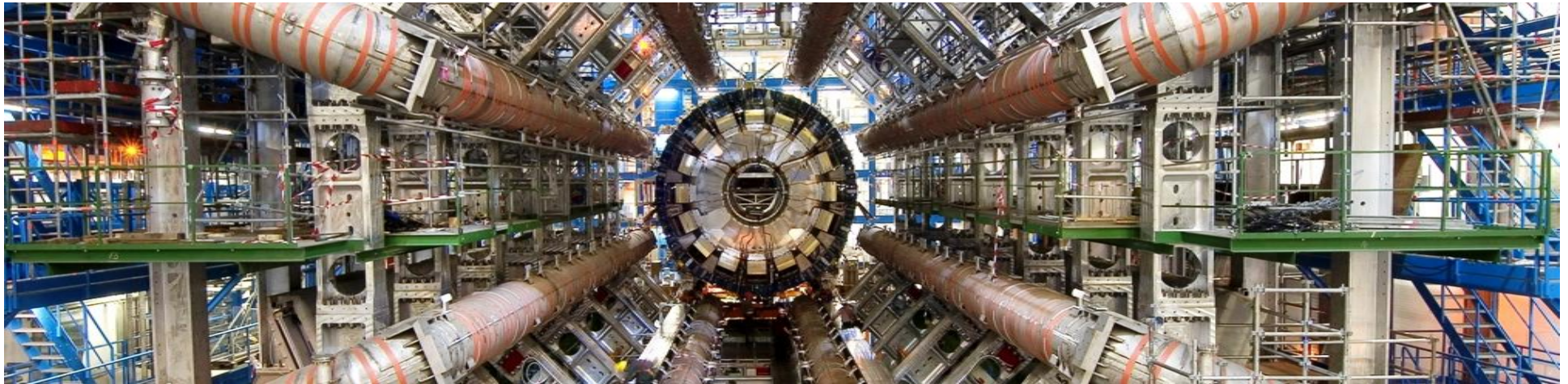


# Interacção da radiação com a matéria e a concepção de um detector em Física de Altas Energias

(o ATLAS como exemplo de uma experiência do LHC)



Ana Henriques

CERN

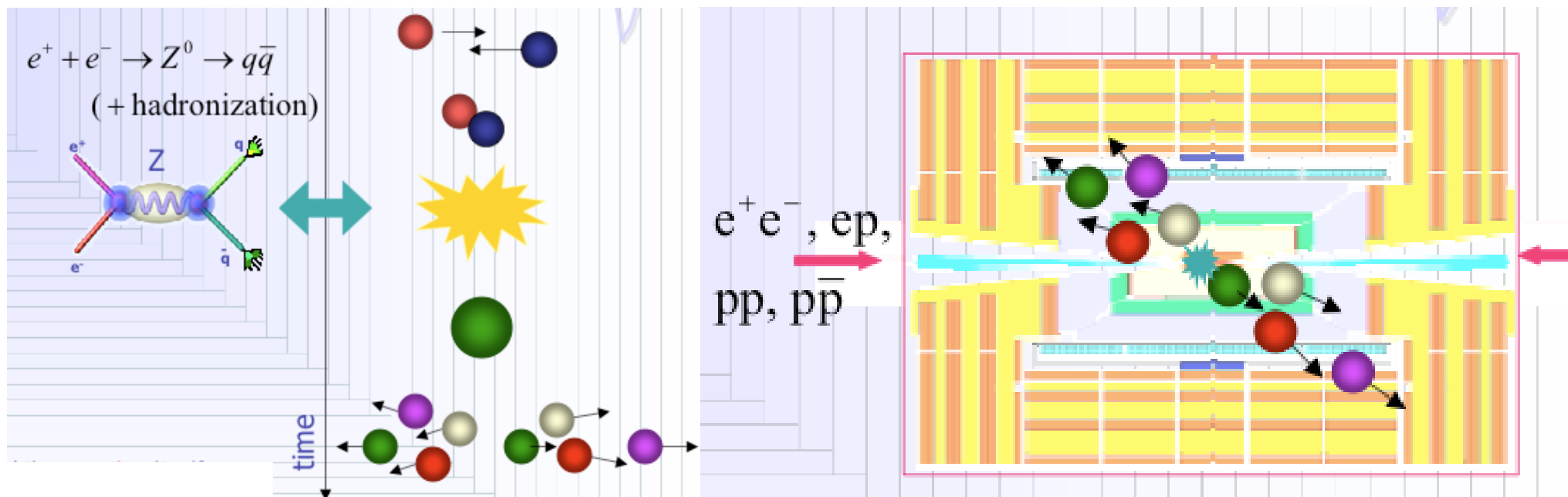
# Sumário

- Os princípios de interacção das partículas com a matéria
- Os vários componentes de um detector:
  - Calorímetro electromagnético e hadrónico
  - Detector de traços interno
  - Espectrómetro de muões
- Integração num detector global
- o ATLAS como exemplo de uma experiência do LHC

# Quais as partículas que podemos detectar?

- Partículas carregadas :  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $p$ ,  $\rho^\pm$ ,  $m^\pm$
- Partículas neutras:  $g$ ,  $n$ ,  $\rho^0$ ,  $\eta$
- Partículas com semi-vida muito curta não são observadas de forma directa, o que detectamos serão os produtos da sua desintegração (muito frequente em experiências de física de altas energias)
- Diferentes tipos de partículas vão interagir de forma diferente com o material que constitui o detector.

# Qual a função de um detector numa experiência de Física de altas energias?



Em geral não se ‘vêm’ as partículas criadas numa colisão mas sim os seus **produtos finais (partículas carregadas, neutras, fótons,...)** que vão ser detectadas através da sua interacção com a matéria que constitui as várias partes do detector .

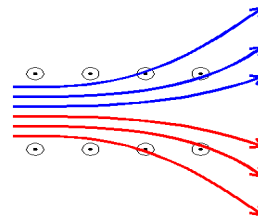
# Qual a função de um detector numa experiência de Física de altas energias?

Um detector ideal será aquele que permite detectar e medir as propriedades das partículas emergentes e assim reconstruir completamente o evento . Um detector deve ter:

-Um ângulo de ‘visão’ máximo (com boa granularidade e sem espaços mortos).

-Efectuar medidas de momento e energia das partículas (**p, E**) => **massa**  $E^2 = m^2 \times c^4 + \vec{p}^2 c^2 \supset m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$

-Detectar e identificar a trajectória das partículas (**carga**)



$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$
$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

-Ter uma resposta rápida de forma a medir o tempo de vida da partícula (**semi-vida**)

**Isto só é possível utilizando vários sub-detectores complementares**

# Princípios de detecção

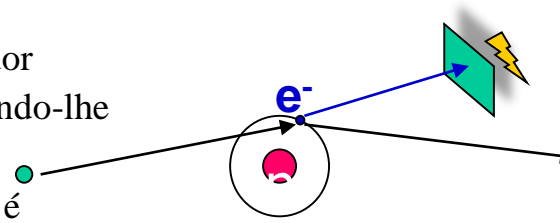
Só é possível medir as características duma partícula se elas interagirem com o material do detector => criar um sinal mensurável (sinal eléctrico, luminoso, ...)

As partículas carregadas ( $e^+$ , ...) vão interagir por:

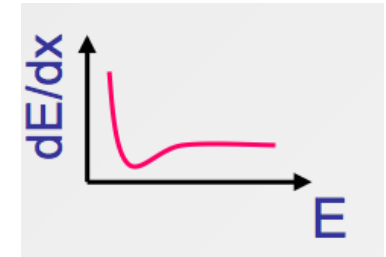
## • Ionização

Colisão com um electrão do átomo do material absorvedor transferindo-lhe parte da sua energia incidente e arrancando-lhe um electrão) => **produção e detecção de carga**

O número de colisões e a conseqüente perda de energia é proporcional à densidade de electrões do meio. Dominante a baixa Energia (E).

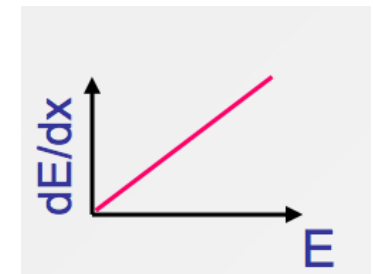
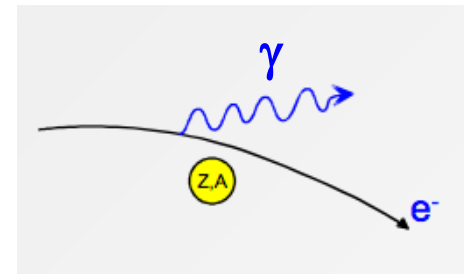


fórmula de “Bethe-Bloch”



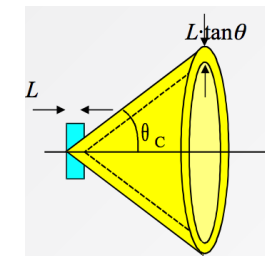
## • Excitação e “Bremsstrahlung”

Excitação do material absorvedor com emissão de fótons que vão transportar parte da energia da partícula incidente => **Produção e detecção de luz proporcional E incidente**



## • Emissão de luz de Cherenkov

Se a velocidade ( $\beta$ ) da partícula carregada incidente no material absorvedor  $> c/n$  ( $c$ = velocidade da luz no vazio ;  $n$ = índice de refração do meio). A luz produzida é emitida com um ângulo  $\cos \Theta = 1/n\beta$ .



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

## • Dispersão-mudança de direcção (“Coulomb scattering”),...

# Interacção das partículas neutras (fotões)

Para ser detectado o fotão tem de criar ou transferir a sua energia para partículas carregadas

$\gamma$

Photoelectric effect



Compton effect



Pair production

$$E_\gamma \geq 2 \times 511 \text{ keV}$$

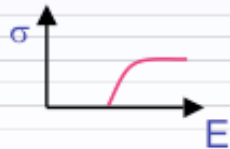
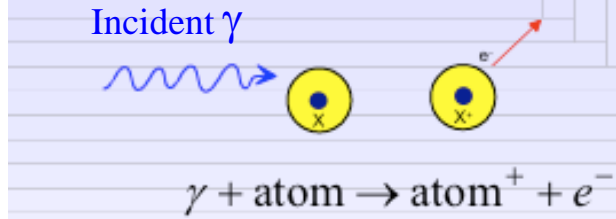


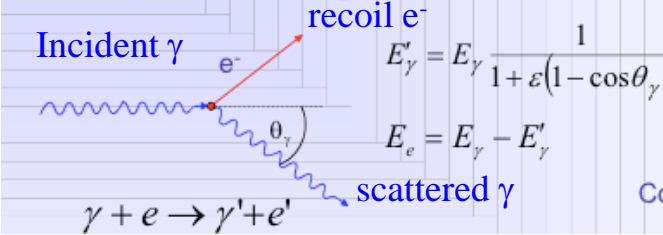
Photo-electric effect: (alrea



**Efeito Fotoelétrico:**

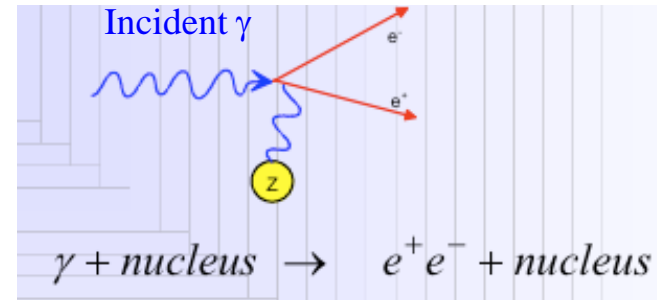
Absorção de um fotão por um electrão (ligado) de um átomo do detector e a consequente libertação de um electrão  
A probabilidade é proporcional a  $E^{-3}$  ;  $Z^5$

Compton scattering:



**Efeito de Compton:**

Dispersão (mudança de direcção) de um fotão por um electrão (quase livre) de um átomo do detector  
A probabilidade é proporcional à densidade do material ( $Z$ )



**Produção de pares:**

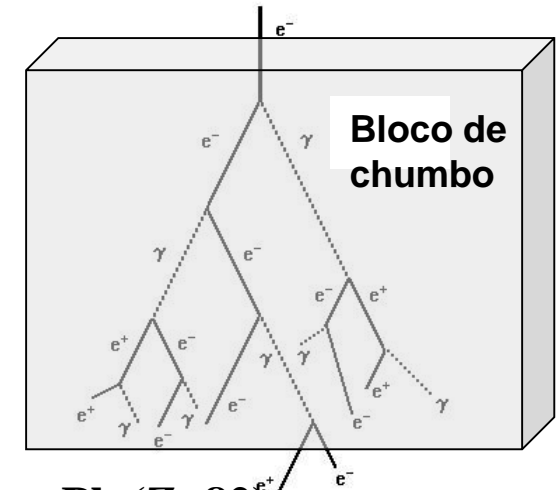
Transformação de um fotão num par de  $e^+e^-$  na presença de um núcleo atómico do detector.  
A probabilidade aumenta com  $Z$  ;  $E$



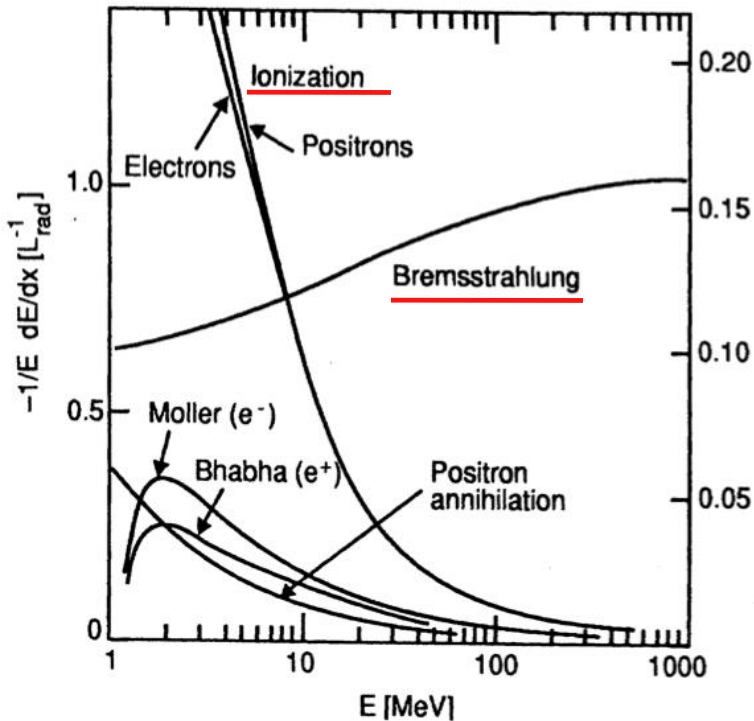
# Desenvolvimento de uma Cascata electromagnética

- Iniciada por um  $\gamma$  ou um  $e^+e^-$ .
- Para  $E > E_c$  (energia crítica,  $E_c=550/Z$ ): multiplicação de uma cascata por “pair production” ( $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ) e “Bremsstrahlung”
- Para  $E < E_c$  : absorção das partículas geradas na cascata por Ionização, efeito Compton e Fotoeléctrico
- O número de partículas gerada  $N \propto E_{\text{incidente}}$  com uma flutuação  $\sigma = \sqrt{N}$

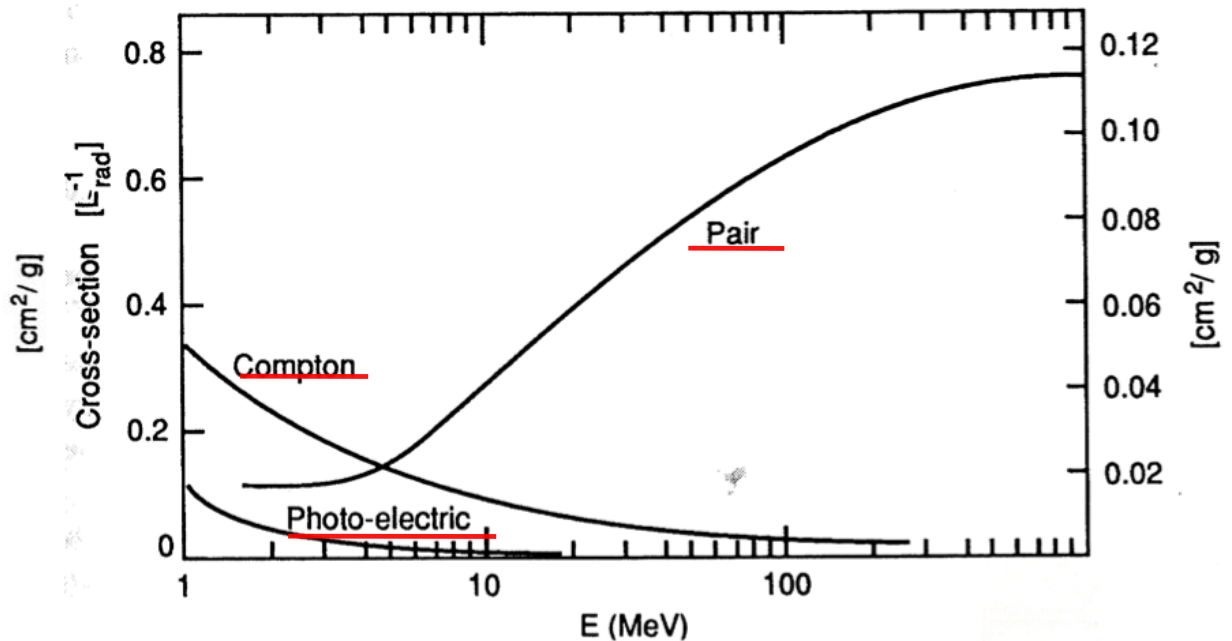
• A resolução da energia detectada = 
$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{\sigma(N)}{N} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \frac{1}{\sqrt{E}}$$



(Interação de  $e^+e^-$  em Pb;  $Z=82$ )



Interação de fótons em Pb ( $Z=82$ )





# Interacção das partículas hadrónicas carregadas ( $\pi, \pi^{+-}, k^{+-}$ ) ou neutras ( $n$ )

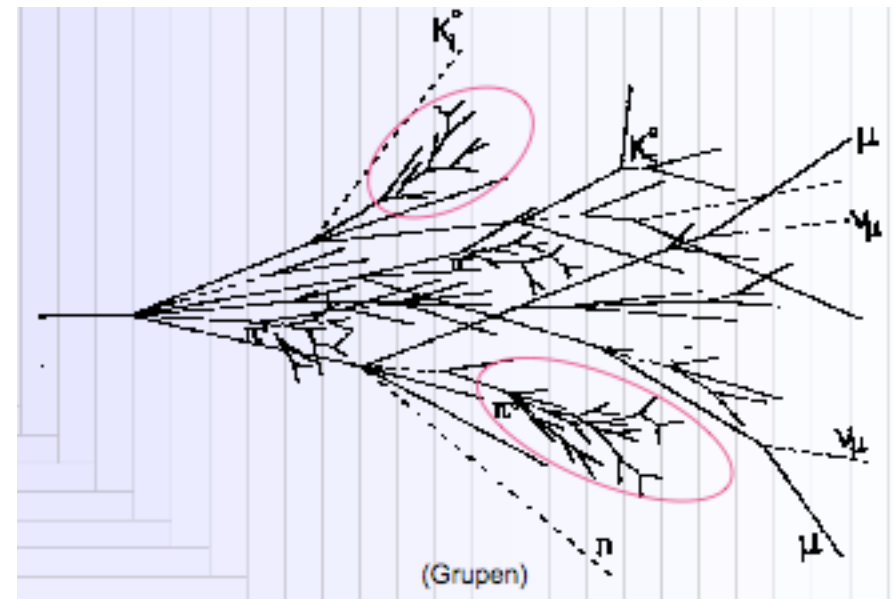
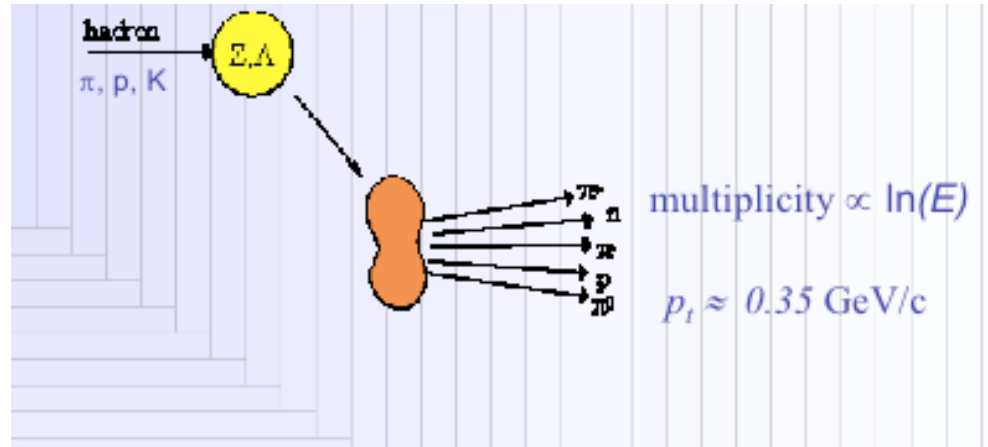
A interacção de hádrões energéticos (neutros e carregados) com a matéria é determinada por processos inelásticos, i.e., excitação nuclear que leva à fragmentação do núcleo e produção de partículas secundárias neutras e carregadas ( $n, \pi^{+-}, \mu, \nu, \dots$ )

Os neutrões para serem detectados têm de criar partículas carregadas através de processos elásticos ( $E_n > 1\text{ GeV}$ ) e inelásticos ( $E_n < 20\text{ MeV}$ )

⇒ Formação de uma cascata hadrónica de partículas

A resolução em energia vai estar limitada pelas flutuações evento a evento dos vários processos envolvidos no desenvolvimento da cascata hadrónica :

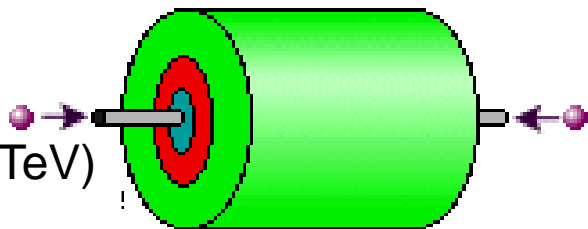
- $E_{\text{invisível}}$  necessária para fragmentar o núcleo.
- flutuações da componente electromagnética (formação de  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ;  $\langle \text{fracção } \pi^0 \rangle \sim 0.1 \log(E)$ )
- Energia não detectada por certas partículas ( $\mu, \nu$ , neutrinos,...)



cascata hadrónica

# As componentes de um detector num colisionador de partículas

Partícula incidente  
(ex: no LHC Protão (3.5-7 TeV))



Protão (3.5-7 TeV)

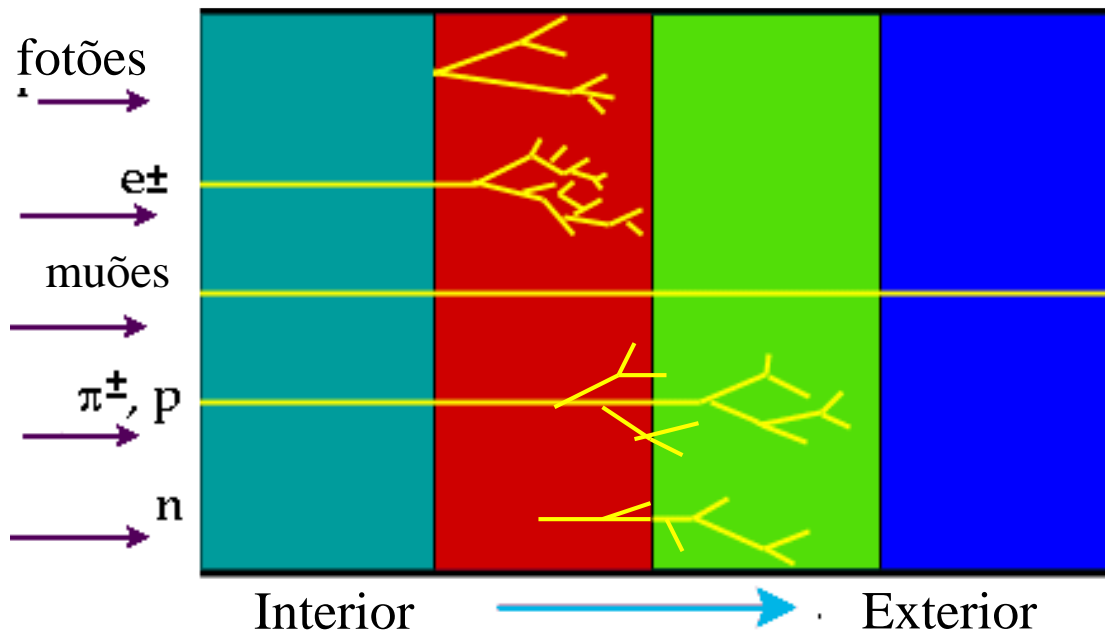
Detector

Câmara  
de traços

Calorímetro  
electromagnético

Calorímetro  
hadrónico

Espectrometro  
de muões



# O Princípio de detecção dos Calorímetros

## Mecanismo básico em calorimetria:

- *Formação de cascatas electromagnéticas (calorímetros electromagnéticos)*
- *Formação de cascatas hadrónicas (calorímetros electromagnéticos+hadrónicos)*

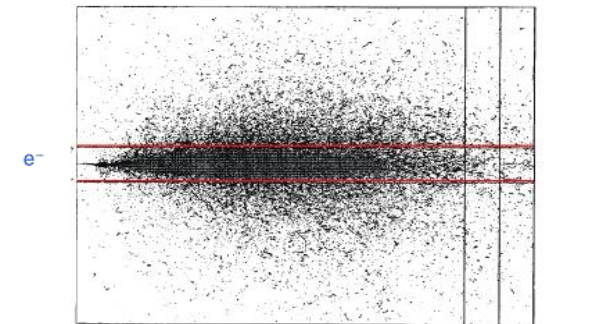
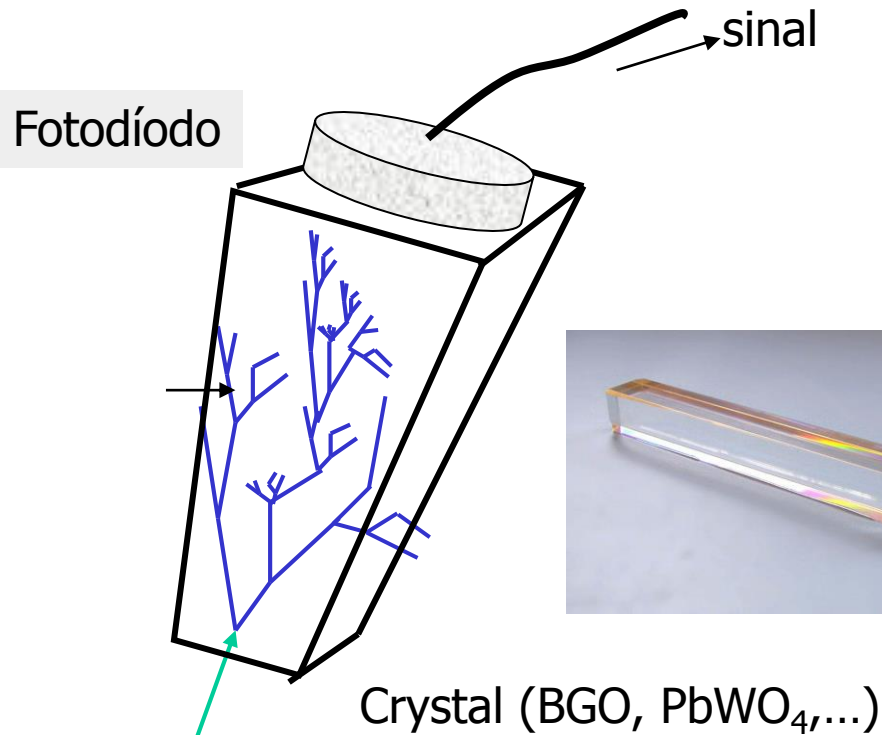
# Calorímetros homogéneos

Toda a energia absorvida no detector é detectada,

ex: ‘*crystal calorimeters*’ (calorímetro electromagnético de CMS ( $\text{PbWO}_4$ ):

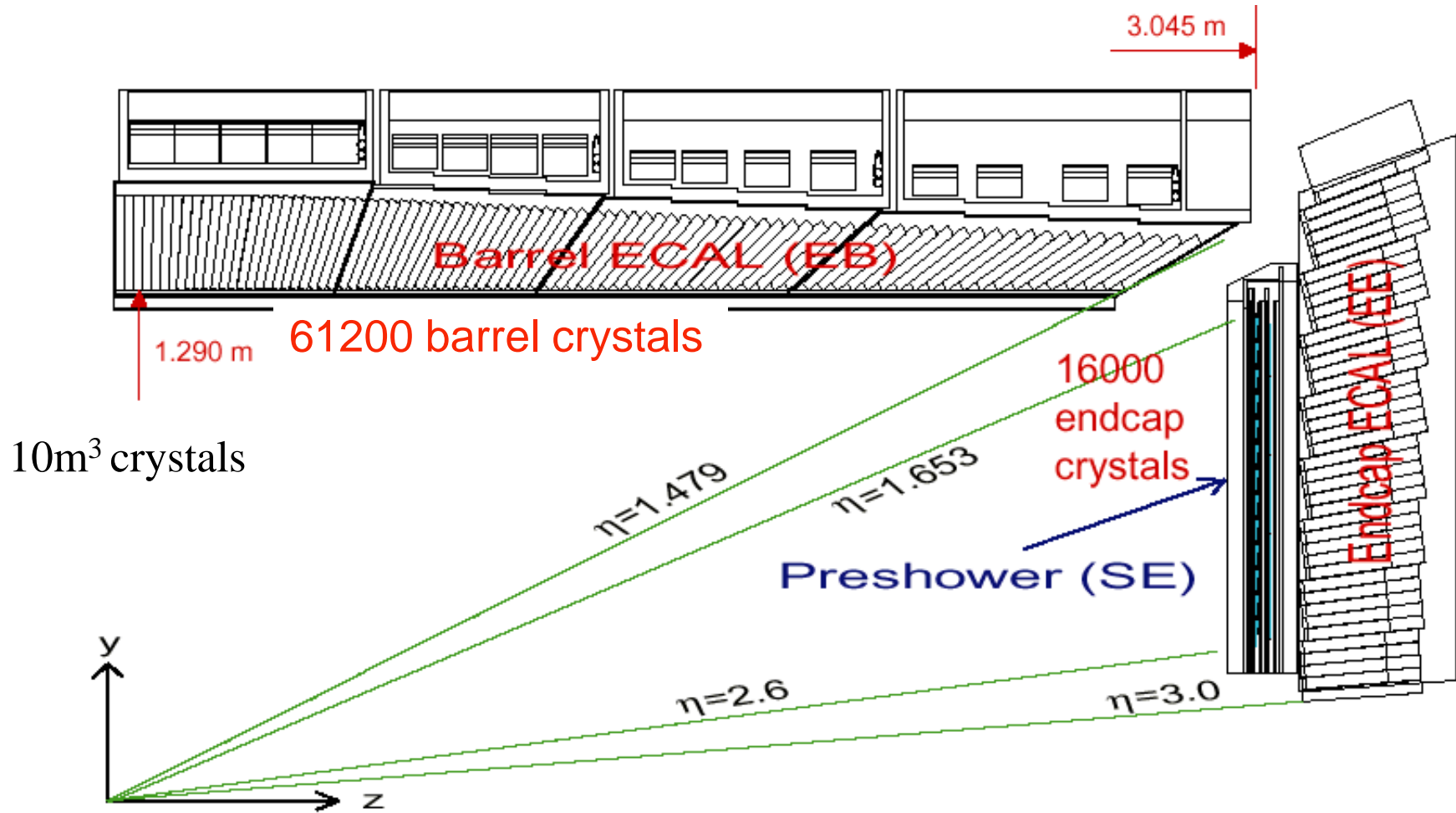


Lead Tungstate Crystals



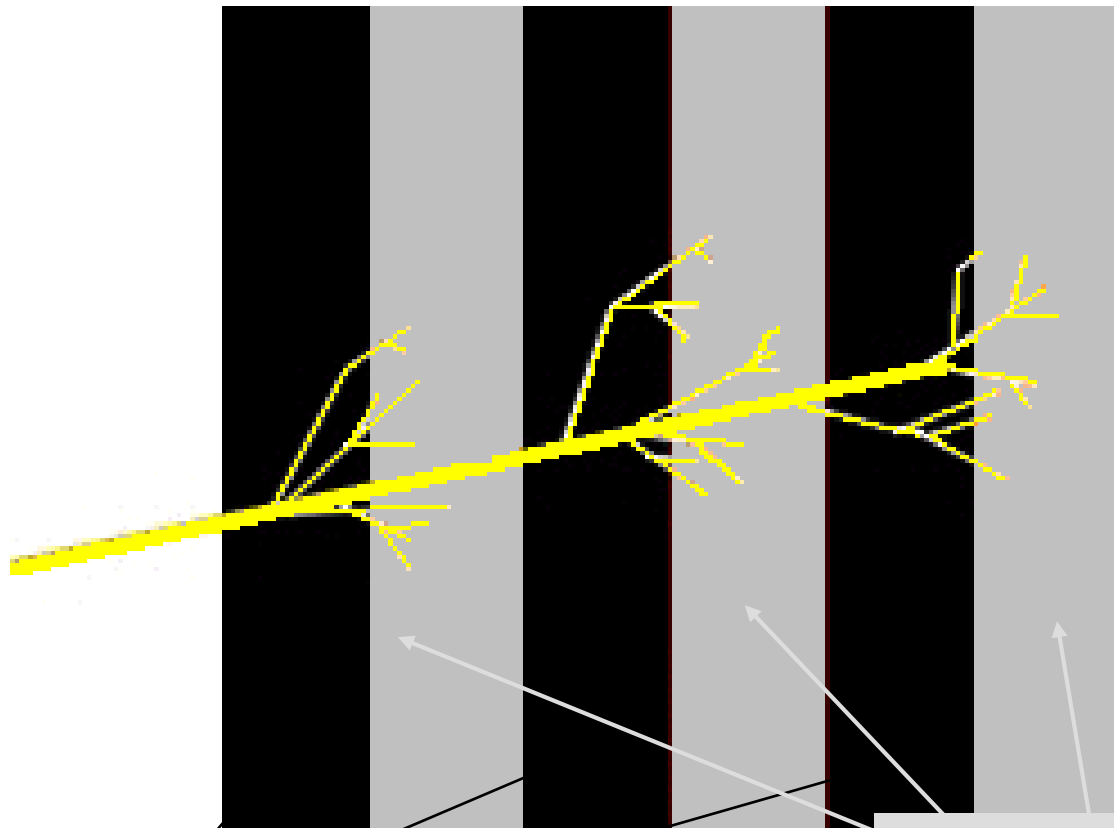
23 25 27  $X_0$   
1  $X_0$  = 0.9 cm

# Calorímetro electromagnético de CMS



# Calorímetros de amostragem

O material activo (menos denso) é intercalado com um material absorvedor muito denso:  
O que se detecta é uma fracção da energia absorvida, proporcional à energia incidente das partículas (ex: calorímetro electromagnético de ATLAS, todos os calorímetros hadrónicos em LHC)

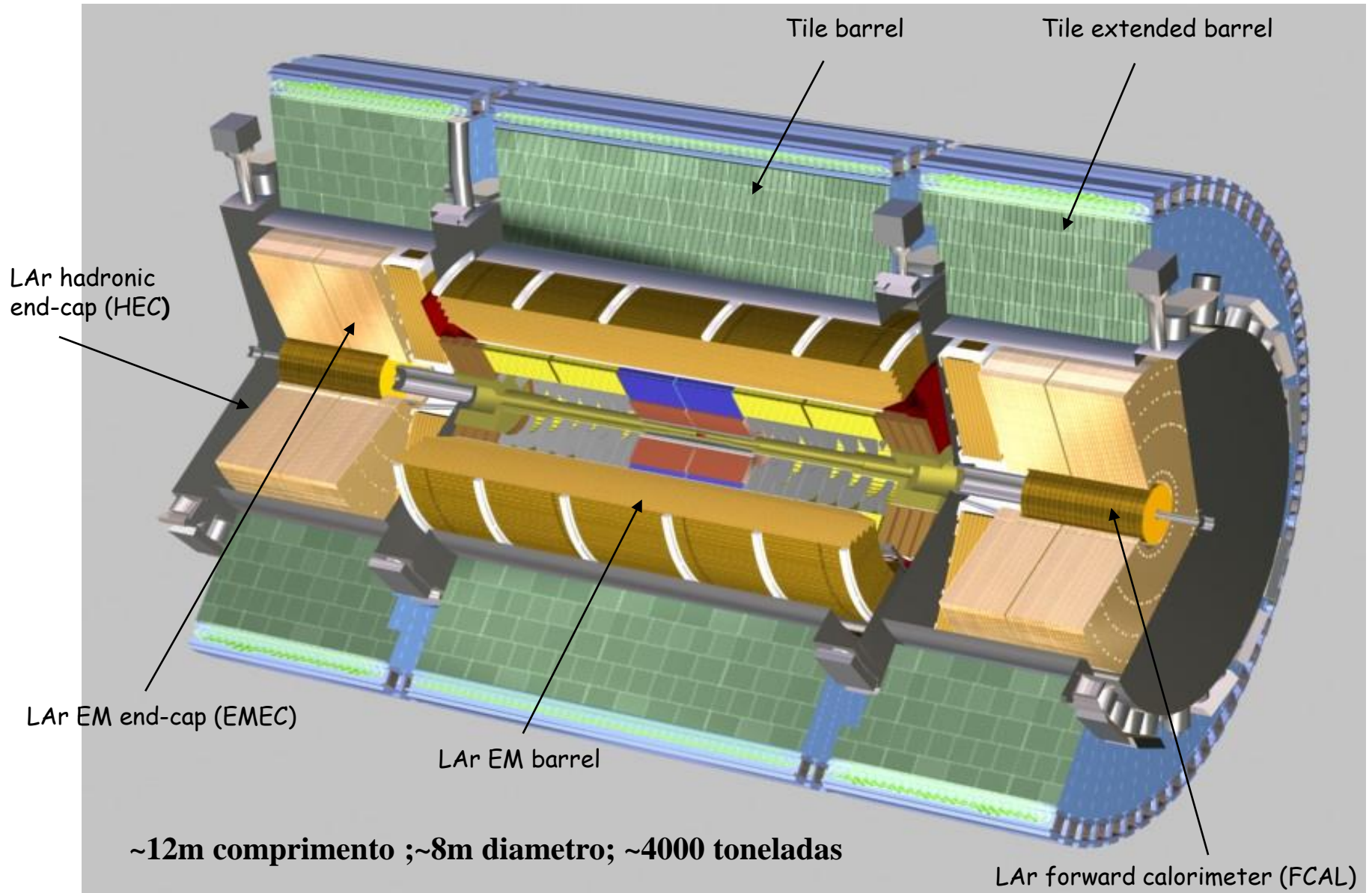


...mas tem de ser calibrado com feixes de energia conhecida !!!

Blocos densos, ex: chumbo, Fe, ..

Detectores - câmaras de fios e cintiladores

# Calorímetros de ATLAS



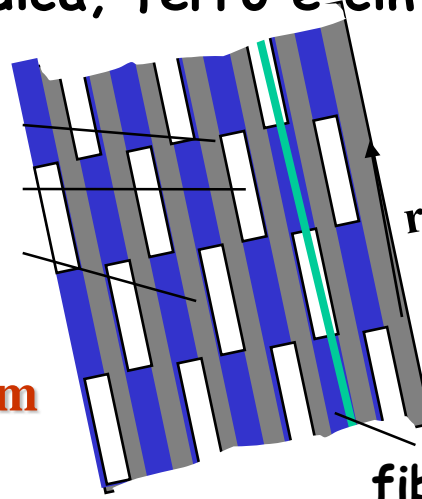


# Princípio do calorímetro ATLAS-Tilecal

Estrutura periódica, ferro e cintiladores de plástico

placa mestra (5mm)  
espaçador (4mm)  
cintilador (3mm)

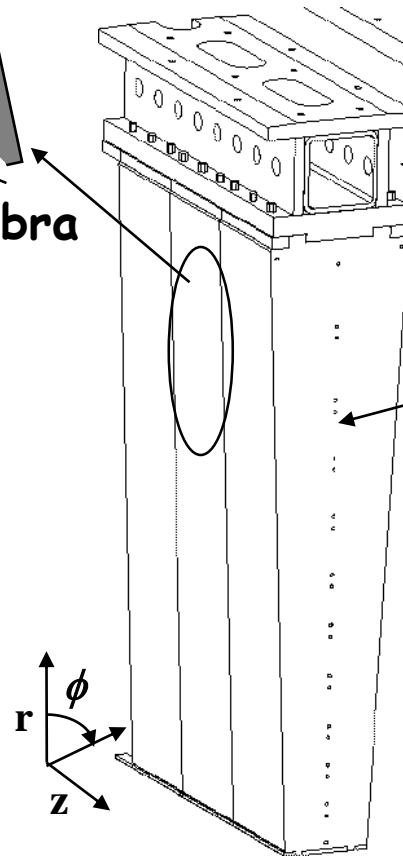
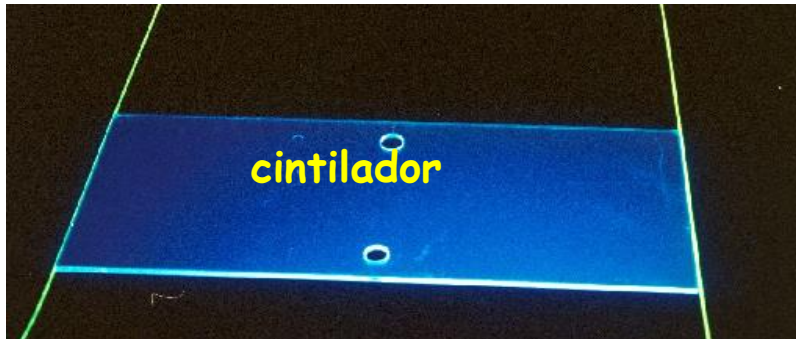
período básico, 18mm



fibra

Luz produzida nos cintiladores transmitida até aos fotomultiplicadores através de fibras ópticas WLS

Fibras WLS



sub-módulo

➤ razão Fe/cint. 4:1

➤ diâmetro ext 8.5

m

➤ comprimento 12

m

➤ peso total 2900 T

Caveta (com electrónica)

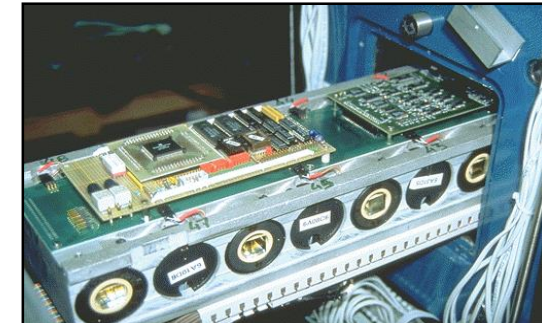
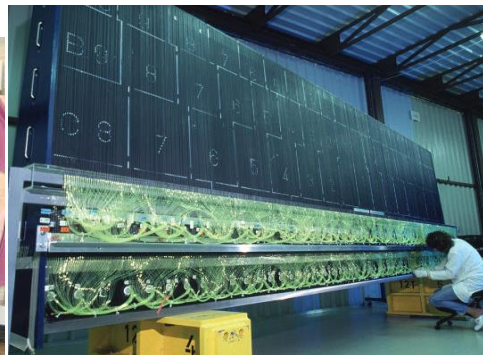
➤ Hermeticidade para detecção de jactos e  $E_{\text{miss}}$

➤ Cobertura  $|\eta| < 1.6$

➤ Resolução em energia para jactos

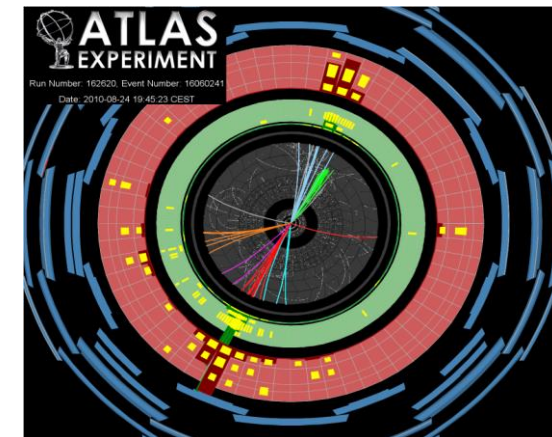
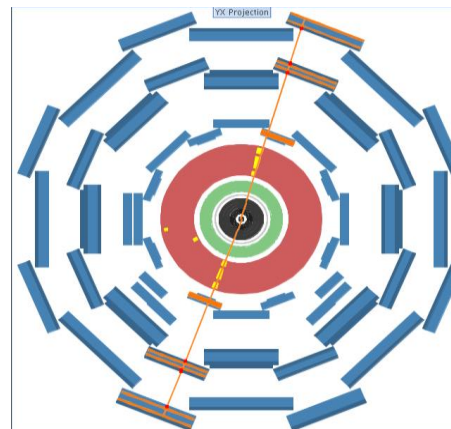
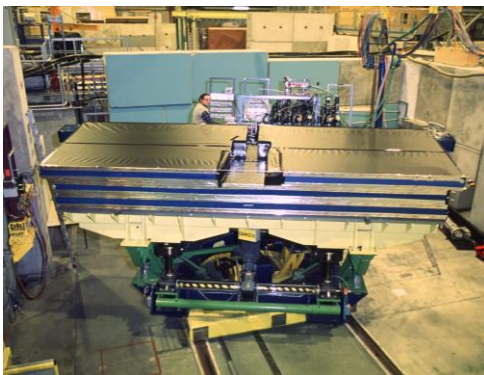
$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$$

# As várias etapas do projecto Tilecal (1993-2011)



1993-1995 R&D-protótipos 1996-2002: construção 1999-2002 Instrumentação

1999-2004: Electrónica



2002-2004: calibrações

2004-2006 Instalação

2007-2009 certificação  
(raios cósmicos)

2009-->:  
aquisição/análise dados  
LHC

Um longo percurso para conseguir as excelentes características do Tilecal no ATLAS

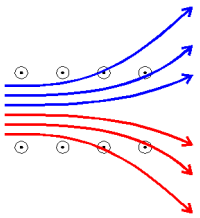
(com a colaboração dos Portugueses, Brasileiros !)

# A função dos detectores de traços

-Permite medir a **carga e momento** das **partículas carregadas** produzidas na colisão (na presença de um **campo magnético**).

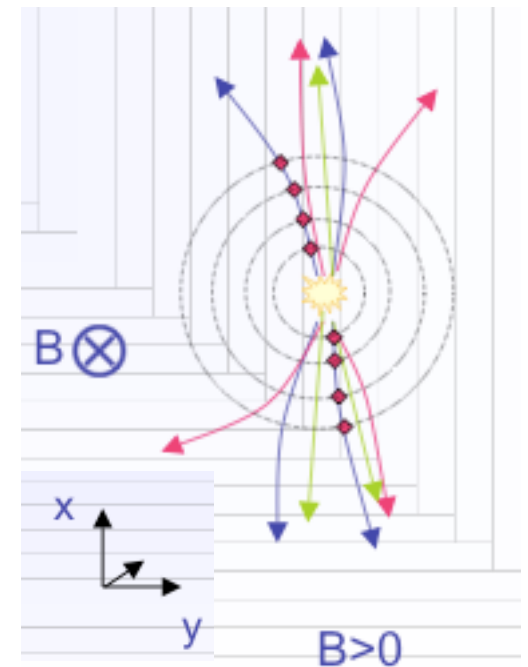
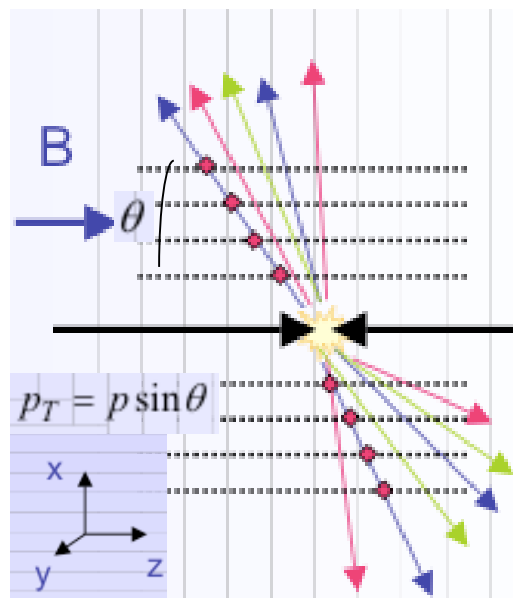
- A sua trajectória vai ser reconstruída medindo vários pontos no espaço.

Usam-se materiais / detectores pouco densos de forma a minimizar a dispersão das partículas e medir a sua trajectória (momento) com o maior rigor.



$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$



# Os vários tipos de detectores de traços

## – Detectores de cintilação:

- Orgânicos
- Inorgânicos
- Gases

## - Detectores de ionização:

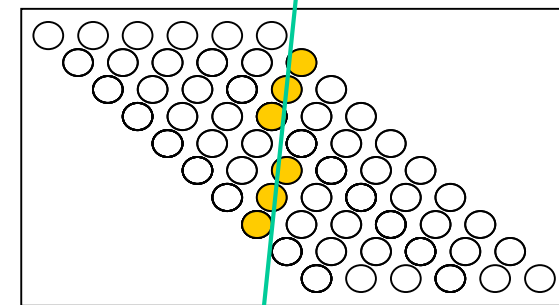
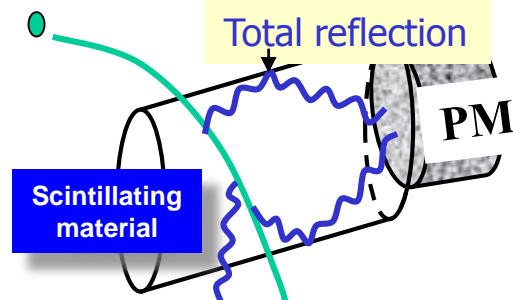
- Câmaras de deriva
- MWPC (‘multi wire proportional chamber’)
- TPC (Time projection chamber’)
- Detectores de silício



# Principais técnicas usadas nos detectores de traços

1) **Detectores de cintilação** (baseados na excitação dos seus átomos) quando partículas carregadas os atravessam emitem luz na zona dos ultravioleta e luz visível. **Também muito usados em calorímetros:**

- Gases nobres
- Cristais inorgânicos
- Cintiladores orgânicos



• Fotomultiplicador (PM) converte o sinal luminoso em sinal elétrico

Quando a luz das fibras cintilantes é detectada individualmente pode reconstruir-se o trajeto da partícula

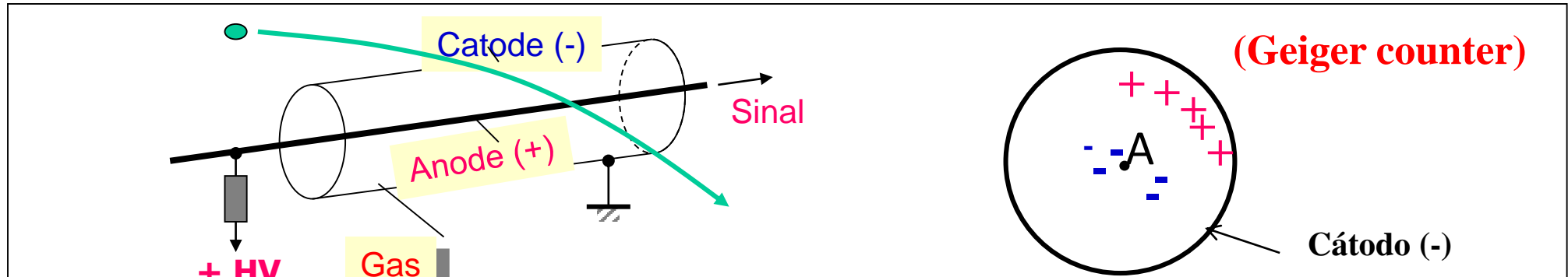
## Cristais cintiladores:

| Scintillator composition | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Index of refraction | Wavelength of max. Em. (nm) | Decay time Constant (μs) | Scinti Pulse height <sup>1)</sup> |
|--------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| NaI(Tl)                  | 3.67                         | 1.9                 | 410                         | 0.25                     | 100                               |
| CsI                      | 4.51                         | 1.8                 | 310                         | 0.01                     | 6                                 |
| CsI(Tl)                  | 4.51                         | 1.8                 | 565                         | 1.0                      | 45                                |
| CaF <sub>2</sub> (Eu)    | 3.19                         | 1.4                 | 435                         | 0.9                      | 50                                |
| BaF <sub>2</sub>         | 4.88                         | 1.5                 | 190/220<br>310              | 0,0006<br>0.63           | 5<br>15                           |
| BGO                      | 7.13                         | 2.2                 | 480                         | 0.30                     | 10                                |
| CdWO <sub>4</sub>        | 7.90                         | 2.3                 | 540                         | 5.0                      | 40                                |
| PbWO <sub>4</sub>        | 8.28                         | 2.1                 | 440                         | 0.020                    | 0.1                               |

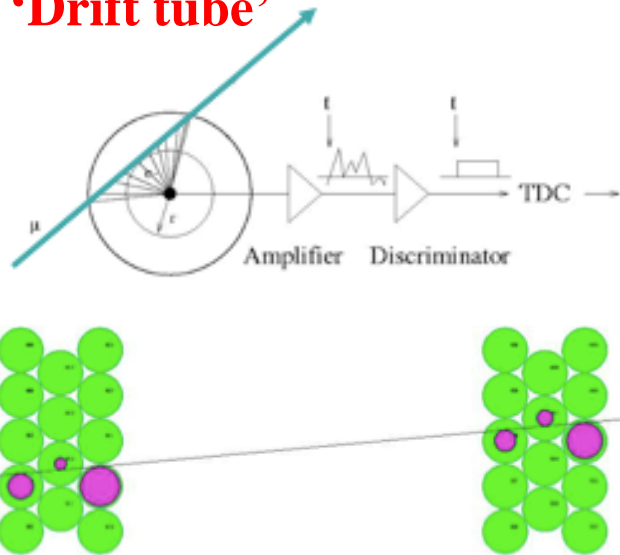


# Principais técnicas usadas nos detectores de traços (cont)

**2) Detectores de ionização.** A partícula carregada arranca electrões do detector ao longo do seu percurso . Um potencial eléctrico criado entre o ânodo / cátodo obriga os electrões a deslocar-se para o ânodo e os iões (+) para o cátodo

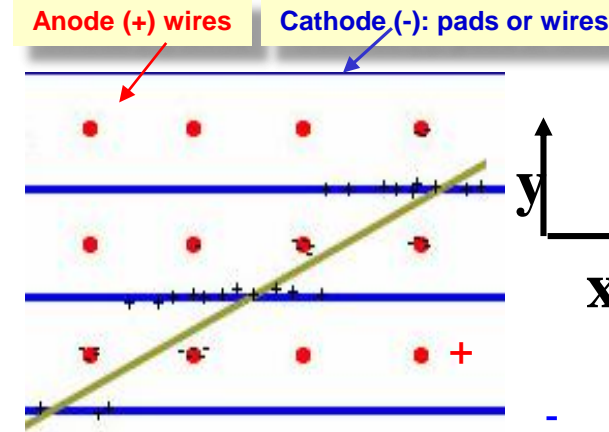


## 'Drift tube'



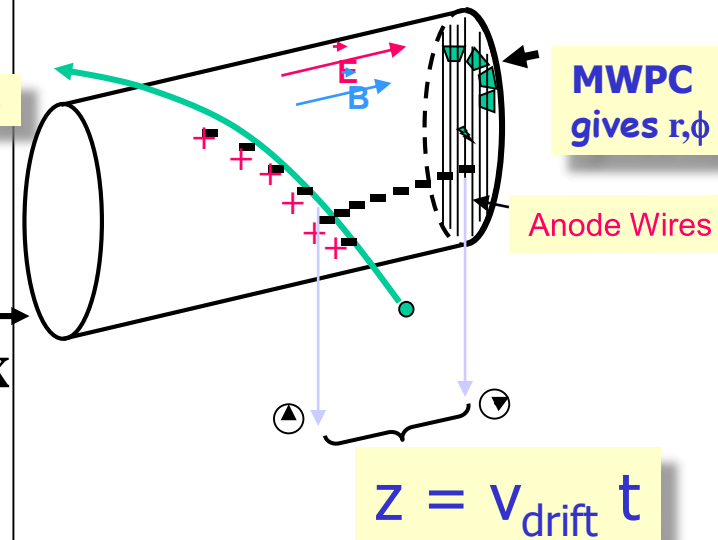
## MWPC ('multi wire proportional chamber')

Premio Nobel: G.Charpak, 1992



Erro limitado pela dist. entre anodos =>  
Erro no momento e origem do traço

## TPC ('time projection chamber')



100-400V/cm  
Tempos de deriva ~ 10-100  $\mu$ s

A medida do tempo de deriva (entre a passagem da partícula e a chegada dos electrões ao ânodo) é convertida num raio através duma correlação raio-tempo

# “Drifting tubes”

## The Geiger Counter reloaded: Drift Tube

Atlas Muon Spectrometer, 44m long, from  $r=5$  to 11m.

1200 Chambers

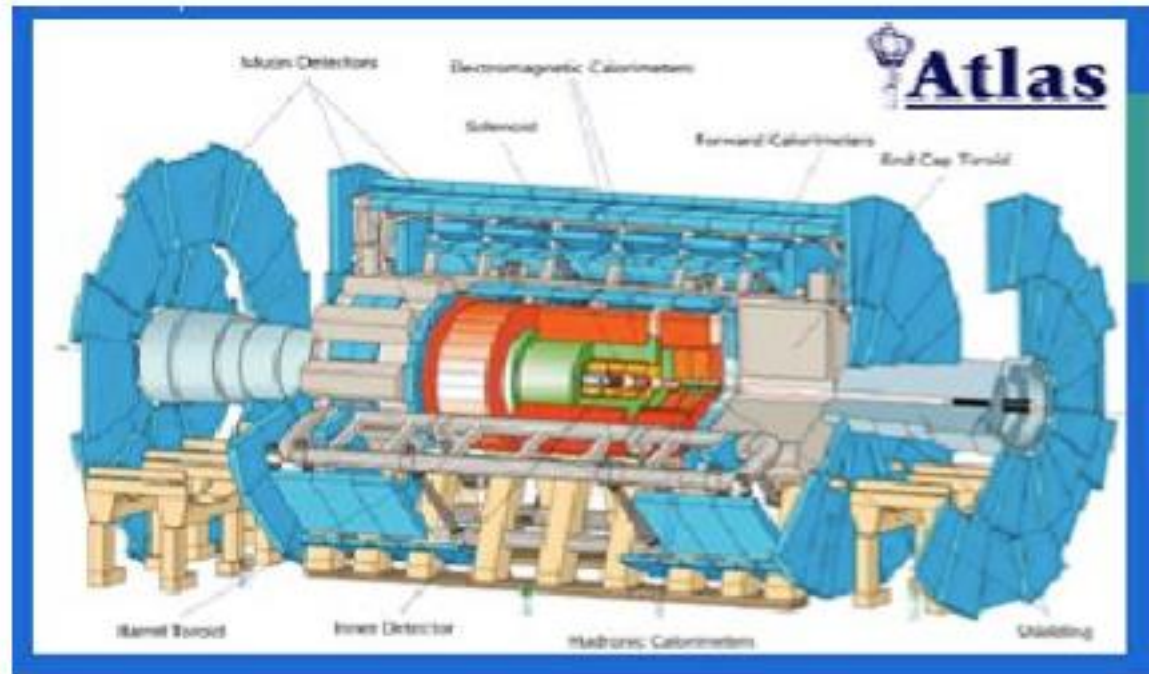
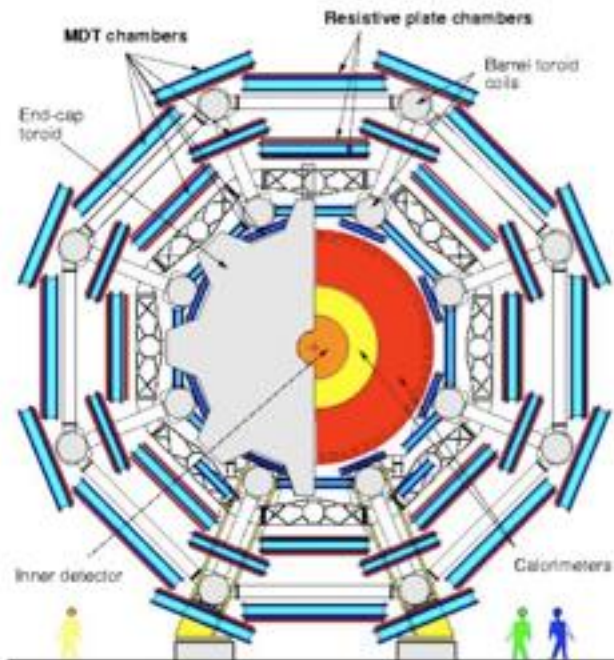
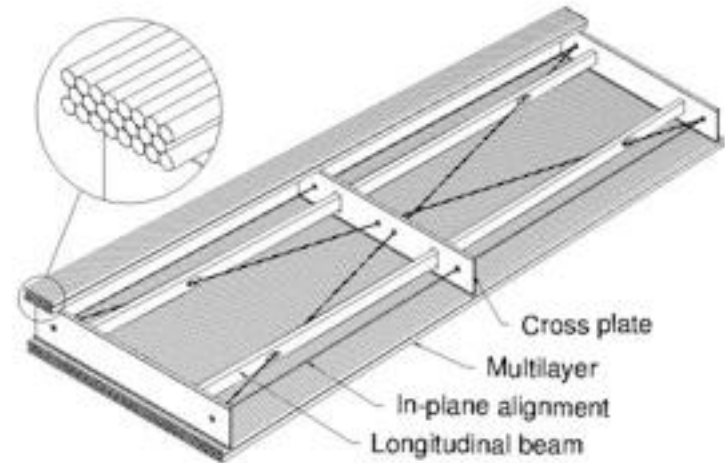
6 layers of 3cm tubes per chamber.

Length of the chambers 1-6m !

Position resolution:  $80\mu\text{m}/\text{tube}$ ,  $<50\mu\text{m}/\text{chamber}$  (3 bar)

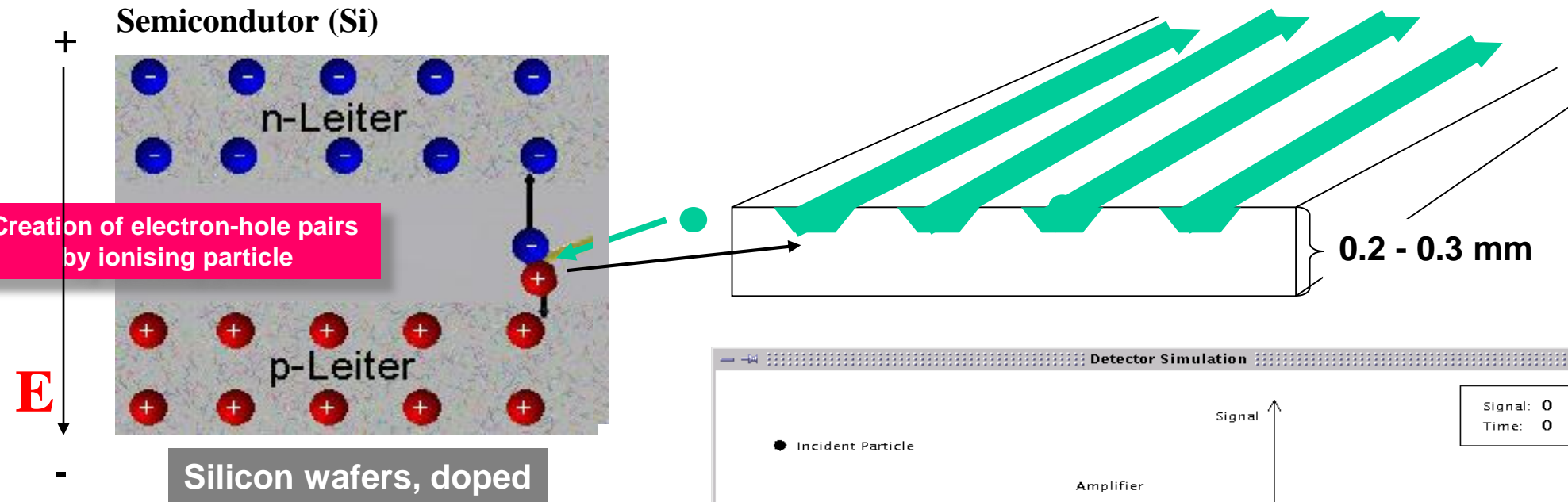
Maximum drift time  $\approx 700\text{ns}$

Gas Ar/CO<sub>2</sub> 93/7



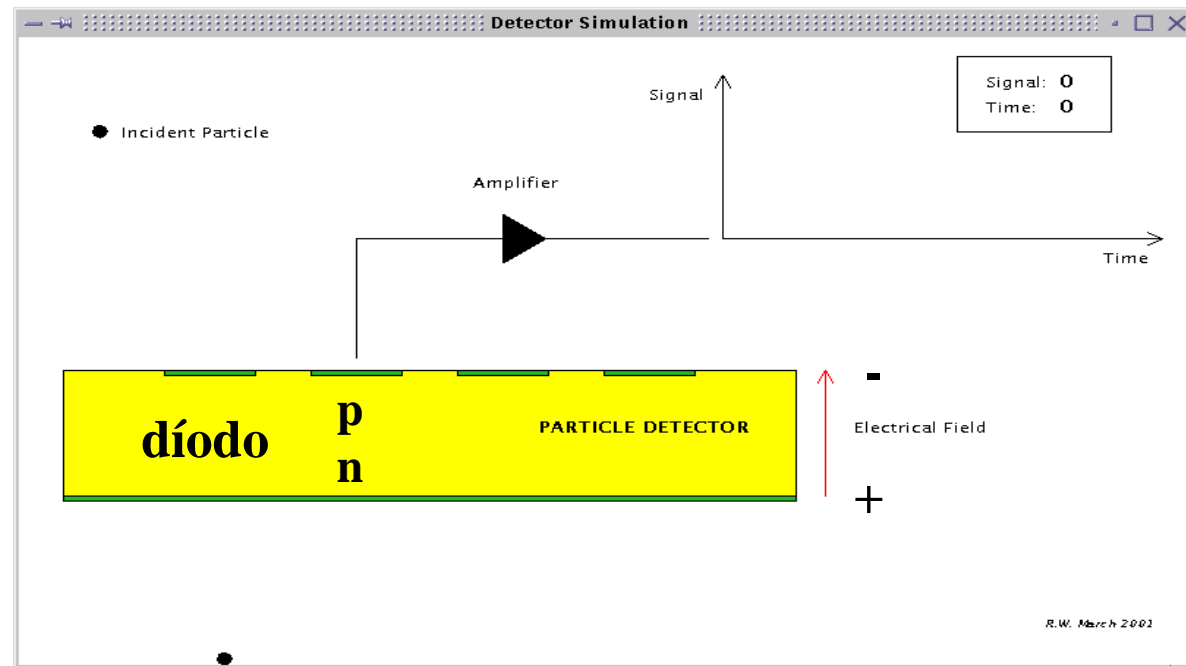


# Detectors de ionização: 'Silicon Microstrip'

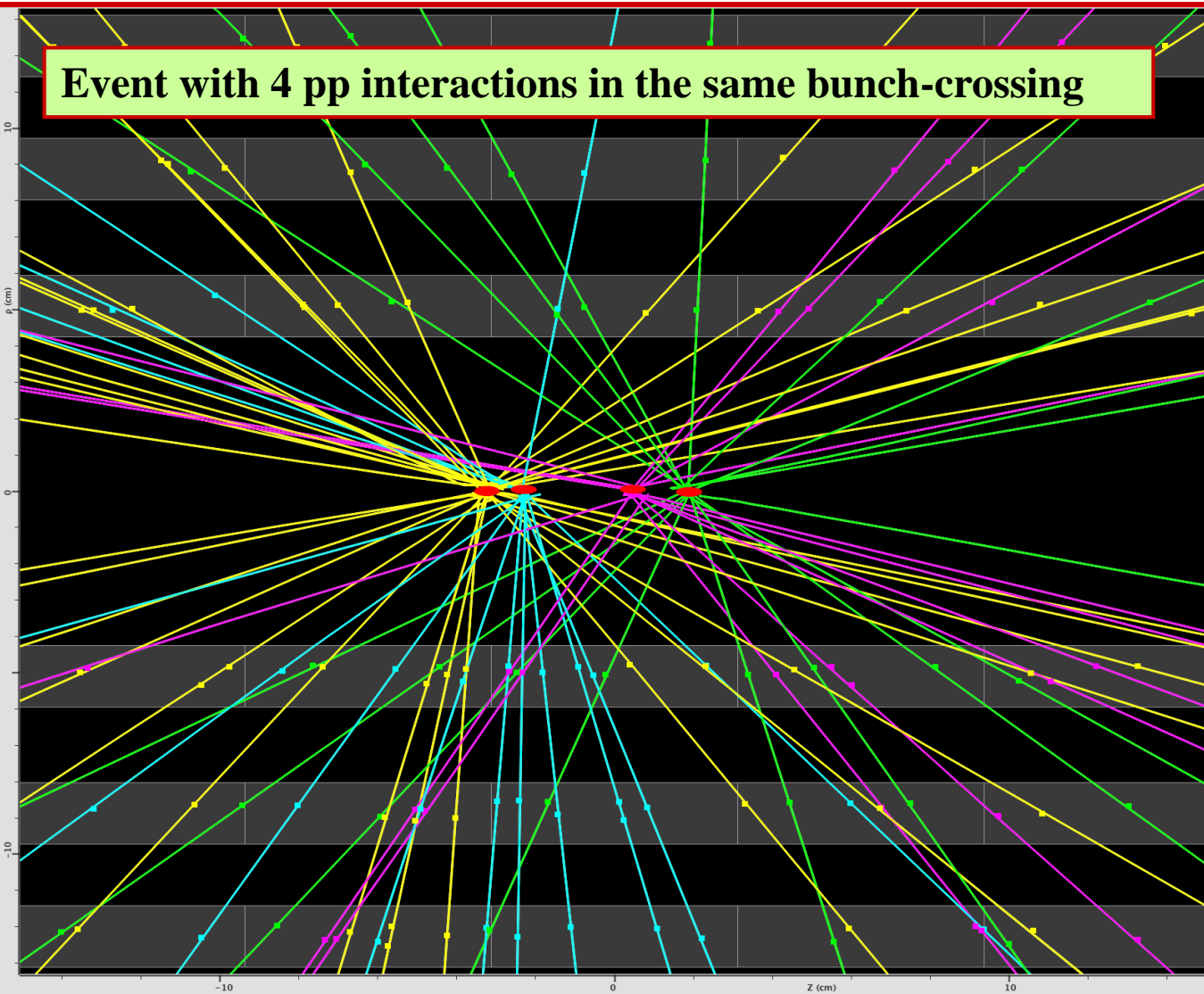


•Mesmo objetivo que os detectores de ionização de gás

•Aqui as 'stripes' funcionam como os fios das câmaras de fios mas com muito melhor resolução em posição (até 10  $\mu\text{m}$ ).



**Event with 4 pp interactions in the same bunch-crossing**

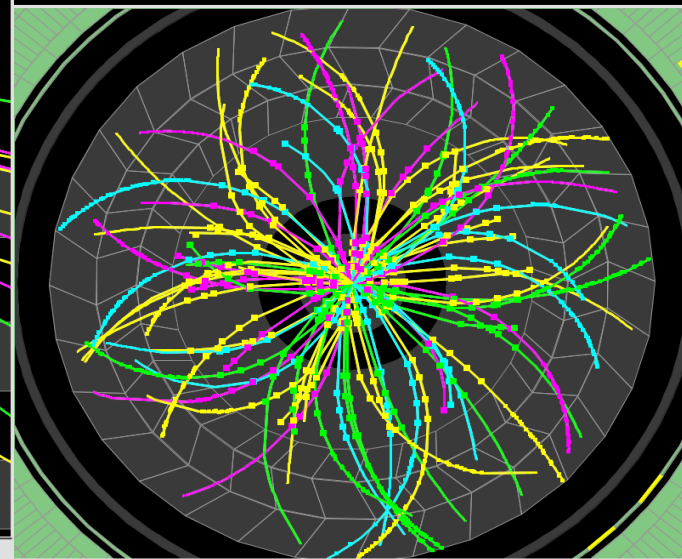


**ATLAS  
EXPERIMENT**

Run Number: 153565, Event Number: 4487360

Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

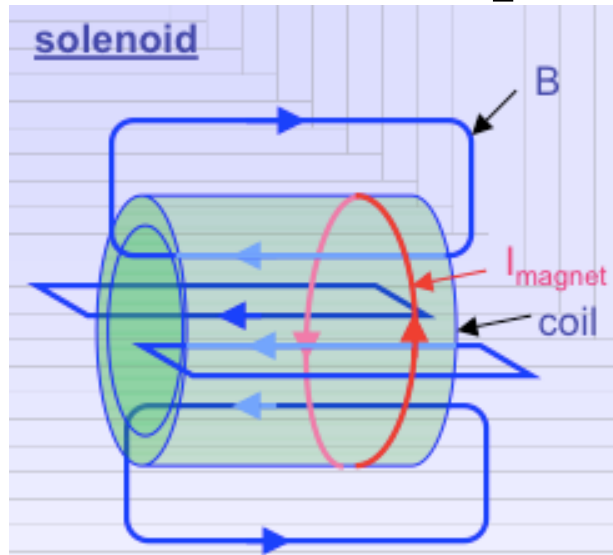
**Event with 4 Pileup Vertices  
in 7 TeV Collisions**



**~ 10-45 tracks with  $p_T > 150$  MeV per vertex**

**Vertex z-positions : -3.2, -2.3, 0.5, 1.9 cm (vertex resolution better than ~200  $\mu$ m)**

# Conceito do campo magnético em detectores

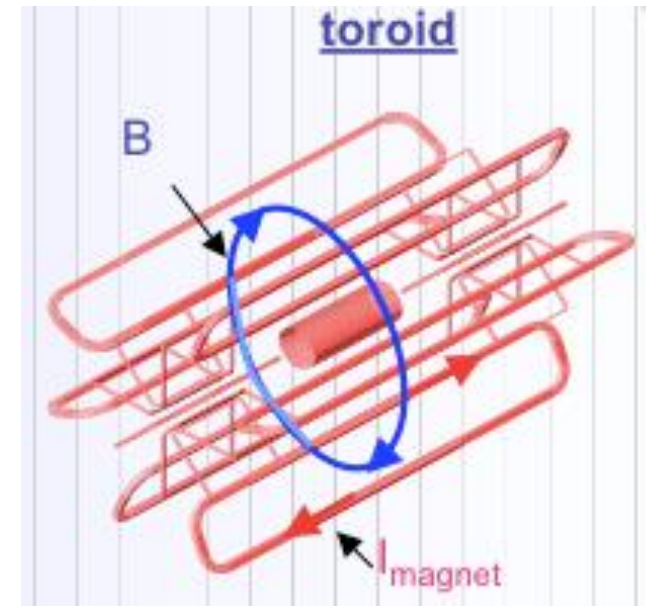


## Principais características:

- Campo magnético homogêneo dentro do "coil"
- Espaço reduzido ( $\Rightarrow$  custo)
- Grandes quantidades de material ( $>Z$ )

## Ex: de experiências que usam um solenóide:

- CMS (4Tesla= $4 \times 10^4$ Gauss) no LHC
- ATLAS (2T) para o detector de traços interno
- L3 (0.5T) e DELPHI (1.2T) no LEP



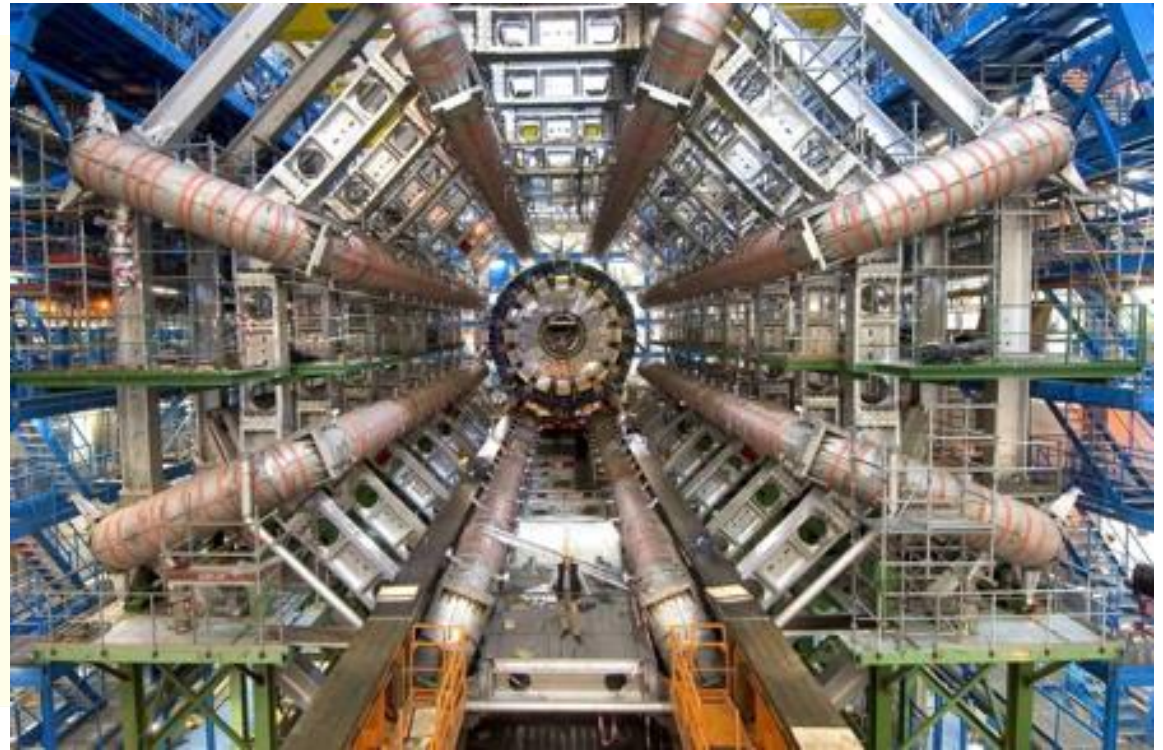
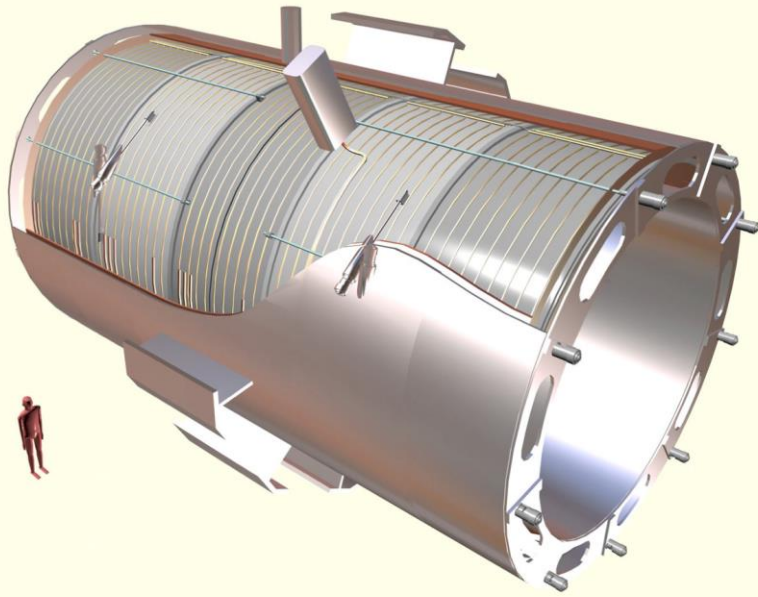
## Principais características:

- Elevados  $B$  em grandes volumes
- Inferior quantidade de material no interior ( $<Z$ )
- $B$  não uniforme

## Exemplo de experiências que usam um toróide:

- ATLAS (4T max.)





## CMS solenoid:

superconductor

length 12.5 m

Free bore diameter 6 m

Central magnetic induction 4 T

Nominal current 20 kA

Stored energy 2.7 GJ

## ATLAS barrel toroid:

superconductor

length 25 m

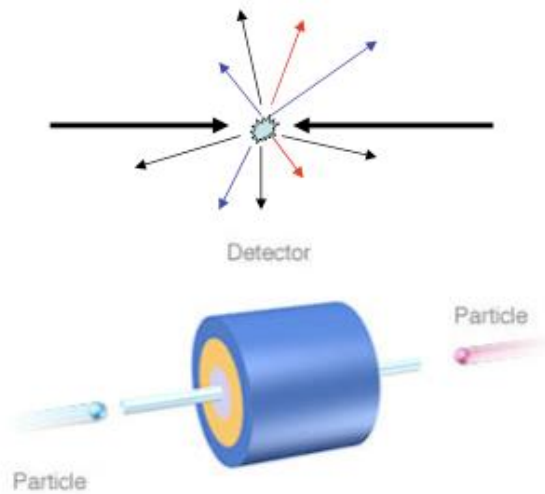
Inside diameter 9.5 m

Central magnetic induction 0.4 T

Nominal current 20.5 kA

# Conceitos de detectores diferentes

## Colisionador- $4\pi$



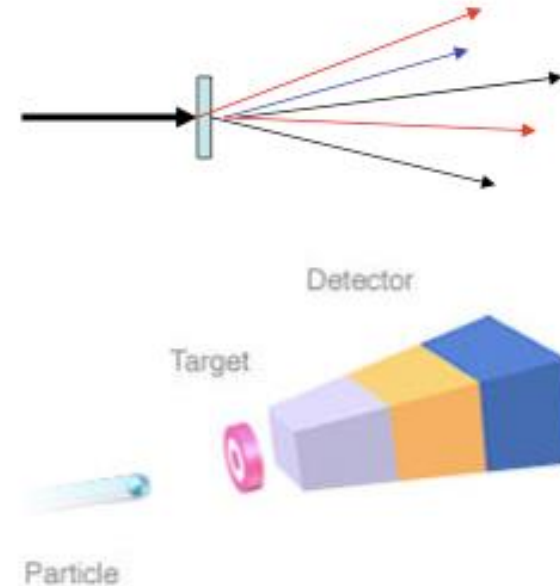
**Ex:**

- ATLAS e CMS no LHC
- DELPHI, ALEPH, L3, OPAL no LEP

ângulo sólido máximo

Compacto, Acesso difícil

## Alvo fixo



**Ex:**

- NA48 no SPS

Ângulo de aceitação limitado

Acesso para manutenção mais fácil



# LHC “Large Hadron Collider”

Colisionador próton-próton em 2015:  
6.5-6.5 TeV (1TeV=10<sup>12</sup> eV\*)  
~10<sup>9</sup> colisões/segundo  
Tempo entre colisões: 25x10<sup>-9</sup> s  
~10<sup>34</sup> prótons cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

27 km perímetro  
100 m profundidade

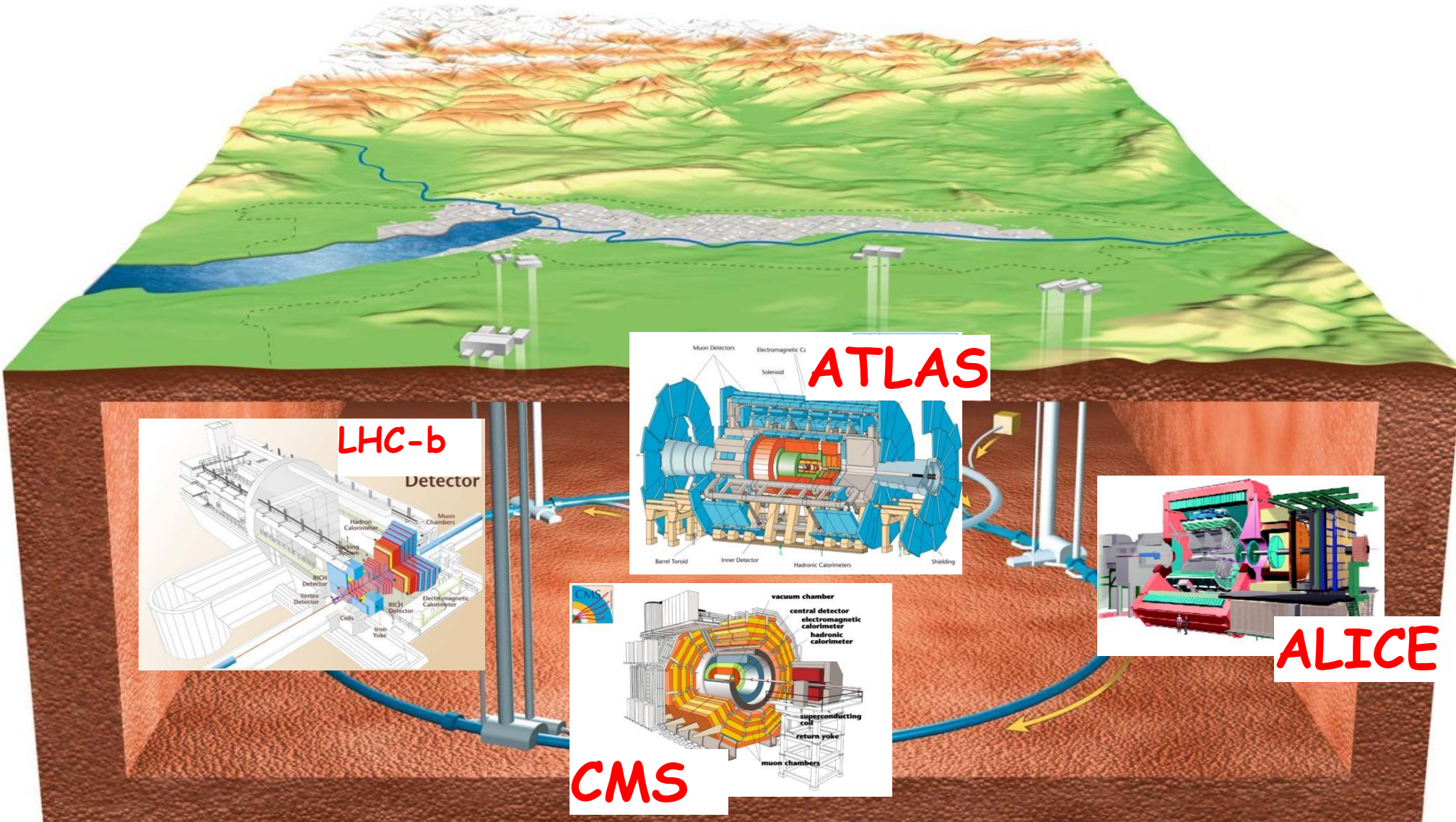
~9000 magnetos supercondutores  
(-271 graus celsius ~ He Líquido)

- \*1eV = Energia de 1 próton (elétron) no potencial de 1Volt (1eV=1.602x10<sup>-19</sup>Joule).
- Como o próton é “leve” ( $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg; diâmetro=10<sup>-15</sup>m), à energia de 7 TeV os prótons vão quase quase à velocidade da luz .



# O LHC e as suas 4 experiências

(enterradas a ~ 90m de profundidade)





# O Detector ATLAS

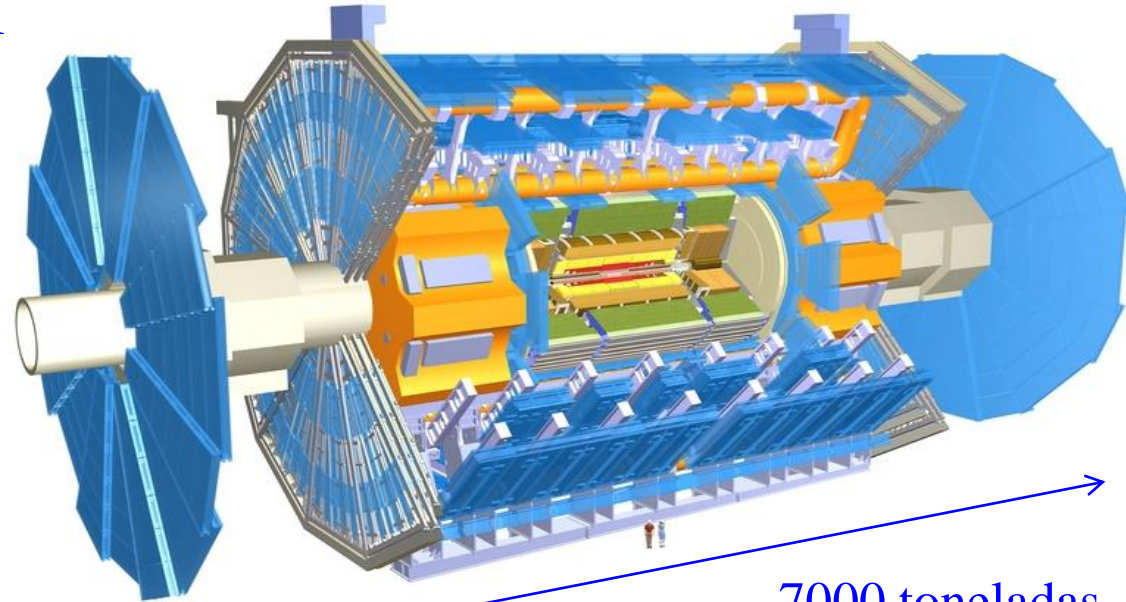


ATLAS ⇔ 1 prédio de muitos andares...



**38 Países**  
**180 Universidades/Institutos de Investigação**  
**5000 Cientistas+Engenheiros**

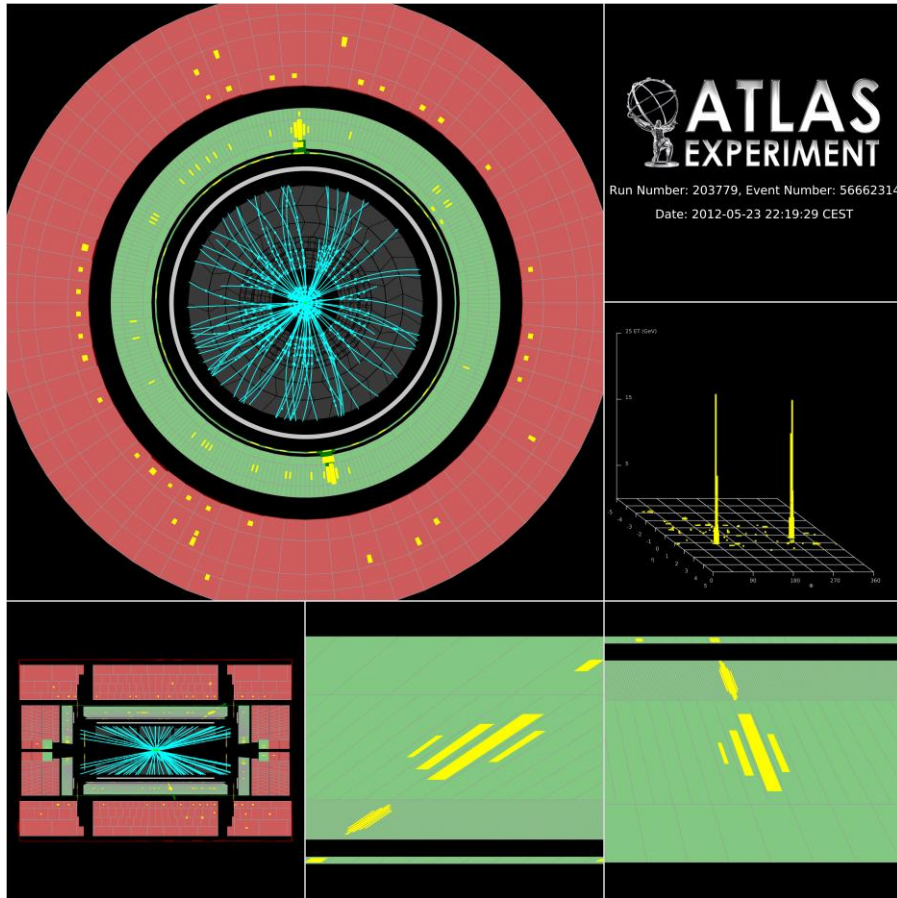
25m



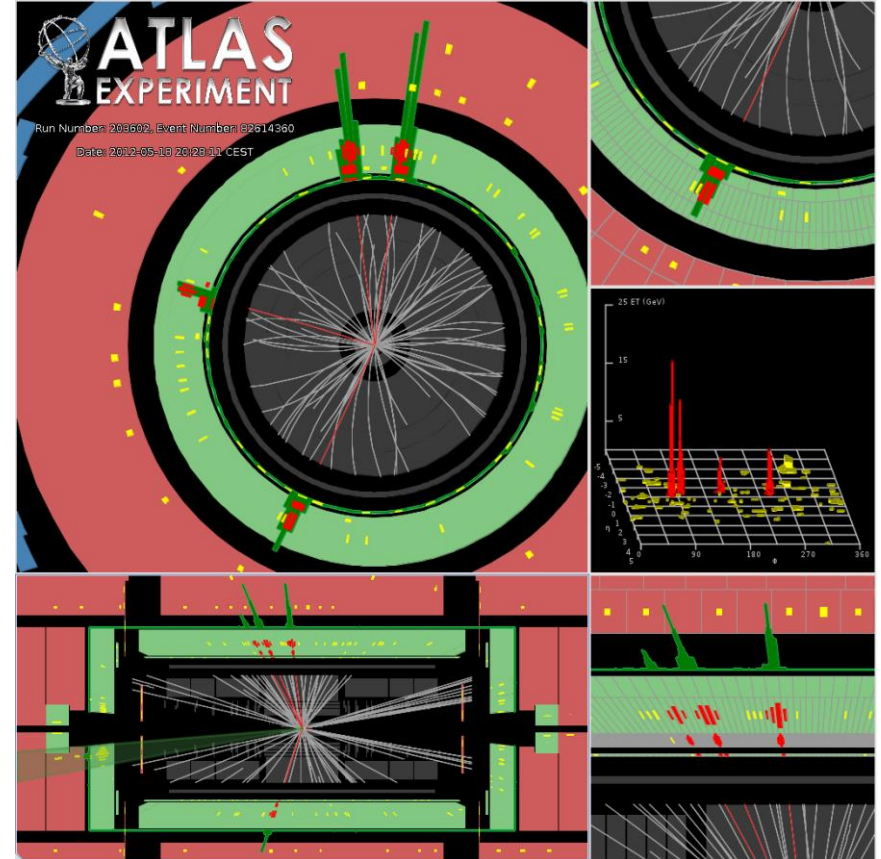
7000 toneladas

46m

# Eventos do bóson Higgs produzidos no ATLAS



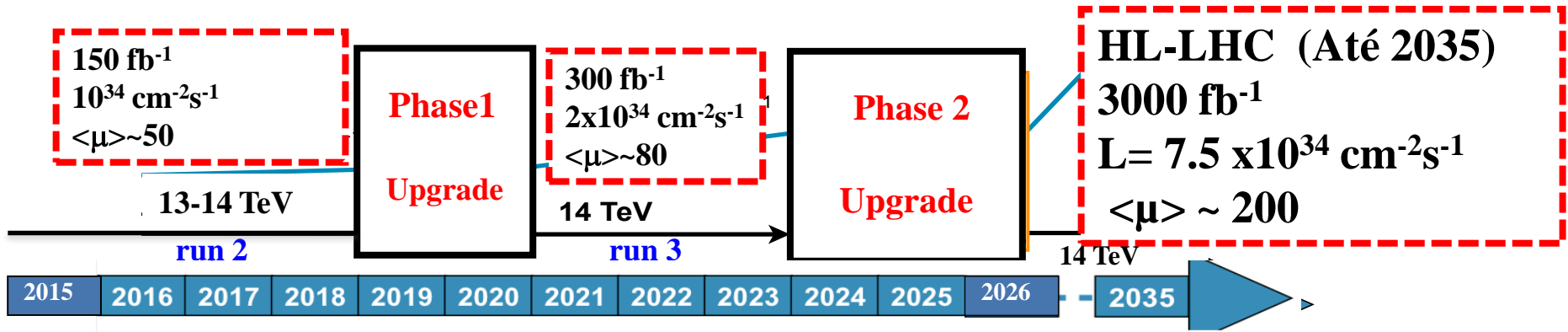
**Higgs- $\rightarrow$  2 fótons**



**Higgs- $\rightarrow$  ZZ- $\rightarrow$ 4 electrões**



# “Upgrades” no LHC e Detectores até 2035



## Os desafios dos Detectores no futuro HL-LHC:

- 10 x mais radiação ( $\sim 10^{16} \text{ neq/cm}^2$  ; 10 MGy )
- 10 x mais colisões simultâneas “pile-up”



- É necessário consolidar/substituir partes dos detectores e LHC

# E como serão os detectores para o futuro acelerador de prótons em estudo (FCC-hh) (2035→...)

E (próton-próton): 50-50 TeV  
100 km de perímetro  
~x7 a energia do LHC...



# FCC-hh Detector

Barrel HCAL:  $\sigma_E/E \sim 50\%/ \sqrt{E} \oplus 3\%$   
better granularity than ATLAS/CMS

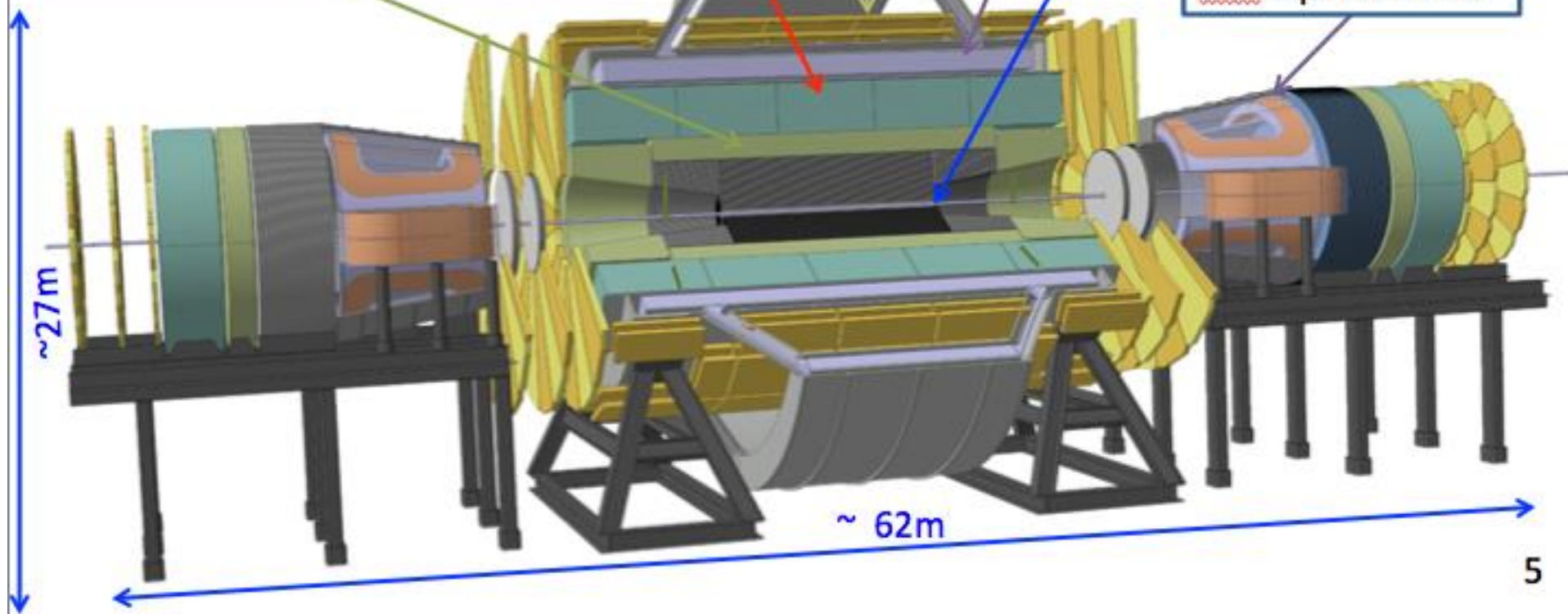
Muon Chambers:  
inside twin solenoid

Magnets: Twin Solenoid  
6T, 12m bore radius

Barrel ECAL:  $\sigma_E/E \sim 10\%/ \sqrt{E} \oplus 1\%$   
better granularity than ATLAS/CMS

Tracker:  $\sigma_{pt}/pt \sim 10\%$   
at 10 TeV (2.5m radius)

Magnets:  
fwd dipoles 10Tm



**E para mais informações ver Filme de ATLAS**

<http://www.atlas.ch/>

**Os detectores ATLAS, CMS, LHCb, etc, serão  
apresentados em detalhe noutras apresentações durante  
a semana**



# Literatura para informação mais aprofundada:

- C. Grupen, B. Shwartz, Particle Detectors, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, 2008
- G. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 3rd ed. Wiley, 2000
- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer, 1994
- R.S. Gilmore, Single particle detection and measurement, Taylor&Francis, 1992
- K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation , 2nd edition, Cambridge Univ. Press, 1998
- W. Blum, W. Reigler, L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers, Springer, 2008
- R. Wigmans, Calorimetry, Oxford Science Publications, 2000
- G. Lutz, Semiconductor Radiation Detectors, Springer, 1999



A descoberta do Higgs em ATLAS decaindo  
em 2 fótons:

[https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/Higgs  
PublicResults//Hgg-FloatingScale-Short2.gif](https://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults//Hgg-FloatingScale-Short2.gif)