



# Princípios básicos de detectores

Pedro Ferreira da Silva, [psilva@cern.ch](mailto:psilva@cern.ch) - (CERN)

*16ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa*

2 de Setembro de 2024



# **Introdução**

**Dar a conhecer a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

# **Introdução**

**Dar a conhecer a passagem de partículas**

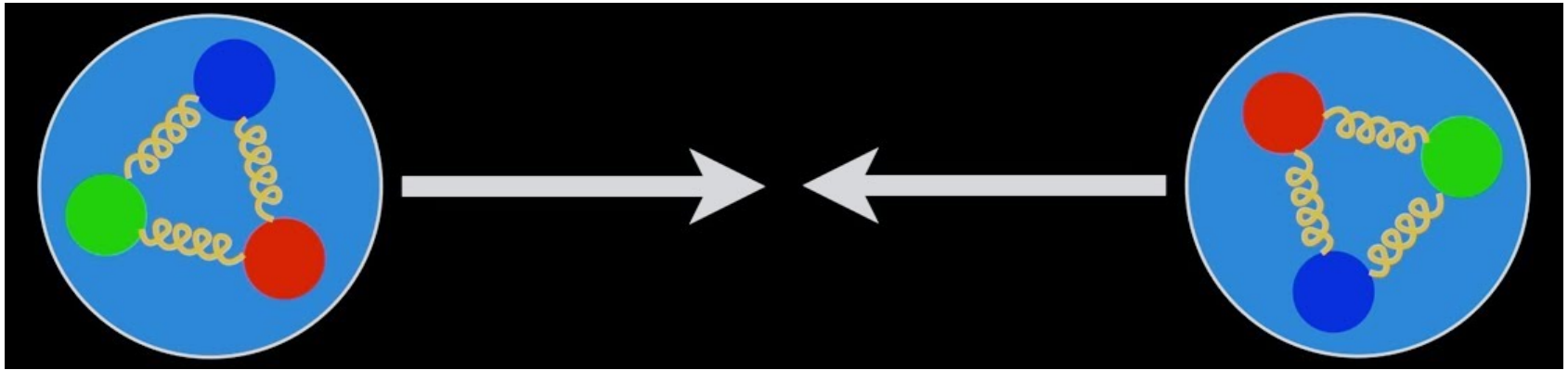
**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

**p**

**p**



**Energia centro de massa = 13.6 TeV**

Qual é a interacção principal numa colisão de protões?

Qual é a interacção principal numa colisão de protões? **Forte**

Qual é a interacção principal numa colisão de protões? **Forte**

○ que se produz maioritariamente?

Qual é a interacção principal numa colisão de protões? **Forte**

O que se produz maioritariamente? **Piões** (hadrões em geral, estados ligados de quarks)





Qual é a interacção principal numa colisão de protões? **Forte**

O que se produz maioritariamente? **Piões** (hadrões em geral, estados ligados de quarks)

Existe alguma ordem nos estados produzidos?

Qual é a interacção principal numa colisão de protões? **Forte**

O que se produz maioritariamente? **Piões** (hadrões em geral, estados ligados de quarks)

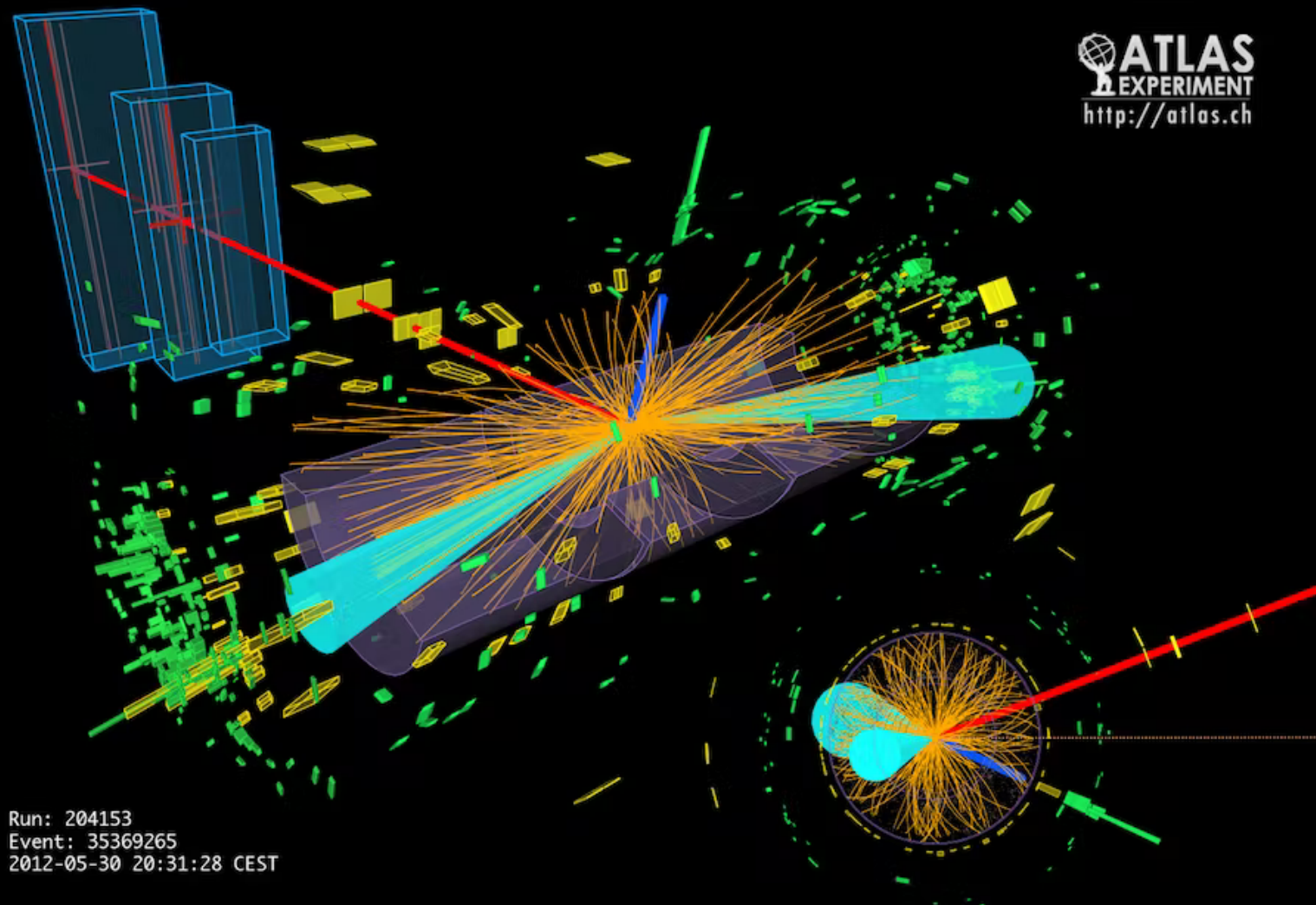
Existe alguma ordem nos estados produzidos?



**Complexidade:** Mesões  
(pares de quark/anti-quark)

**Estados fundamentais** de spin, leves :  $\pi$   
(mesões de quarks leves e com spin 0)

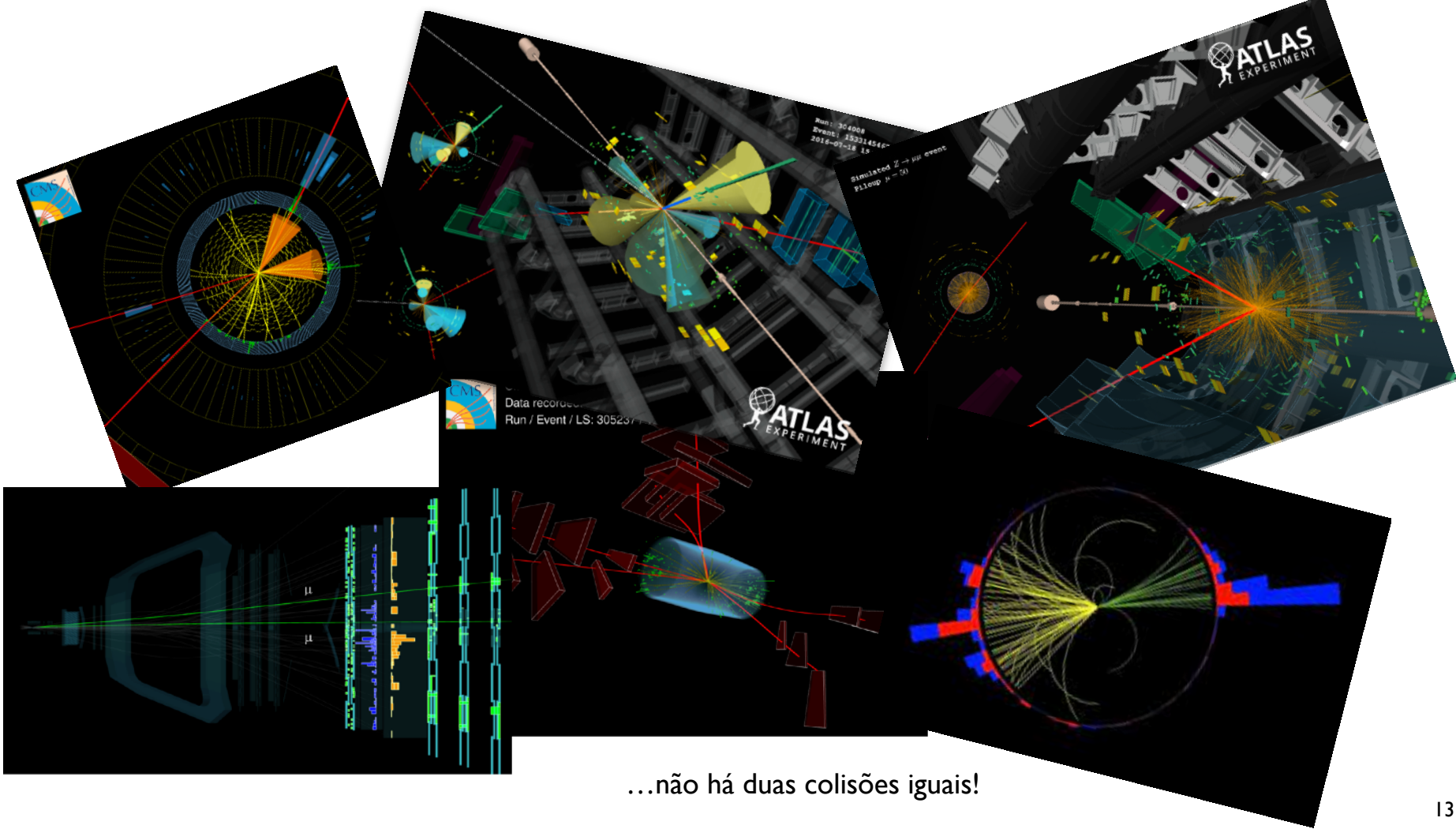
**Simetria de isospin** forte:  $\frac{2}{3} \pi^{\pm} + \frac{1}{3} \pi^0$



Run: 204153  
Event: 35369265  
2012-05-30 20:31:28 CEST

Pára de dizer a Deus  
o que fazer!

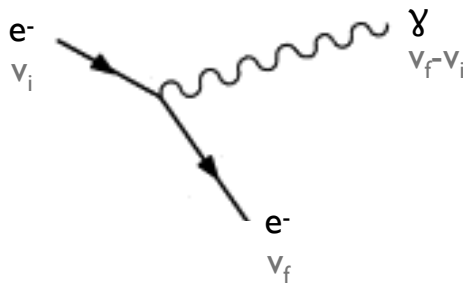




...não há duas colisões iguais!

## O efeito do observador I

Para observar este electrão tenho de o obrigar a emitir/trocar um fóton  
o qual irá por sua vez ionizar algum material convertendo-se num sinal eléctrico  
⇒ um acto de observação interfere necessariamente com o fenómeno analisado



No processo o momento do electrão foi alterado irreversivelmente, o observador/detector passa a fazer parte do sistema inicial

## O efeito do observador II

A carga eléctrica é:

- colectada durante um intervalo de tempo limitado:  $\Delta t$
- proporcional à transferência de momento e afectada por incertezas:  $\Delta p$



Em última análise se o observador repetir a mesma experiência em condições semelhantes, dificilmente reproduzirá os mesmos resultados

$$|v_f - v_i| \cdot \Delta p \sim \hbar \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

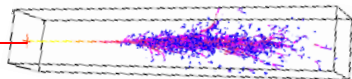
No LHC as energias são tipicamente  $> 1 \text{ GeV} \Rightarrow \lambda = hc/E < 10^{-15} \text{ m}$

- comportamento essencialmente corpuscular  
 $\Rightarrow$  a incerteza quântica associada ao observador é pequena

# Princípios gerais de detecção no LHC

Há uma analogia entre a incerteza de Heisenberg e os detectores usados no LHC

Calorimetria

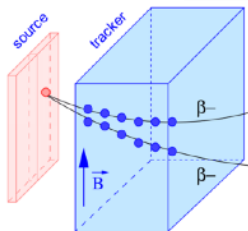


Medição da energia de uma partícula pela absorção completa da cascata de secundários

E x t ID



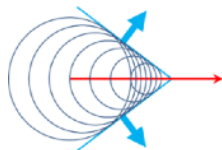
Tracejadores + campo magnético



Identificação da passagem de uma partícula através de repetidas interações “fracas”



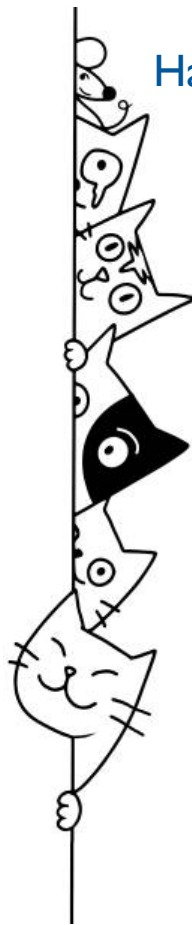
“Velocímetros”



Medidas de velocidade/tempo de vôo permitem distinguir diferentes partículas



... pela combinação óptima atingimos a precisão necessária

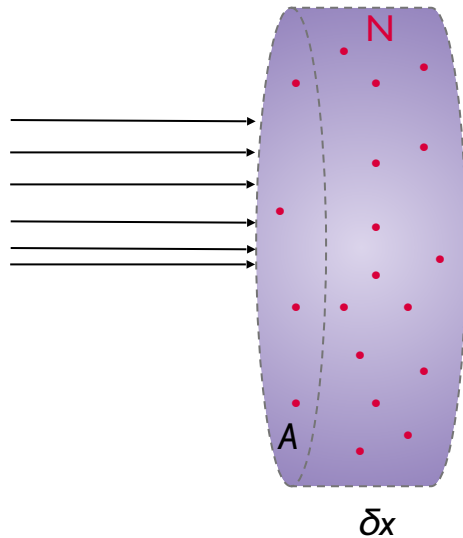




## Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende:

- da **massa do detector**



*O número de centros difusores é proporcional à massa*

$$N = N_A \cdot \mathbf{m} / M = N_A \cdot \rho A \delta x / M$$

$6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$



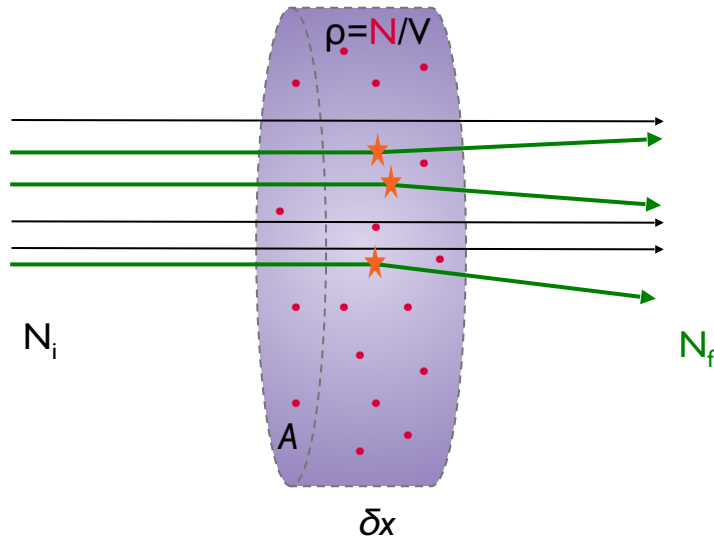
**massa**  
[M]

massa atómica /  
molecular  
[M]

## Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende:

- da massa do detector
- da **secção eficaz de interação** ( $\sigma$ ) entre a radiação e o material



Probabilidade de uma partícula interagir ao percorrer  $\delta x$

$$p = N_f / N_i = \delta x \cdot \rho \cdot \sigma$$

espessura  
[L]

densidade  
[L<sup>-3</sup>]

**secção eficaz**  
[L<sup>2</sup>]

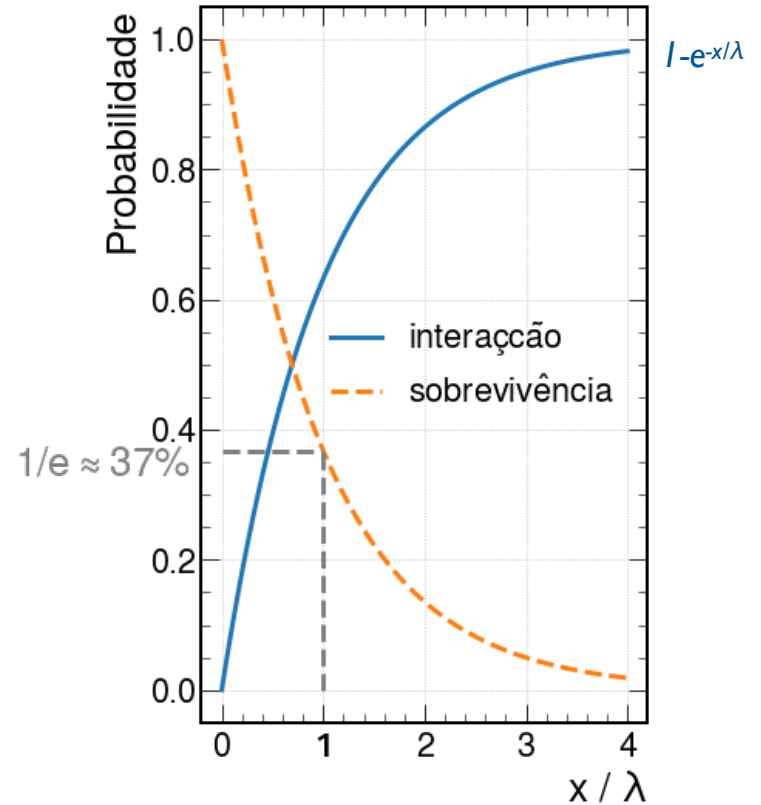
Probabilidade de uma partícula interagir ao percorrer  $\delta x$

$$p = N_f / N_i = \delta x \cdot \rho \cdot \sigma$$

$$\lambda = 1 / \rho \cdot \sigma$$

comprimento de interação [L]

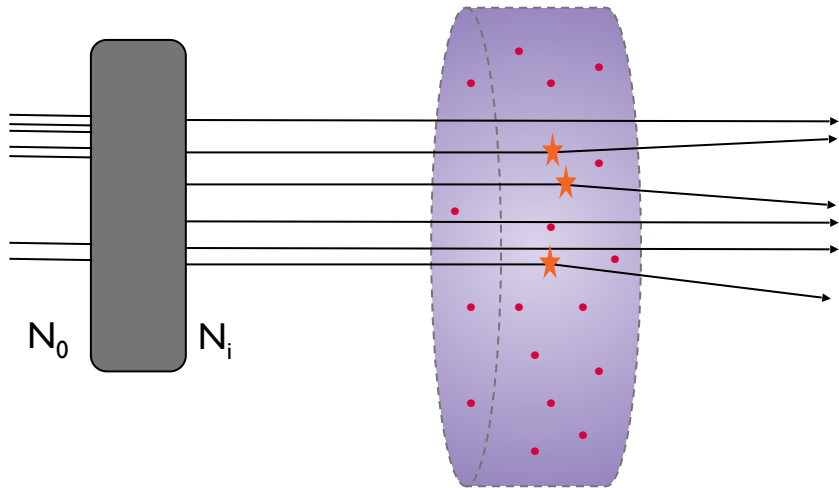
**Após percorrer um comprimento correspondente a  $\lambda$  o fluxo é atenuado em cerca de 37%**



## Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende

- da massa do detector
- da secção eficaz de interacção ( $\sigma$ ) entre a radiação e o material
- do **material a montante** da região sensível

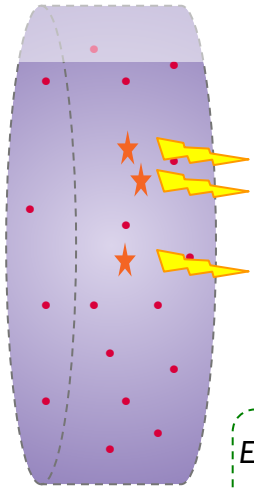


*O material interposto entre a fonte e o detector pode absorver, converter, multiplicar, dispersar, ...*

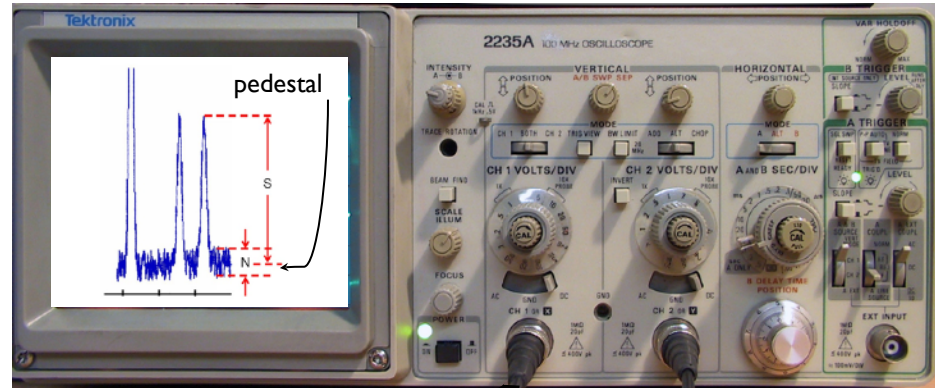
# Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende

- da secção eficaz de interacção ( $\sigma$ ) entre a radiação e o material
- da massa do detector
- do material devante a região sensível do detector
- do **ruído intrínseco** do detector



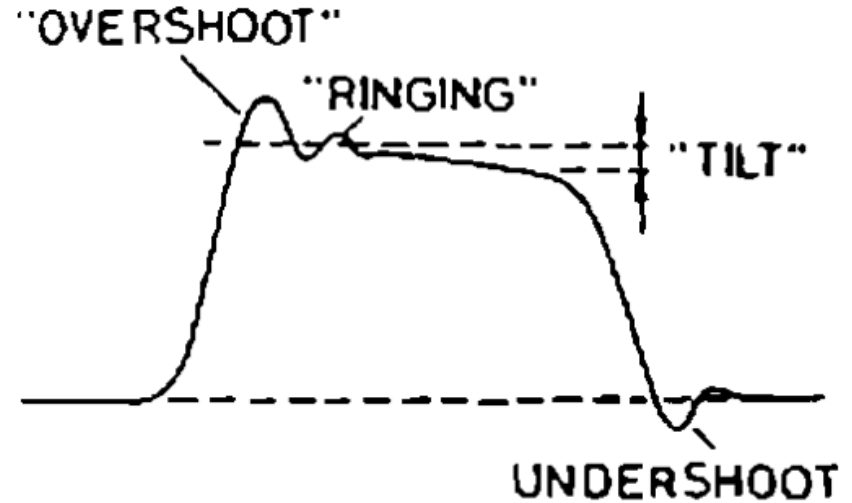
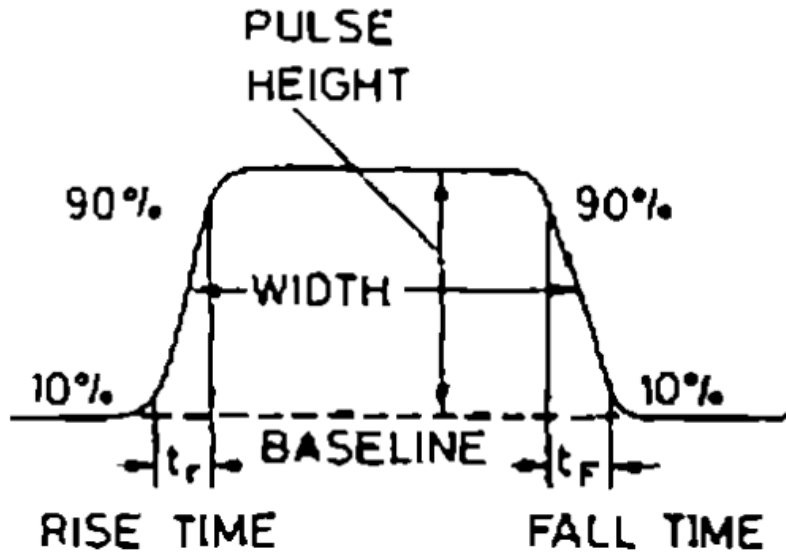
Electrónica de leitura  
(frontend)



## Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

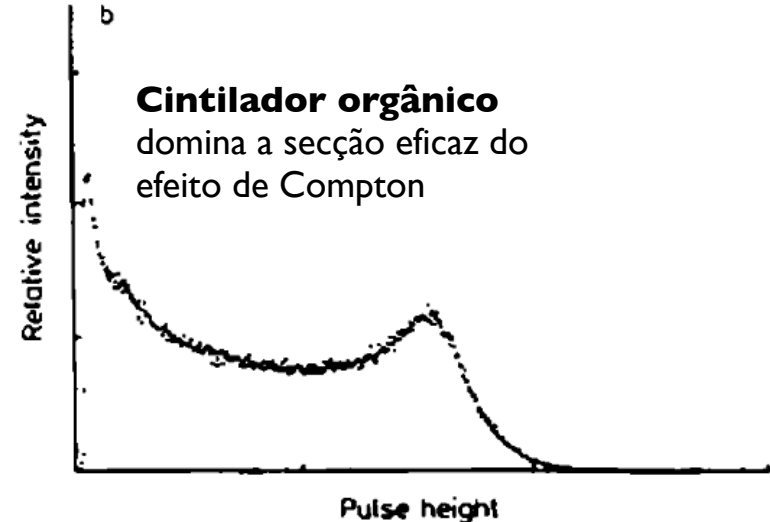
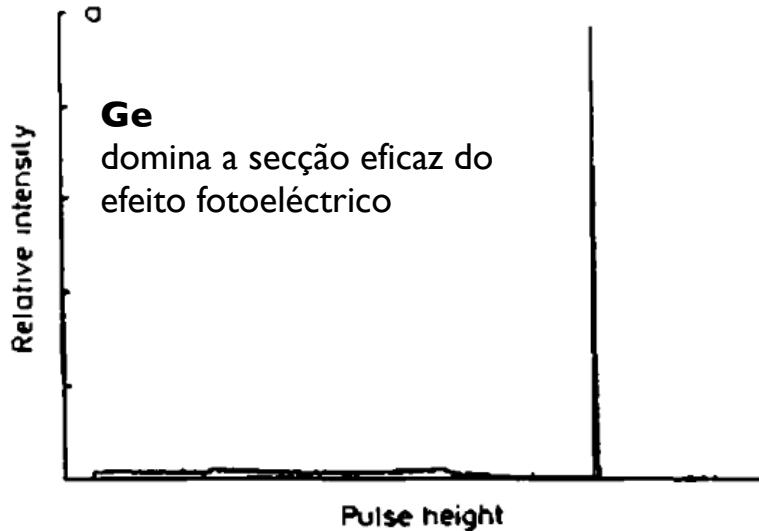
- **a resposta** : tipicamente impulso elétrico gerado pela passagem de radiação



## Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

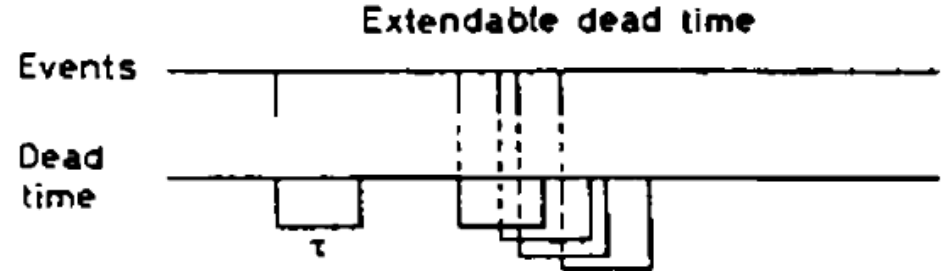
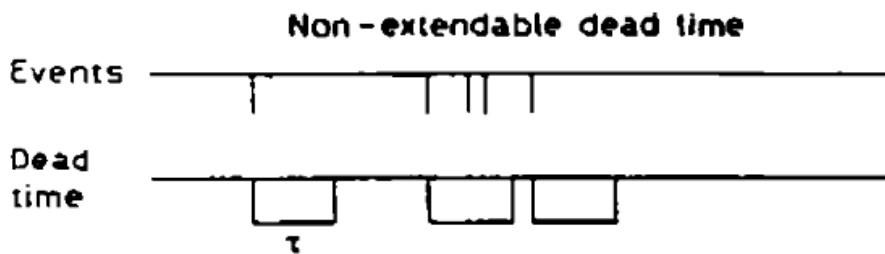
- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
  - **a resolução**: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução
- o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial



## Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
- a resolução: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução
  - o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial
- **o tempo de resposta:** determina a eficiência em tempo de um detector
  - pode levar a uma saturação das taxas de eventos medidas

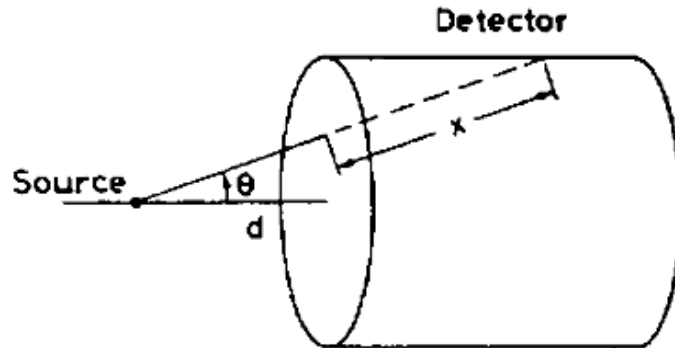




## Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
- a resolução: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução
  - o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial
- o tempo de resposta: determina a eficiência em tempo de um detector
  - pode levar a uma saturação das taxas de eventos medidas
- **a eficiência**: produto da geometria (aceitação) e eficiência intrínseca



*Eficiência total de um detector*

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{\text{detector}} &= N_{\text{registados}} / N_{\text{emitidos}} \\
 &= (N_{\text{incidentes}} / N_{\text{emitidos}}) \cdot (N_{\text{registados}} / N_{\text{incidentes}}) \\
 &= \epsilon_{\text{geometrica}} \cdot \epsilon_{\text{intrinseca}}
 \end{aligned}$$

# Sumário

**aceitação**  
**massa**

**eficiência**  
**resposta**

**ruído intrínseco** **resolução**

**secção eficaz**  
**tempo morto**

**material** **electrónica**

# Introdução

**Dar a conhecer a passagem de partículas**

**Alguns exemplos de detectores do LHC**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

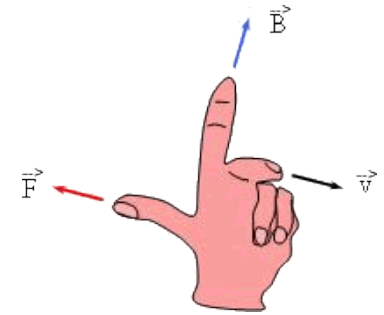
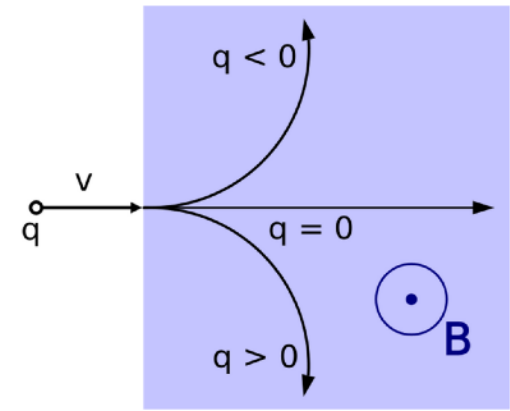
**Conclusões**

# Campo magnético: no coração de uma experiência

Cargas eléctricas em movimento são sensíveis aos campos magnéticos

A partir da trajectória de uma partícula sujeita a B:

- *direcção*  
⇒ medição da carga eléctrica
- *raio de curvatura*  
⇒ medida de momento (conhecida a massa)  
⇒ medida de massa (conhecida a velocidade)



$$p \cos \lambda = 0.3 z B R$$

momento linear [GeV/c]

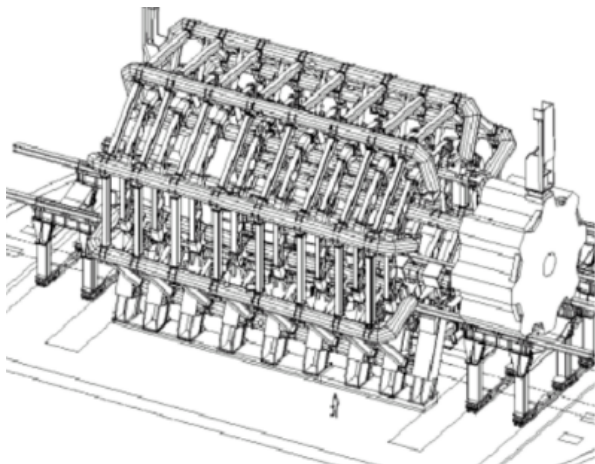
ângulo de inclinação

carga eléctrica [e]

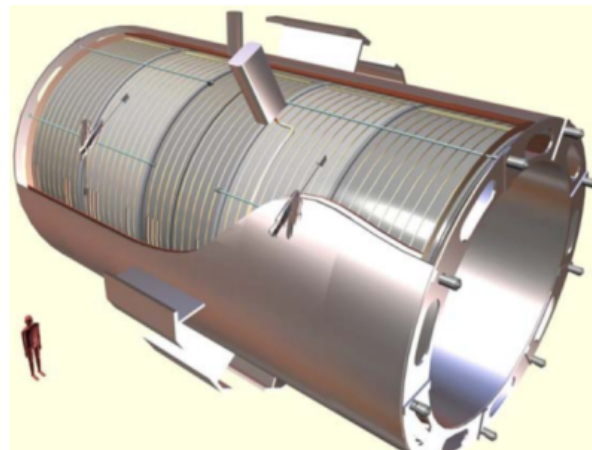
intensidade de campo magnético [T]

Raio de curvatura [L]

# Campos magnéticos nas grandes experiências



**ATLAS**

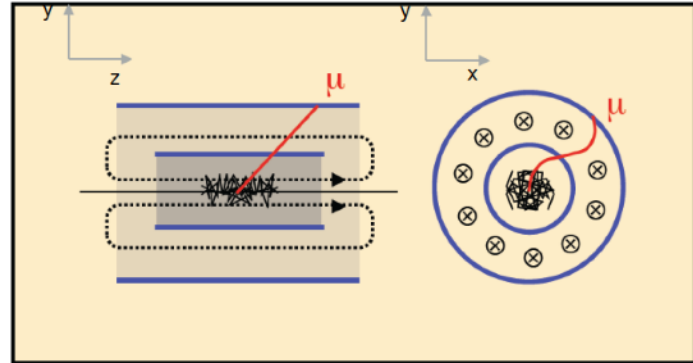
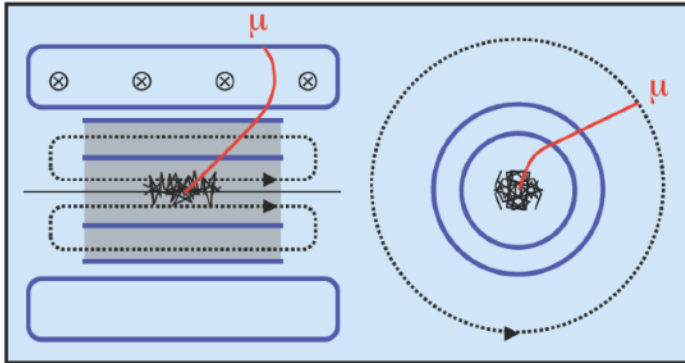
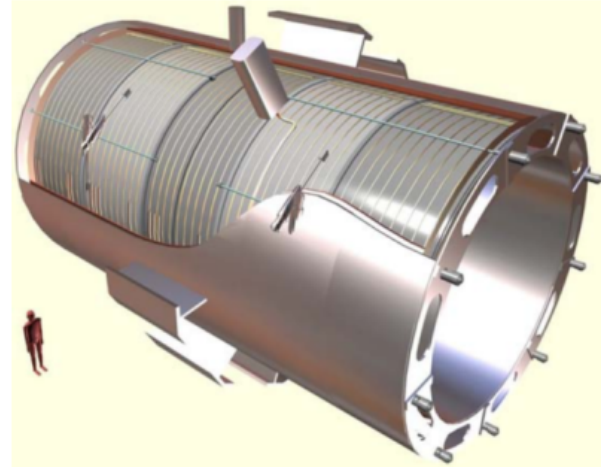
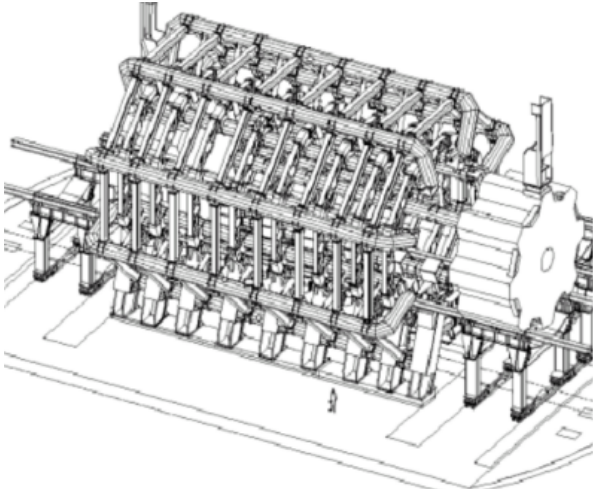


**CMS**

<i>B</i>	0.6 T (8 bobinas, 2x2x30 voltas)	4T (1 bobina, 2168 voltas/m)
<i>Desafios</i>	alinhamento espacial 1.5 GJ energia armazenada	enrolamento do cabo 2.7 GJ energia armazenada
<i>Desvantagens</i>	campo toroidal limita capacidades de apontar para origem necessita um solenóide interno complementar (2T) requer (muito) espaço	espaço e tecnologias limitadas para calorimetria curvatura pequena para ângulos maiores

Dando a conhecer a passagem de partículas

# Campos magnéticos nas grandes experiências



Dando a conhecer a passagem de partículas

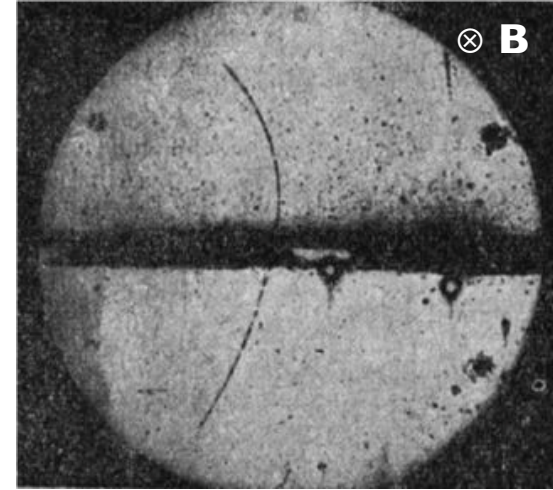
## Como ver a trajetória das partículas?



Câmara de nuvens

(Wilson, 1911; Prémio Nobel 1927)

Câmara com vapor que condensa em resultado de uma ionização, deixando um traço visível.



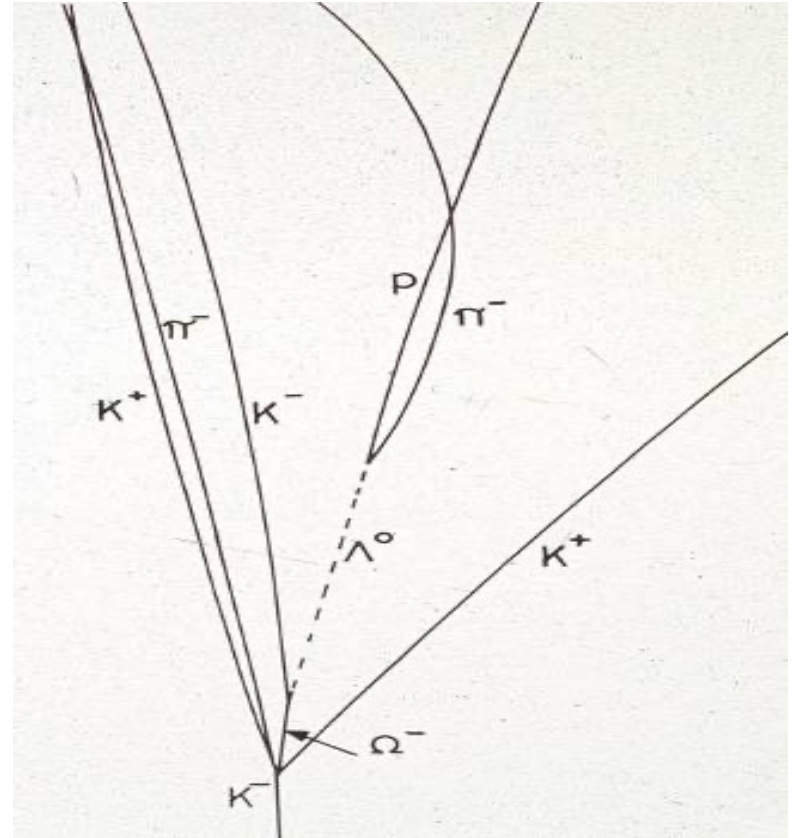
Descoberta do positrão ( $e^+$ )

(Anderson, 1932; Prémio Nobel 1936)

Câmara de nuvens, sob campo magnético com um absorvedor de chumbo.

Dando a conhecer a passagem de partículas

# Os primeiros reveladores de partículas







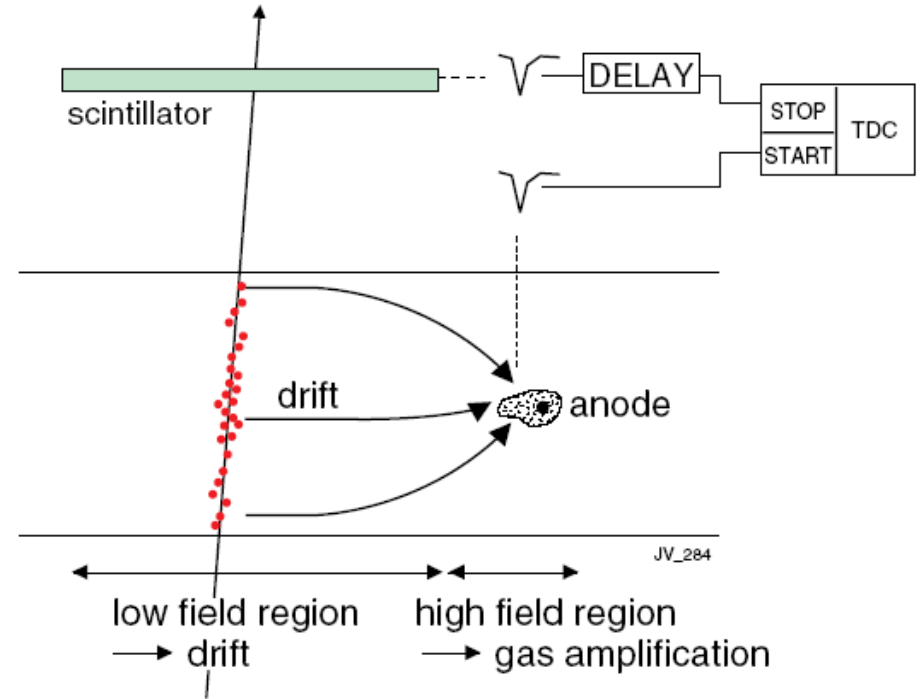


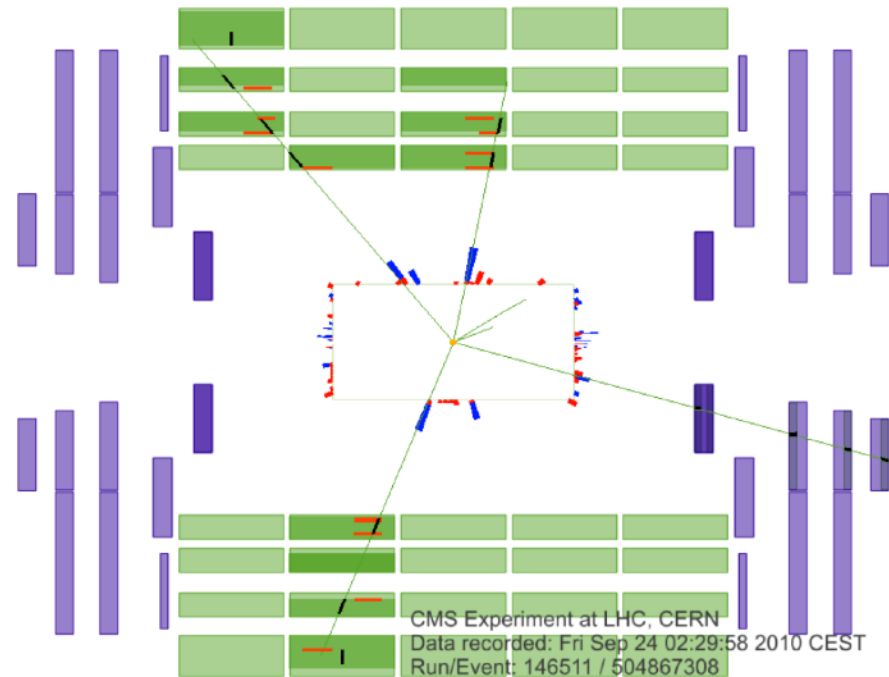
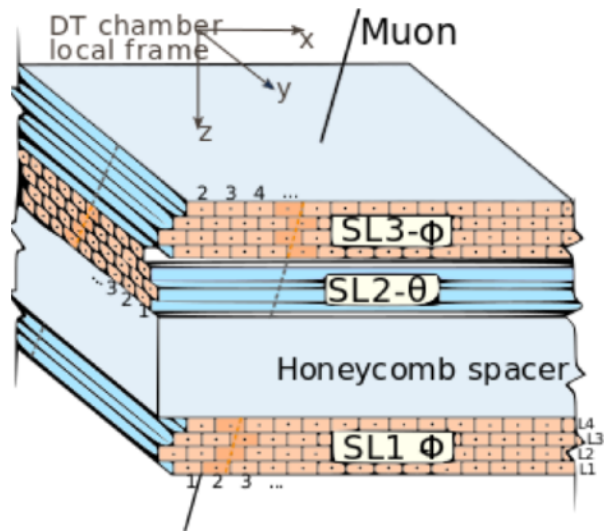
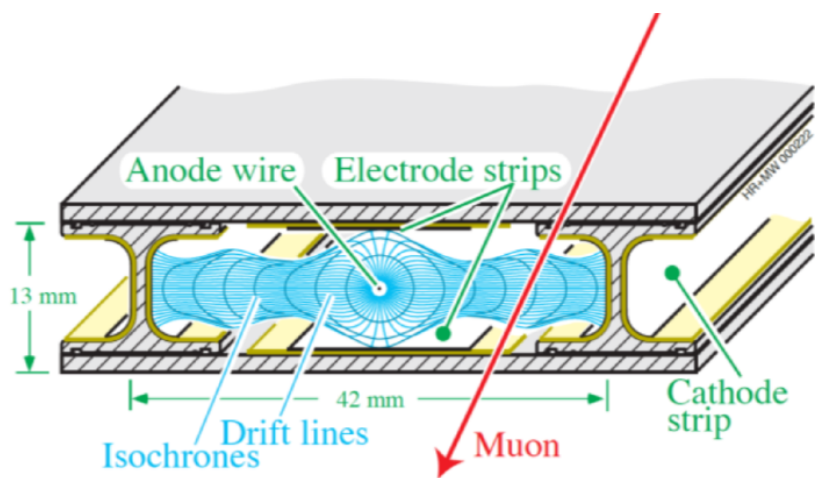
# Câmaras de deriva (drift chambers)

O espaçamento entre ânodos nas câmaras de fios é um factor limitativo.

A resolução pode melhorar medindo o **tempo de deriva** das cargas até ao ânodo

Para tal é necessário ter um tempo de referência para cada evento.





Barril de **CMS**: 250 câmaras

Total de 172'000 células

Resolução de 250  $\mu\text{m}$

# Detectores de estado sólido I

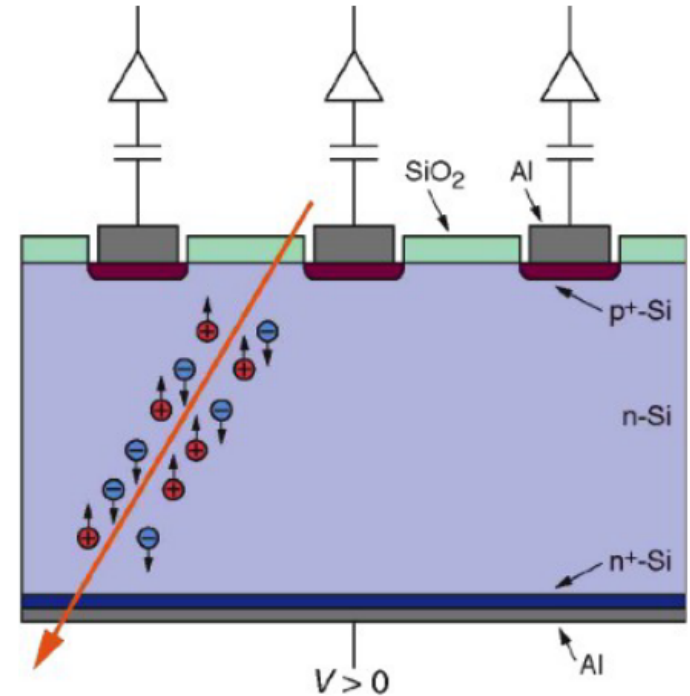
Princípio de funcionamento semelhante a câmara de gás

**Energia de ionização cria pares electrão-buraco**

que quais derivam para o cátodo/ânodo

A carga colectada é proporcional à energia depositada

	<b>Gás</b>		<b>Estado sólido</b>	
<i>Densidade</i>	Baixa	4.25 kg/m <sup>3</sup> (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> )	Alta	2.33 g/cm <sup>3</sup> (Si)
<i>Número atómico (Z)</i>	Baixo		Moderado	14 (Si)
<i>Energia de ionização</i>	Moderado	30 eV	Baixo	3 eV
<i>Rapidez sinal</i>	Moderado	10ns-10µs	Rápido	<20 ns



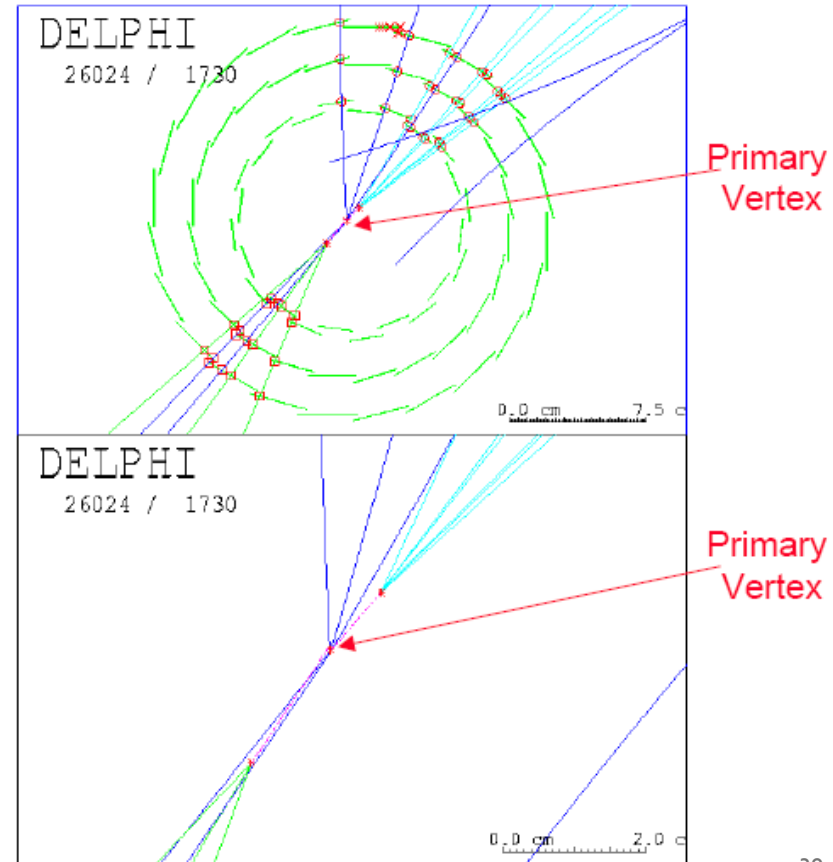
## Detectores de estado sólido II

Providenciam uma medida extremamente precisa de posição ( $\sim 10\text{-}100\ \mu\text{m}$ )

Baixa energia de ionização  $\Rightarrow$  minimizam a interacção com as partículas que os atravessam

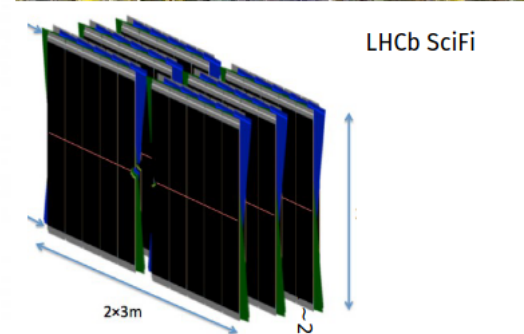
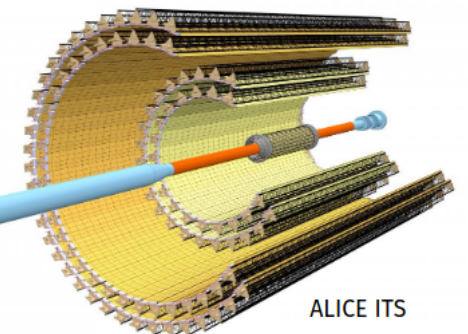
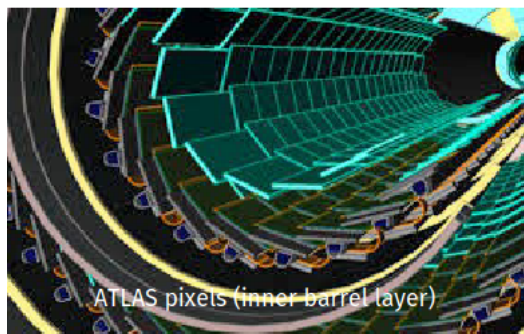
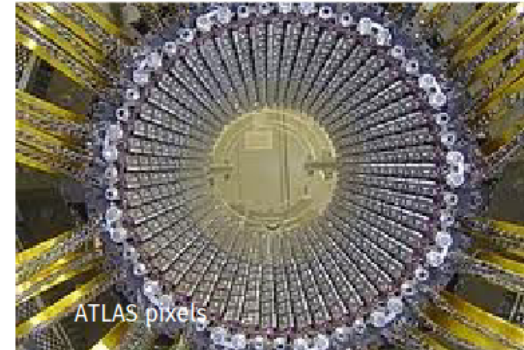
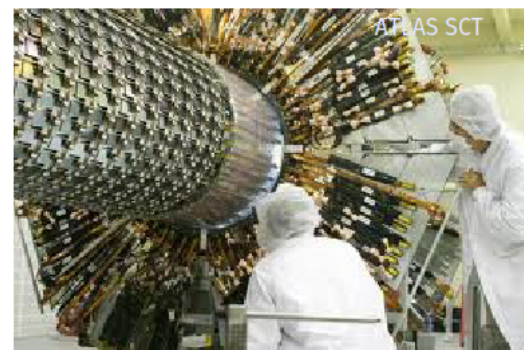
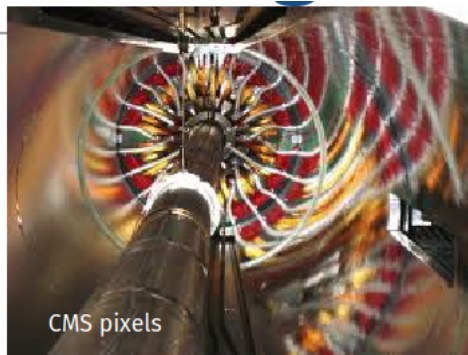
Resilientes a radiação: podem ser colocados muito próximo dos feixes e ser medir decaimentos secundários de partículas com tempo de vida “elevado”

$$\tau_B \approx 1.6\ \text{ps} \quad l = c\tau\gamma \approx 500\ \mu\text{m}\cdot\gamma$$

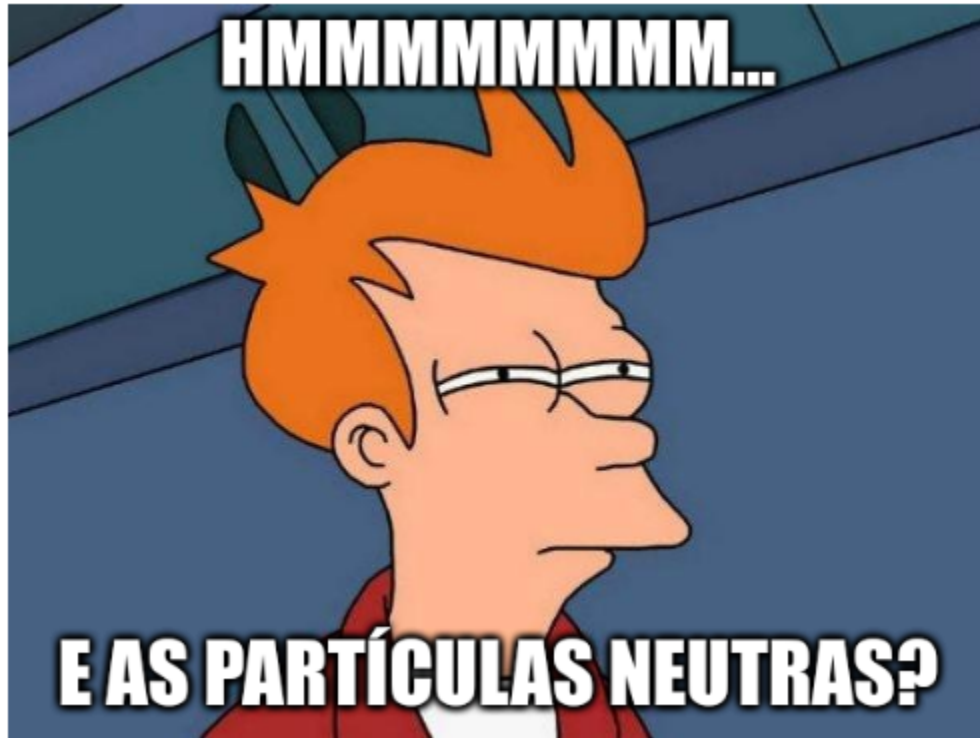


# Complexidade crescente dos detectores de Si

<b>Experiência</b>	<b>Detectores</b>	<b>Canais [<math>10^3</math>]</b>	<b>Área de Si [<math>m^2</math>]</b>
<i>Aleph (LEP)</i>	144	95	0.49
<i>CDF (Tevatron)</i>	720	405	1.9
<i>D0 (Tevatron)</i>	768	793	4.7
<i>AMS II</i>	2300	196	6.5
<i>ATLAS (LHC)</i>	4088	6'300	61
<i>CMS (LHC)</i>	15148	10'000	200







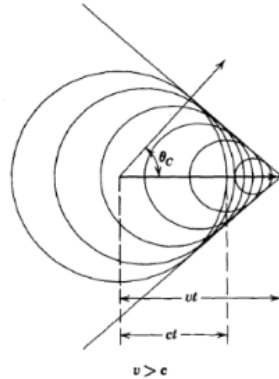
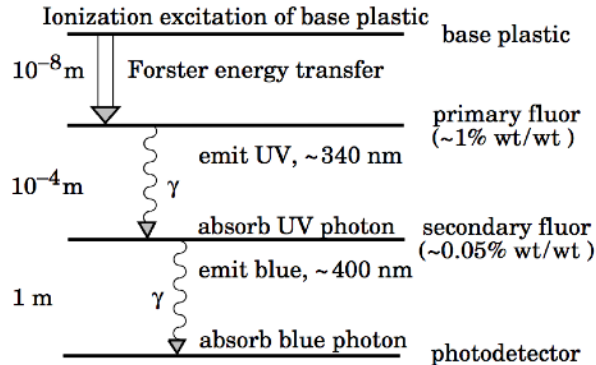
... em última instância temos de as converter em partículas ionizantes

# Princípios de calorimetria

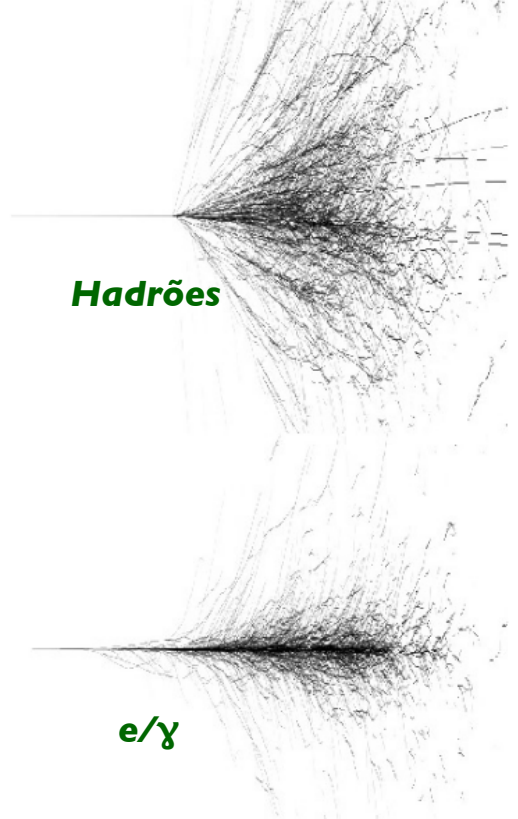
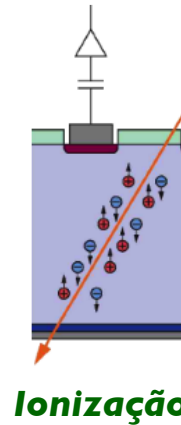
## As partículas precisam de interagir na matéria $\Rightarrow$ interação destrutiva

- Os depósitos de energia são convertidos em sinal
- É preciso colectar: carga, luz, calor

### Cintilação



### Radiação de Čerenkov



# Funções de um calorímetro

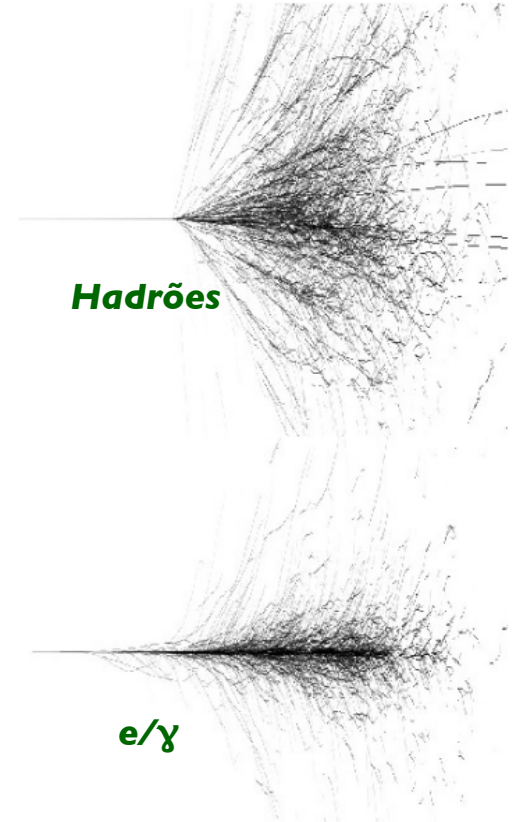
## Os calorímetros medem a energia das partículas, mas são versáteis

- podem medir também posições, ângulos e tempo
- permitem identificar as partículas a partir das cascatas que iniciam
- permitem inferir a energia de neutrinos (balanço)

## Na generalidade dos casos:

- a resolução melhora com a energia depositada
- providenciam sinais rápidos e fáceis de reconstruir  
(podem ser usados em sistemas de *trigger*)
- tem de ser dimensionados para conter as cascatas de secundários

**É quase impossível fazer física das altas energias sem um!**



# Cascatas eletromagnéticas

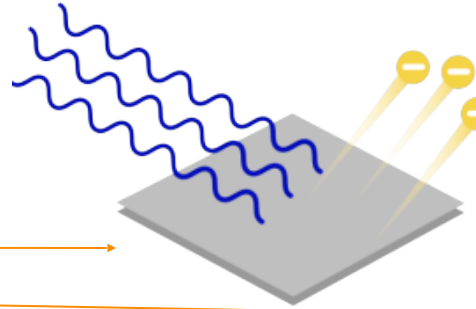
## A alta energia os fótons e electrões interagem com núcleos e electrões atómicos

- ionização
- bremsstrahlung

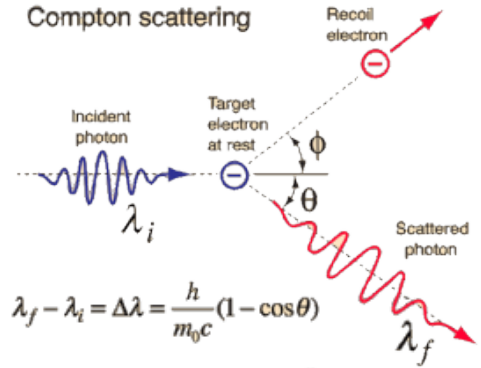
e

- efeito fotoeléctrico
- dispersão de Compton
- produção de pares

$\gamma$

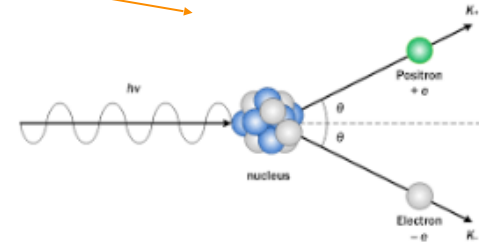


Compton scattering



## A evolução destas cascatas é fácil de prever

- os secundários comportam-se como os primários



# Cascatas eletromagnéticas - um modelo simples

## Simplificando, a energia é dividida a cada passo por 2

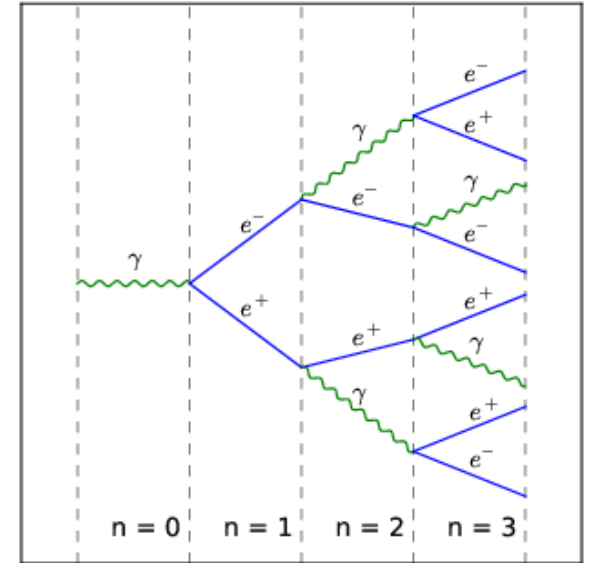
- $E \rightarrow E/2 \rightarrow E/4 \rightarrow \dots$

## A dada profundidade:

- número de partículas a dat:  $N = 2^{x/X_0}$
- energia a dada profundidade:  $E = E_0 / 2^{x/X_0}$

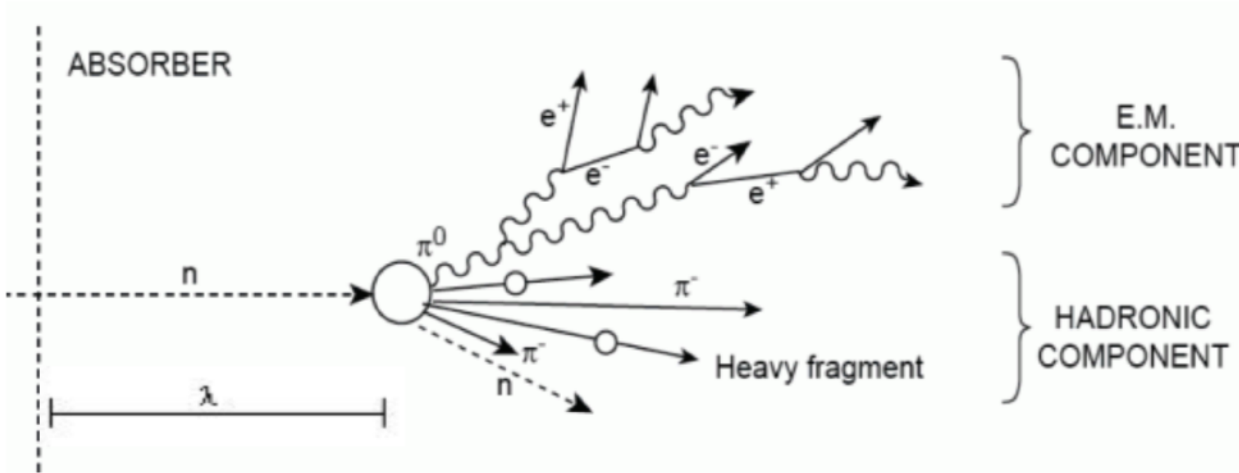
## A cascata vai-se multiplicando até uma energia crítica $E_c$

- profundidade do máximo:  $x_{\max} \propto X_0 \log_2 E / E_c$
- $N_{\max} \sim E_0 / E_c$



**Este modelo simples não anda longe da realidade!**

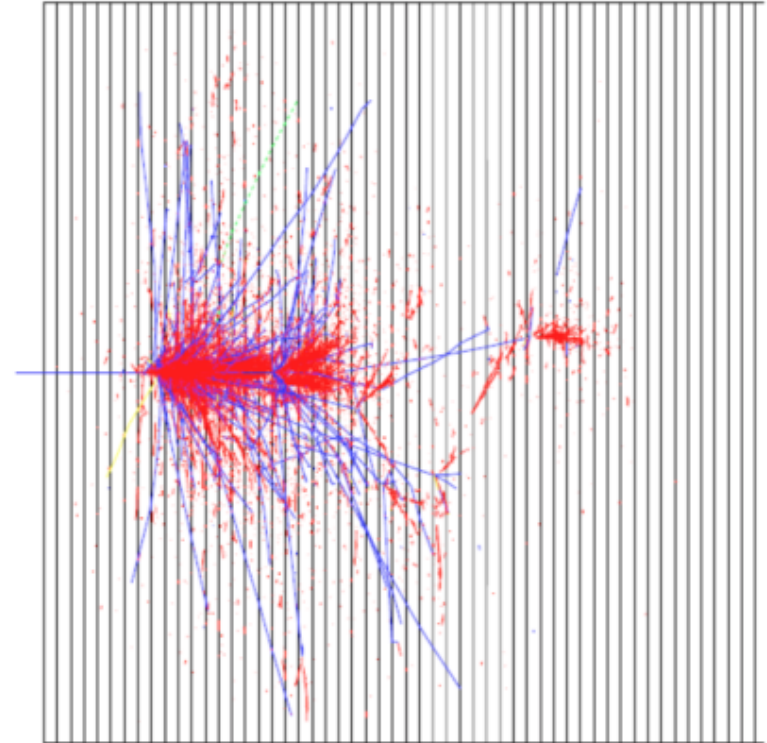
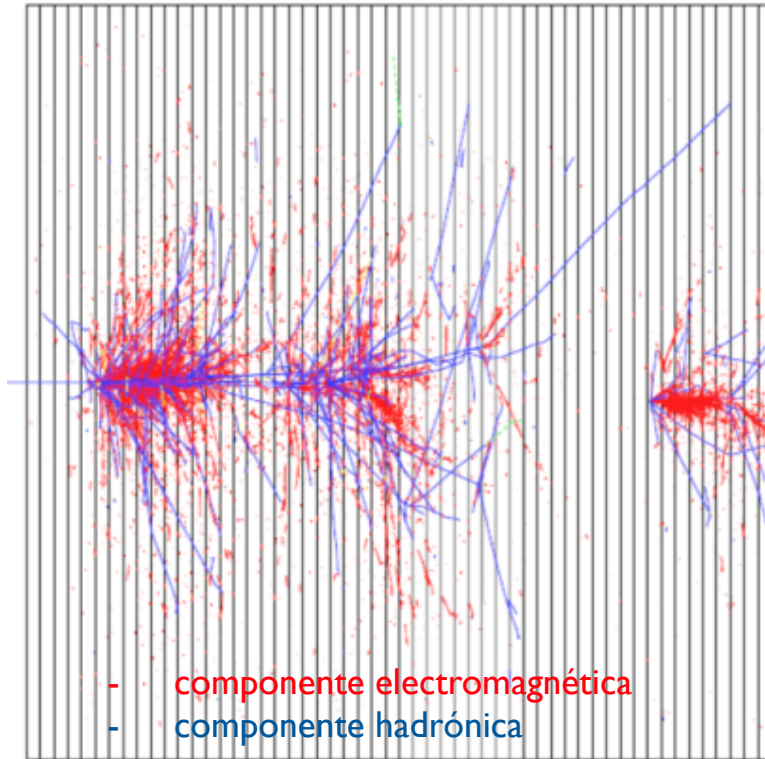
# Cascatas hadrónicas



## As reacções nucleares são mais complexas

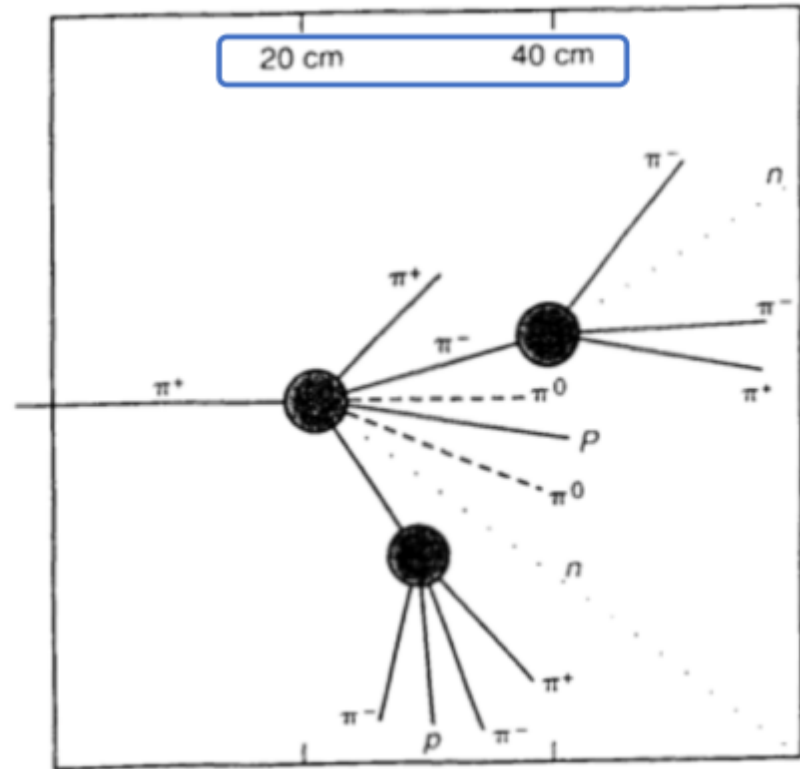
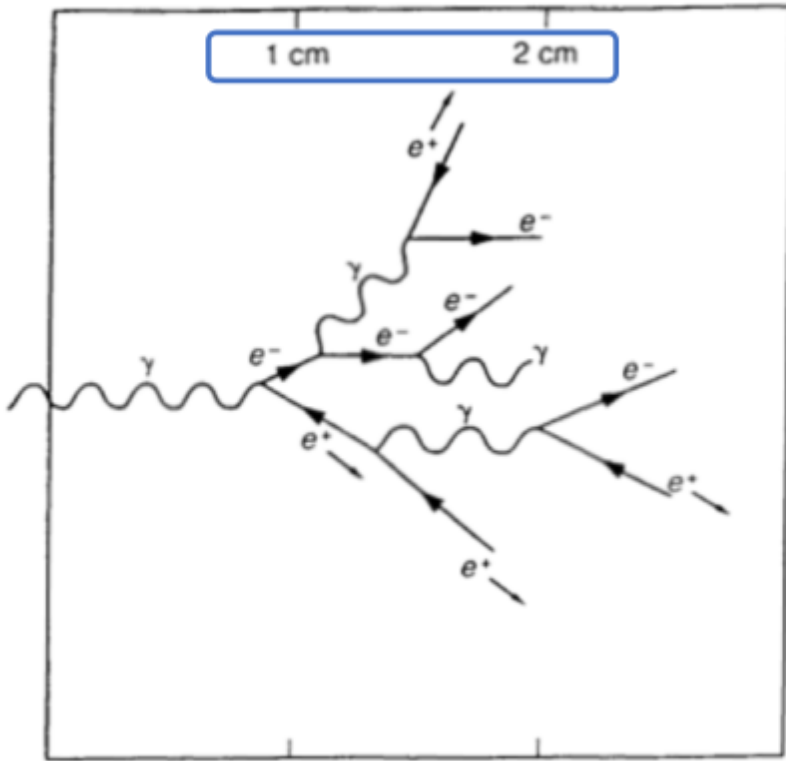
- dependem da energia, da partícula incidente, dos alvos, etc.
- os produtos são uma mistura de fragmentos electromagnéticos e novos hadrões
- contenção das cascatas requiere uma massa elevada no calorímetro

# Cascatas hadrónicas

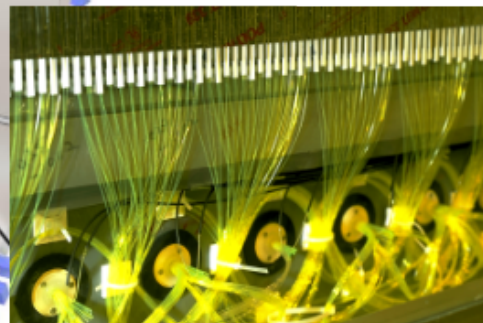
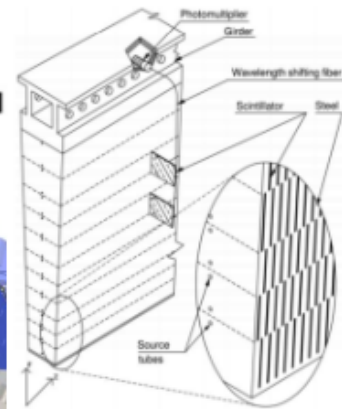
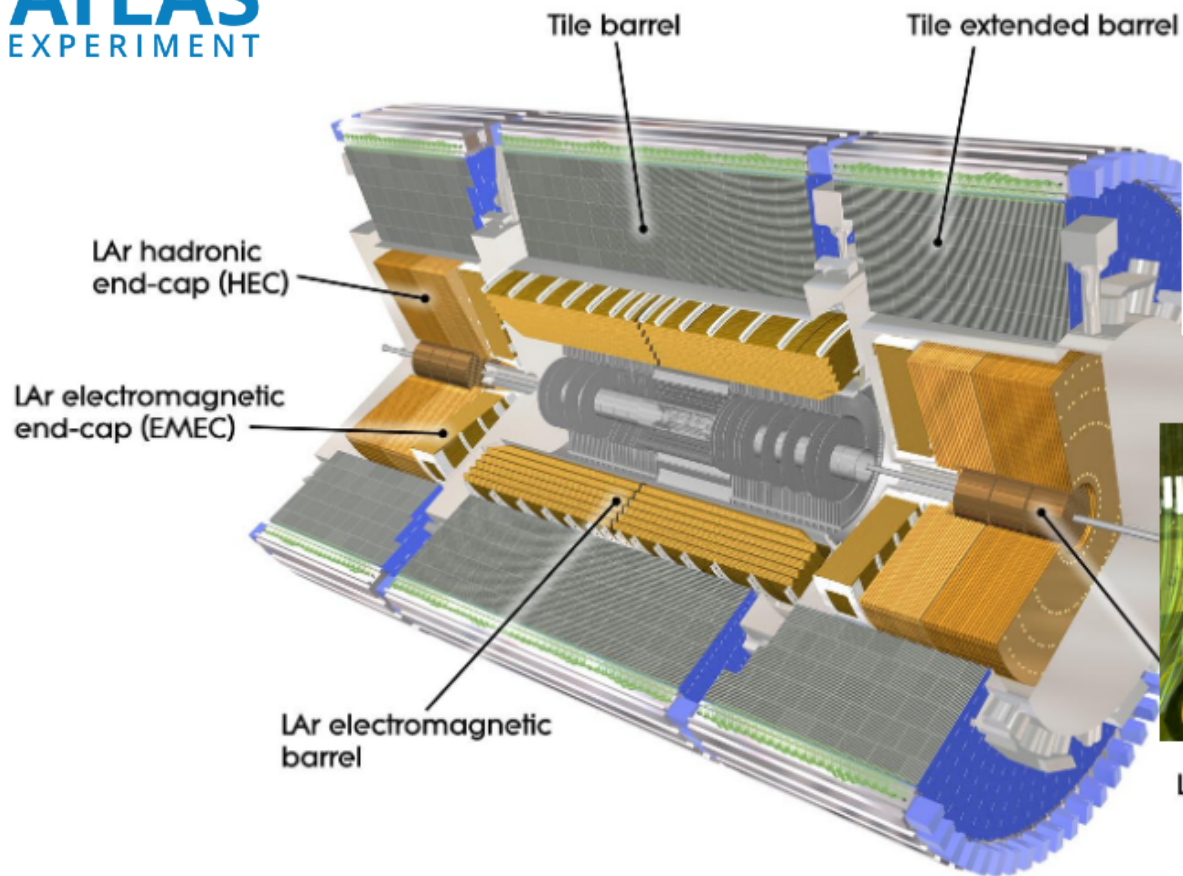


**Não há duas semelhantes: modelos associados com incertezas significativas!**

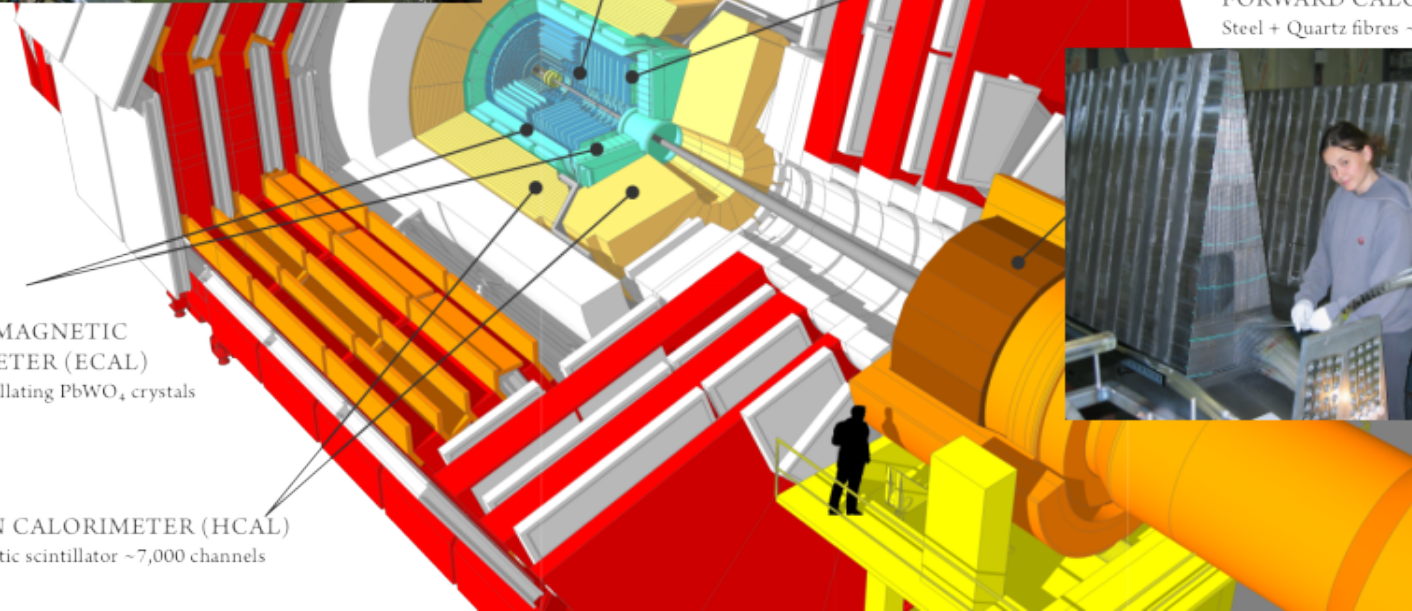
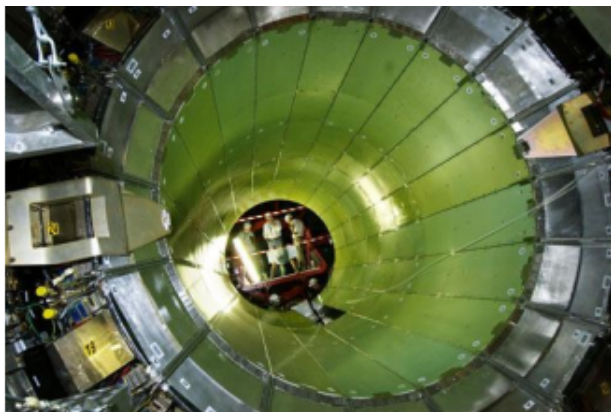
## Cascatas hadrónicas - contenção







LAr forward (FCal)

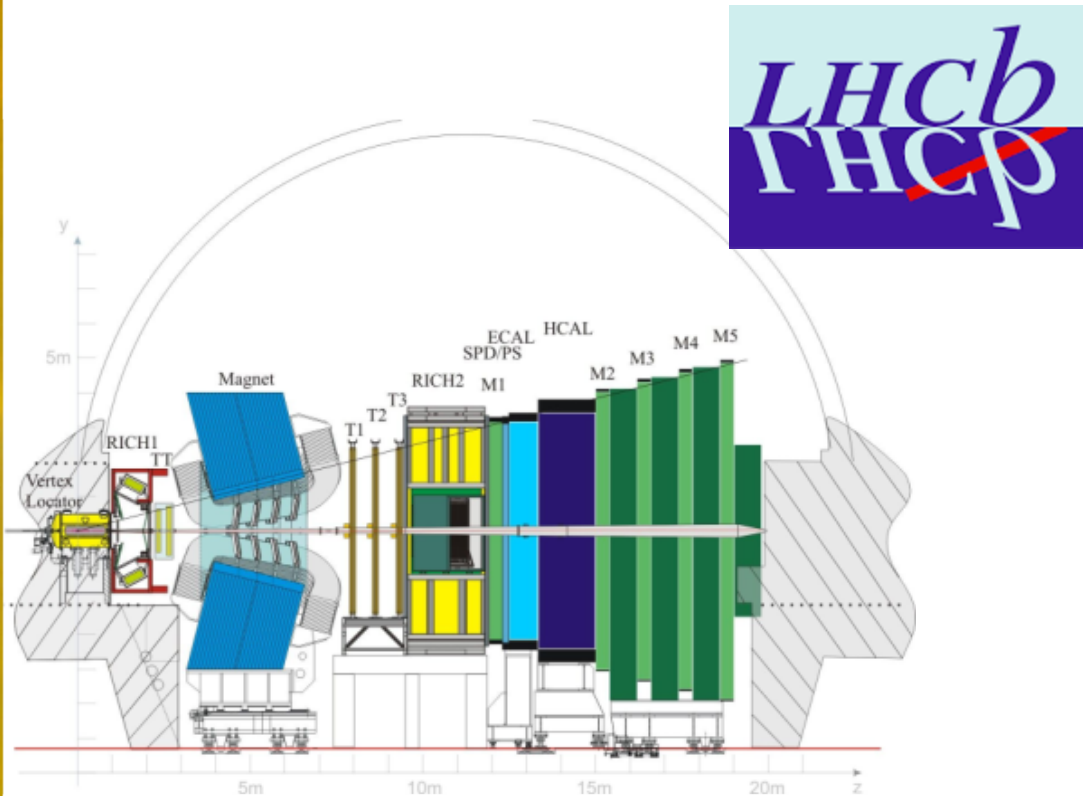
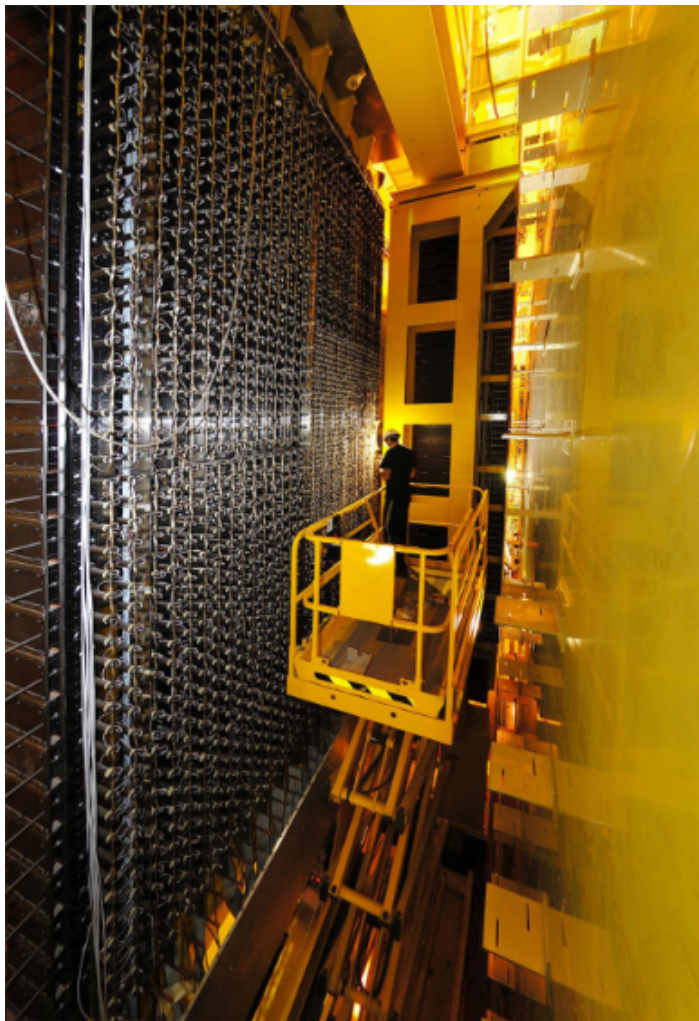


FORWARD CALORIMETER  
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels



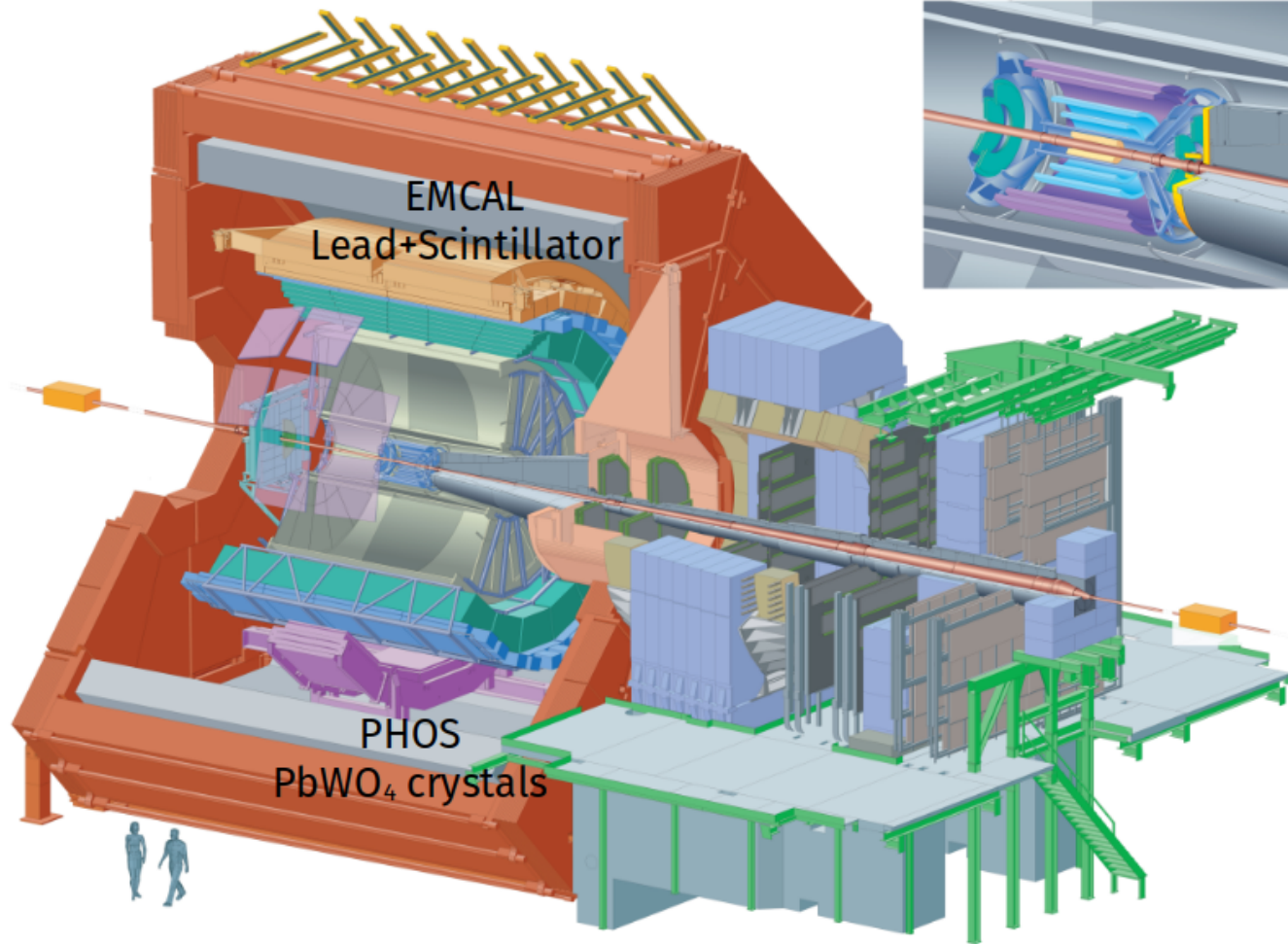
CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)  
~76,000 scintillating  $PbWO_4$  crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels



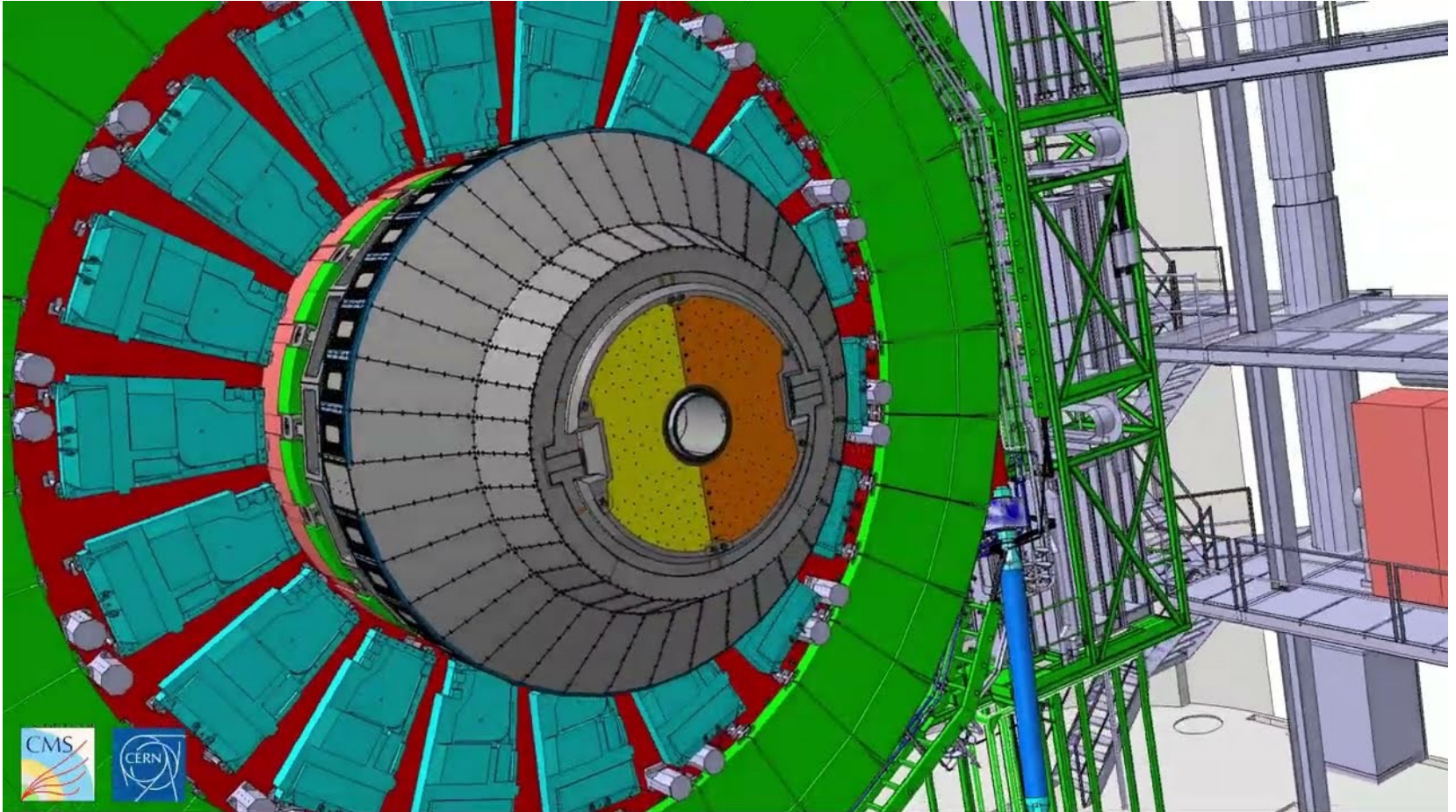


ALICE



Dando a conhecer a passagem de partículas

# O calorímetro em que o André David e eu andamos a trabalhar



# **Introdução**

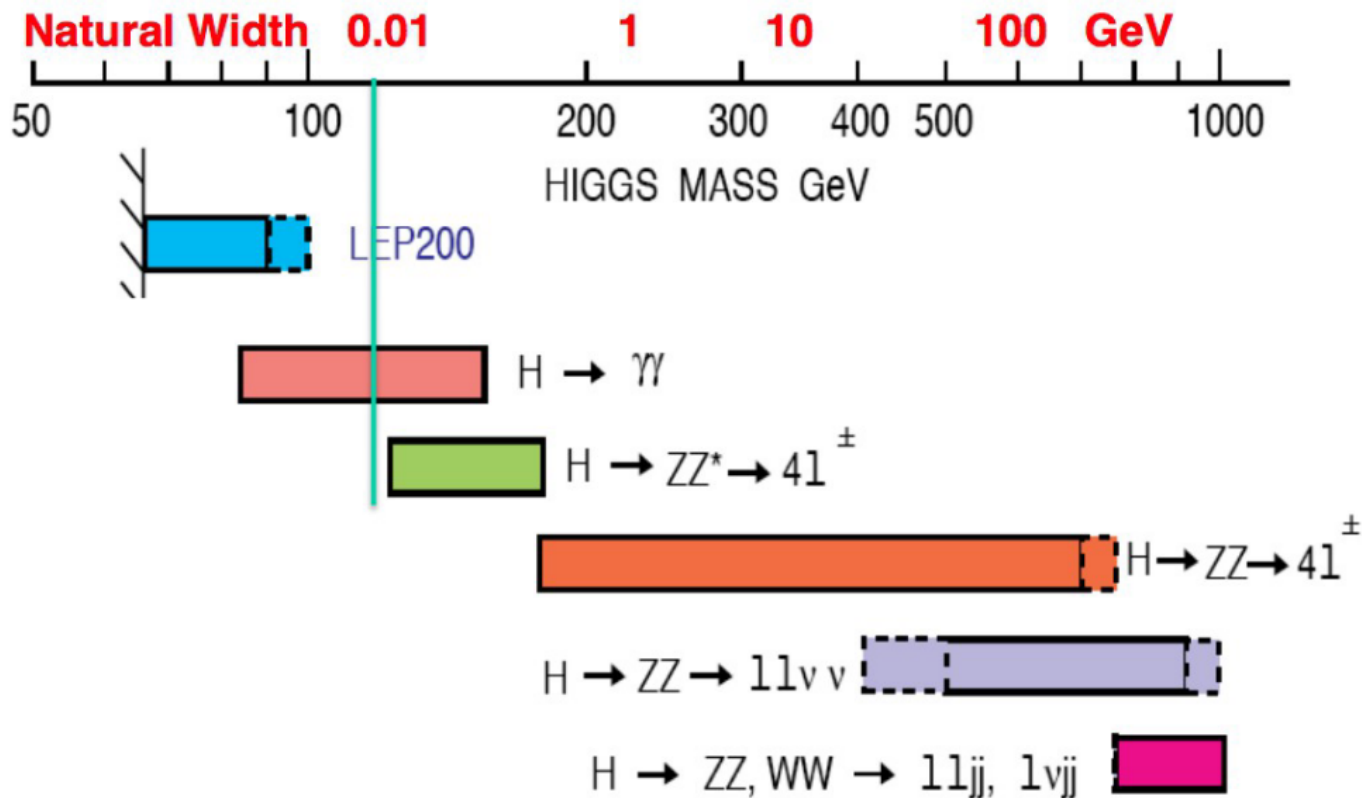
**Dar a conhecer a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

# A física alinha os princípios gerais



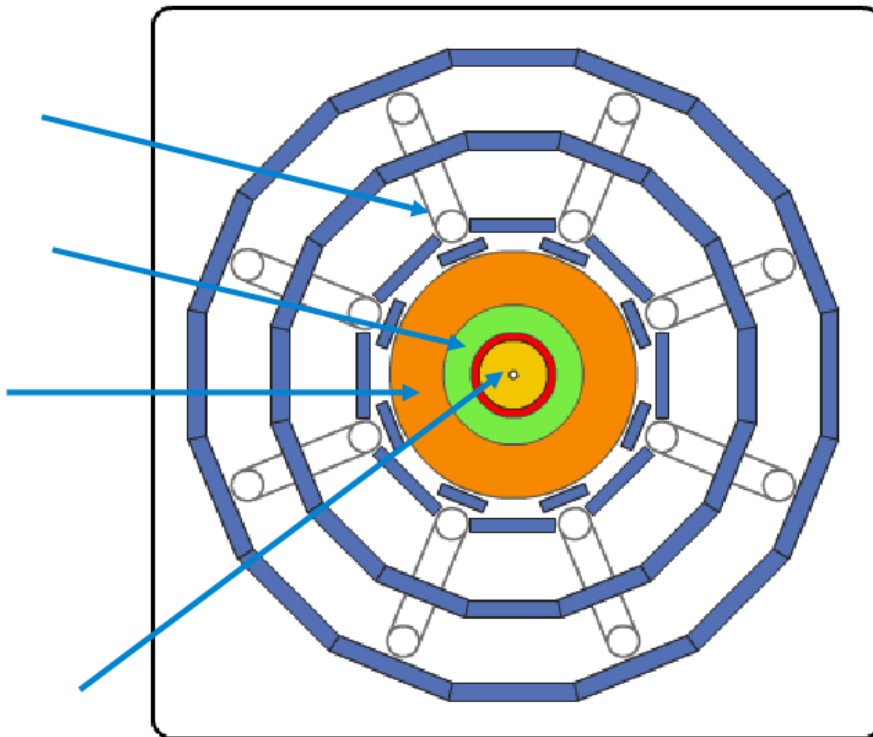
# A engenharia guia a concretização

**B field source**

**High-Z materials**

**Dense materials** (e.g.  
Iron, Copper, Brass,  
Stainless Steel,  
Uranium)

**Lightweight materials**  
(Si, gaseous)



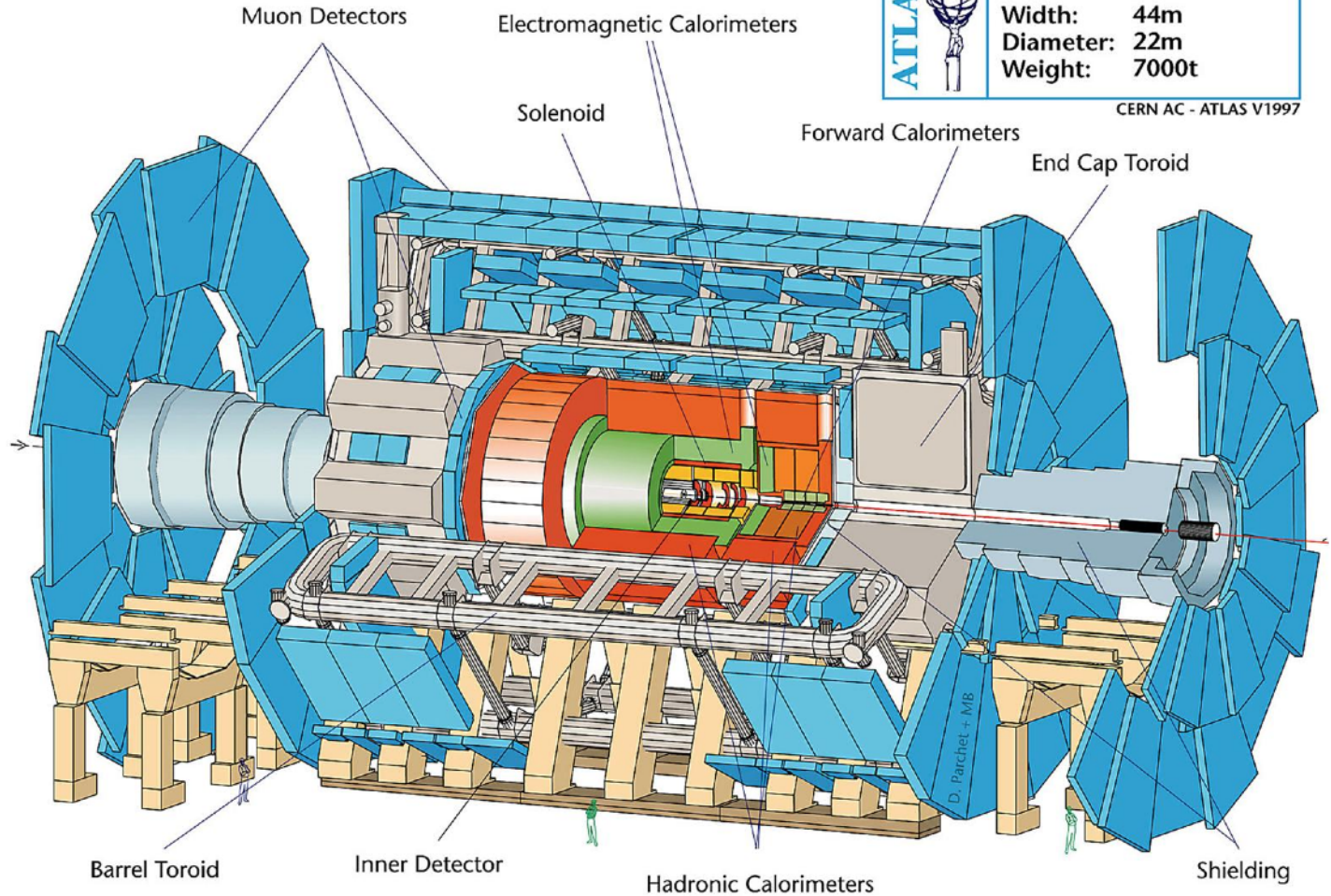




### Detector characteristics

**Width:** 44m  
**Diameter:** 22m  
**Weight:** 7000t

CERN AC - ATLAS V1997



Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding



**SUPERCONDUCTING COIL**

**ECAL Scintillating  $PbWO_4$  Crystals**

**CALORIMETERS**

**HCAL Plastic scintillator  
brass sandwich**

**IRON YOKE**

**TRACKER**

Silicon Microstrips  
Pixels

**MUON BARREL**

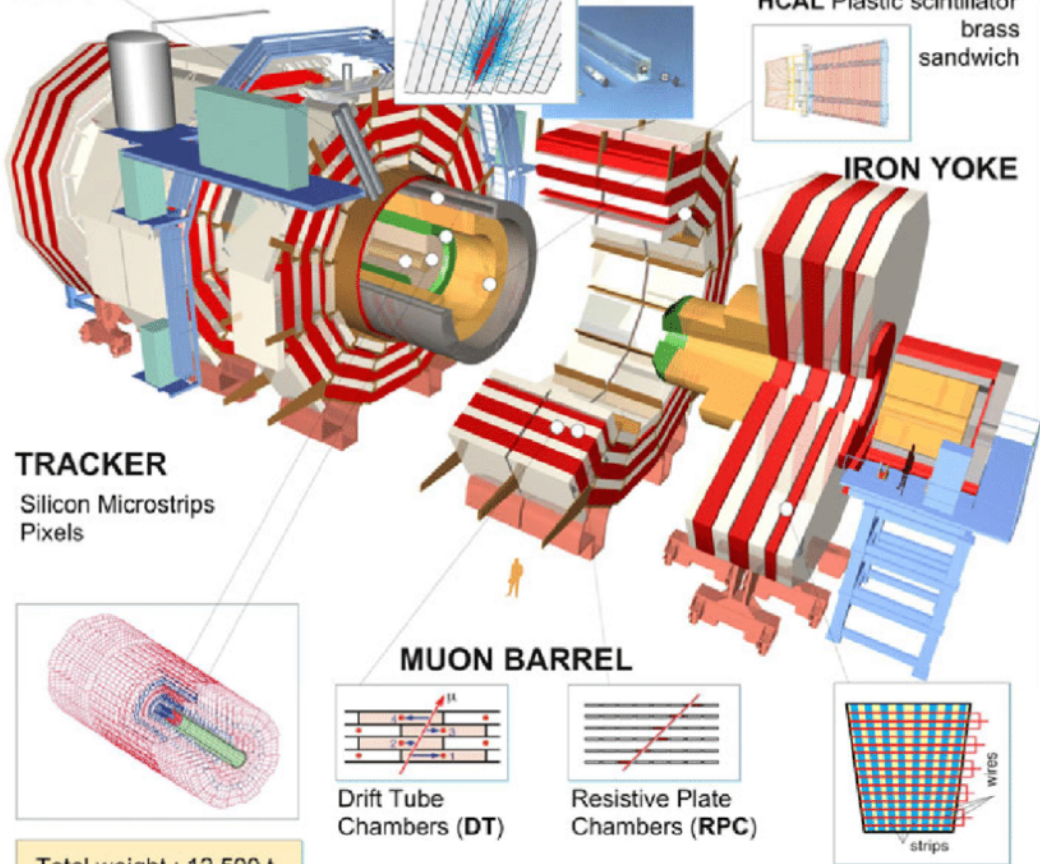
Drift Tube  
Chambers (DT)

Resistive Plate  
Chambers (RPC)

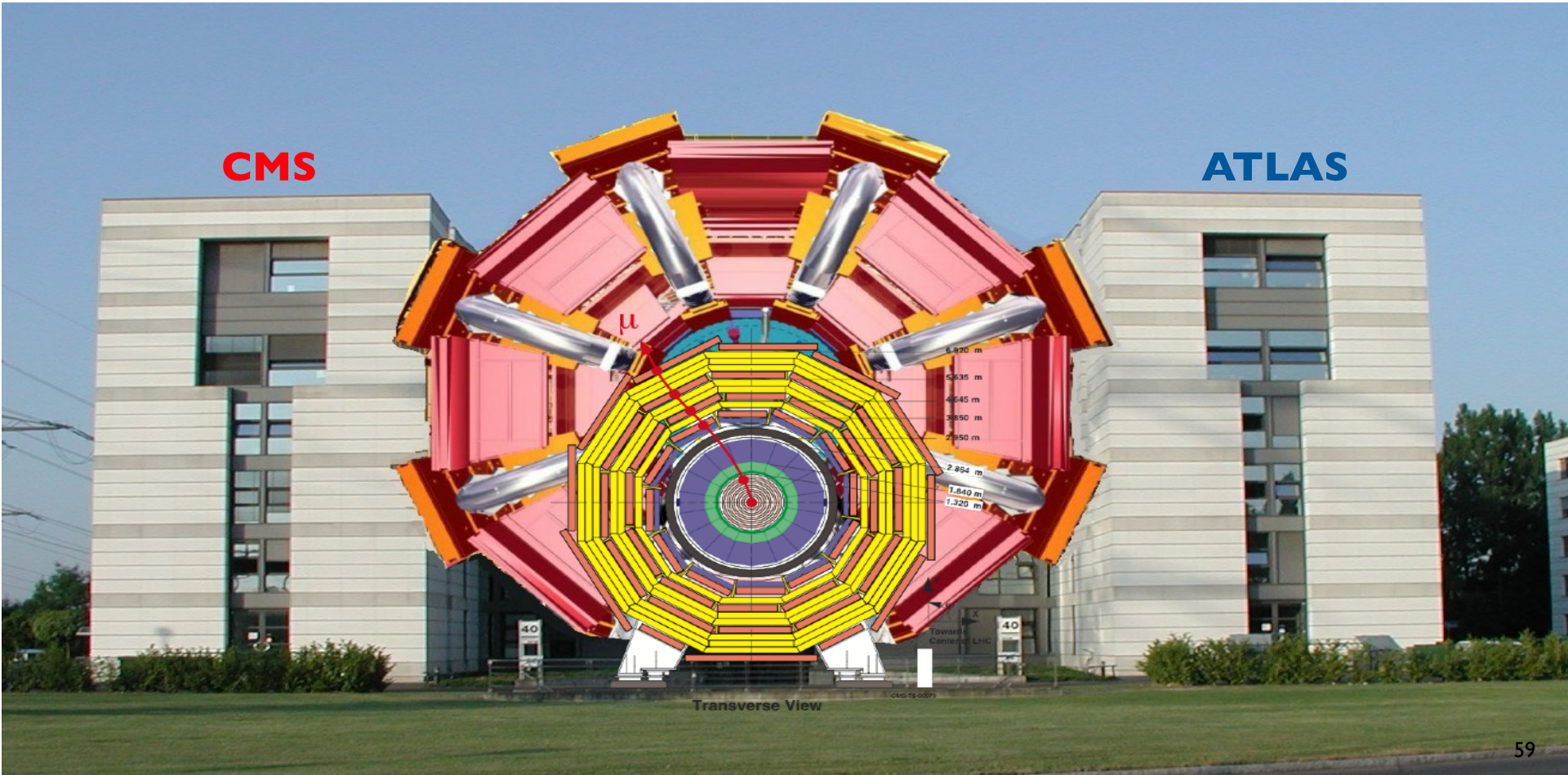
**MUON ENDCAPS**

Cathode Strip Chambers (CSC)  
Resistive Plate Chambers (RPC)

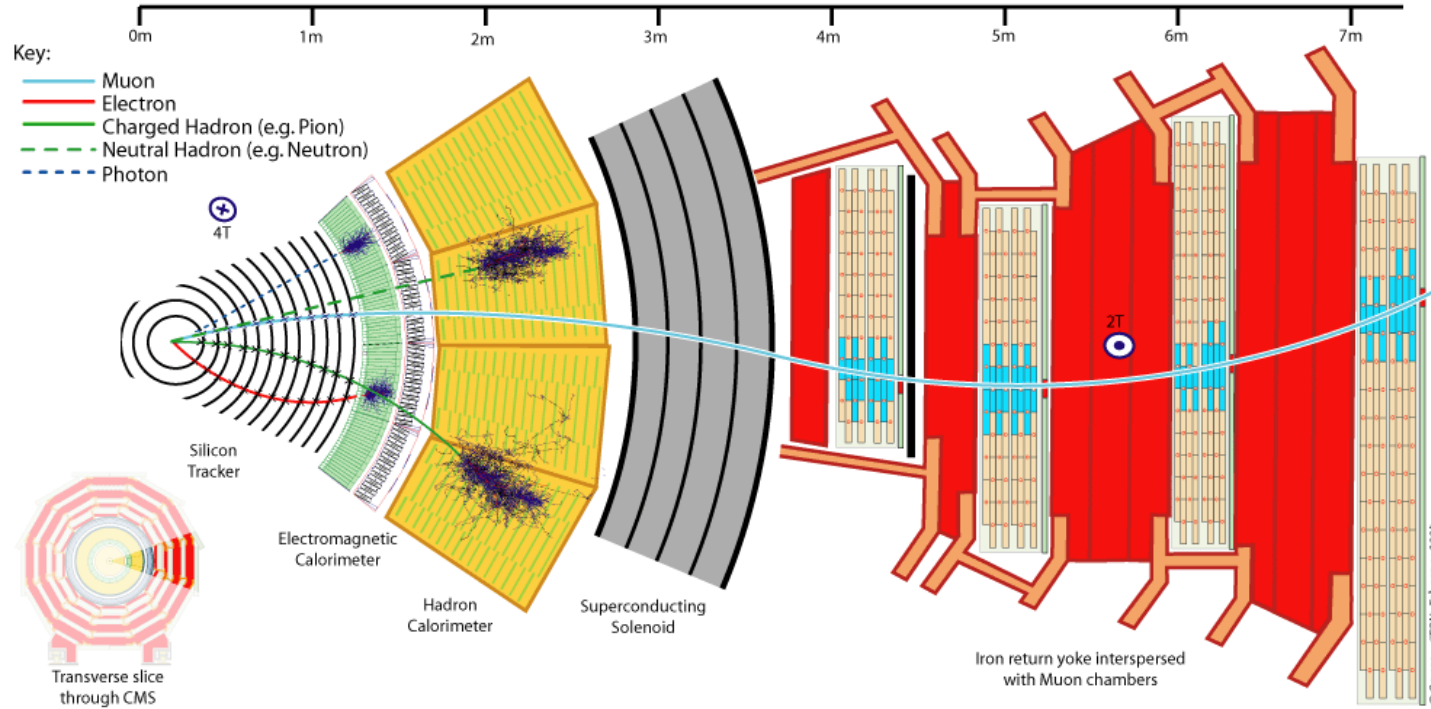
Total weight : 12,500 t  
Overall diameter : 15 m  
Overall length : 21.6 m  
Magnetic field : 4 Tesla

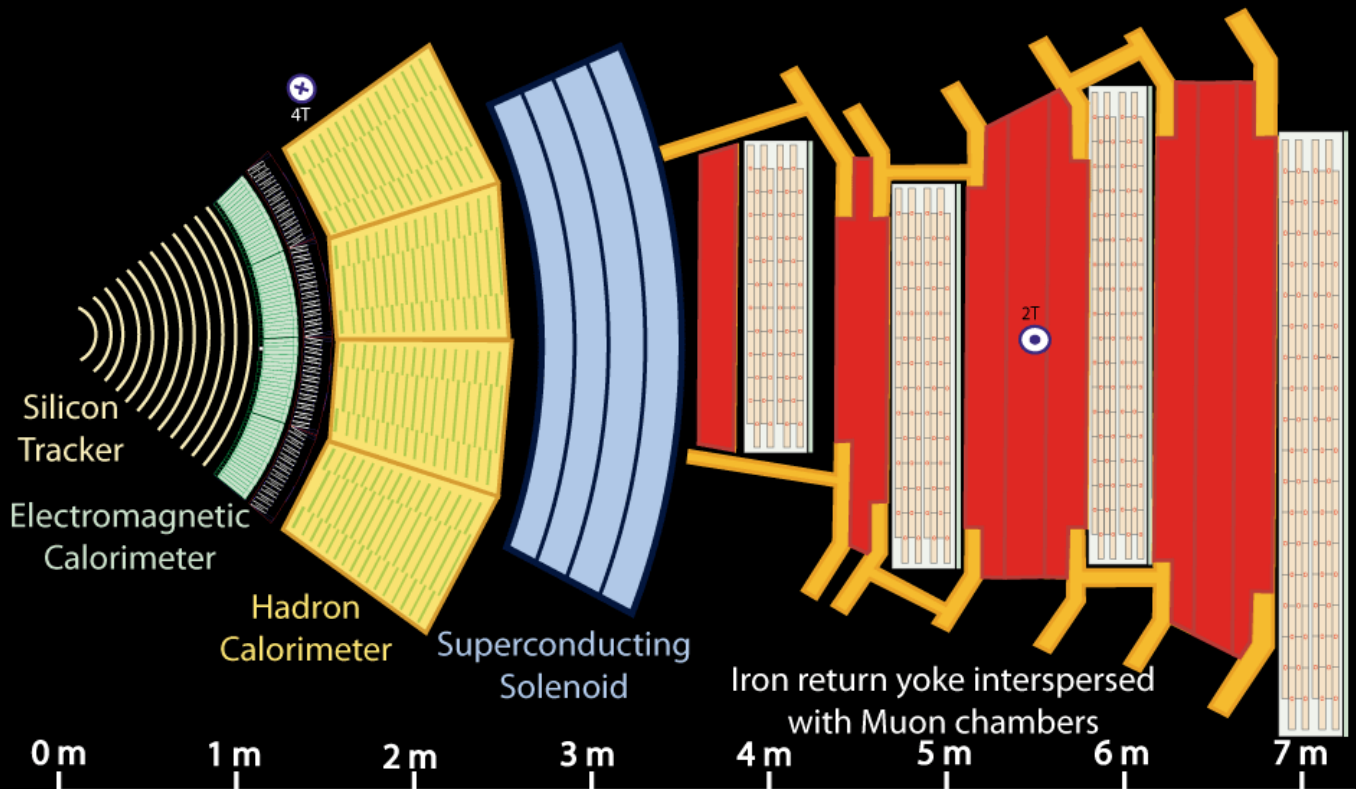


# Os detectores ATLAS e CMS o edifício 40 do CERN



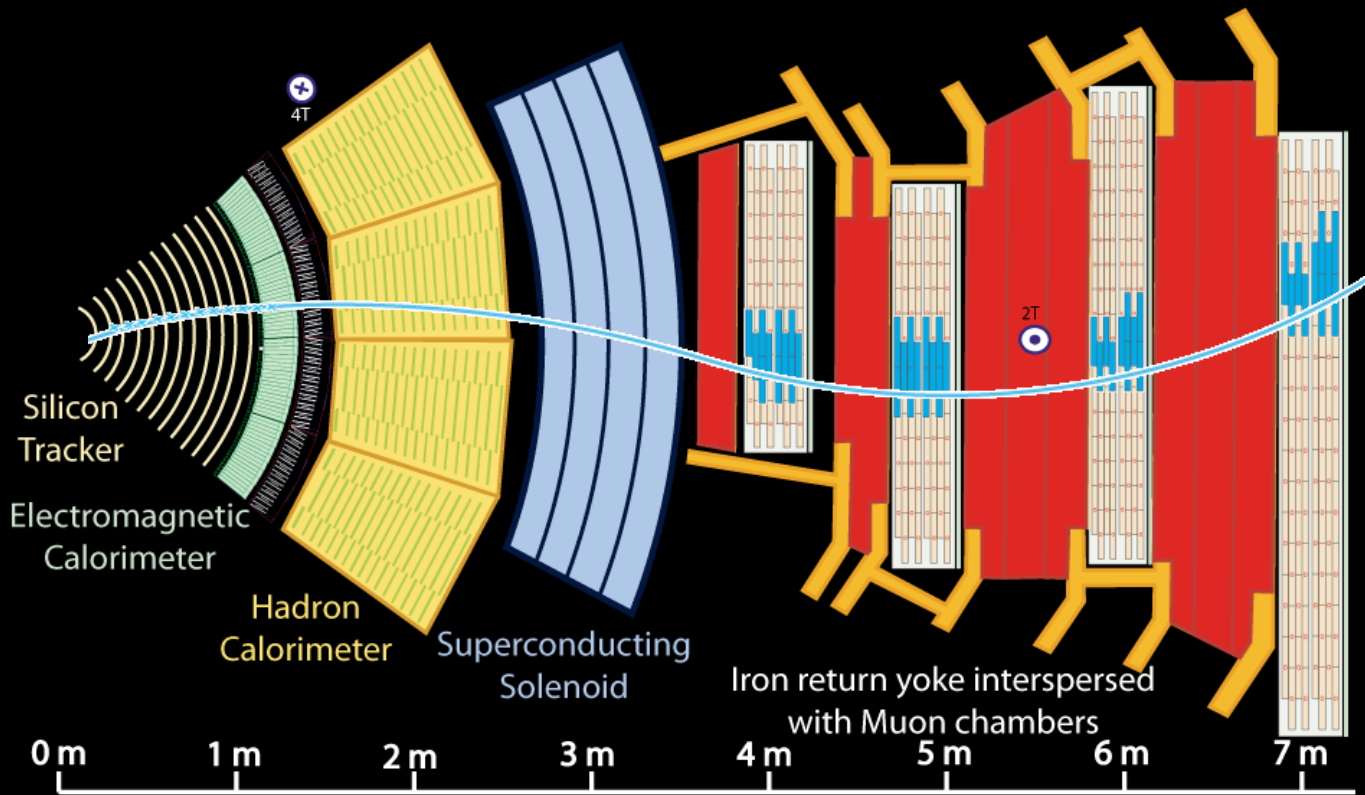
# Detector e as partículas





Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

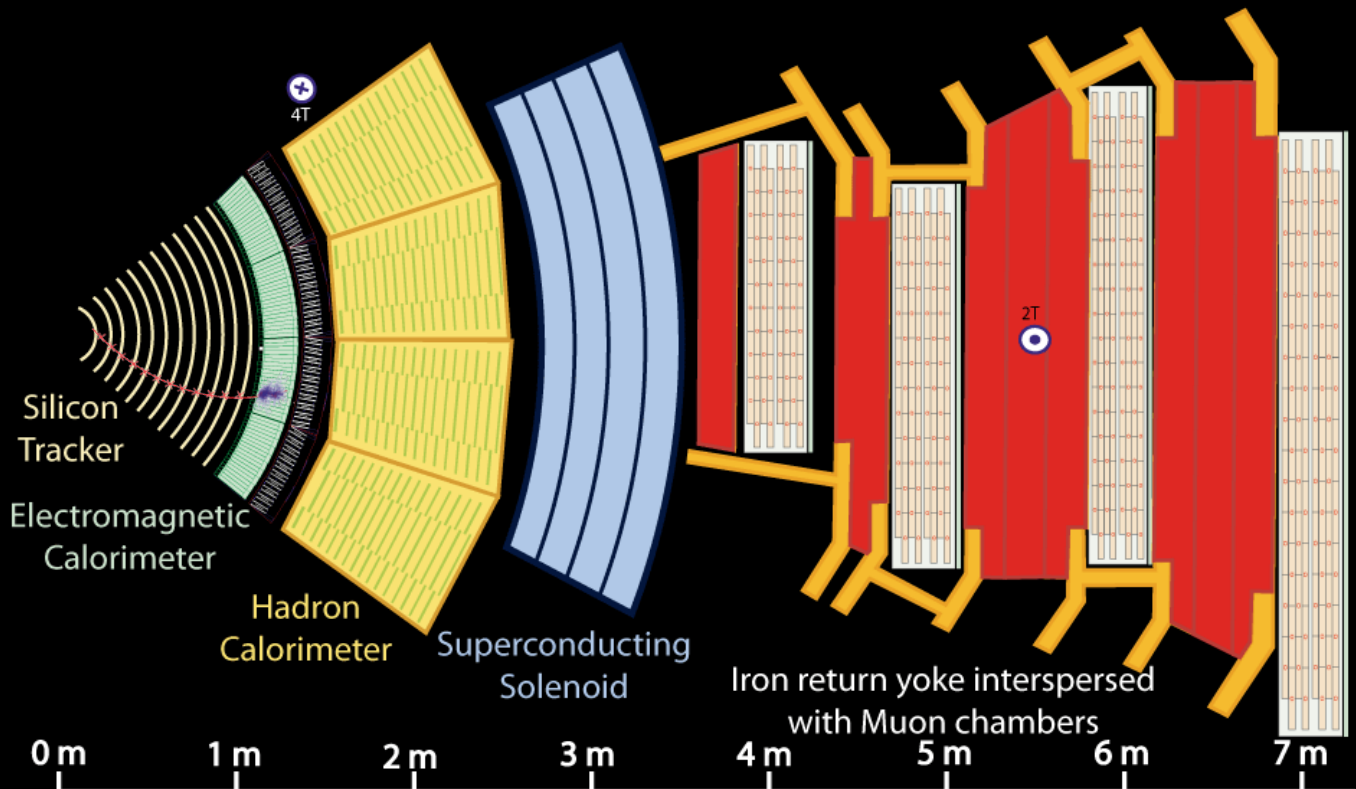
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

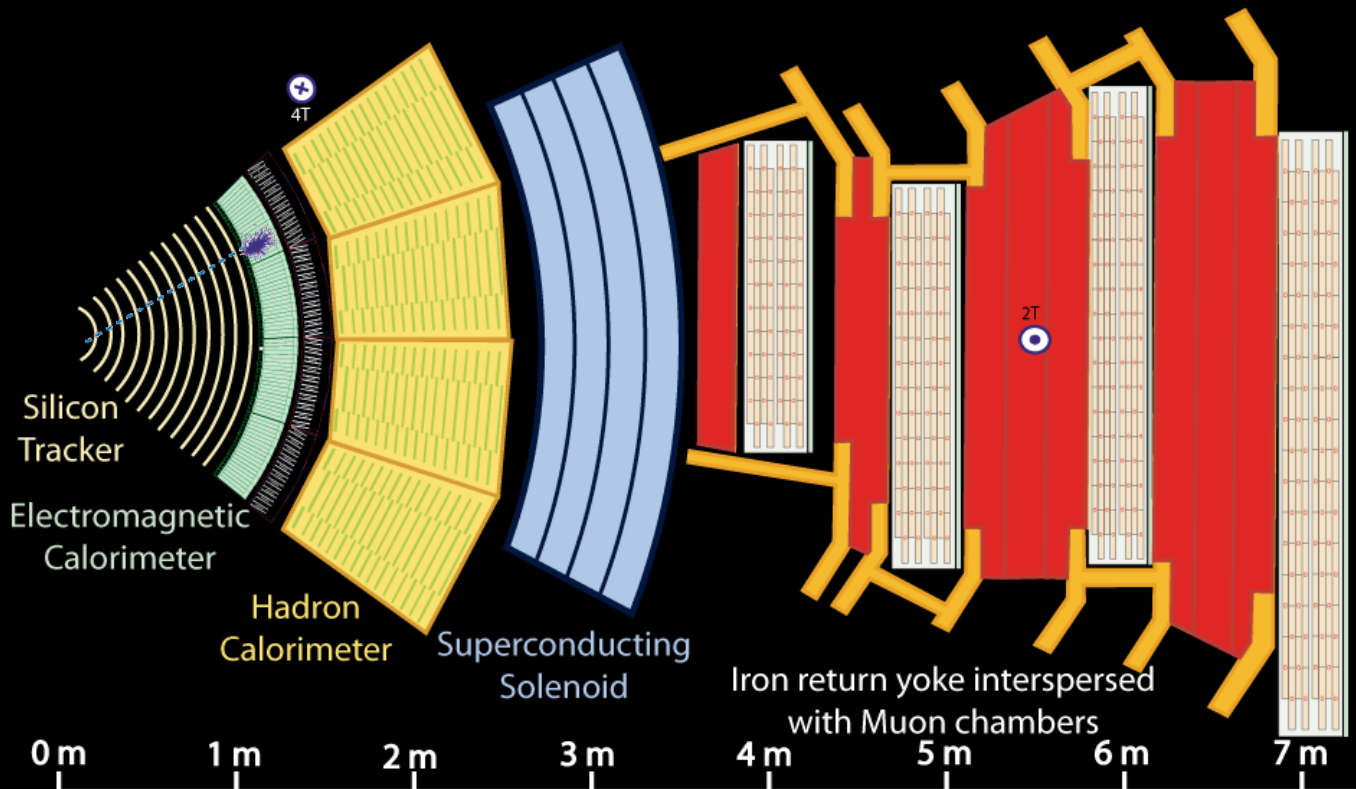
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

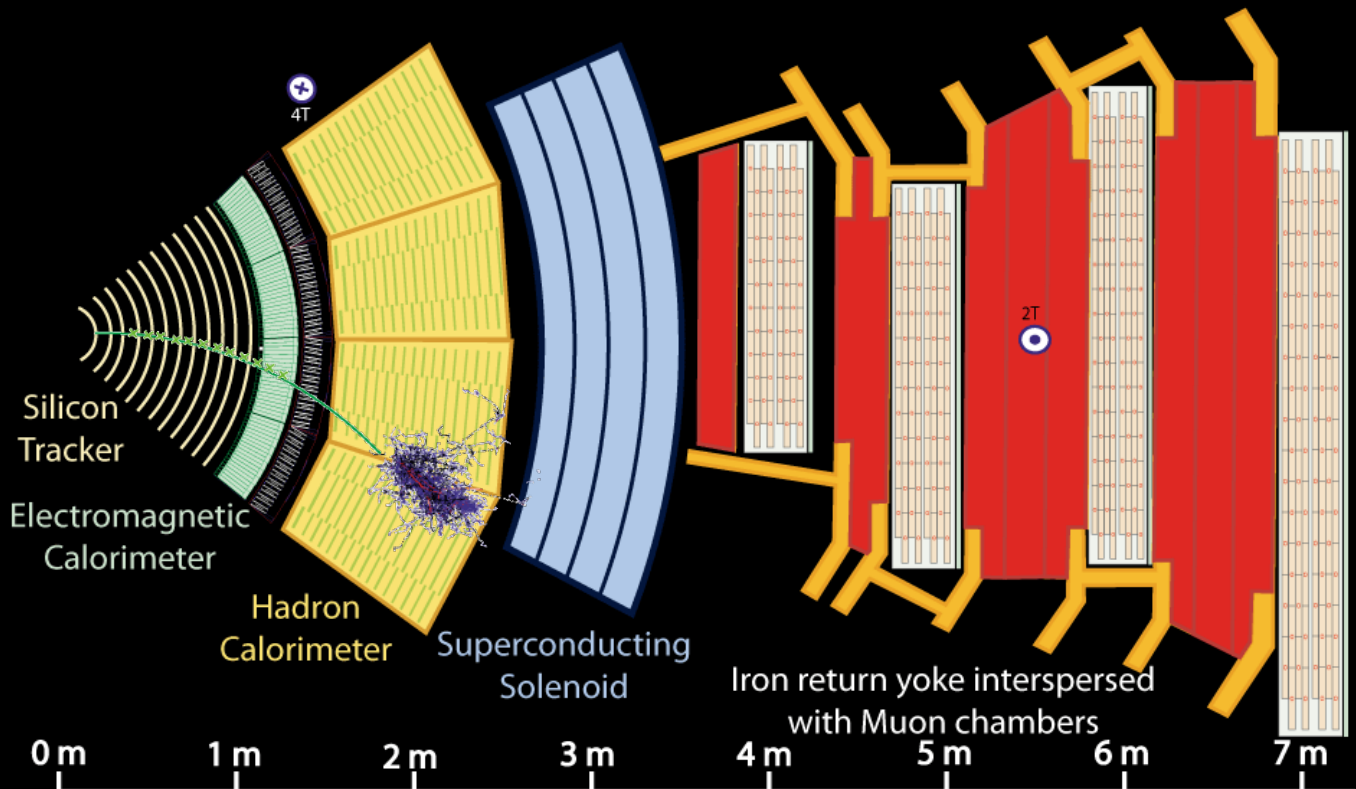
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

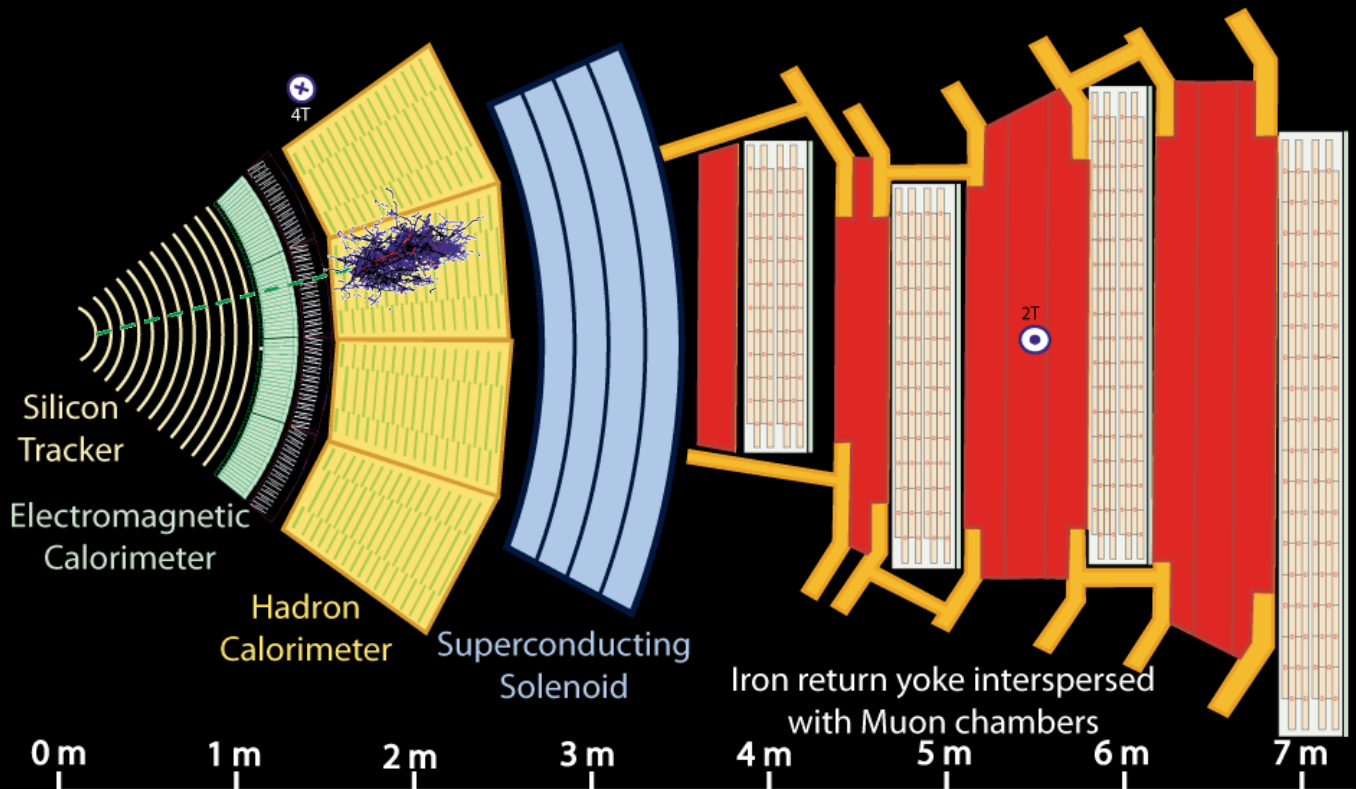
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon





Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Photon
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

# **Introdução**

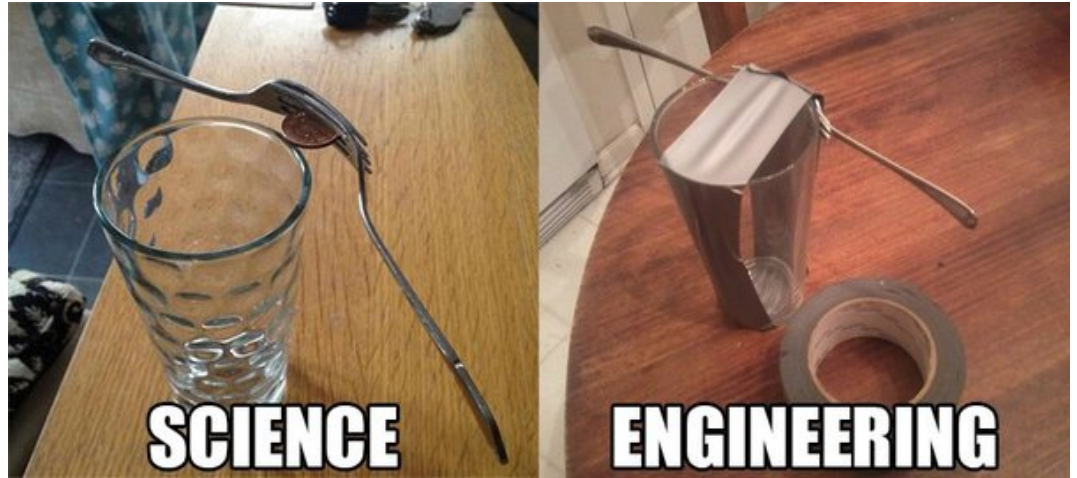
**Dar a conhecer a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

# Conclusões



## O desenvolvimento e integração de detectores é integrante do trabalho do CERN

- tecnologias acompanham a par e passo as questões da física
- maior desafio : compromisso entre a precisão necessária e possibilidades actuais da tecnologia
- complexidade dos detectores do LHC é fundamental ao seu sucesso:

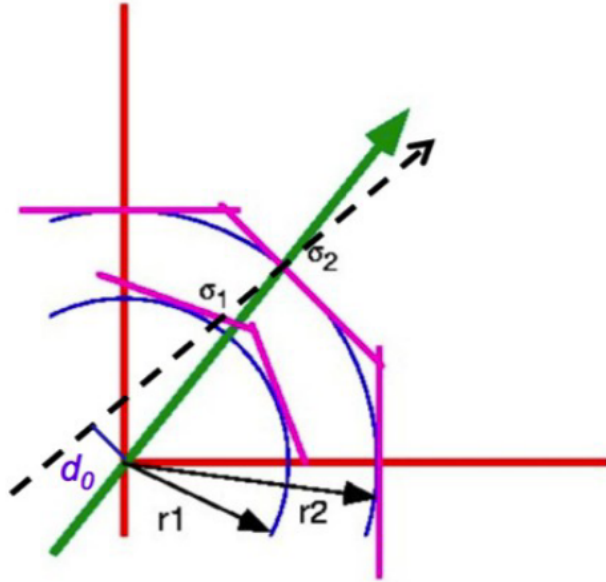
descoberta e estudo do Higgs

medidas de precisão

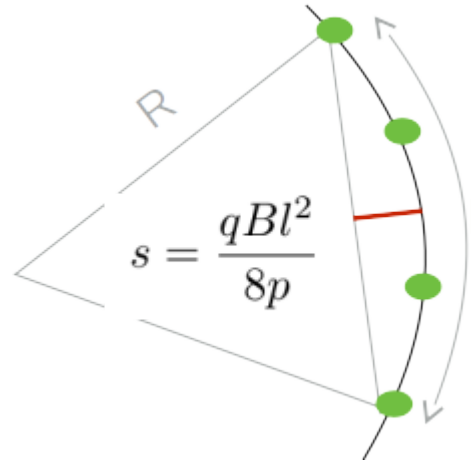
pesquisa por sinais de nova física

# Extras

# Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias I



$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}$$

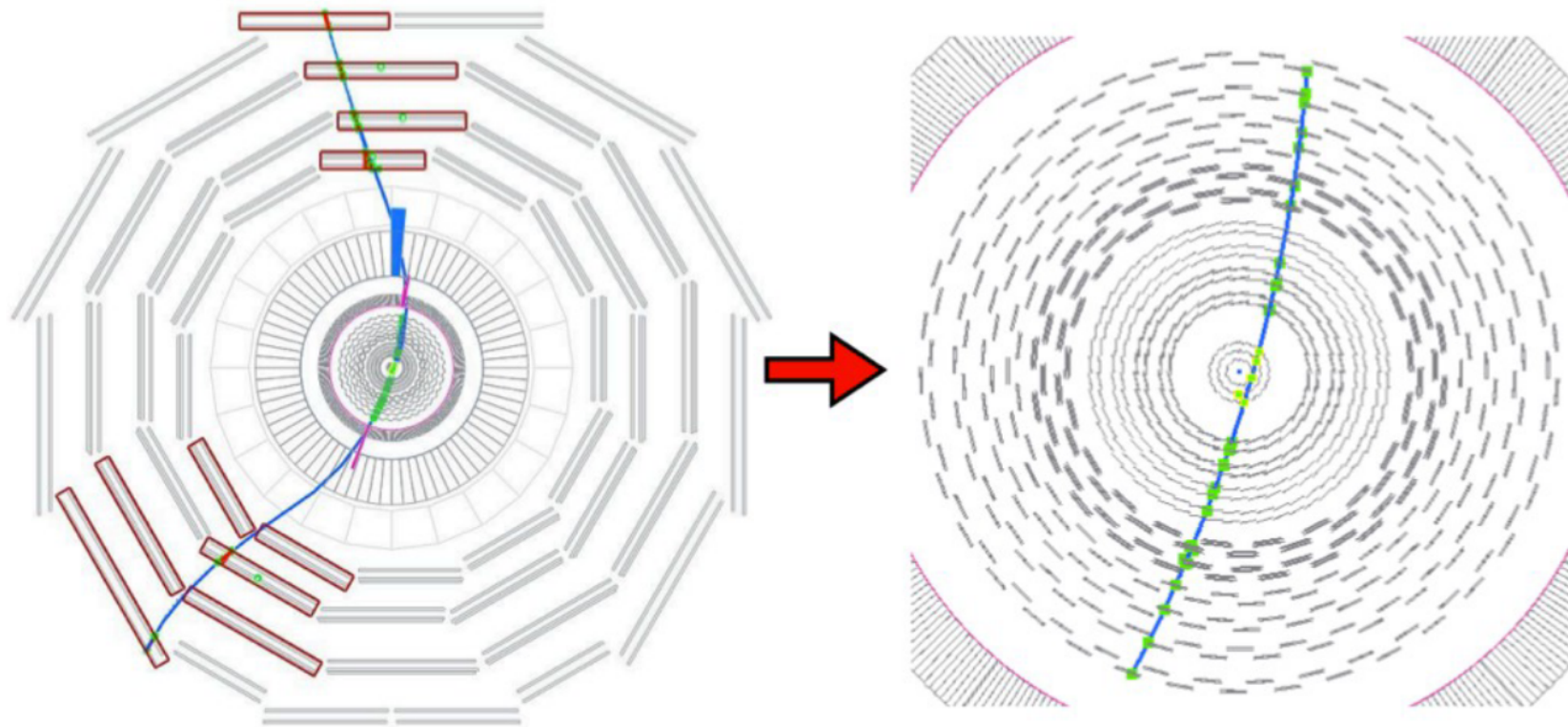


$$s = \frac{qBl^2}{8p}$$

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{8p_T}{0.3BL^2} \sigma_s$$

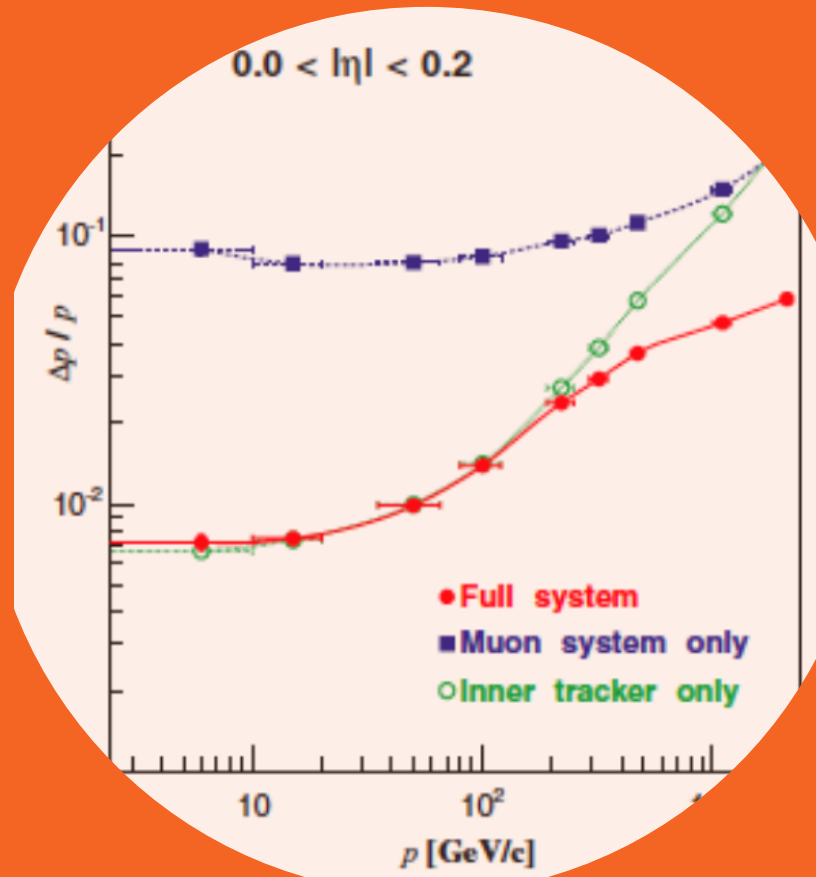
Dando a conhecer a passagem de partículas

## Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias II



Dando a conhecer a passagem de partículas

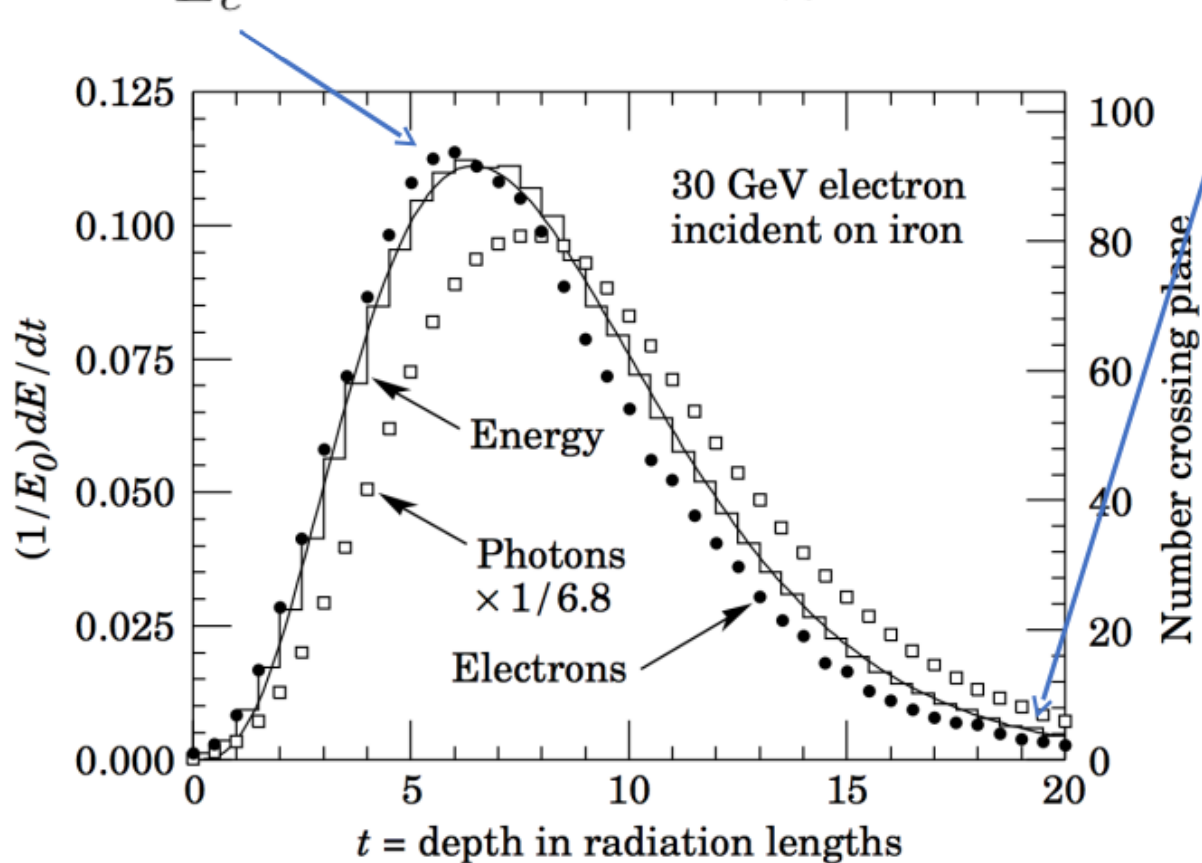
# Ligando os pontos: reconstrução de trajectórias III



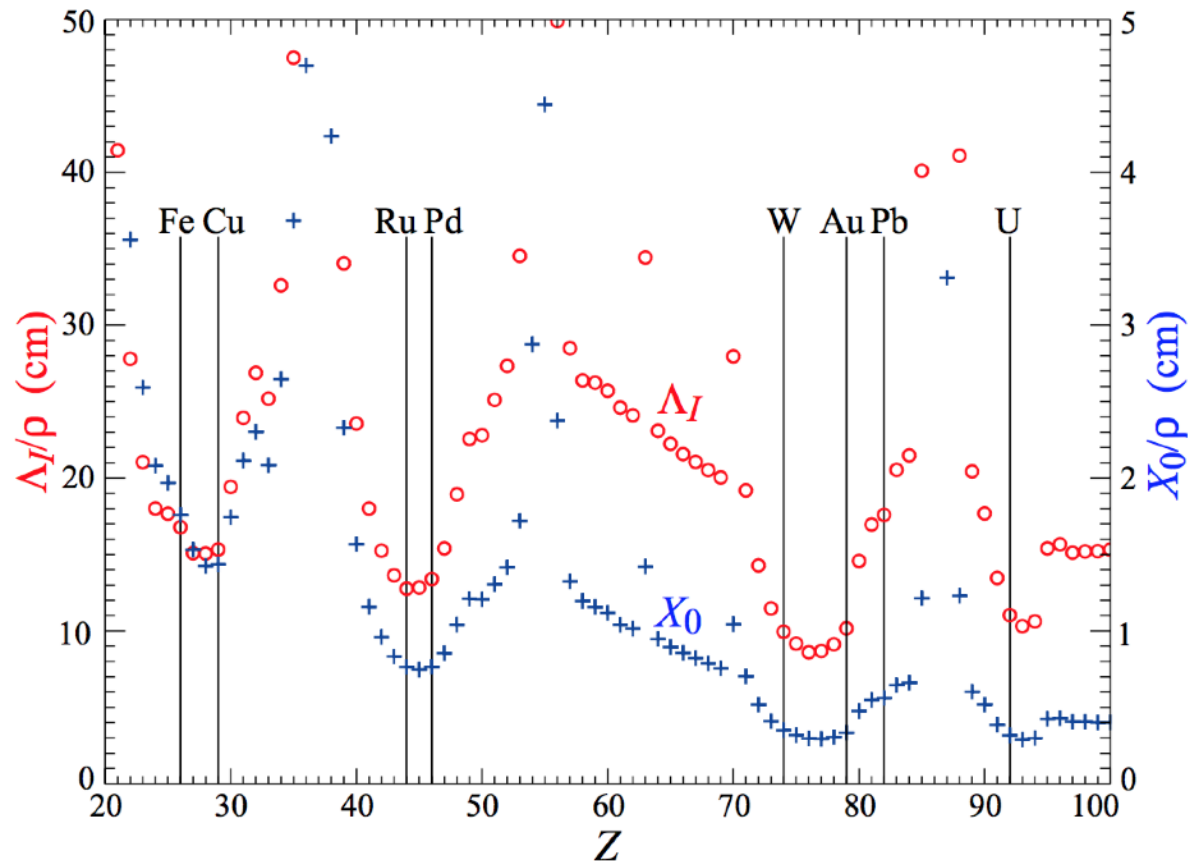


$$t_{max} \approx \log \frac{E}{E_c} \pm 0.5$$

$$t_{95\%} = t_{max} + 0.08Z + 9.6$$



# Materiais tipicamente usados em absorvedores



Quanto menores forem os comprimentos de interação nuclear e de radiação e mais densos forem os materiais melhor!

Custo, activação radioactiva, maleabilidade, facilidade de corte, etc. são alguns dos pontos a considerar na escolha.

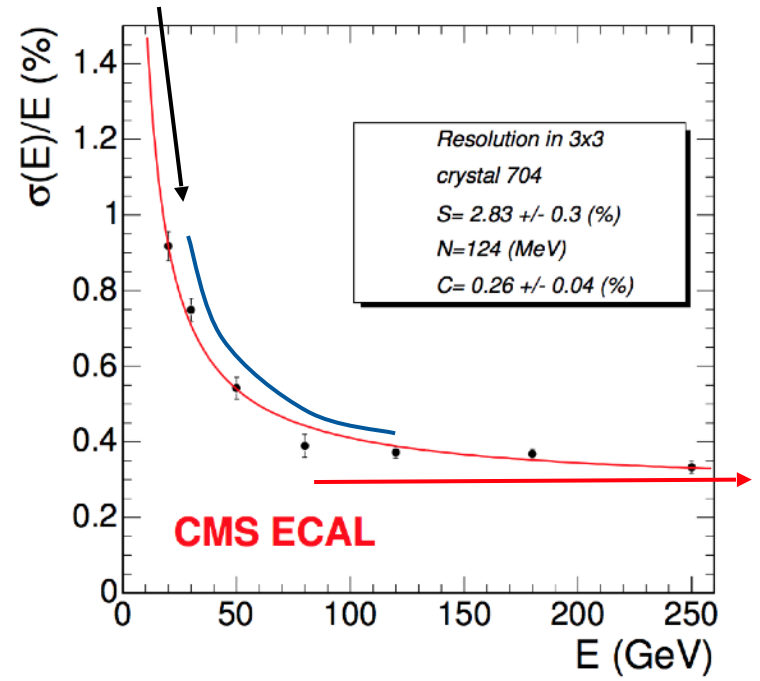
# Modelo de resolução calorimétrica

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

**termo estocástico** - relacionado com as flutuações no desenvolvimento da cascata

**termo de ruído** - degradação adicional introduzida a baixa energia pela electrónica, sobreposicoes, ...

**termo constante** - normalmente devido a falta de contenção da energia das cascatas energéticas, danos de radiação, etc.



⊕ = soma em quadratura

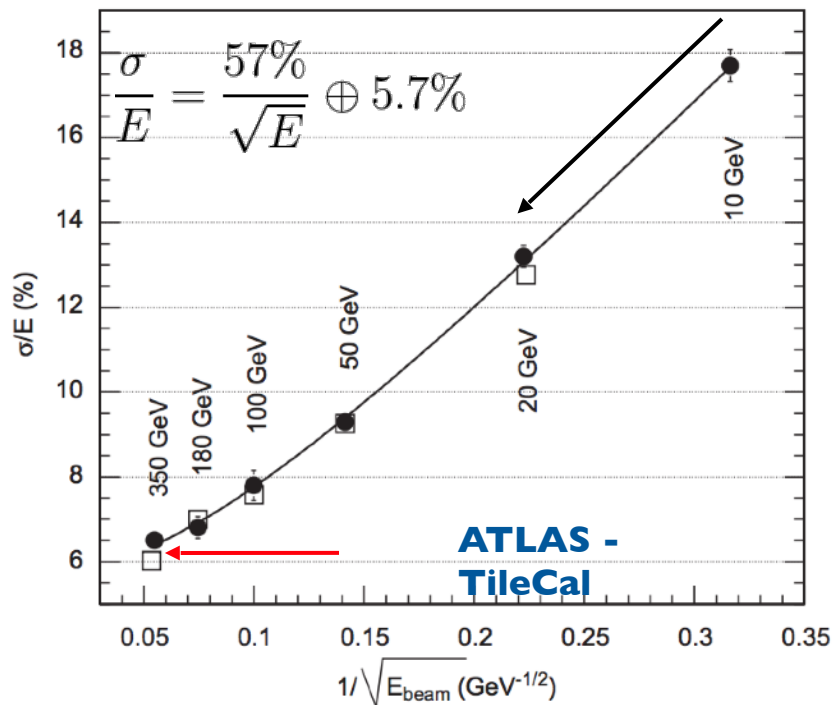
# Modelo de resolução calorimétrica

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

**termo estocástico** - relacionado com as flutuações no desenvolvimento da cascata

**termo de ruído** - degradação adicional introduzida a baixa energia pela eletrónica, sobreposicoes, ...

**termo constante** - normalmente devido a falta de contenção da energia das cascatas energéticas, danos de radiação, etc.



resolução de reconstrução de energia de píões carregados

# **Introdução**

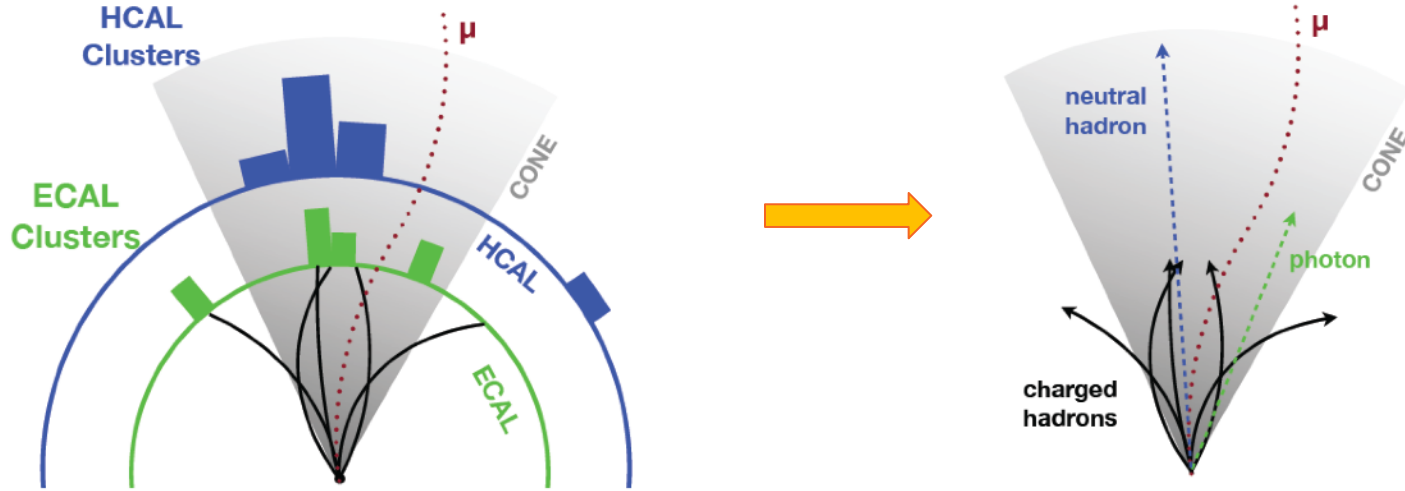
**Dar a conhecer a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

# Descrição global de um evento: o algoritmo de “particle flow”

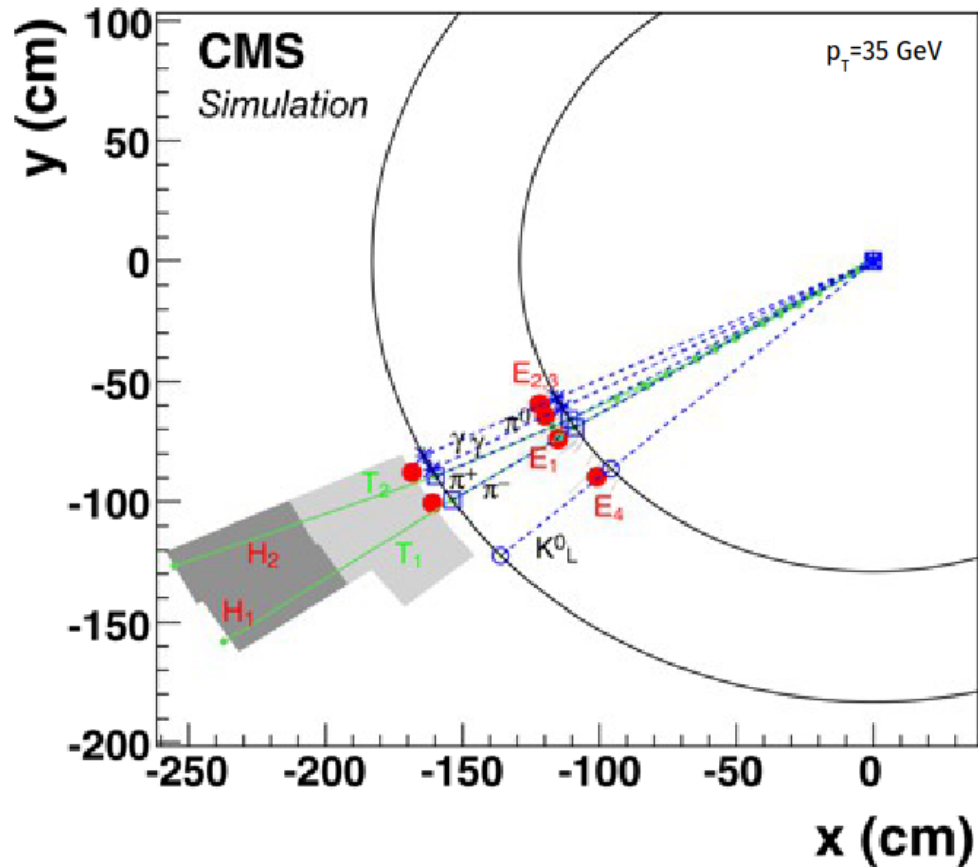


Num evento associamos a informação disponível: hits, traços, aglomerados de hits,...

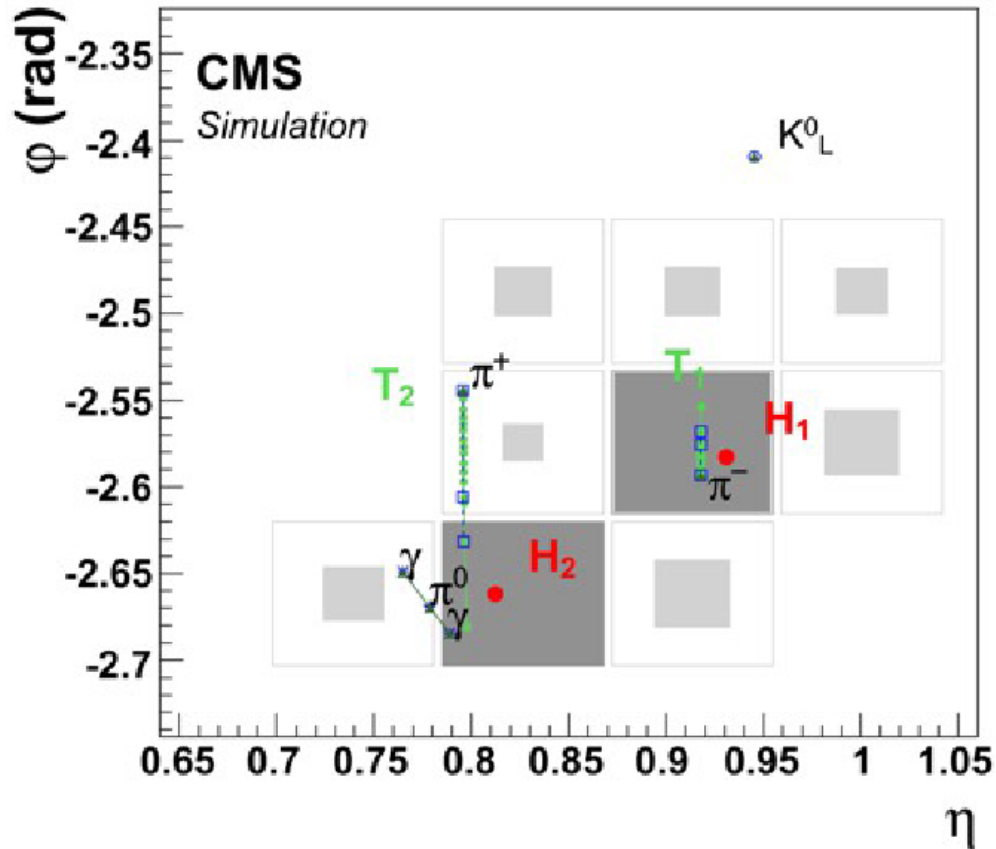
O melhor detector pode ser usado para atribuir a medida final de posição, energia, tempo

No final do algoritmo temos uma lista de diferentes partículas, o seu 4-momento e podemos calcular a energia em falta

# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas

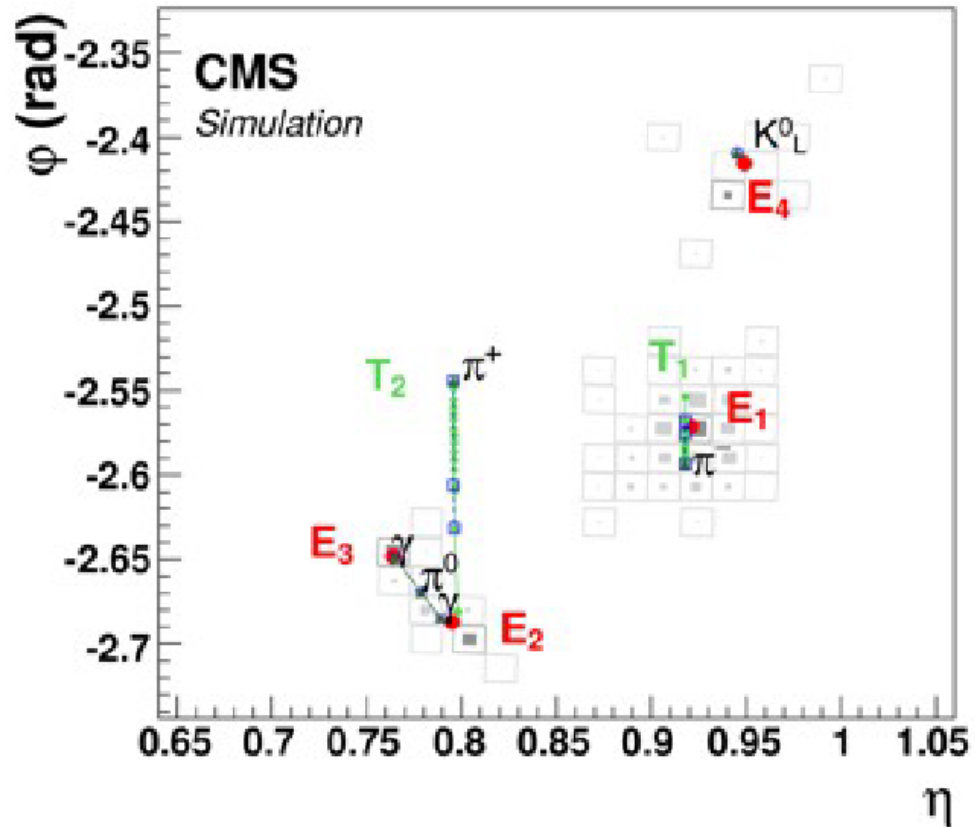


# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas

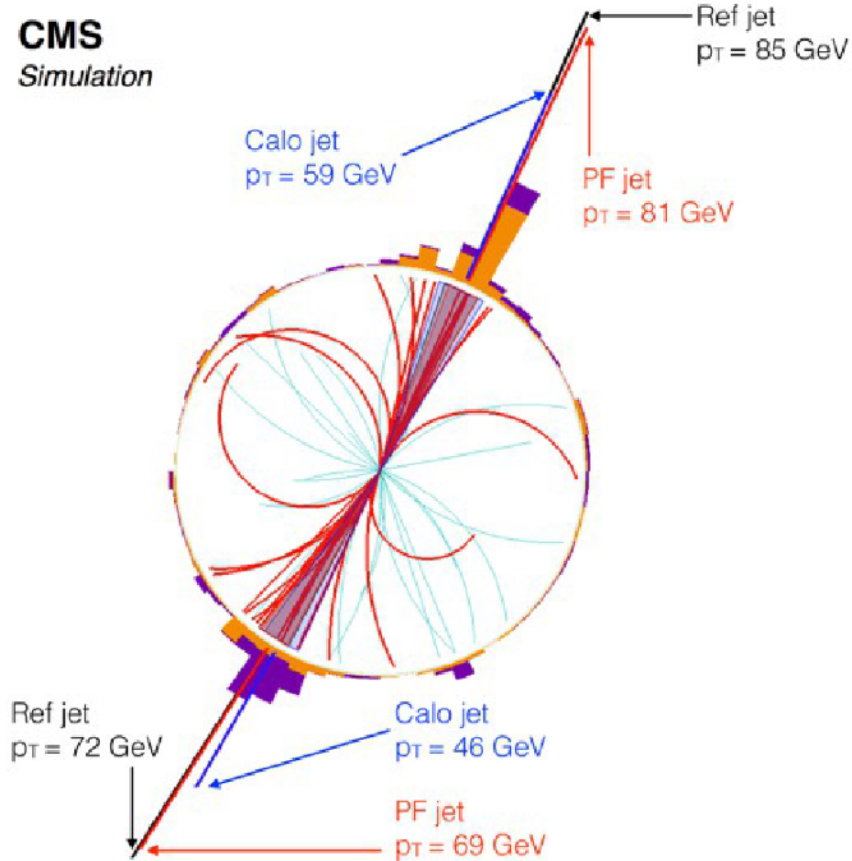




# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas



# Particle flow: paradigma actual de reconstrução



# Inteligência artificial Aprendizagem automatizada: paradigma futuro de reconstrução?

**CMS** *Simulation Preliminary*

