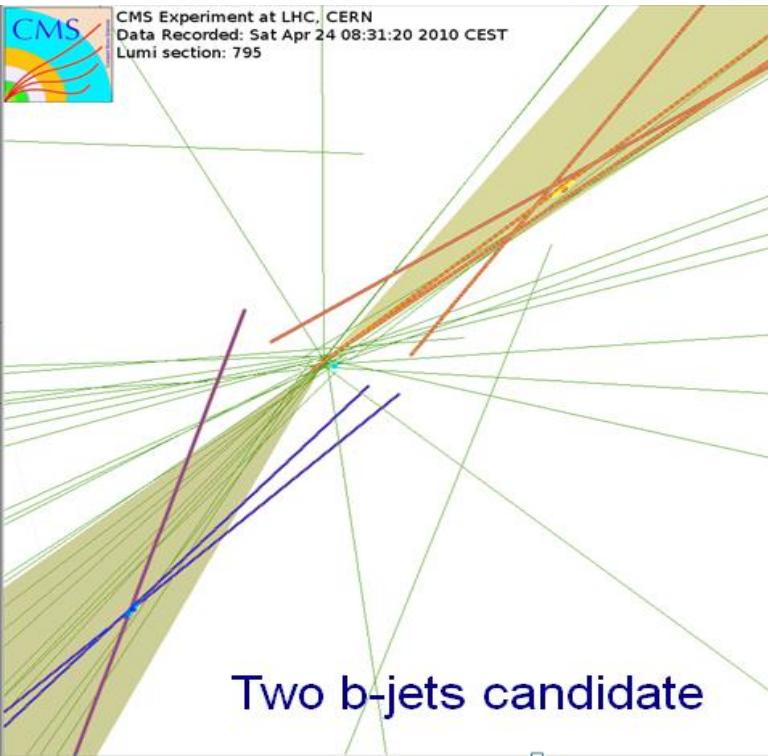
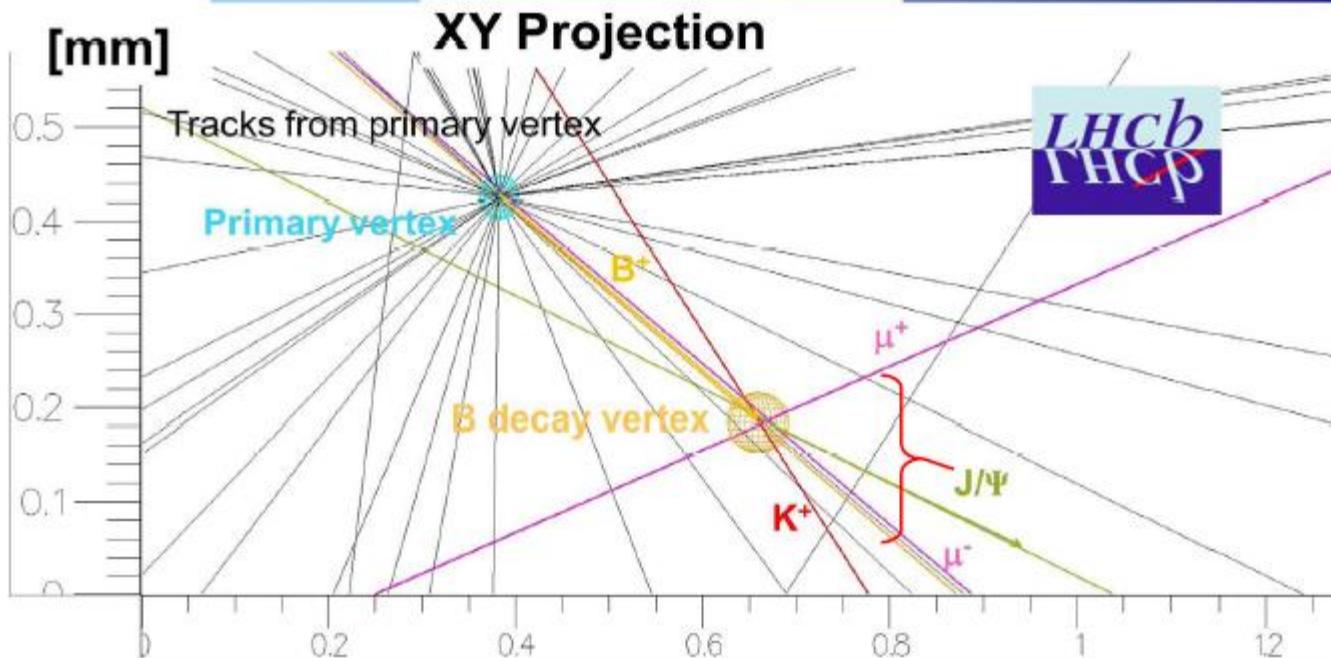


Jatos de quarks e glúons



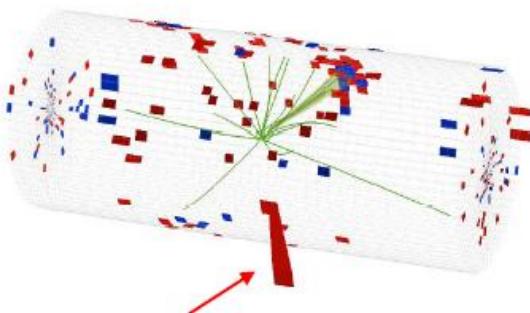
Quarks Pesados – b

$B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$

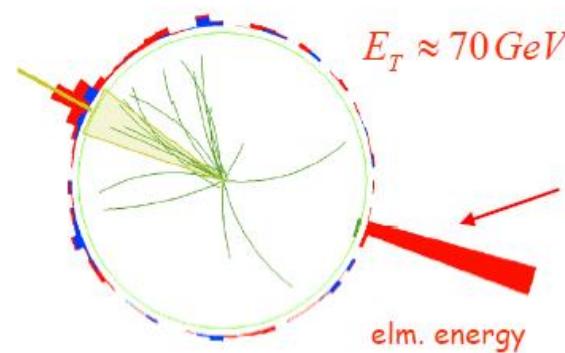
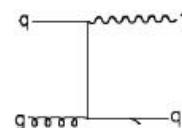


**Detectores de vértice
fundamentais na
identificação dos
decaimentos**

Photons



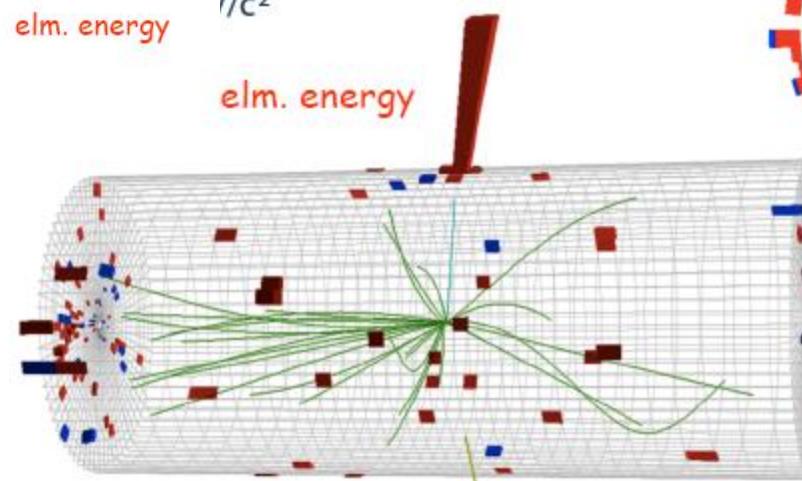
T Hebbeker



CMS Experiment at LHC, CERN
Run 133874, Event 21466935
Lumi section: 301
Sat Apr 24 2010, 05:19:21 CEST

35.6 GeV/c
 TeV/c^2

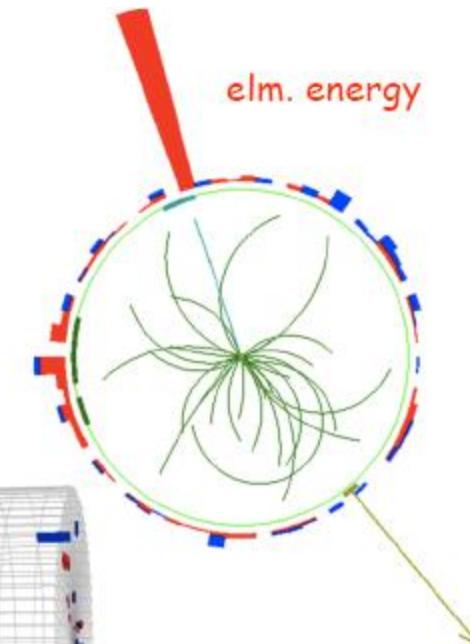
elm. energy



$$W \rightarrow e \nu_e$$

Missing E_T = neutrino !

Elétrons e Fótons



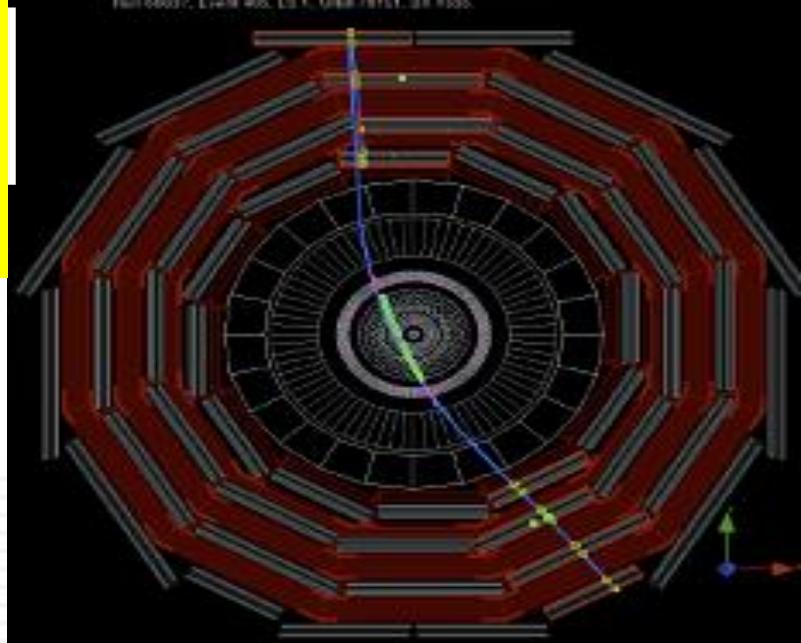
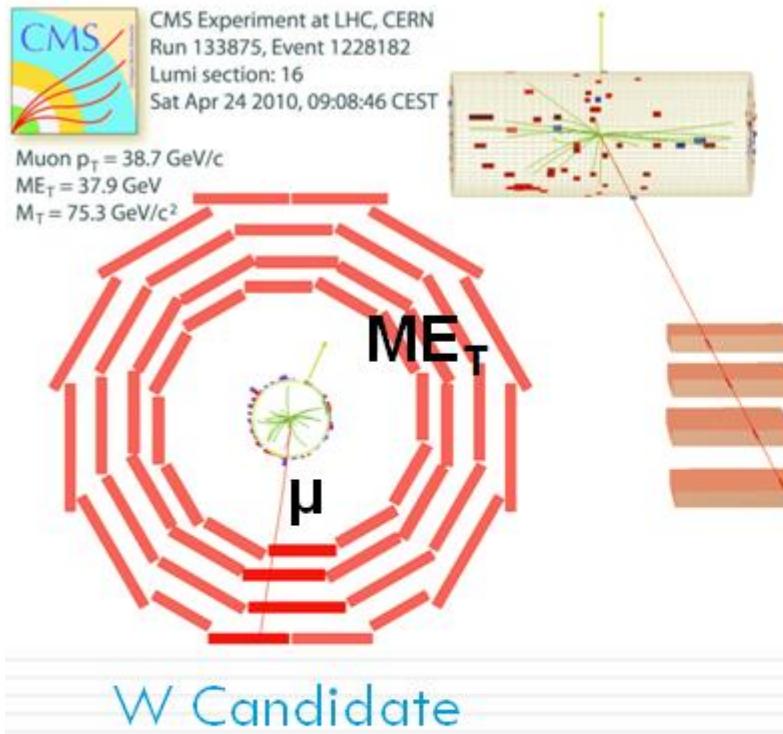
Fundamentais para
calibração da Energia
medida nos calorímetros.

Estado final em diversos
decaimentos.

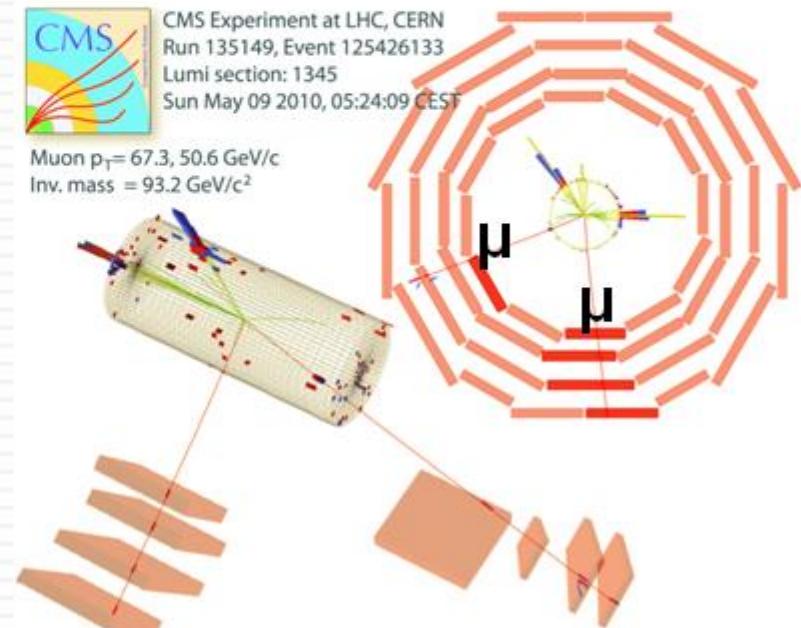
$H \rightarrow \gamma\gamma$

Muons

Identificação precisa.
Fundamental para novas
descobertas – Estado final em
diversos decaimentos.

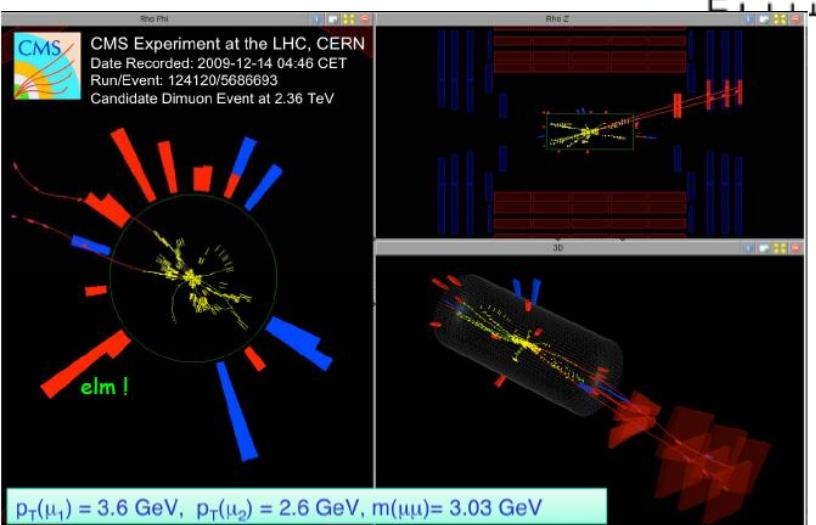
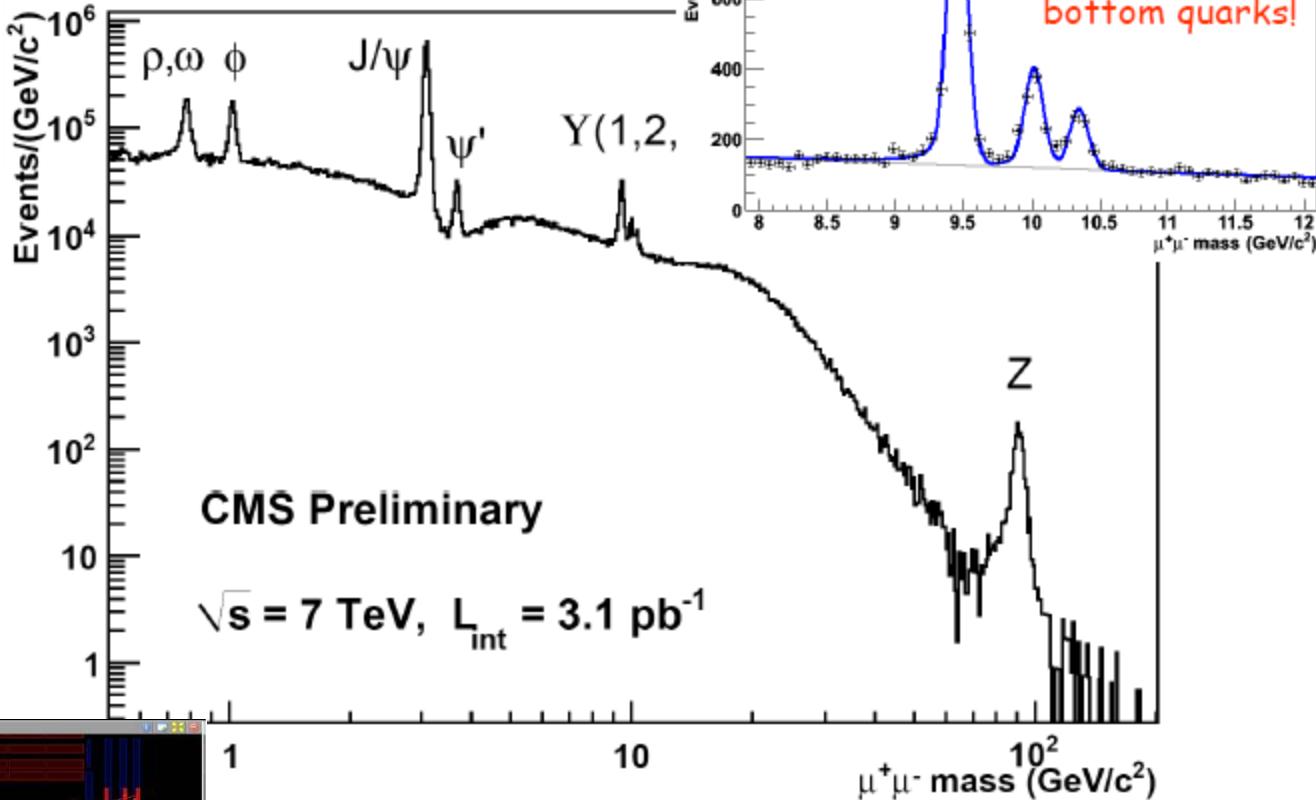


Z Candidate

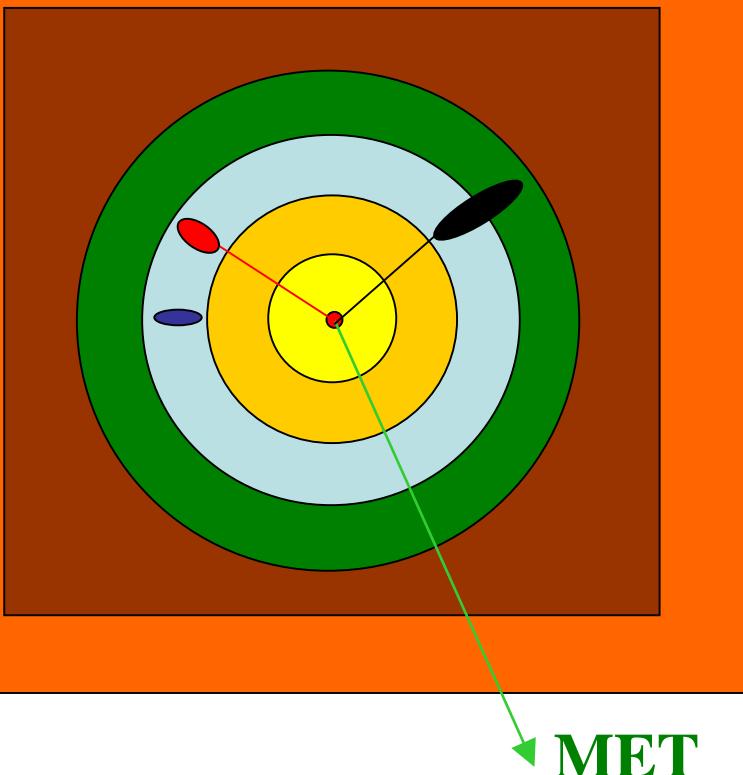


Muons - Um século em semanas

Dimuon resonances

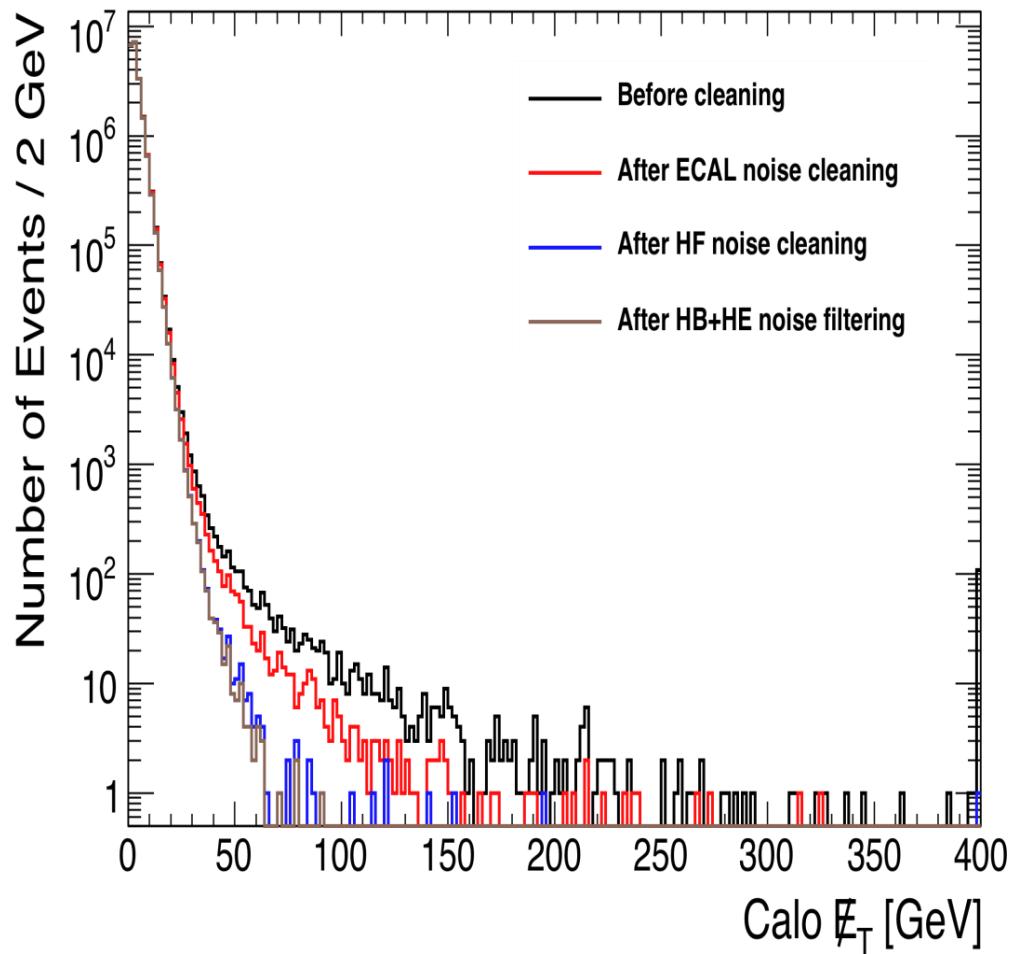


MET – Energia Perdida



MET

Calibração dos calorímetros é fundamental – falsas fontes
 Diversas fontes físicas
MP - ν
EMP - SUSY



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

- Posição

Medidas - 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. $\nu p \rightarrow n e^+$

⇒ 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:

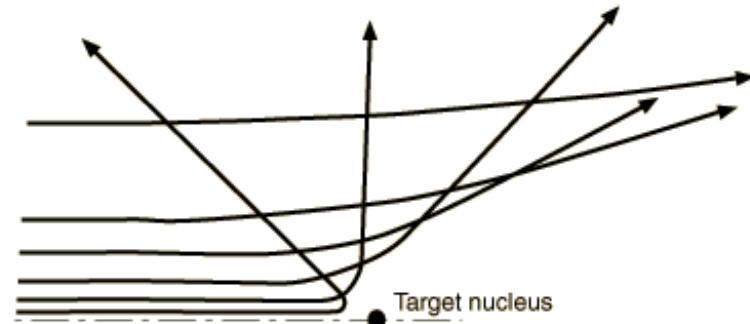
Partículas carregadas relativísticas interagem com a camada eletrônica e núcleos do material através de 3 processos básicos:

- Ionização - Dominante exceto para elétrons e fótons
- Espalhamento Coulombiano Múltiplo
- Irradiação (bremsstrahlung)

Espalhamento Coulombiano Múltiplo -

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

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.

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

⌚ **X₀** - Comprimento de radiação - Probabilidade de irradiação
 α - constante de estrutura fina $\approx 1/137$

N_A - Número de Avogadro

Z - Número atômico do material

A - Peso atômico do material

r_e - raio clássico do elétron = $e^2/4\pi\epsilon_0 mc^2$

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)

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

■ $C = -4\pi N_A r_e^2$

■ Z, A - Número Atômico e Peso Atômico do material

■ z - carga da partícula (múltiplo de e^-)

■ ρ - densidade do meio

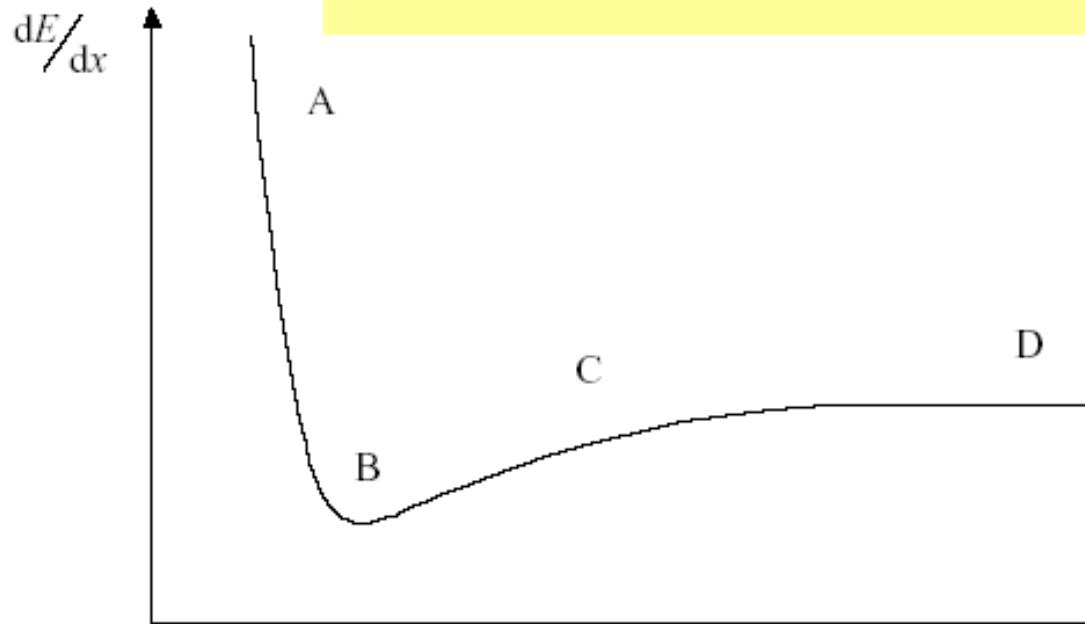
■ I_0 - potencial de ionização do meio

■ ϵ - correção de blindagem das camadas eletrônicas

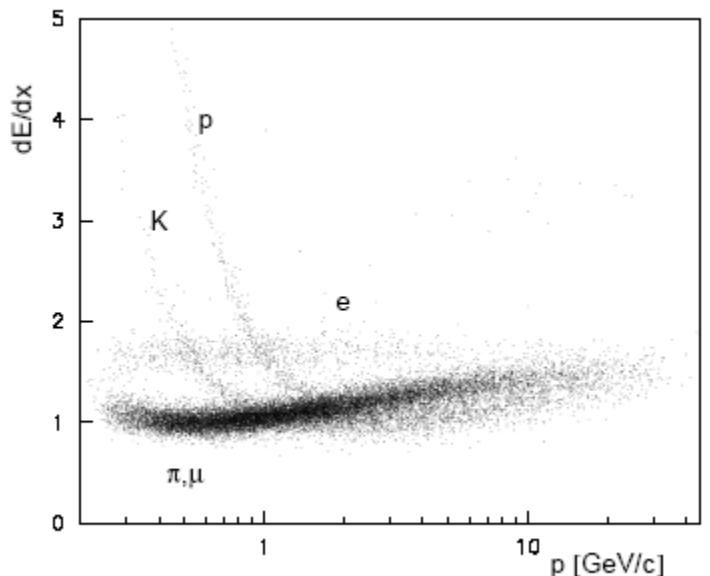
■ δ - correção de densidade, polarização do meio

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

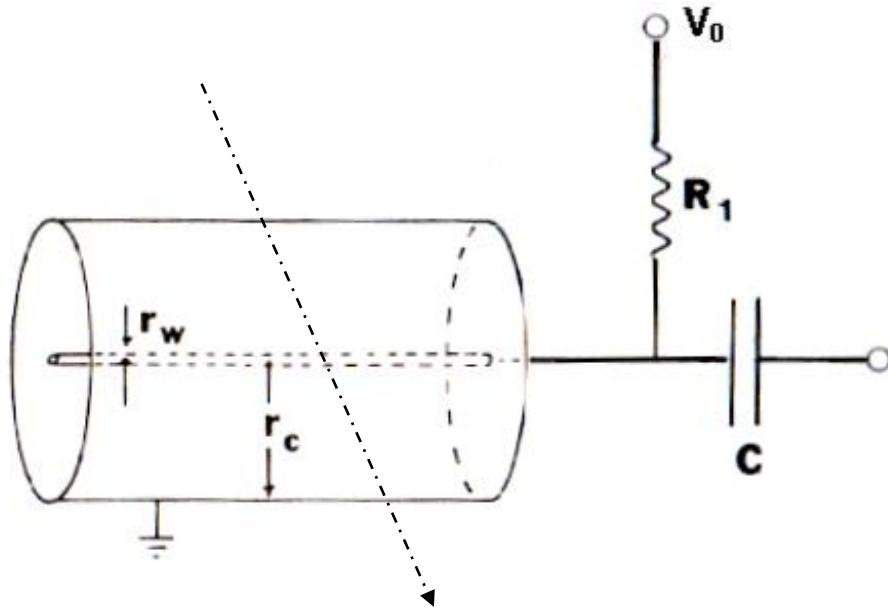
$$\overline{\Delta E} = C \frac{m_e \dot{\varphi}}{\beta^2} \frac{Z^2}{A} \rho \Delta x \left[\ln\left(\frac{2\gamma^2 \beta^2 m_e c}{I_0}\right) - \beta^2 - \frac{\epsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right]$$



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



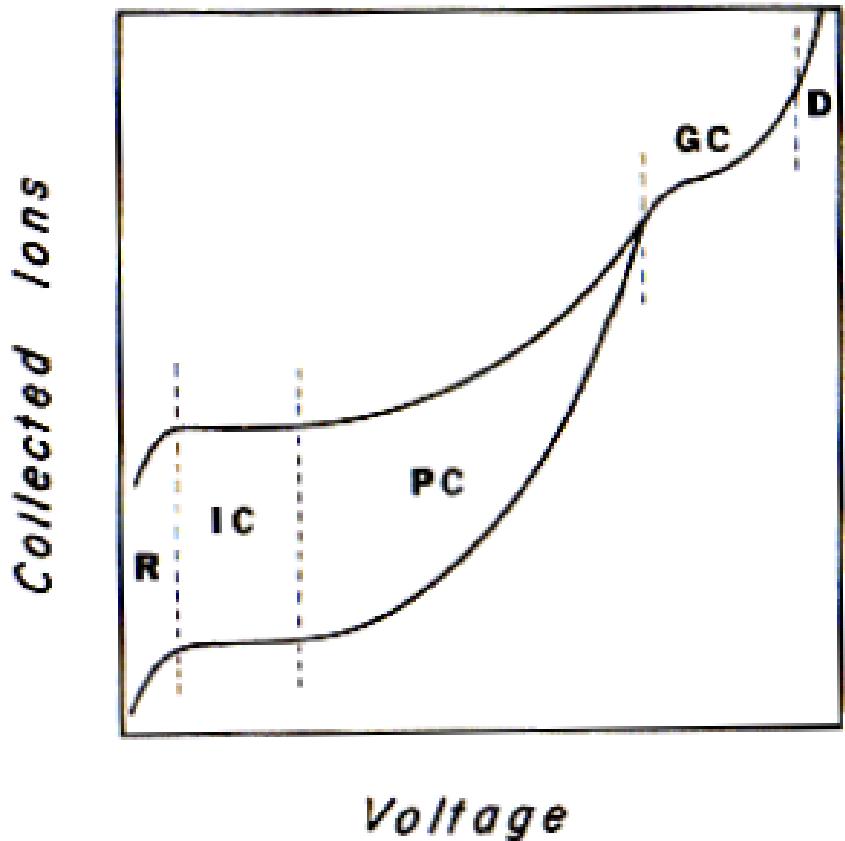
Câmaras Proporcionais



↔ 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

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

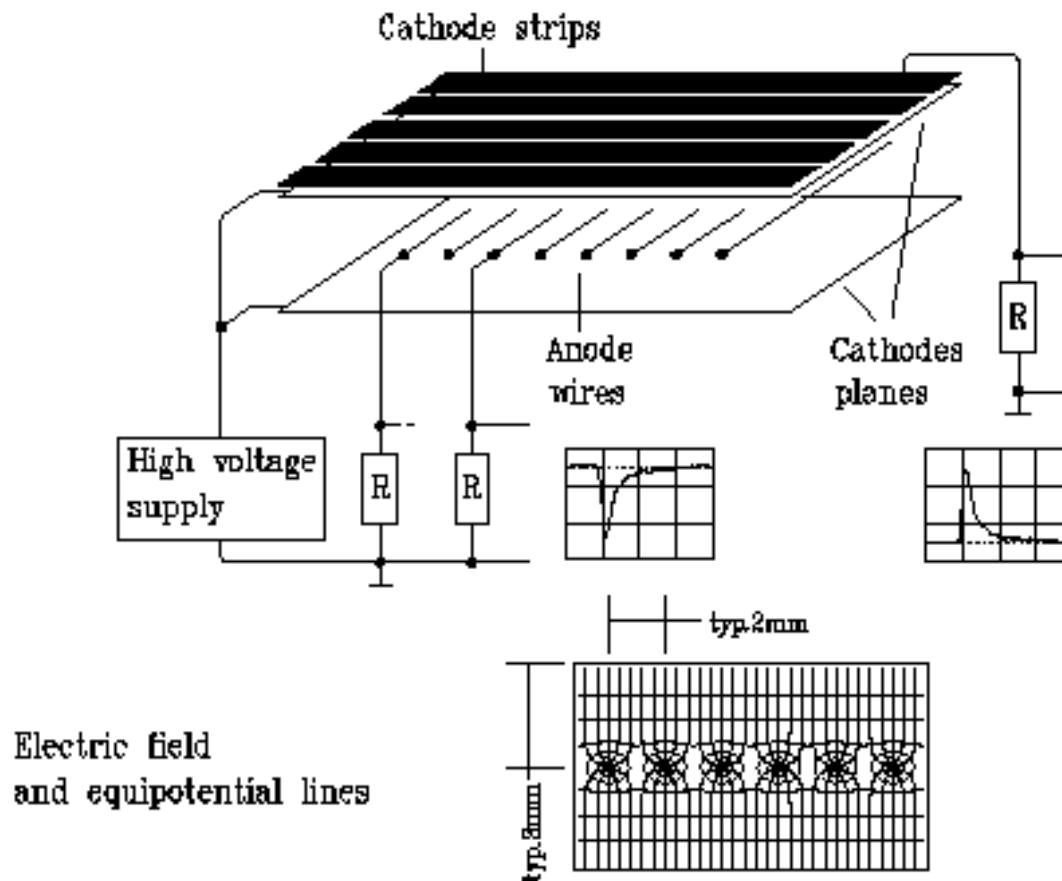
↔ M - fator de amplificação do gas $\approx ke^{CV_0} \cdot 10^4 - 10^6$ no regime proporcional



- ⇒ **R** - regime de recombinação dos íons
- ⇒ **IC** - regime de ionização
- ⇒ **PC** - regime proporcional
- ⇒ **GC** - regime Geiger

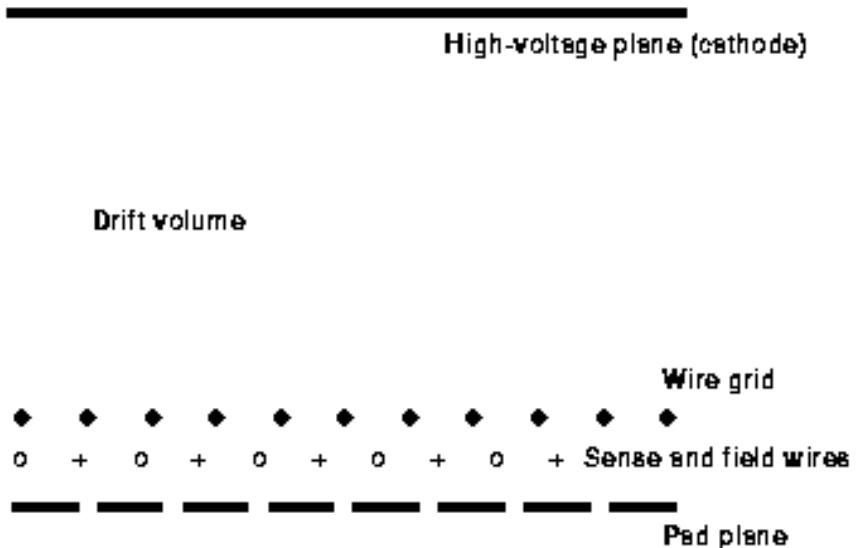
Câmaras Proporcionais a Multifios

Multi Wire Proportional
Chamber



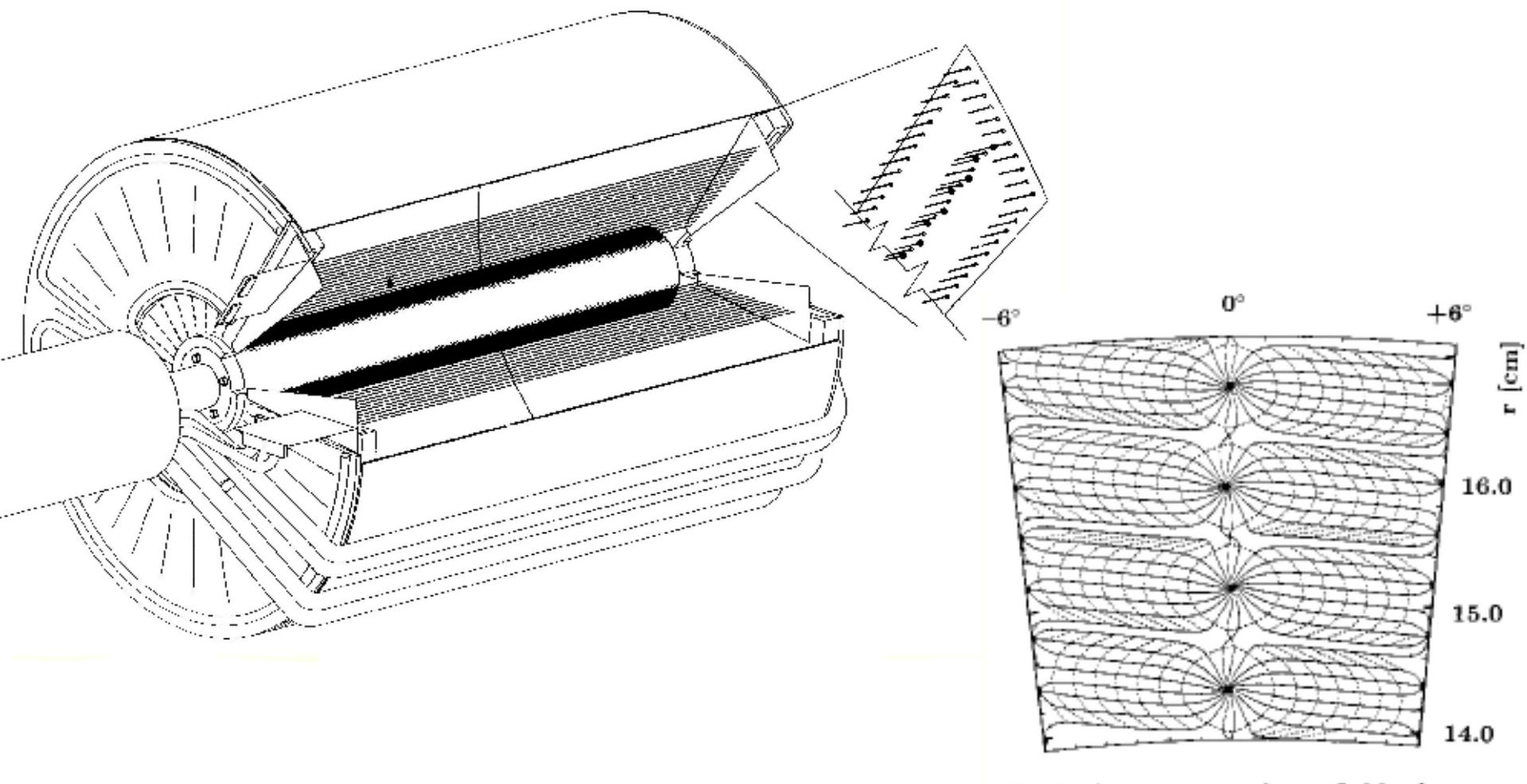
- ⌚ catodo dividido em tiras fornece 2 coordenadas
- ⌚ resoluções $\approx 100\mu\text{m}$ em ambas cordenadas
- ⌚ sinais induzidos em cada fio $\approx 100\text{mV}$ ($10 \mu\text{A}$) - $V_0 \approx 4\text{kV}$

Câmaras de Arraste (Drift Chambers)



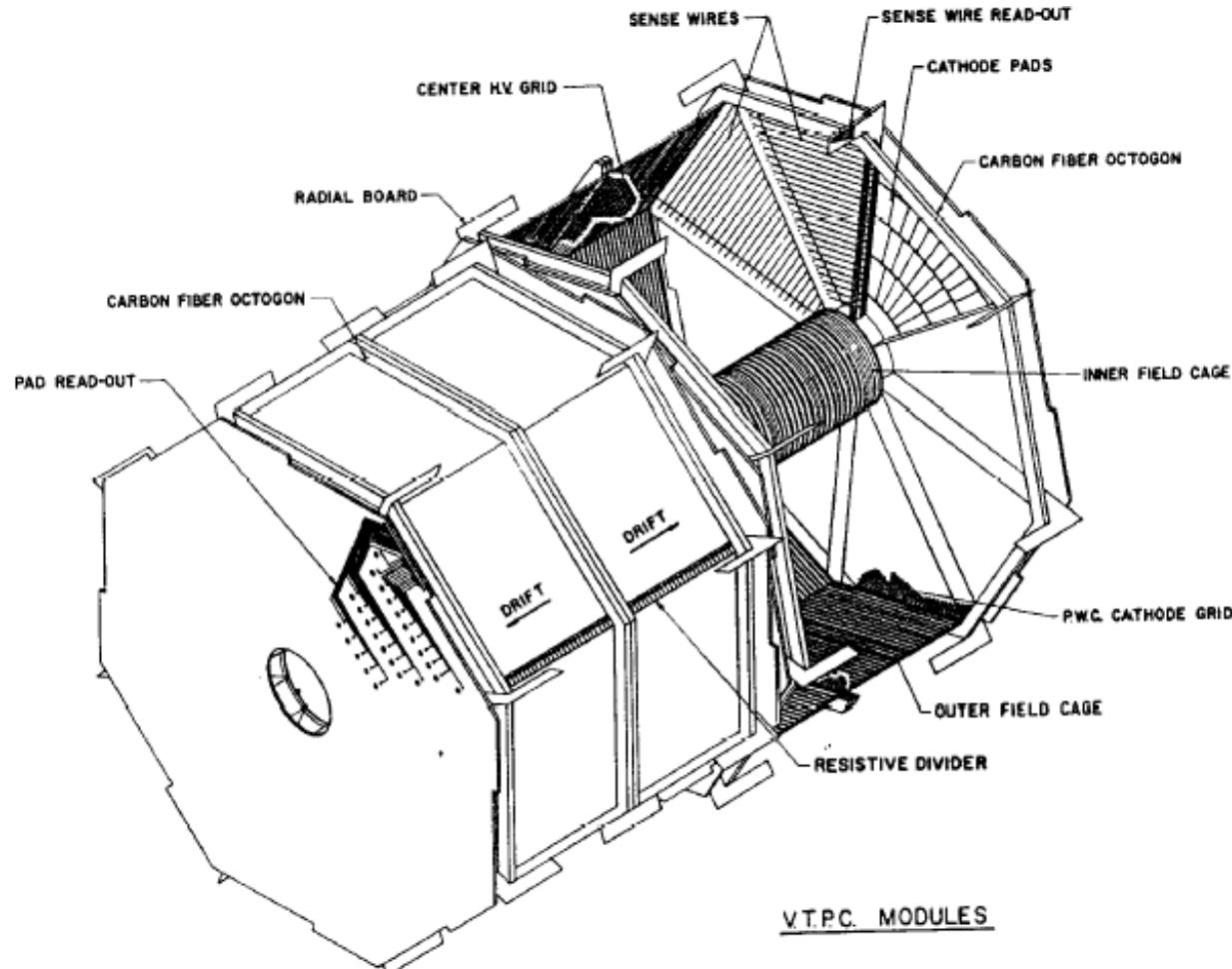
- Ⓐ semelhante às câmaras proporcionais - medida do tempo de migração dos e⁻
- Ⓐ fios adicionais para melhorar a uniformidade do campo - velocidade dos e⁻
- Ⓐ sinais induzidos ≈ câmaras proporcionais
- Ⓐ resoluções ≈ 100μm x 1mm
- Ⓐ permitem cobrir maiores áreas - menor custo
- Ⓐ adequadas para detectores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

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

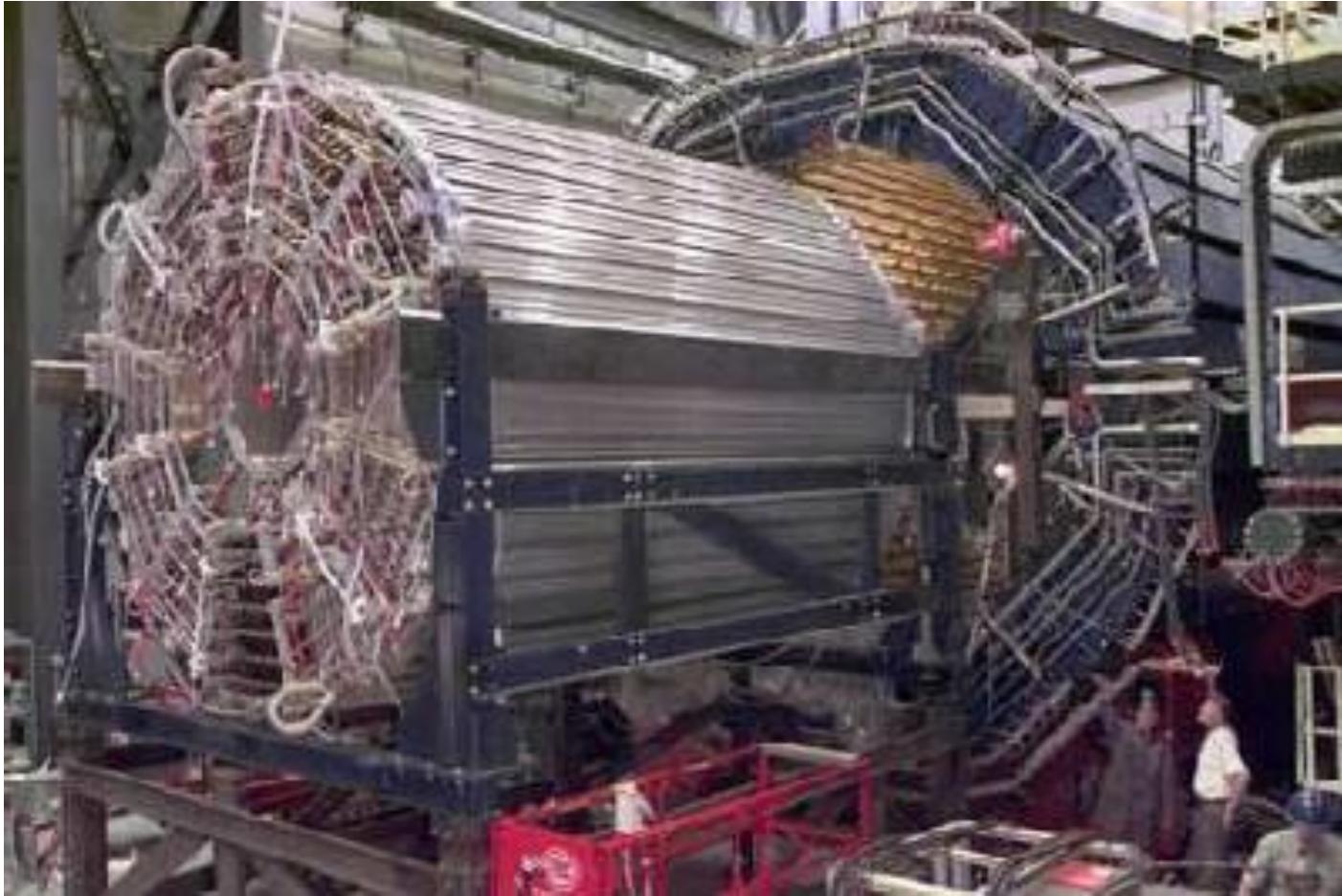


Câmaras de Projeção Temporal (TPC)

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

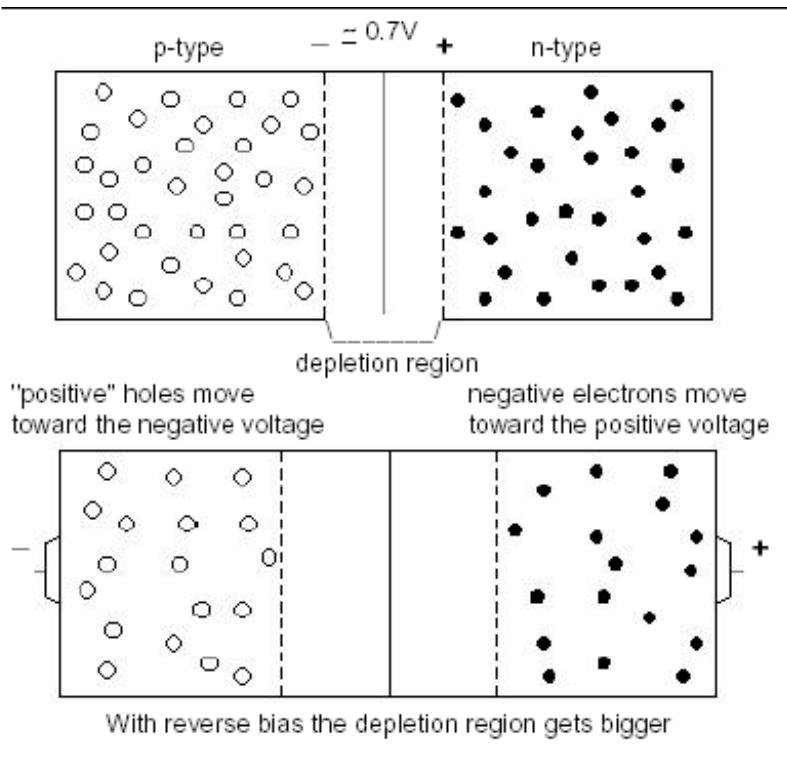
Energia de ionização = 1.1eV Si, 0.7eV Ge (30eV para gases)

Maior densidade => maior probabilidade de interação

≈ 25000 pares e⁻-buraco criados em 300μm de Si

$\approx 4\text{fC}$ tempo de coleta $\approx 10\text{ns}$ => 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.

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

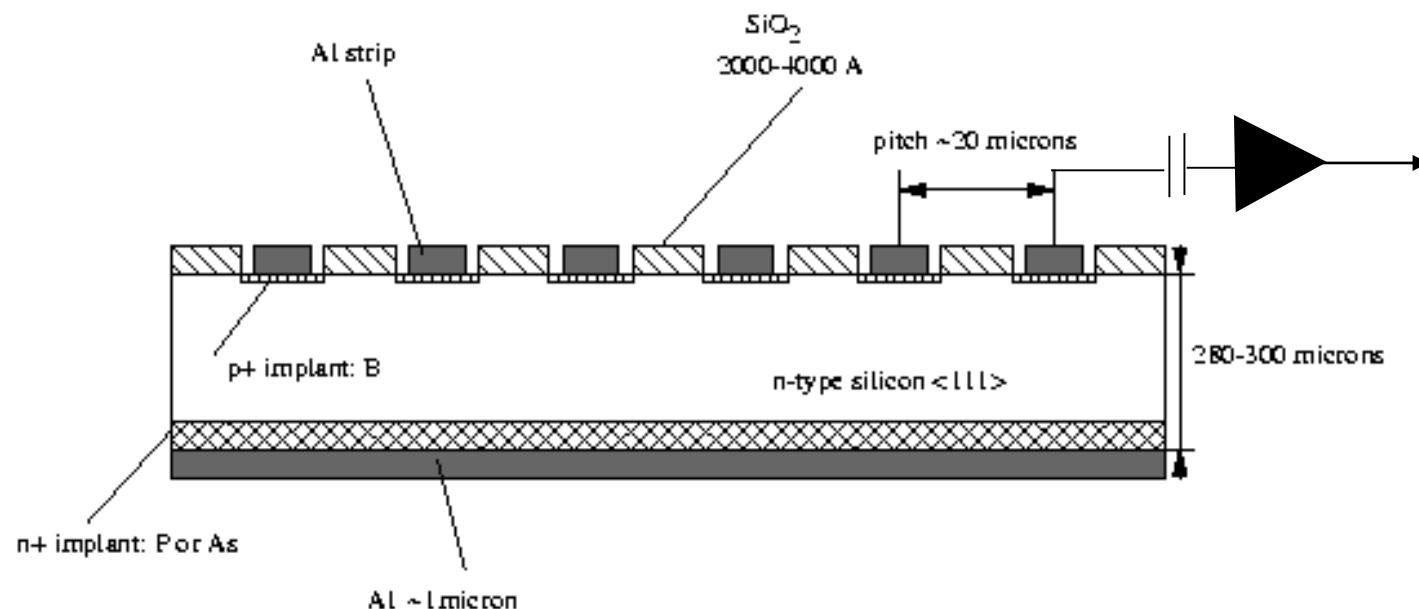
ϵ - permissividade do material

μ_e - mobilidade dos elétrons

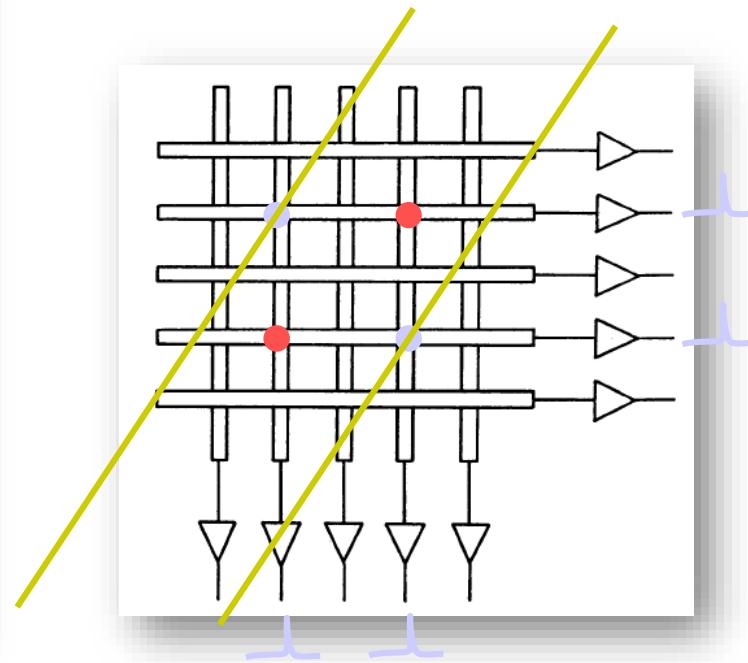
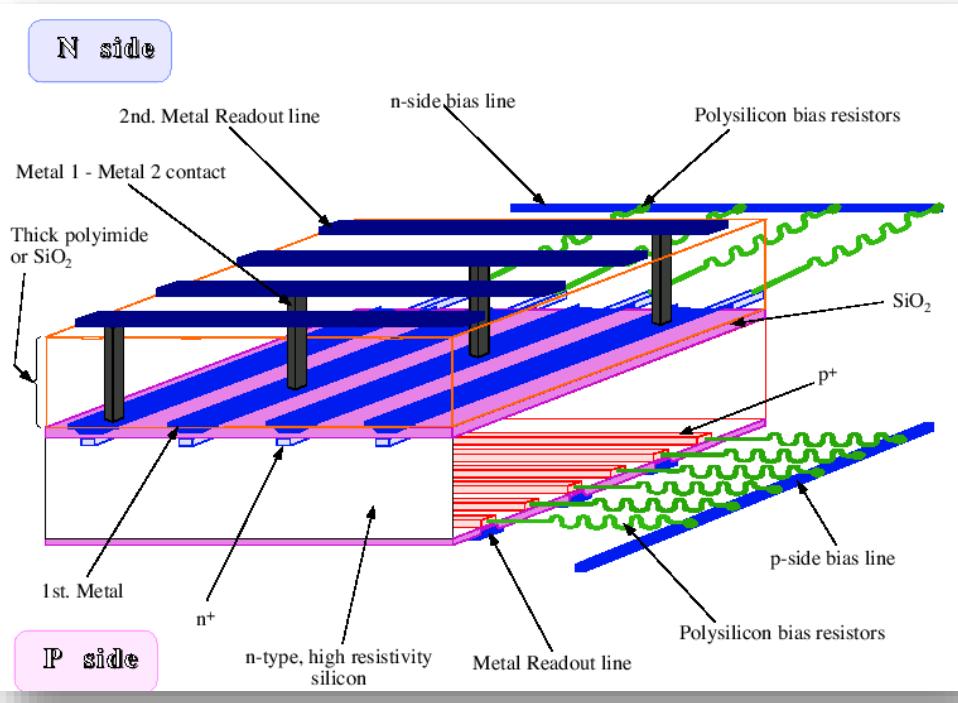
ρ - densidade do dopante

$$V_B \sim 100\text{V}$$

- Detector de Microtiras de Silício - mesmas características resolução espacial de $5\text{-}10\mu\text{m}$ perpendicular a trilha.
- Amplificação para cada canal ou usando divisão de cargas



Double-sided silicon microstrips



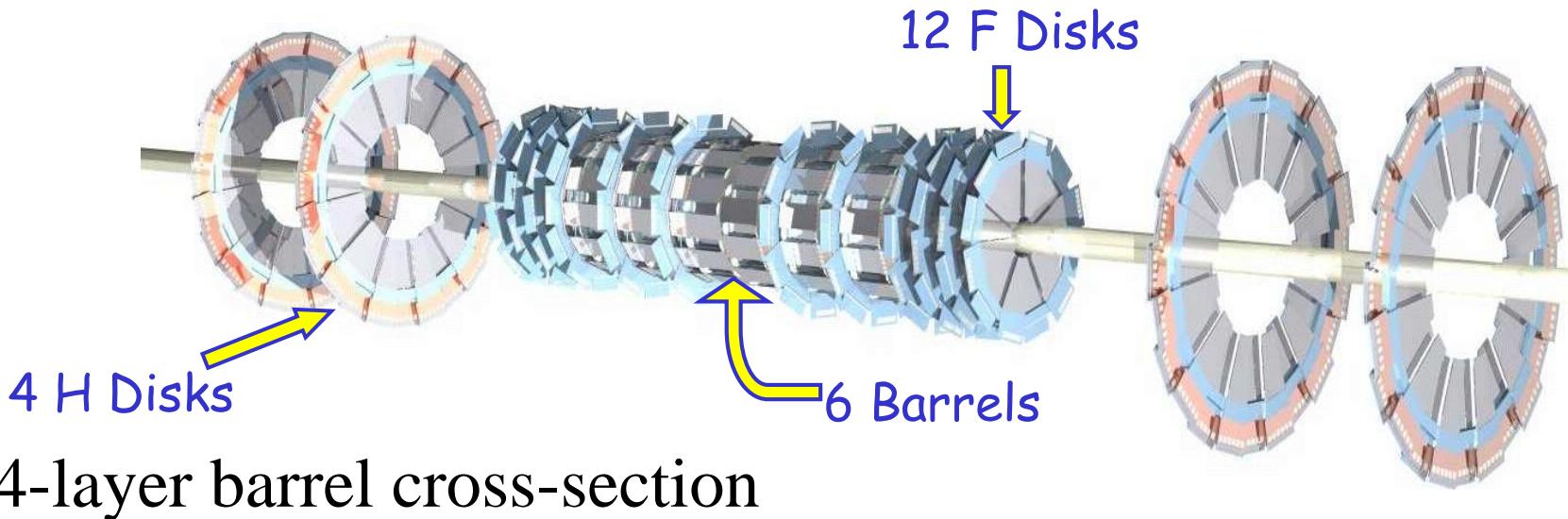
$2 \times 1\text{D}$ information generates ambiguities:

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

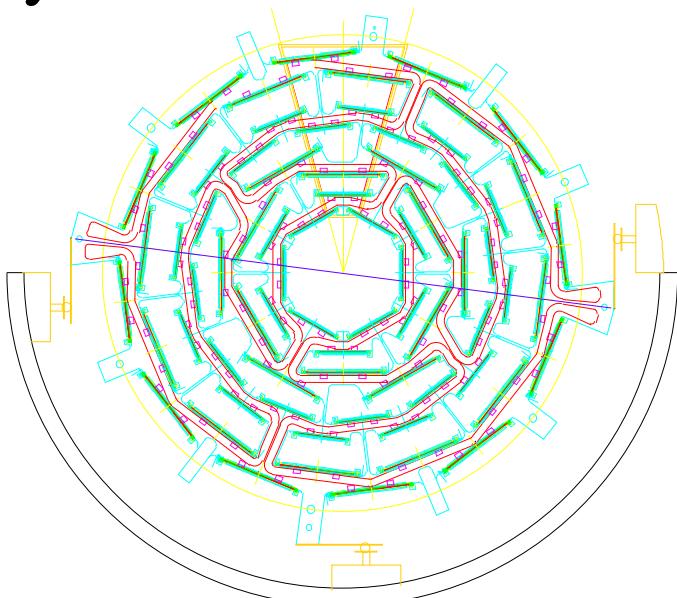
Pattern recognition of 2 particle tracks on double-sided microstrips

Need real 2D info: from strip to pixel

SMT Design

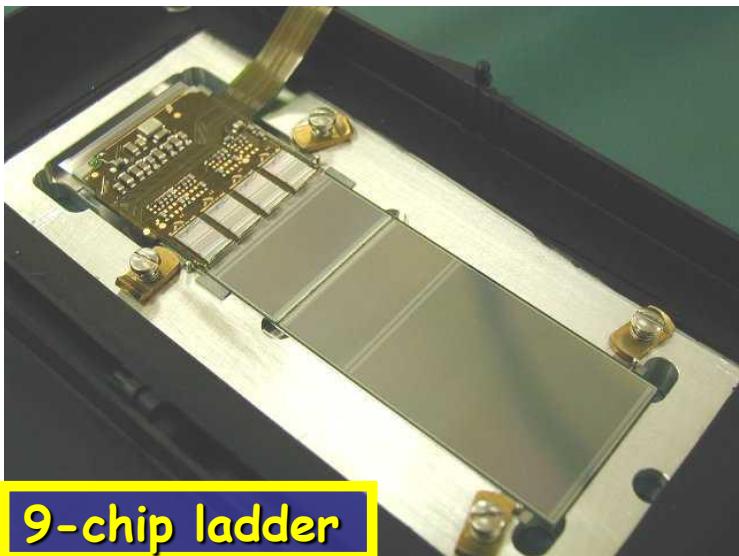


4-layer barrel cross-section

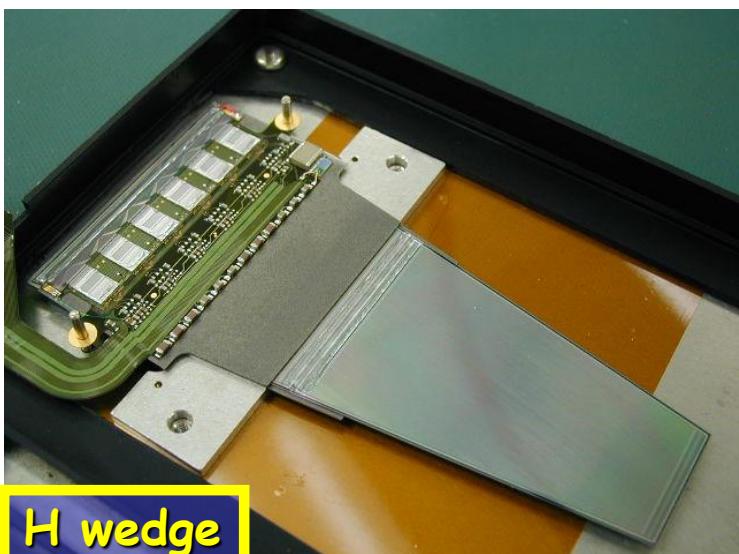


	Barrels	F-Disks	H-Disks
sngl/dbl	sngl + dbl	double	single
Stereo	0, 2, 90	+/-15	+/-7.5
Channels	387072	258048	147456
Modules	432	144	96
Rin/Rout	2.7/9.4cm	2.6/10.5cm	9.5/26cm

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

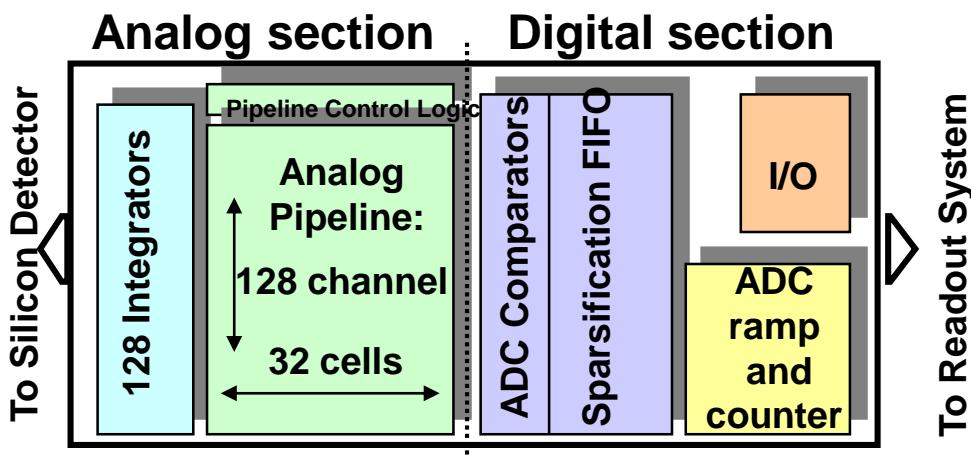


- Wedges
 - F Disks: 144 double-sided, $\pm 15^\circ$, 6+8 chip wedges
 - H Disks: 96×2 back-to-back single-sided, $\pm 7.5^\circ$, 6 chip wedges

SMT Readout Electronics

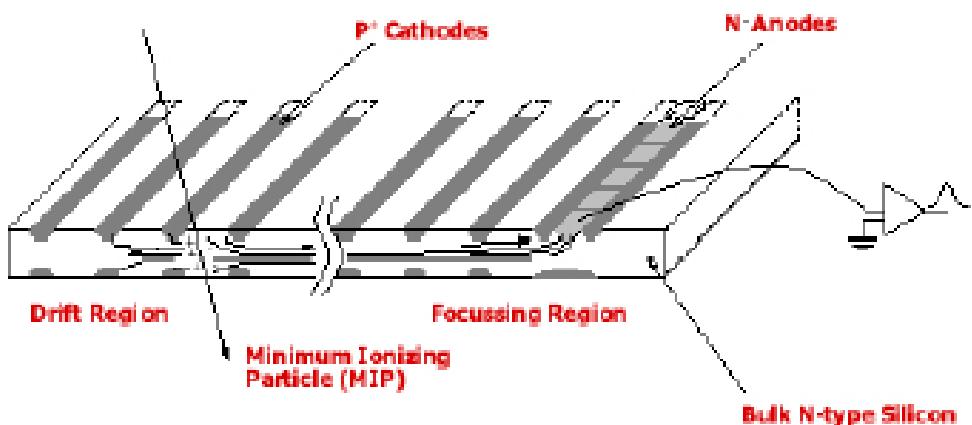
SVX IIe Chip

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



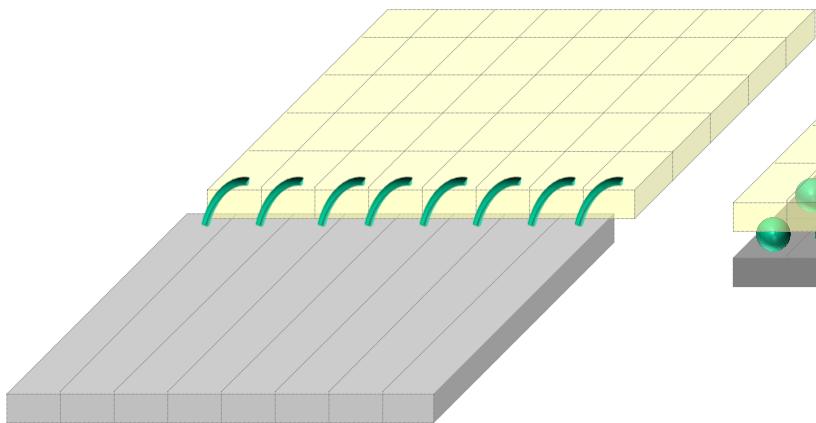
- Interface Boards
 - Refresh signals and adjust timing
 - Power management and monitoring
- SEQencers
 - Management of SVX
 - Conversion to fiber optics
- VRB (VME Readout Buffer)
 - Data buffer pending L2 trigger decision
 - ~ 50 Mb/s/channel
 - 5-10 kHz L1 accept
 - → 1 kHz L2 accept rate

- ⌚ Silicon Drift Detectors
- ⌚ resoluções $\approx 10\mu\text{m}$ em ambas cordenadas = pixel
- ⌚ redução no número de canais de eletrônica



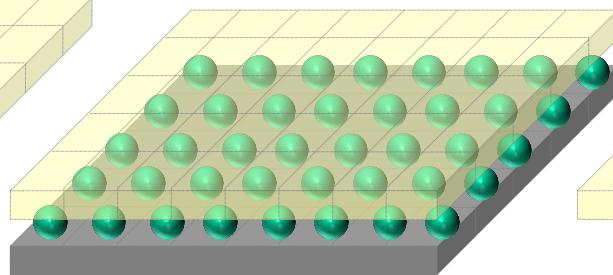
Position Sensitive Detectors: 2D sensor topology

Sensor + Readout



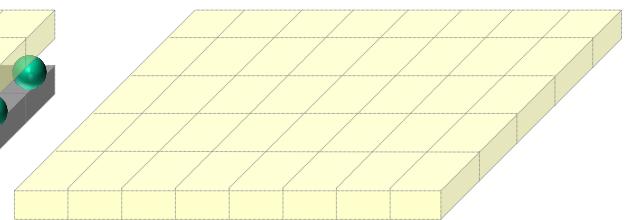
2D segmented Si sensor
attached to 1D
segmented Si (readout) or
other electronics

Hybrid



2D segmented Si (sensor)
attached to 2D
segmented Si (readout)

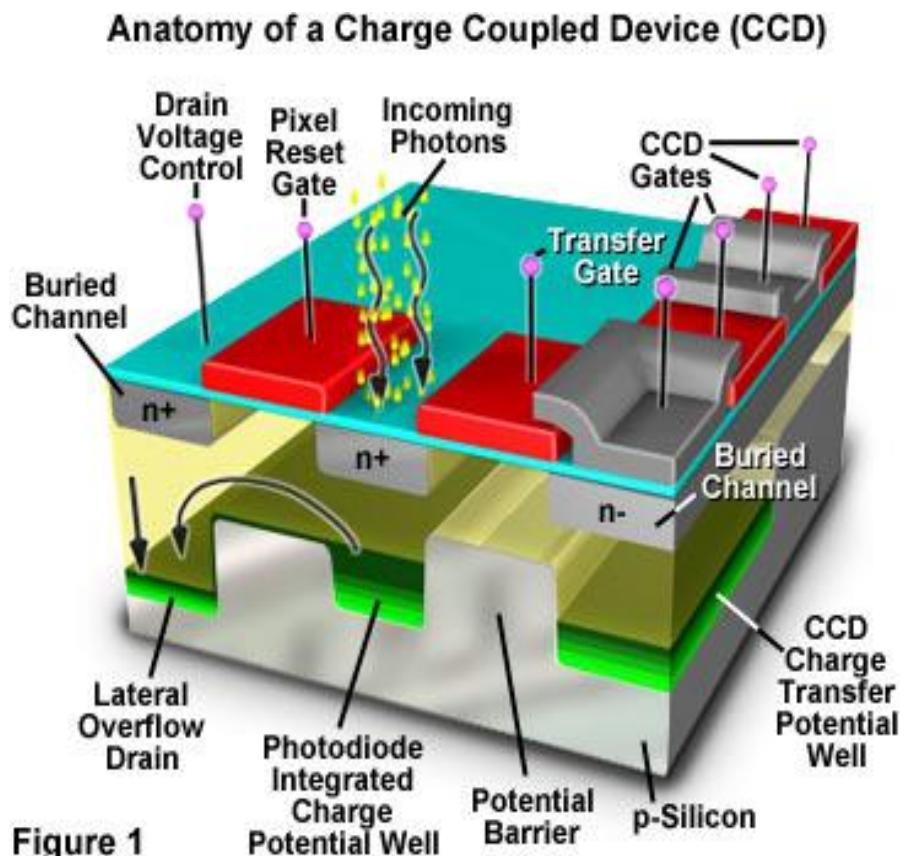
Monolithic



2D segmented Si
(sensor + readout)

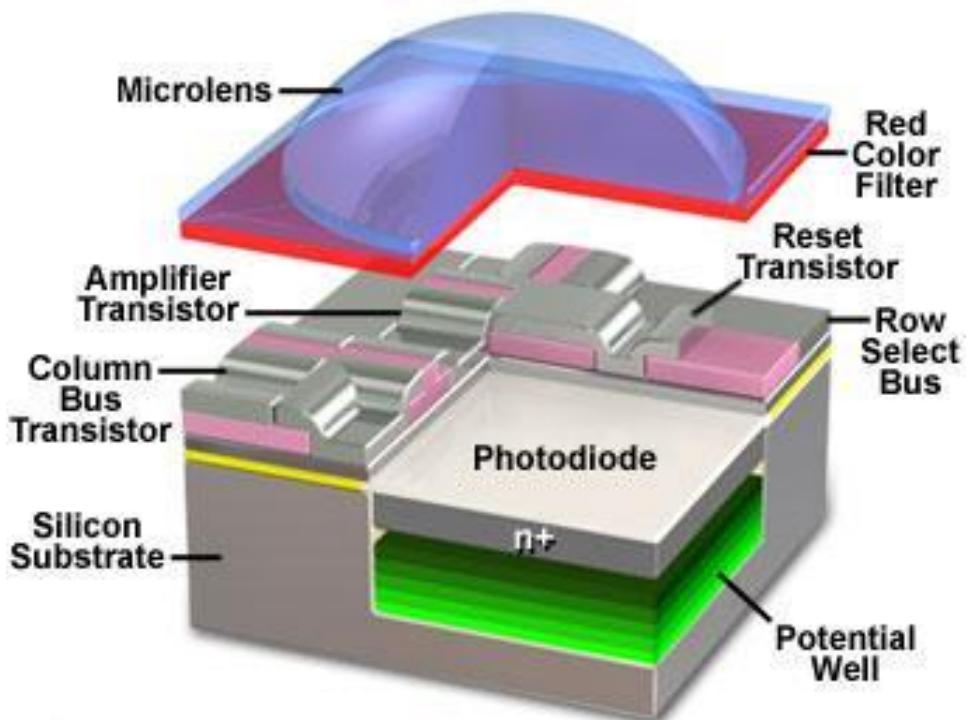
- Detectores de Píxel - Charge Coupled Devices(CCD), Active Pixel Sensor(APS)

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 subsequentemente pelo chip por registradores e depois para um amplificador.



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

Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

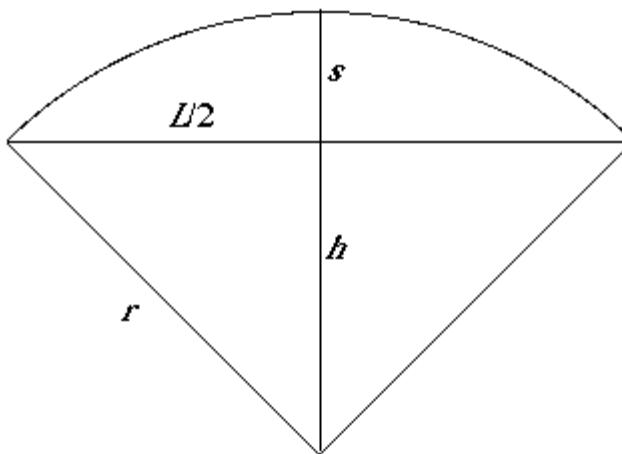


Medida de Momentum

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

$\mathbf{F} = Q\vec{v} \times \vec{B}$
 perpendicular a sua trajetória e ao campo \vec{B}

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



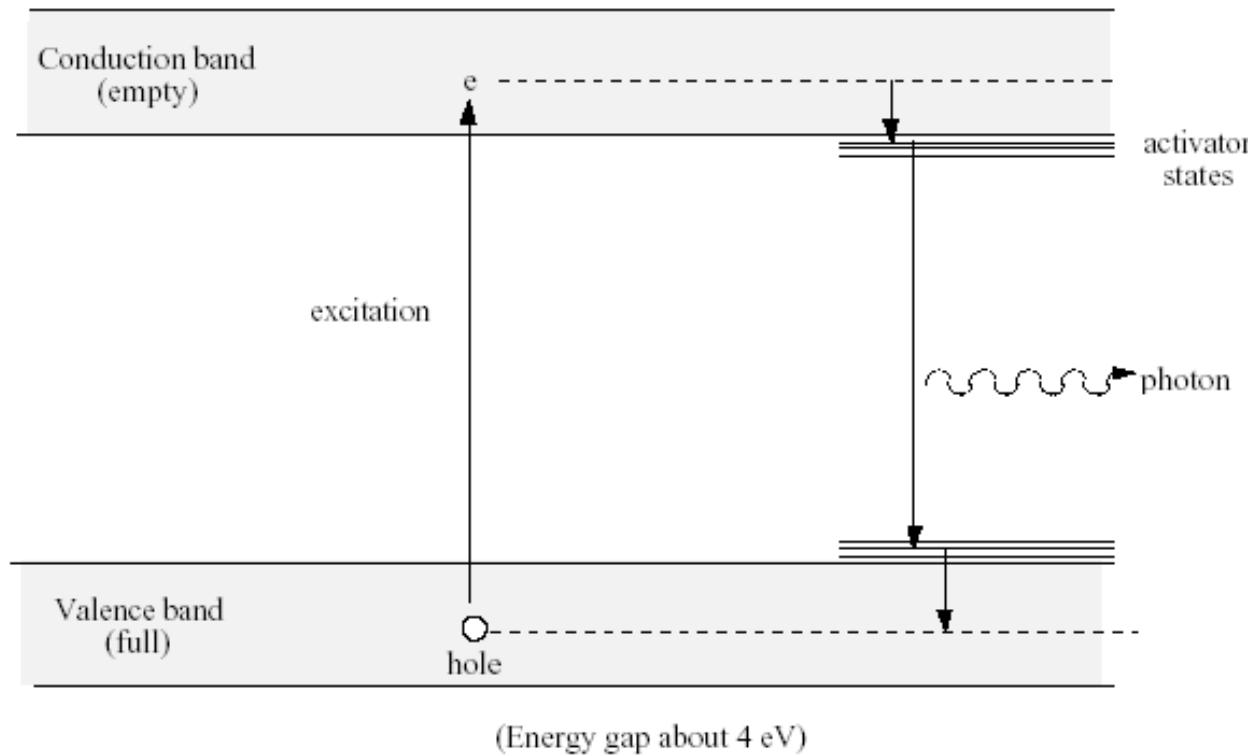
$$\mathbf{p} = 0.3\mathbf{Br}$$

- 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 $\sim 10^{-12}$ s
- ⌚ Materiais Cintiladores oferecem rápida resposta à passagem de partículas
 - Princípio => Utilizam excitação molecular ao invés de ionização



Cintiladores

- **Inorgânicos(NaI, CsI, BGO)** - $\tau \approx 200\text{ns}$

Mais usados em Calorímetros EM - resposta mais uniforme => resolução E
 Propriedades dependem da forma cristalina(pureza)

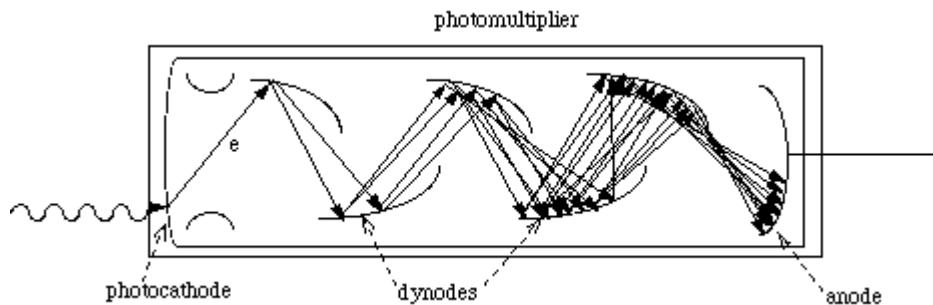
- **Orgânicos(Antraceno, Naftaleno, etc.)** - $\tau \approx 1.5 - 20\text{ns}$

Grande versatilidade - podem ser adicionados a plásticos ou líquidos
 - fibras cintilantes

Baixa eficiência $\approx 3\%$ - reabsorção

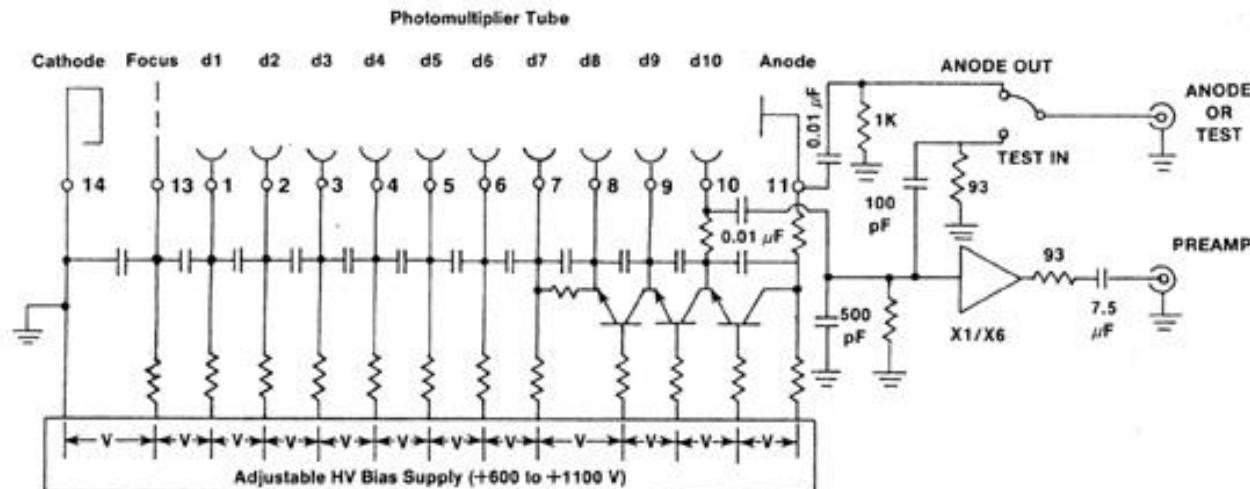
Adição de compostos que reemitem os fótons absorvidos em diferentes comprimentos de onda (wavelength shifter) aumentam sua eficiência

- Baixa eficiência => amplificação do sinal => CCD, APD, Fotomultiplicador

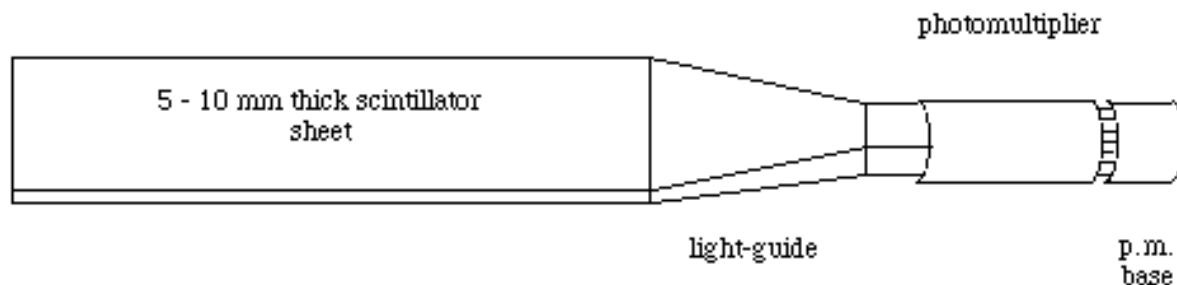


- Utilizam metais alcalinos fotosensíveis como revestimento do cátodo
- Dinodos são revestidos com material (BeO) com boa emissão de elétrons secundários
- Todo o sistema opera em vácuo e submetido a alto potencial $\approx 3\text{kV}$

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

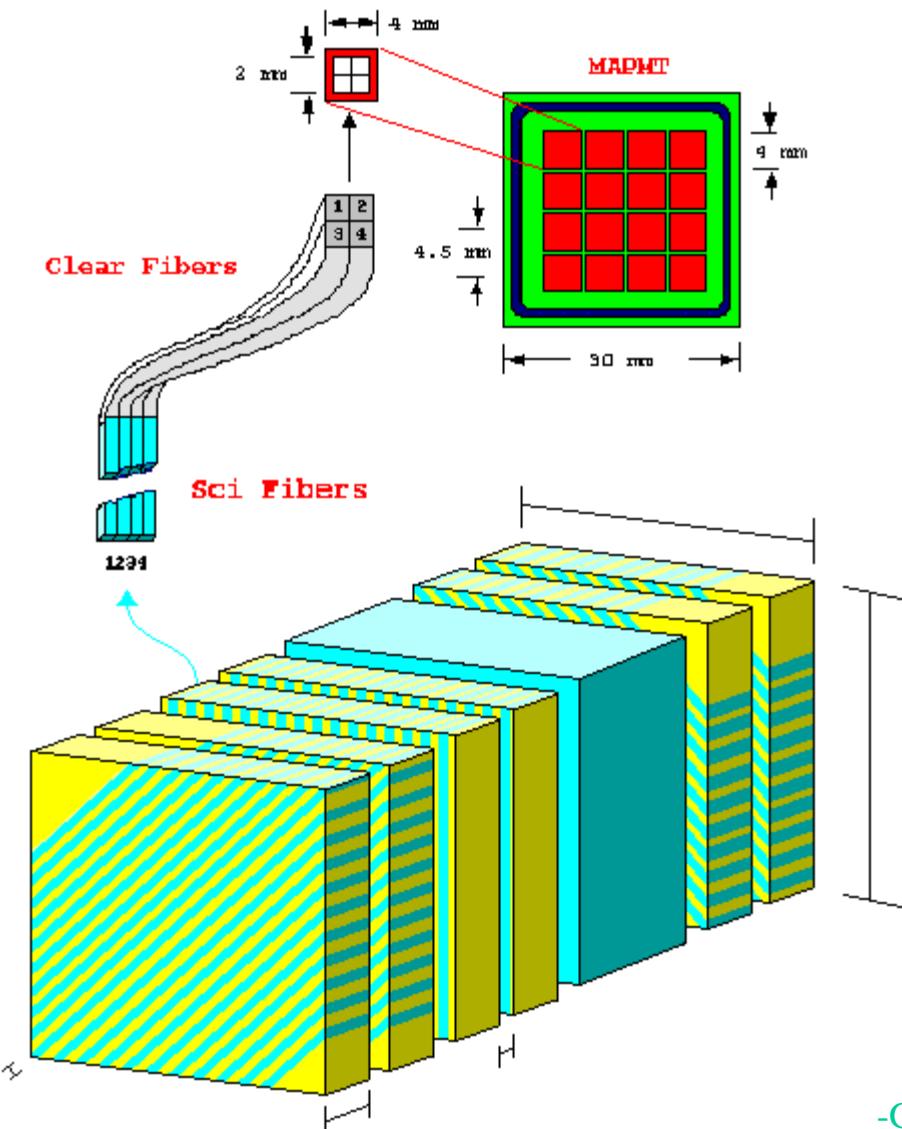


- Na prática se faz uso de montagens do tipo cintilador-guia de luz-fotomultiplicador



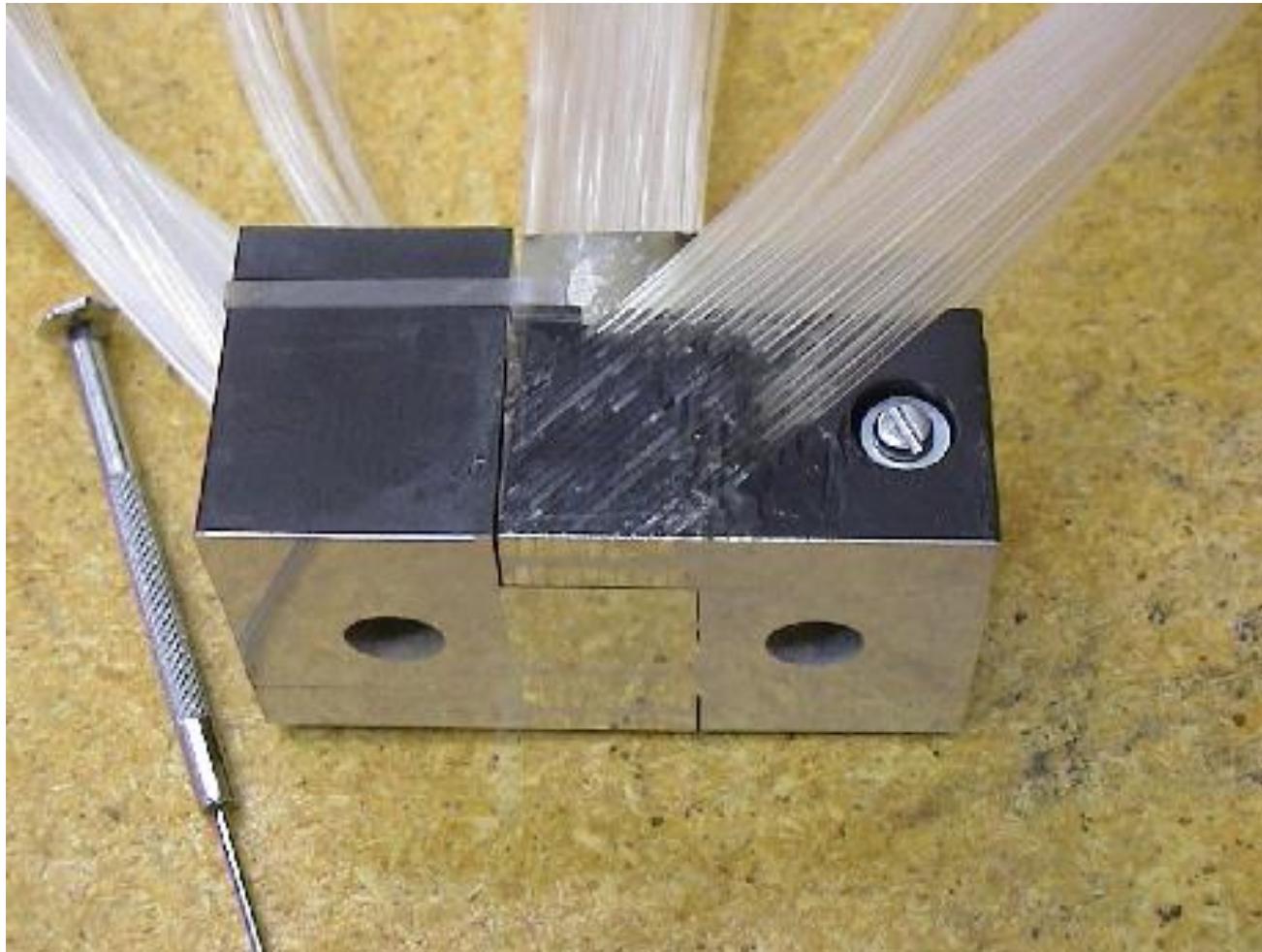
Fibras Cintilantes

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

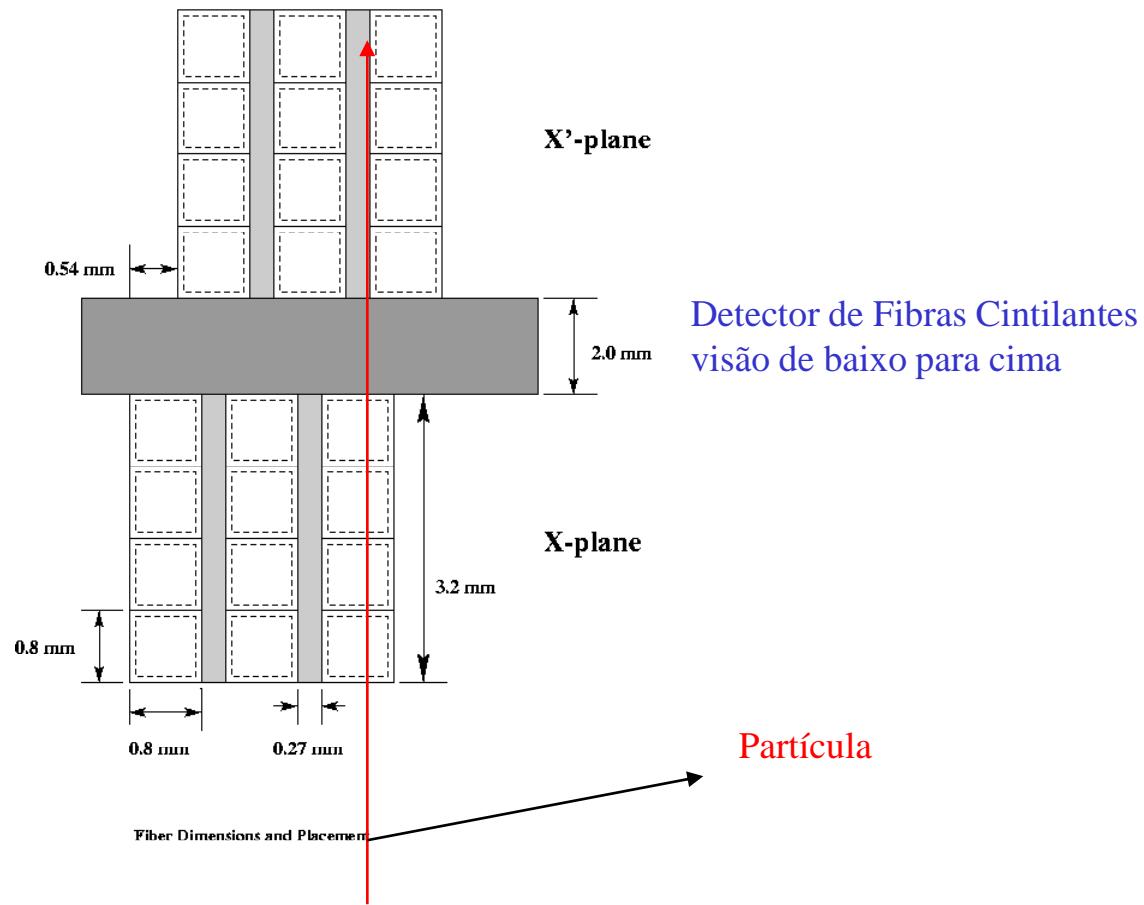


- 6 planes per detector in 3 frames and a trigger scintillator
- U and V at 45 degrees to X, 90 degrees to each other
- U and V planes have 20 fibers, X planes have 16 fibers
- Planes in a frame offset by $\sim 2/3$ fiber
- Each channel filled with four fibers
- 2 detectors in a spectrometer

Detector de Fibras Cintilantes

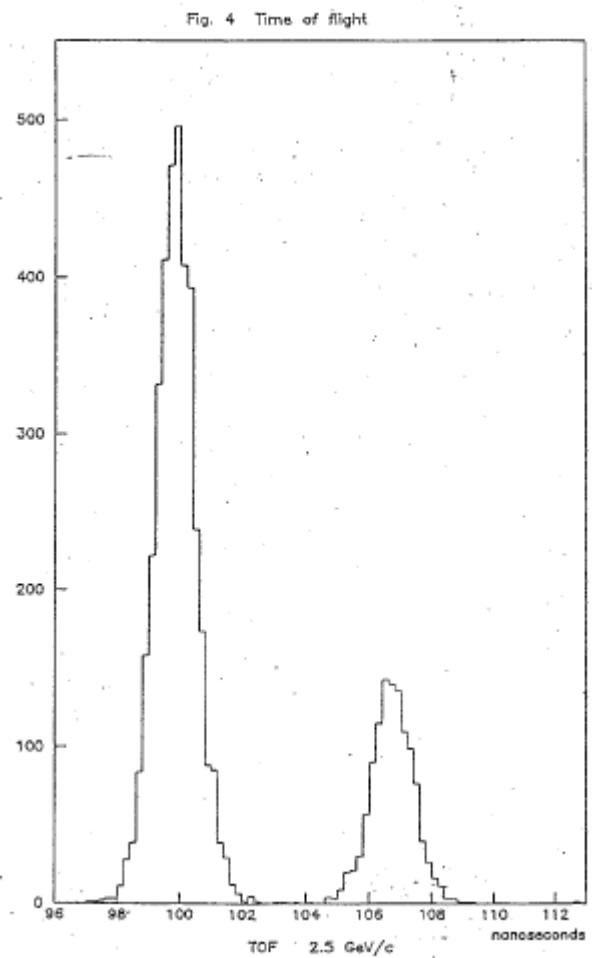
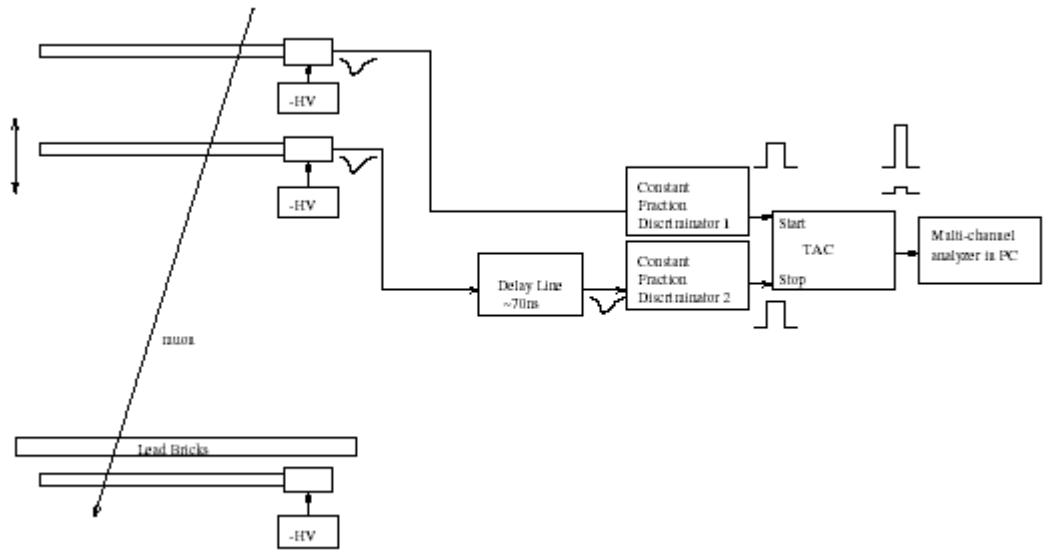


Detector de Fibras Cintilantes



Métodos de Identificação

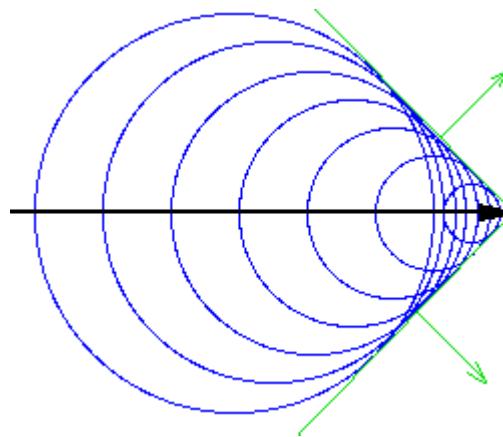
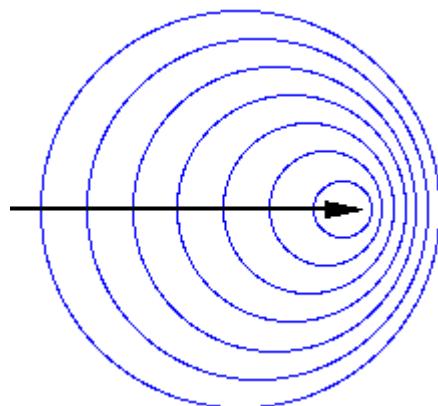
- Tempo de vôo da partícula $v = L / \Delta t$
- Sabendo-se $p=mv\gamma$ obtemos a massa da partícula



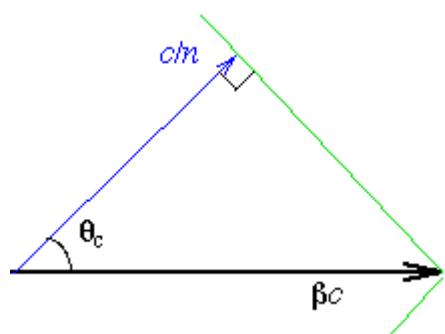
- Δt para π e prótons com $p=2.5\text{GeV}$ $L=30\text{m}$
- resolução em $\Delta t \sim 1\text{ns}$

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:



$$\cos \theta_c = \frac{c}{\beta} = \frac{1}{\beta n}$$

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

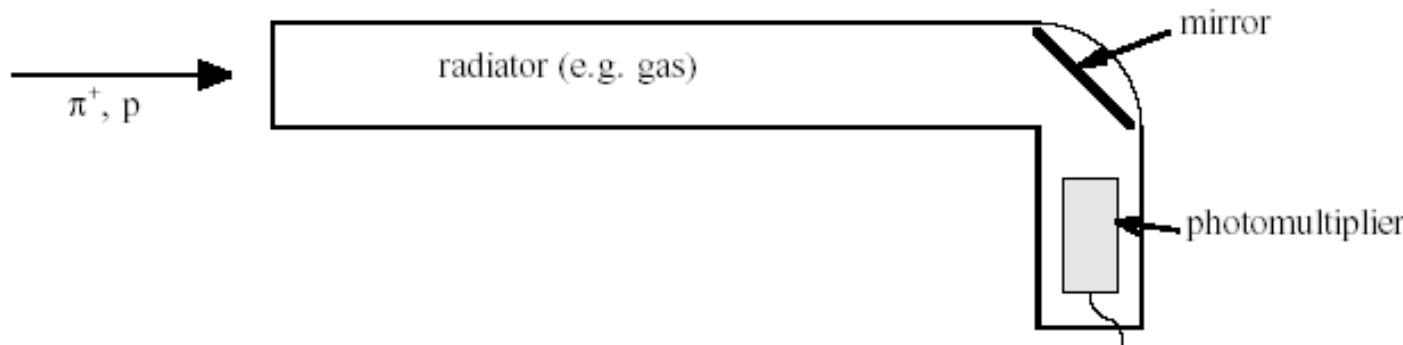
$$= \frac{\alpha z^2}{c} \int \sin^2 \theta_C 2\pi v dv$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

$$\bullet N_\gamma \sim 500 \sin^2 \theta_c$$

Detektore de Radiação Cherenkov

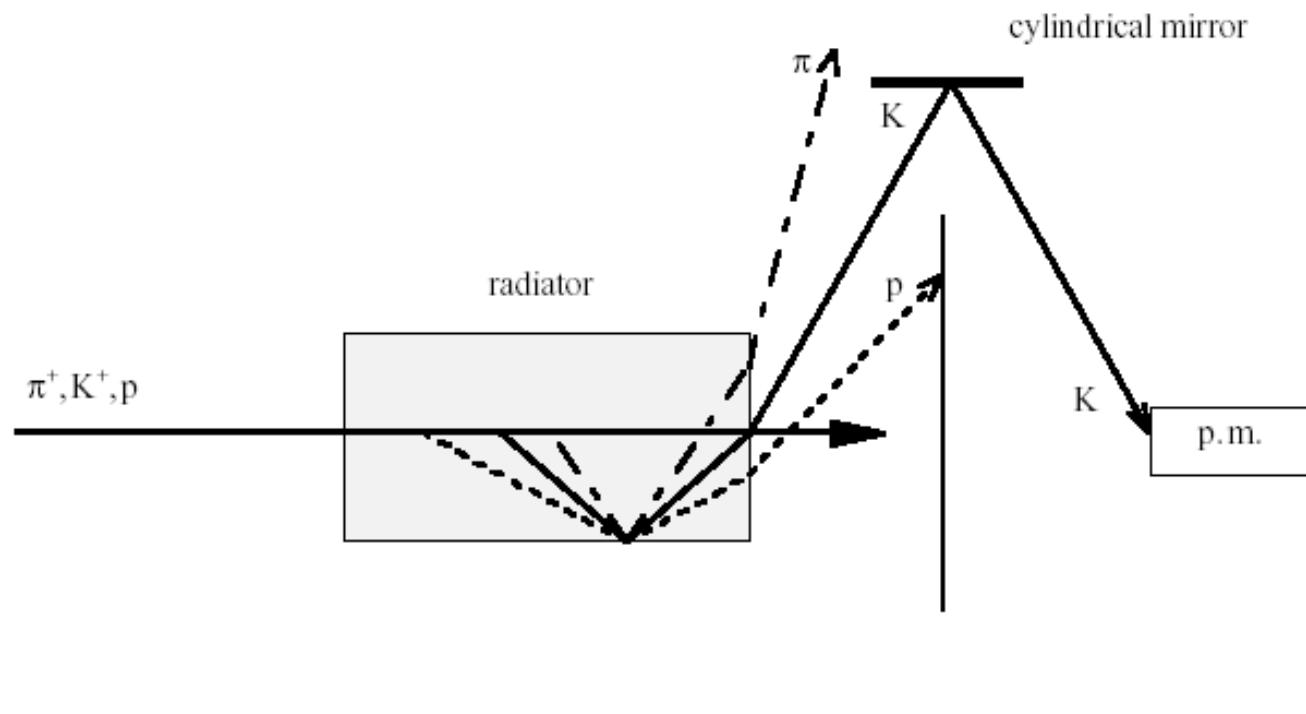
- ❖ Detectores de Limiar (Threshold) só emitem radiação para $\beta(\gamma) > \beta_L = 1/n$
- ❖ Detectores Diferenciais
- ❖ Detectores de Anéis Cherenkov (RICH)



<u>Material</u>	<u>n</u>	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

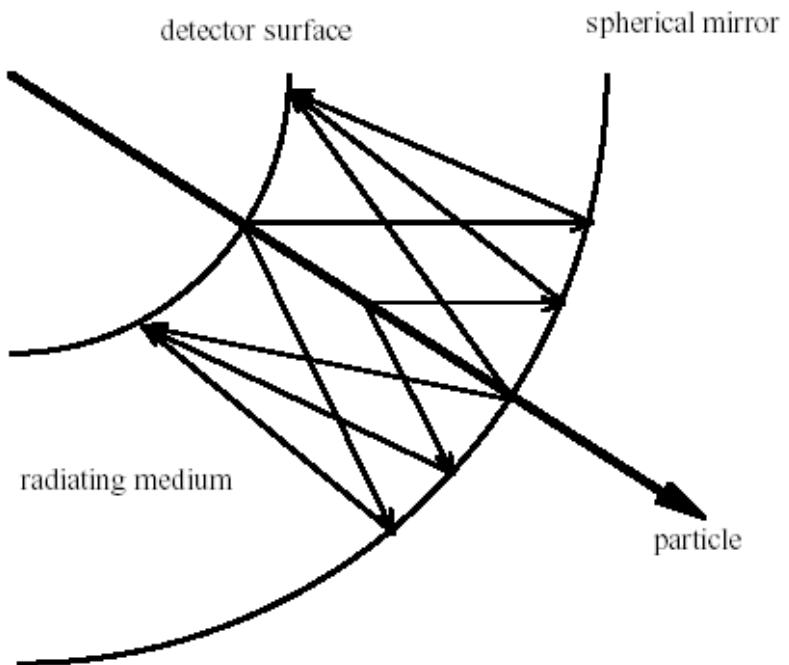
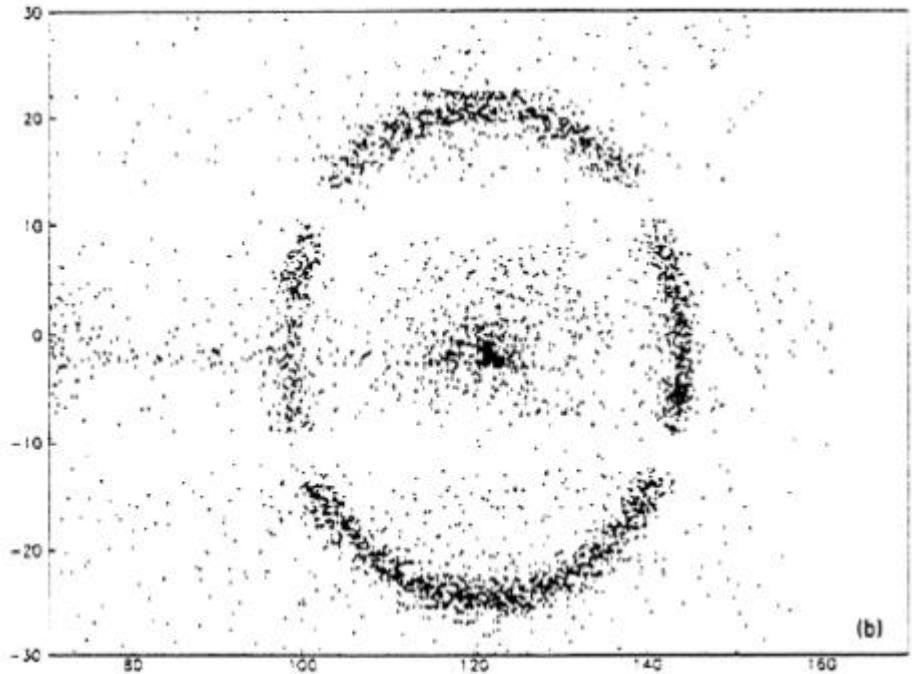
✿ Muito usados na identificação de feixes de partículas



◆ Detectores de Anéis Cherenkov (RICH)

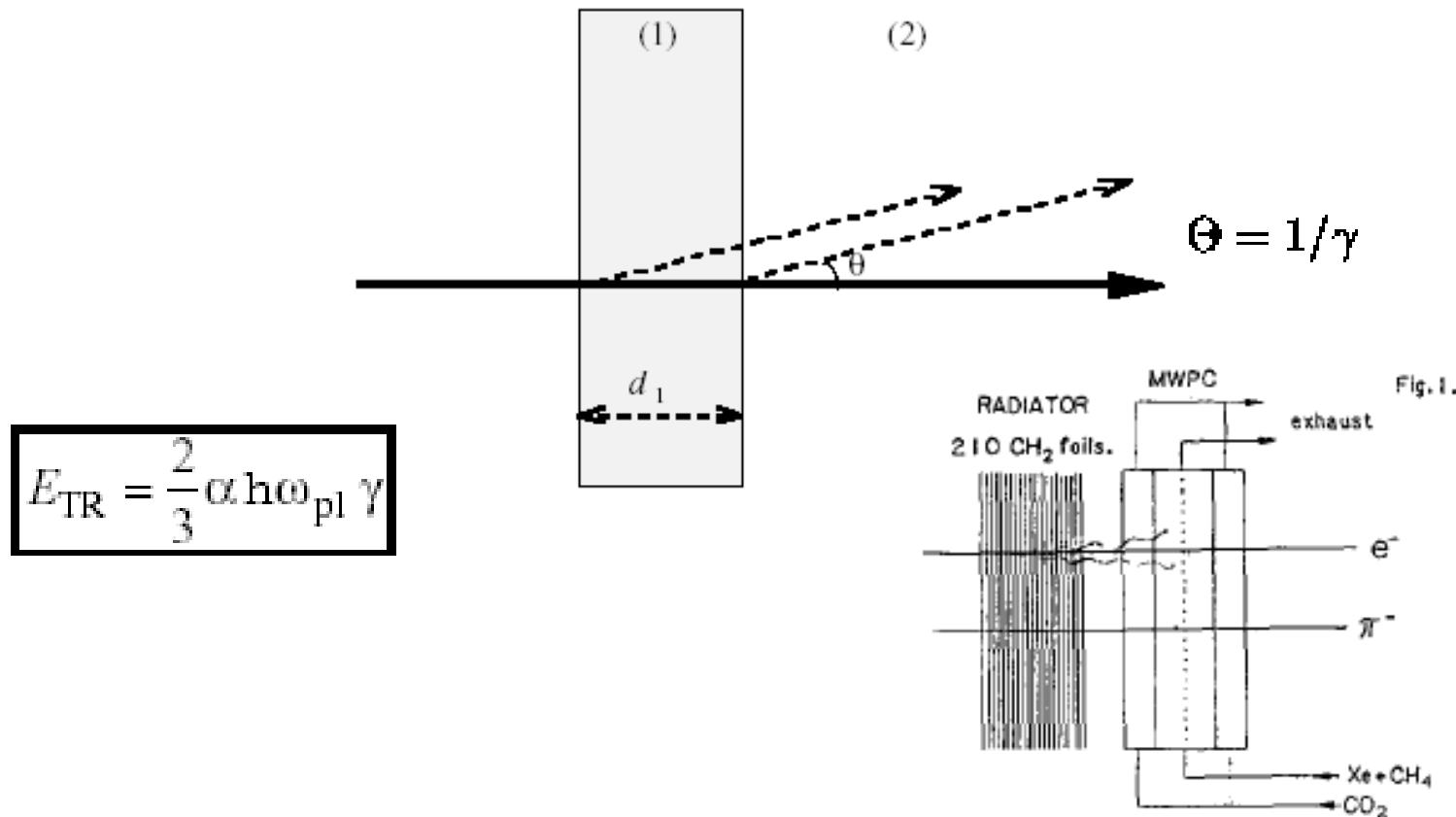
◆ Utilizam uma combinação de espelhos e detectores de radiação para medida direta do ângulo θ_c

◆ Muito usado em colisões



Métodos de Identificação III

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



✿ ω_{pl} = frequência de plasma do meio

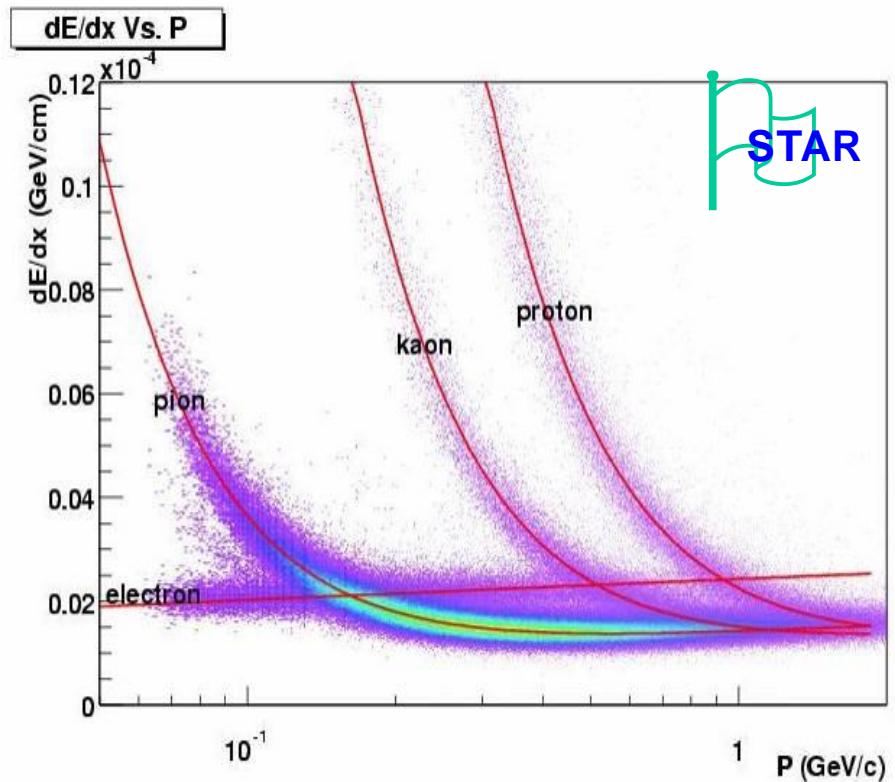
✿ Na prática somente elétrons emitem quantidades apreciáveis desta radiação

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

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



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:

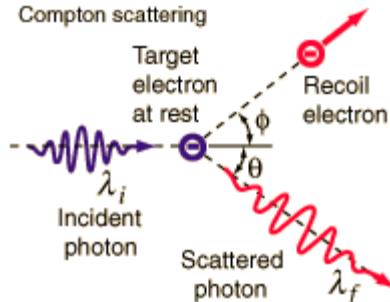
$$\delta E/E \approx 1/\sqrt{E} \implies \text{Maior precisão a altas energias } \delta p/p \approx p$$

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

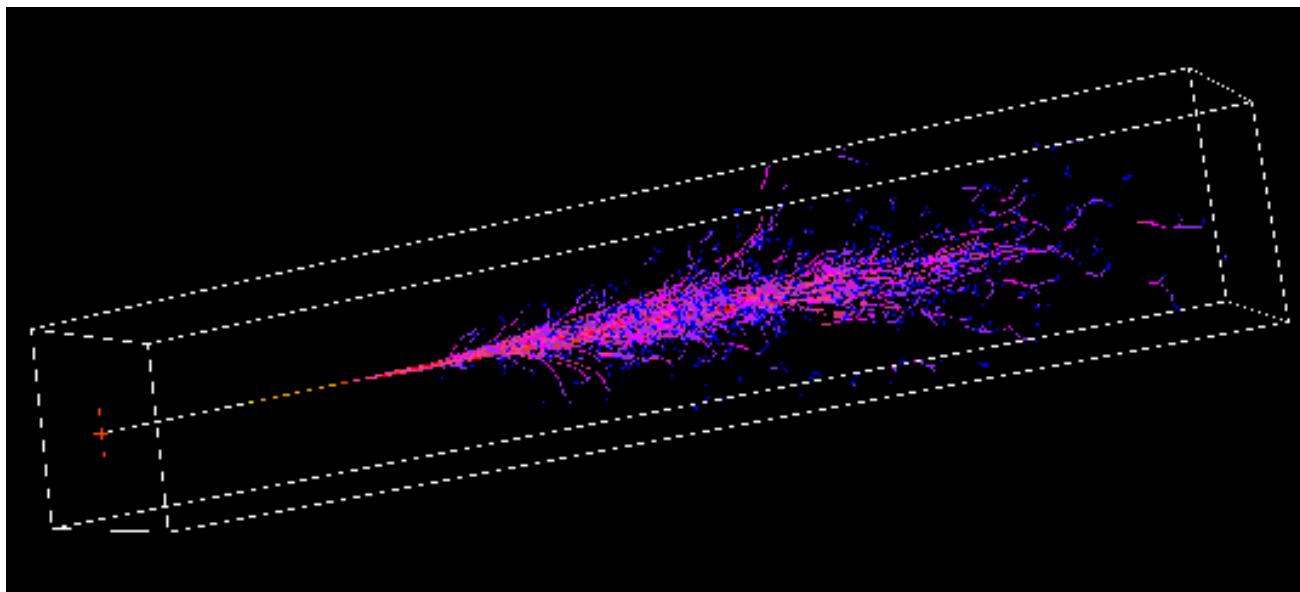
- ☞ Chuveiros Eletromagnéticos - interação EM(irradiação, criação de pares)
- ☞ Chuveiros Hadrônicos - interação forte

- ◆ Chuveiros Eletromagnéticos - iniciados por e^- , γ , $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 $e^- \rightarrow e^- \gamma \rightarrow e^- e^+ \Rightarrow$ Chuveiro se desenvolve até $E=E_c \approx 550/Z$ MeV
 \Rightarrow 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

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

$$a = 1 \text{ para } e^- e^+, 0.5 \text{ para } \gamma$$

sendo que a profundidade máxima é dada por:

$$L_{\max} = L_M + 0.08Z + 9.6[X_0] \implies \text{depende de } \ln E \text{ e } Z$$

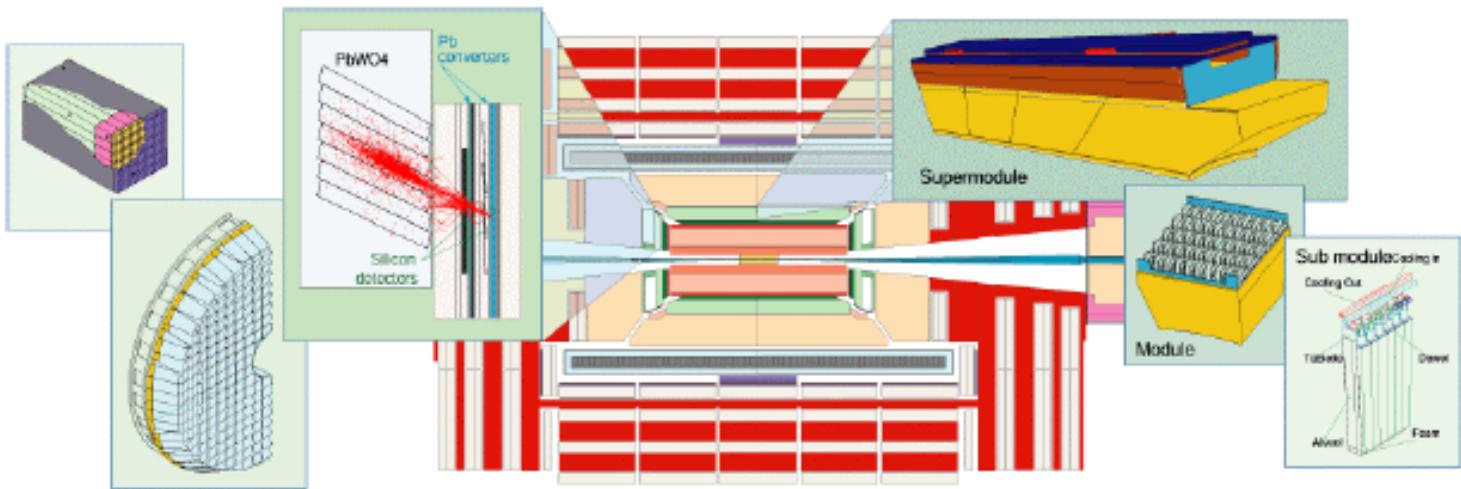
• Na prática materiais de alto Z são usados para se obter um detector compacto

• 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

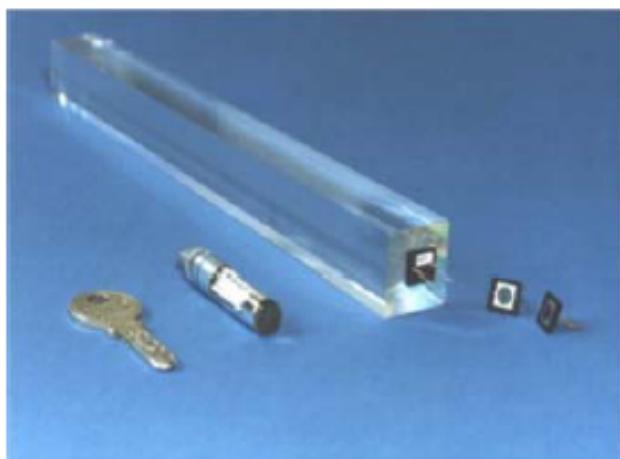
- Lead Glass($PbO+SiO_2$) detecção por radiação Cherenkov
 $\delta E/E = 0.05/\sqrt{E}$
- Cristais cintiladores inorgânicos(NaI, CsI, BGO) detecção direta da luz do cintilador. $\delta E/E = 0.015/(E)^{1/4}$

CMS Project for LHC



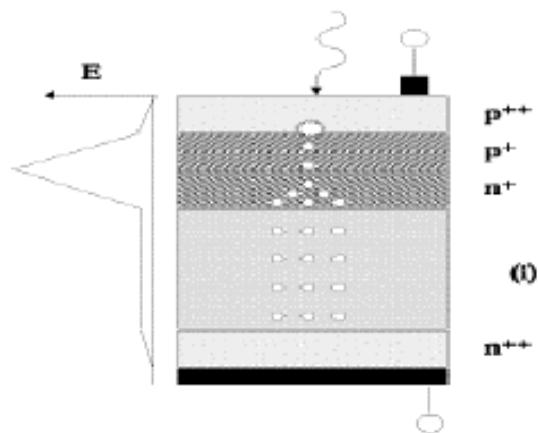
- 80,000 lead-tungstate (PbWO₄)
 - 22x22x230 mm³ (barrel) $\Leftrightarrow 1R_M \times 1R_M \times 26X_0$
 - 30x30x220 mm³ (end cap)
- magnetic field of 4T
- radiation dose of $\sim 1\text{-}2 \text{ kGy/year}$

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	
I _{max}	450 nm	
Decay time	10 ns	
Light output	200 photons/MeV	

Signal: > 4 photoel./ MeV ×(gain=50)

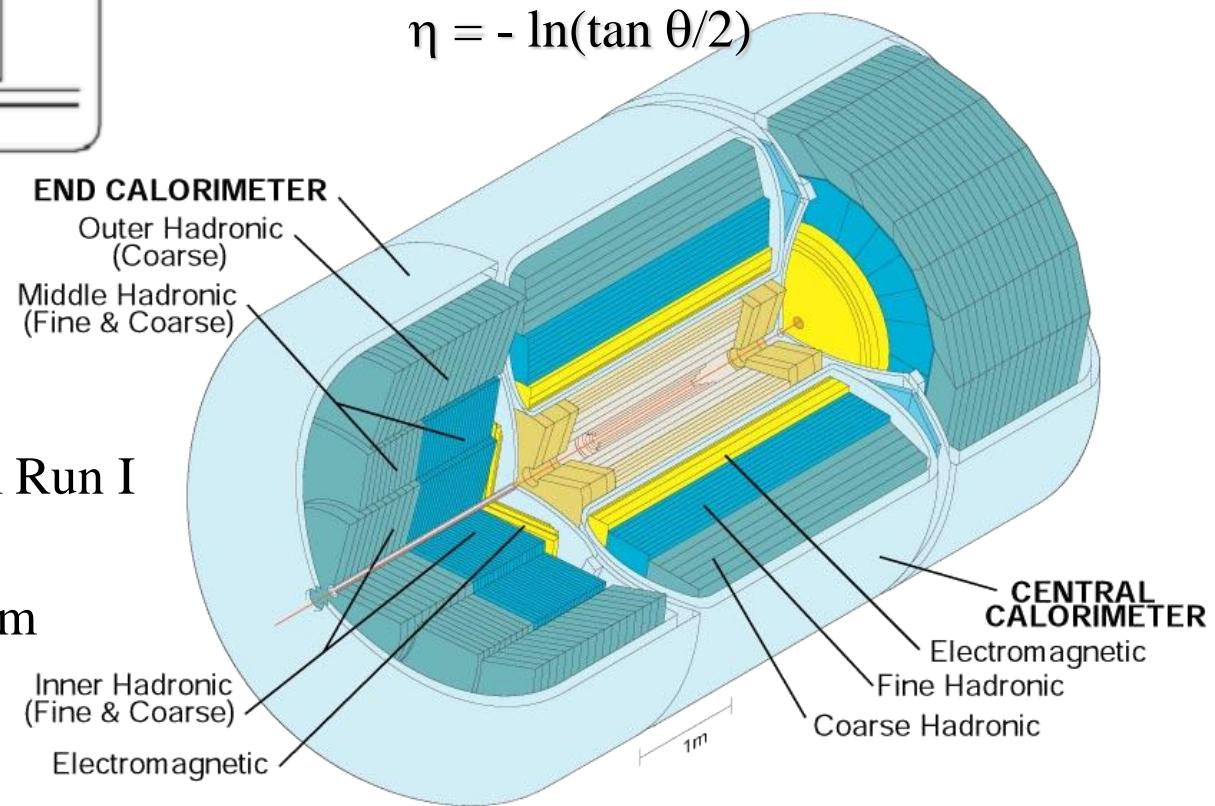
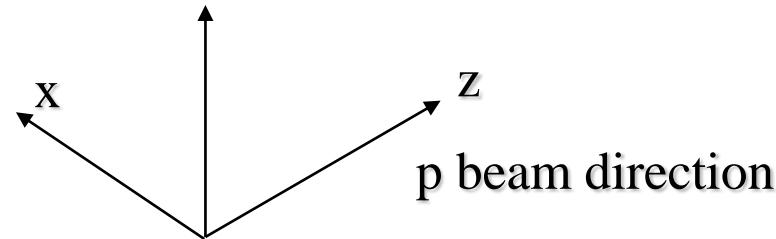
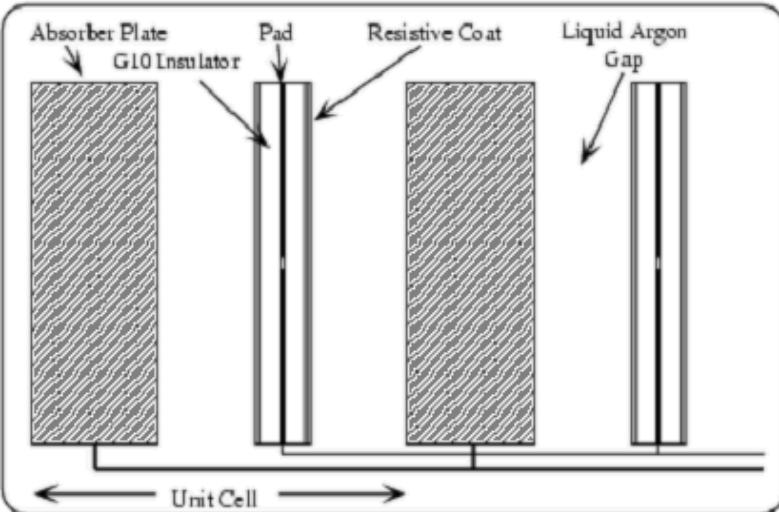


- available size: 5x5 mm² x 2/per cr.
- C ~ 100pF @ U_W ~ 300V
- Gain ~ 50
- ENF ~ 2
- High rad.tolerance
- Low nuclear counter effect

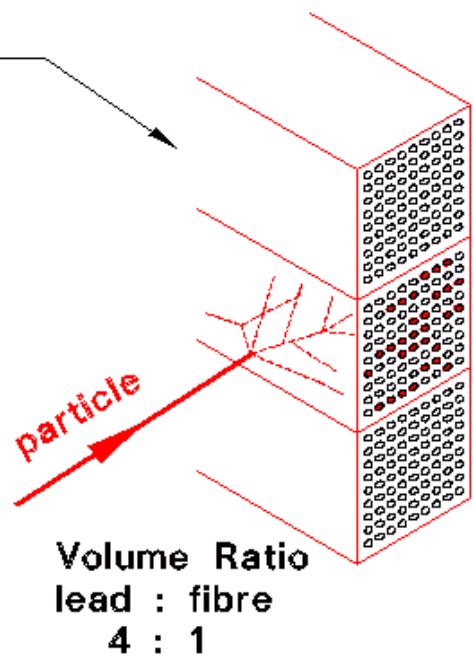
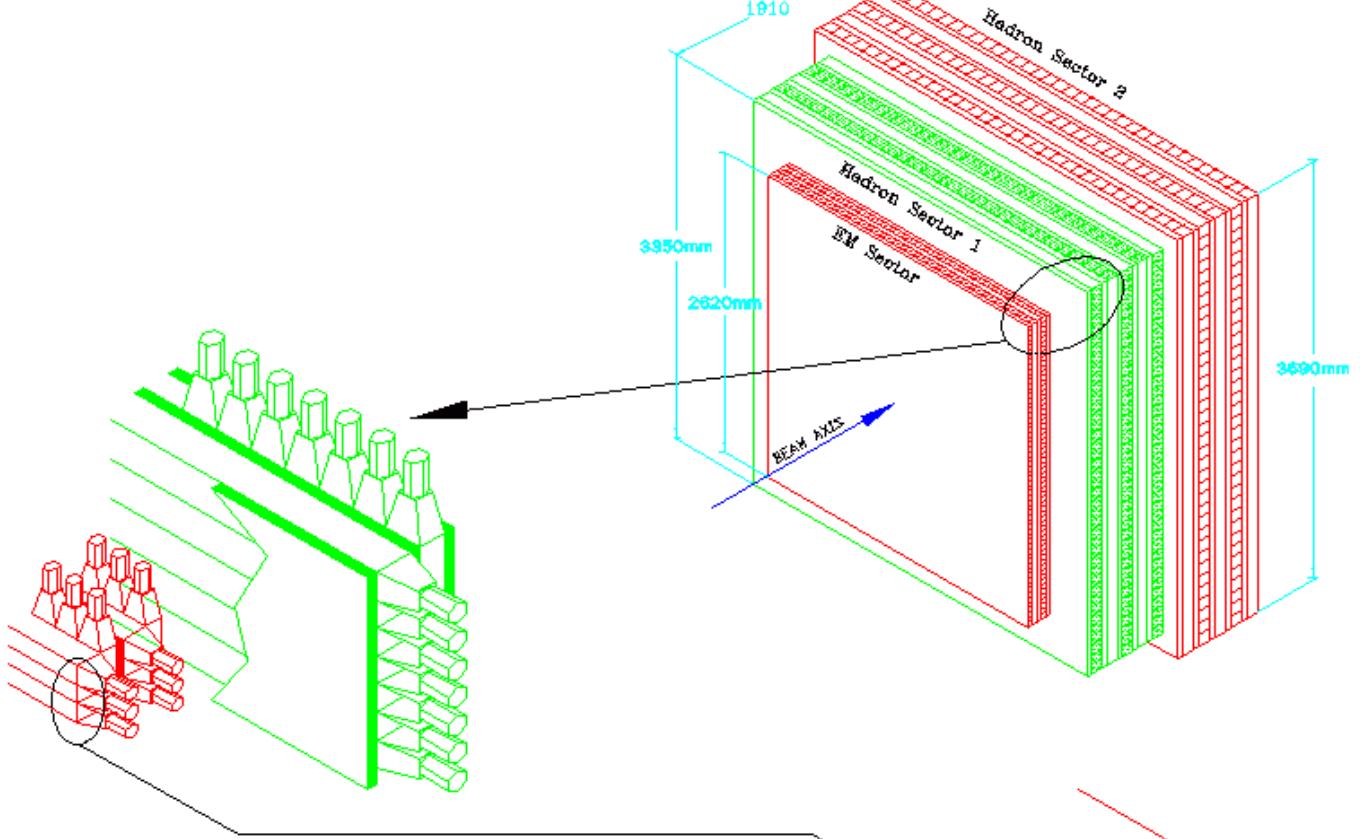
- ❖ Amostragem - Um material de alto Z(onde ocorre a interação e produção de partículas) é intercalado ao detector(cintilador, câmara de ionização, câmara proporcional, etc.) onde se dá a formação do sinal. Várias camadas deste tipo são utilizadas para se obter a contenção completa dos chuveiros.
 - 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



- 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:



- 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 $\sigma_{in} \Rightarrow \lambda$ 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 }	$dE/dx _{\text{min}}^b$ $\left\{ \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right\}$	Radiation length ^c X_0 {g/cm ² }	Radiation length ^c (cm)	Density {g/cm ³ } ({g/ℓ} 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	0.411130	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 terephthalate (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	
Polyvinyltoluene, 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:

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

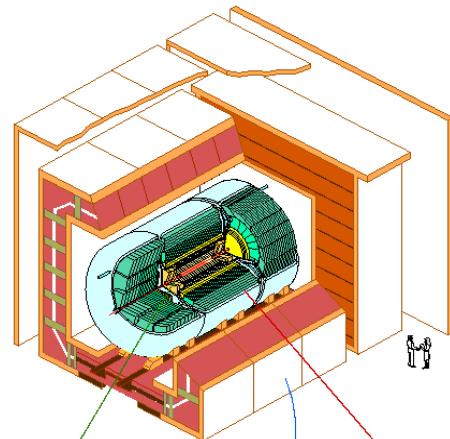
- **Calorímetros Hadrônicos**

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 de partículas) 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 hadrons atravessa a parte EM com pouca interação.



TRACKING

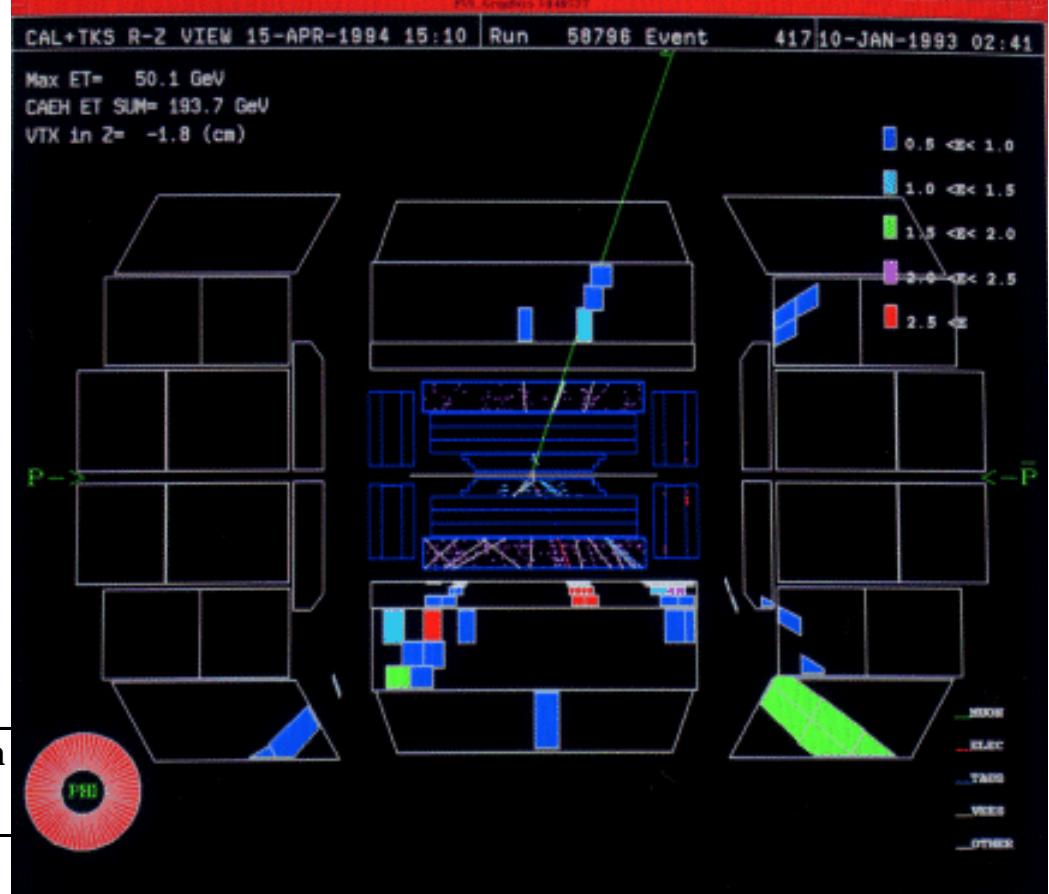
$\sigma(\text{vertex}) = 6 \text{ mm}$
 $\sigma(r\phi) = 60 \mu\text{m}$ (VTX)
 $= 150 \mu\text{m}$ (CDC)
 $= 200 \mu\text{m}$ (FDC)

MUON

$|\eta| < 3.3$
 $\delta p/p = 0.2 \oplus 0.01 p$

CALORIMETRY

$|\eta| < 4$
 $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$
 $G(\text{EM}) = 15\% / \sqrt{E}$
 $G(\text{HAD}) = 50\% / \sqrt{E}$



Partícula	Tracking	ECAL	HCAL	Muon
γ				
e				
μ				
Hadron				
neutrinos				