

# Princípios básicos de detectores

Pedro Ferreira da Silva (CERN)

*14ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa*

5 de Setembro de 2022

**Introdução**

**“Revelando” a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

**Conclusões**

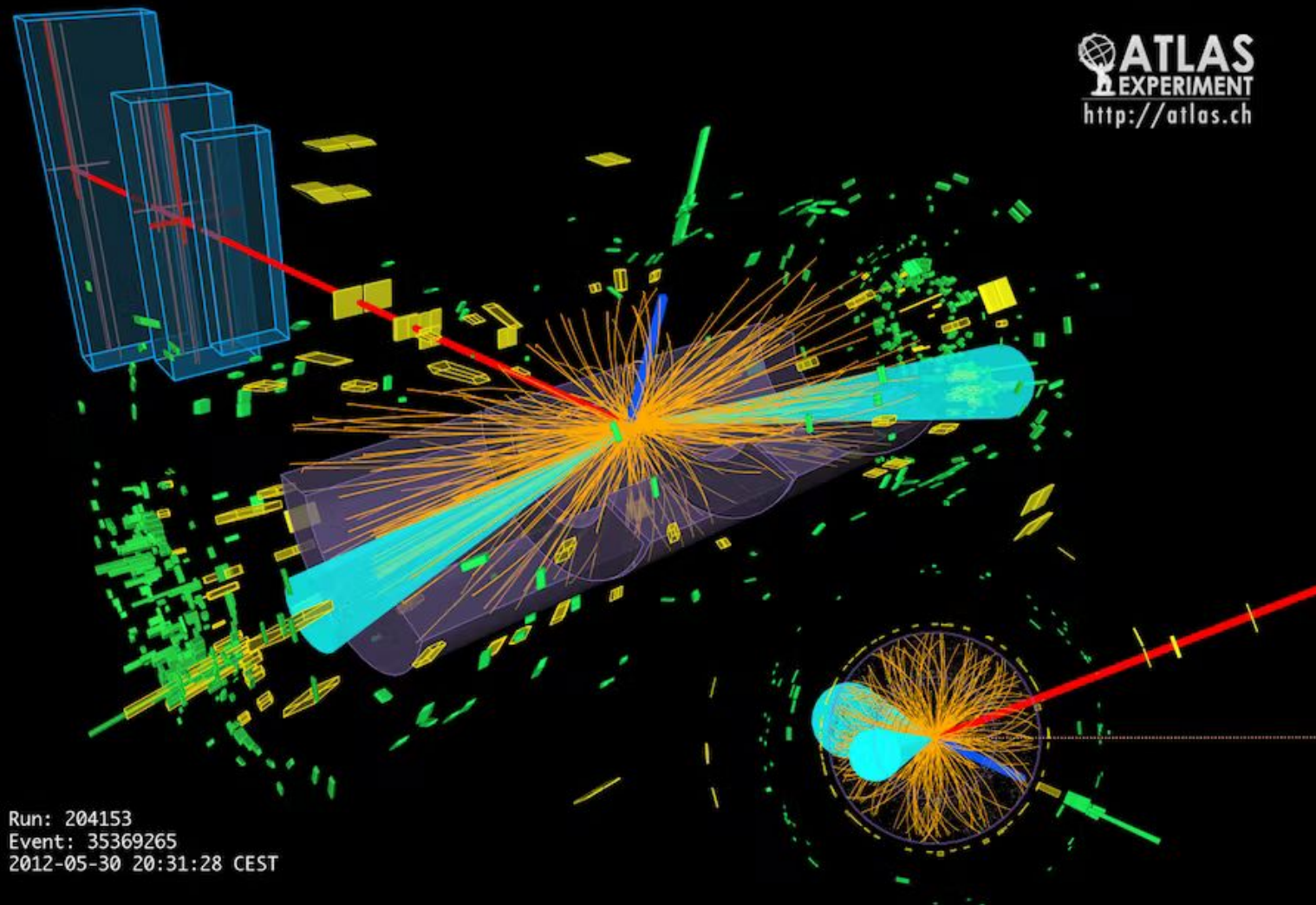
# **Introdução**

**“Revelando” a passagem de partículas**

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

**Como a reconstrução complementa a detecção**

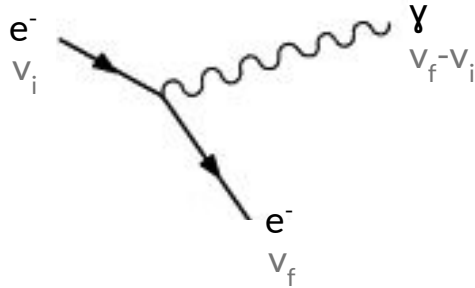
**Conclusões**



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

# 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 exactamente os mesmos resultados

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

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

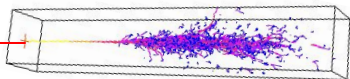
- comportamento essencialmente corpuscular  
 $\Rightarrow$  a incerteza quântica associada ao observador é essencialmente pequena



# Princípios gerais de detecção no LHC

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

Calorimetria

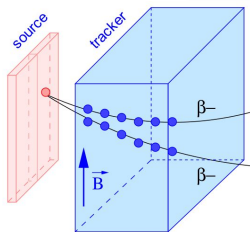


Medição da energia de uma partícula pela absorção completa da cascata de secundários

E x t



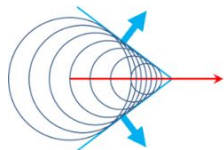
Tracejadores  
+  
campo magnético



Identificação da passagem de uma partícula através de repetidas interações mínimas



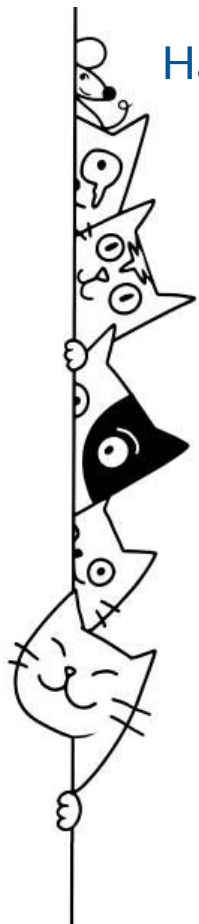
“Velocímetros”



Medidas de velocidade/tempo de voo permitem distinguir diferentes partículas



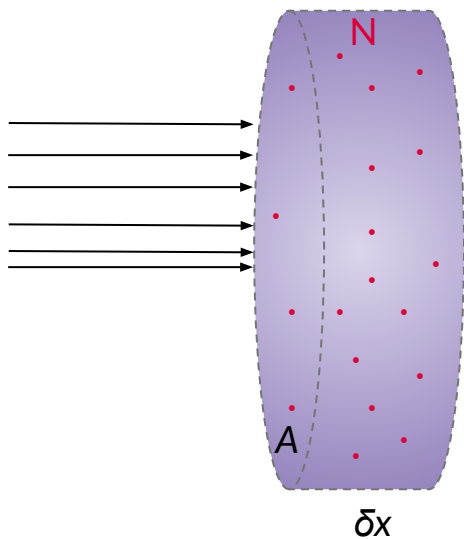
... pela combinação correcta destes elementos atingimos a precisão necessária



# 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*

$$N = N_A \cdot m / M$$



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

massa  
[M]

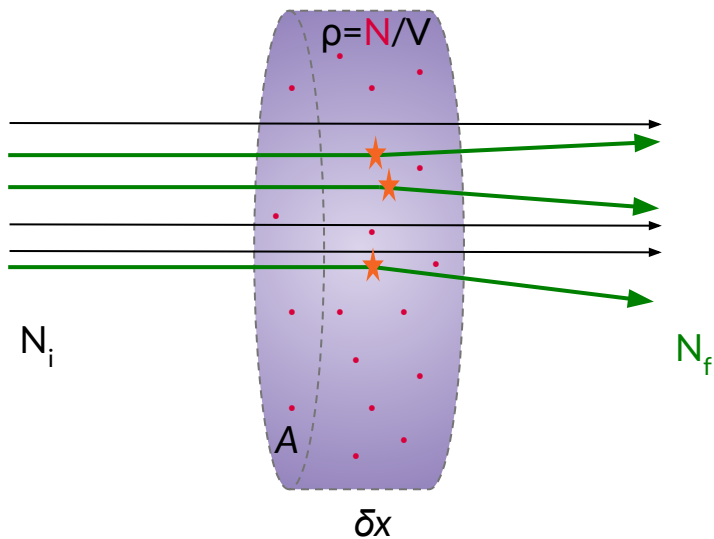
massa atômica /  
molecular  
[M]



# Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende:

- da massa do detector
- da **secção eficaz de interacção** ( $\sigma$ ) 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>]

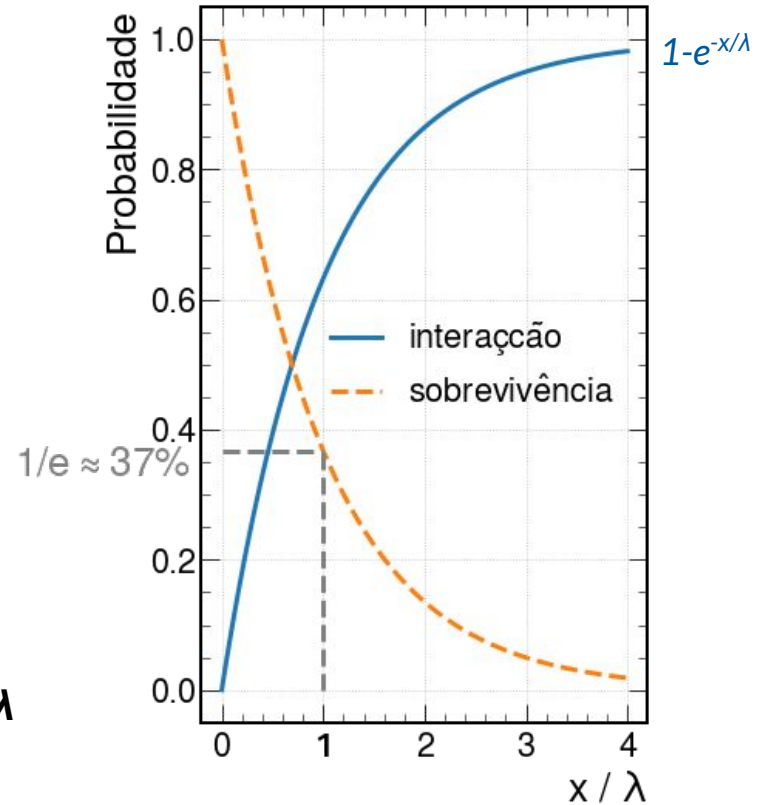
Probabilidade de uma partícula interagir ao percorrer  $\delta x$

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

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

comprimento de interacção [L]

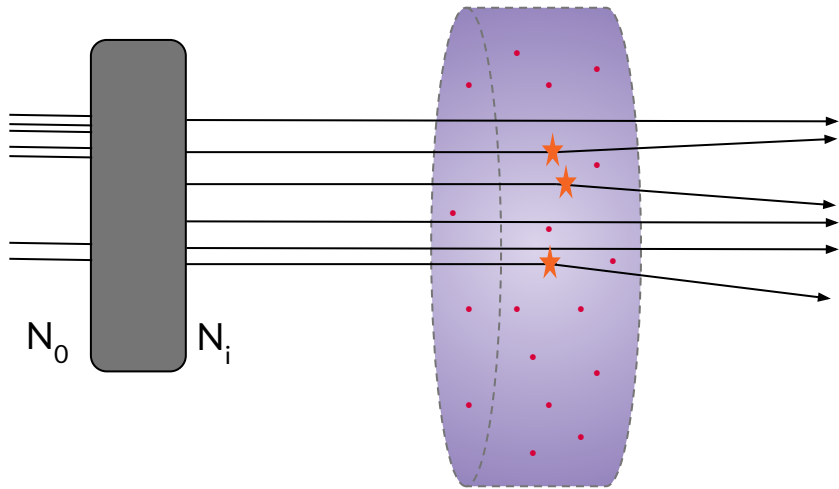
**Após percorrer um comprimento correspondente a  $\lambda$   
o fluxo é atenuado em cerca de 37%**



# 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

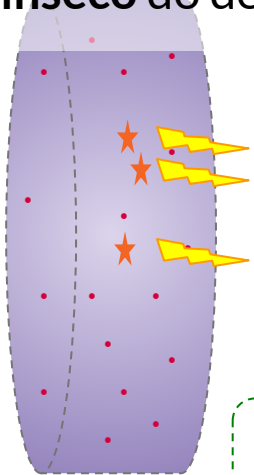


*O material interposto entre a fonte e o detector pode absorver, converter, multiplicar, dispersar, ...*

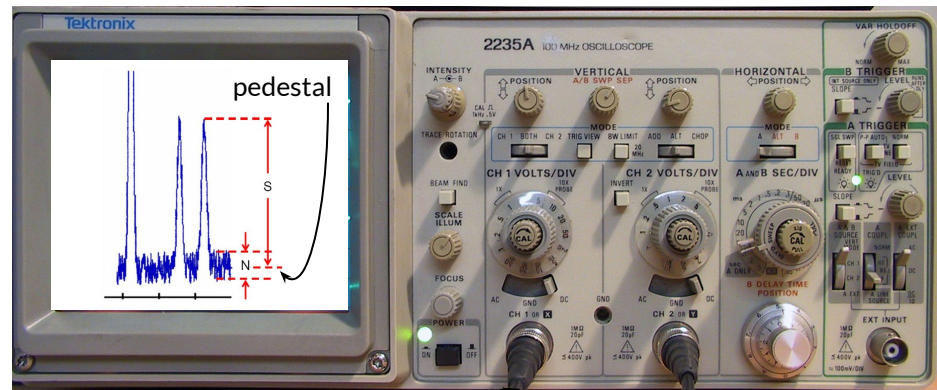
# Características genéricas de um detector

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



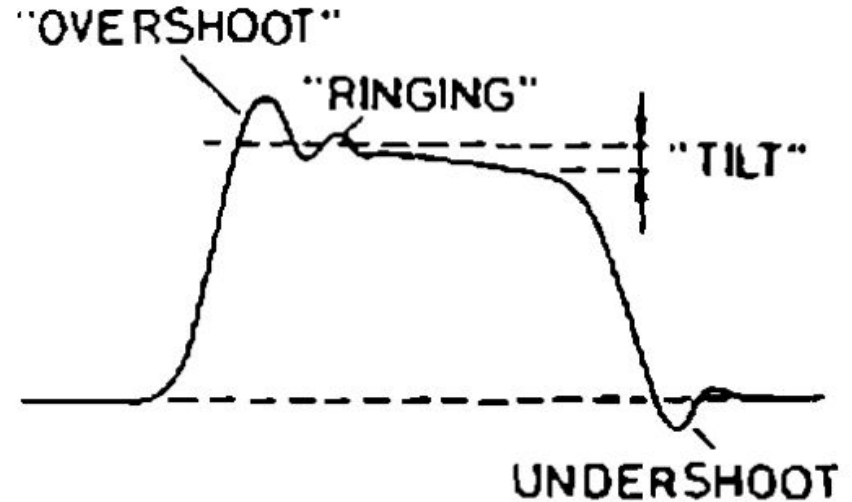
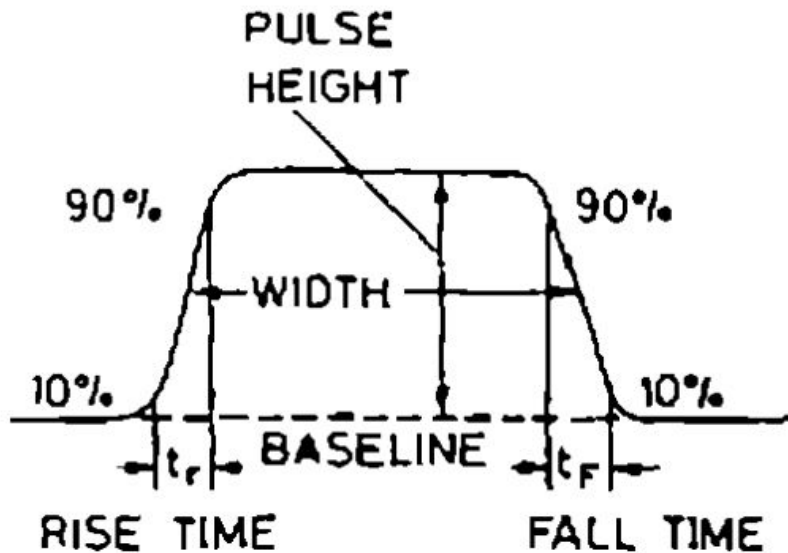
Electrónica de leitura (frontend)



# Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

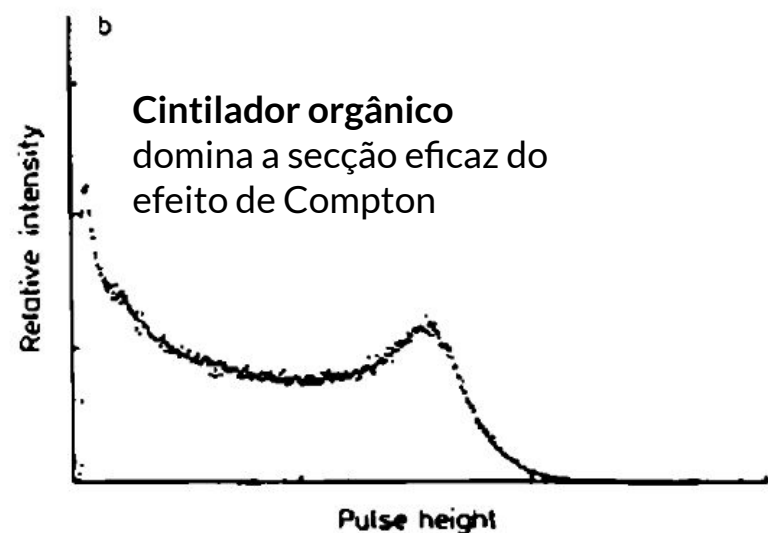
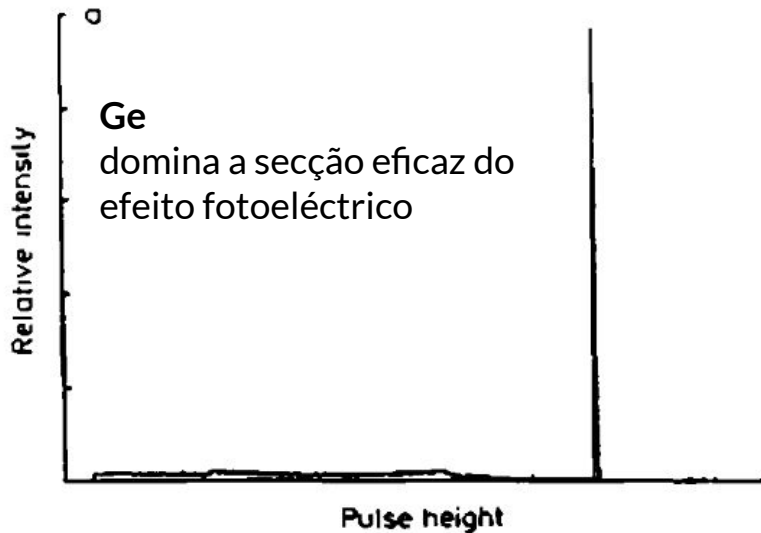
- **a resposta** : tipicamente impulso elétrico gerado pela passagem de radiação



# Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

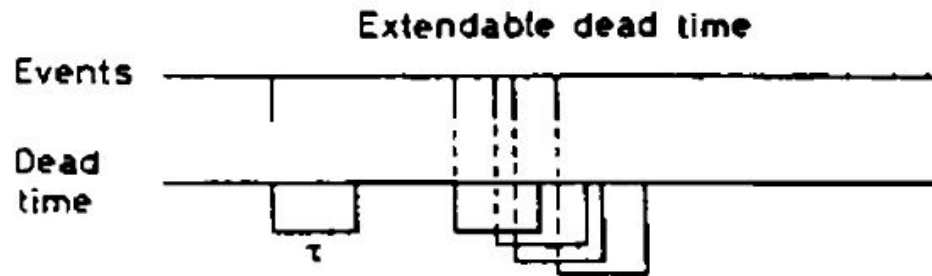
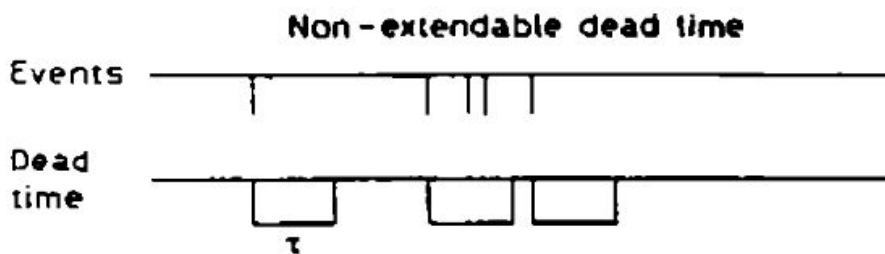
- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
- **a resolução**: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução  
o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial



# Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

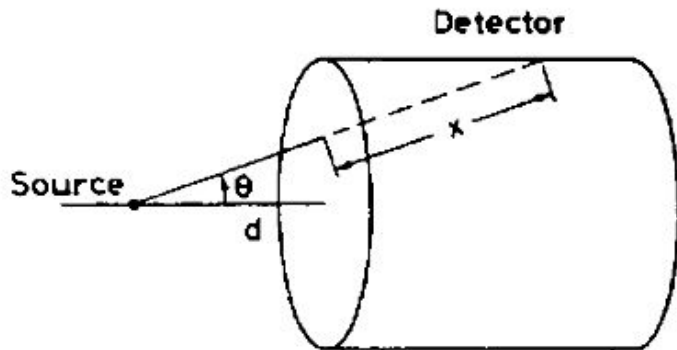
- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
- a resolução: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução  
o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial
- **o tempo de resposta**: determina a eficiência em tempo de um detector  
pode levar a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

**“Revelando” a passagem de partículas**

Alguns exemplos de detectores do LHC

Como a reconstrução complementa a detecção

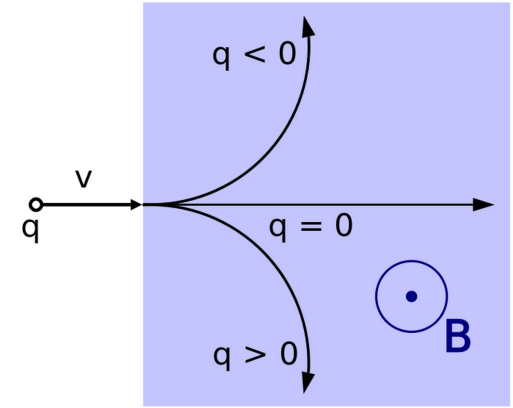
Conclusões

# Campo magnético: no coração de uma experiência

Cargas eléctricas em movimento são sensíveis aos campos magnéticos

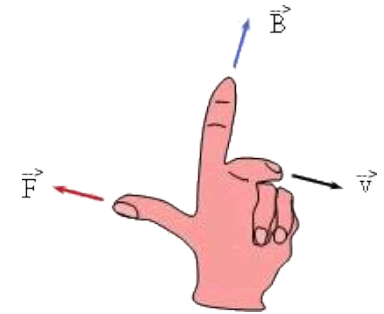
A partir da trajectória de uma partícula sujeita a B:

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

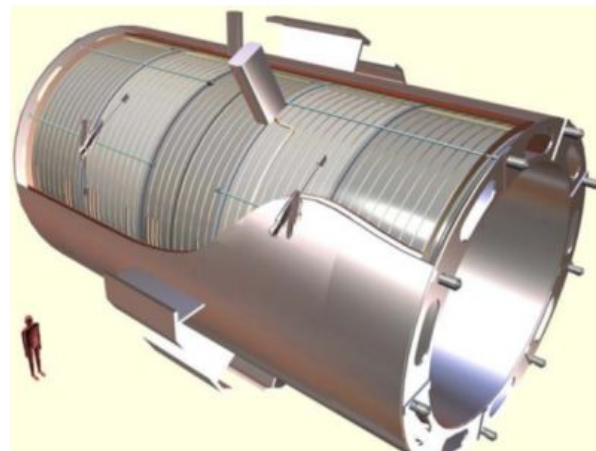
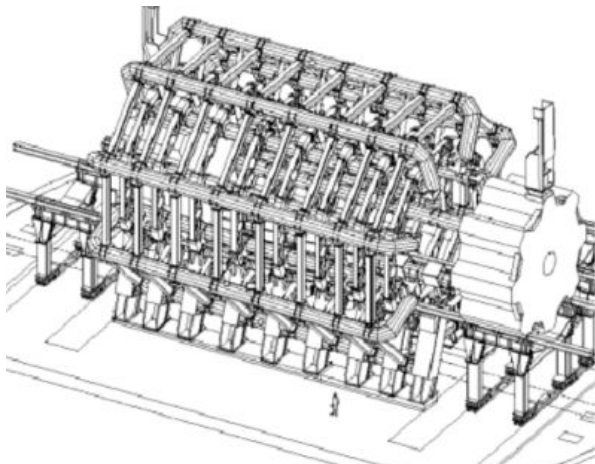


$$p \cos \lambda = 0.3 z B R$$

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

*B* 0.6 T (8 bobinas, 2x2x30 voltas)

4T (1 bobina, 2168 voltas/m)

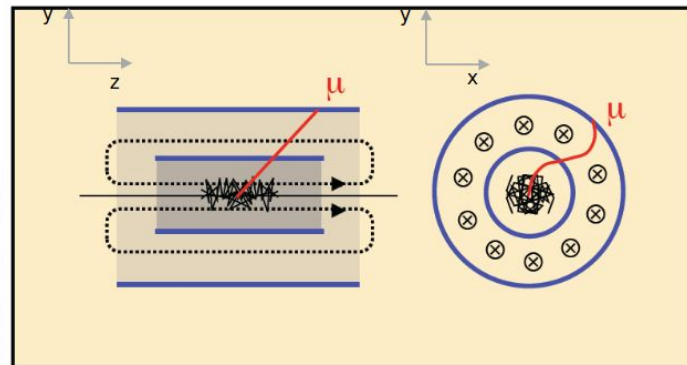
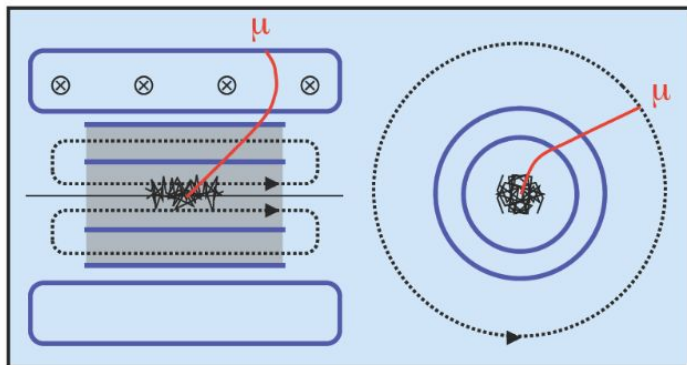
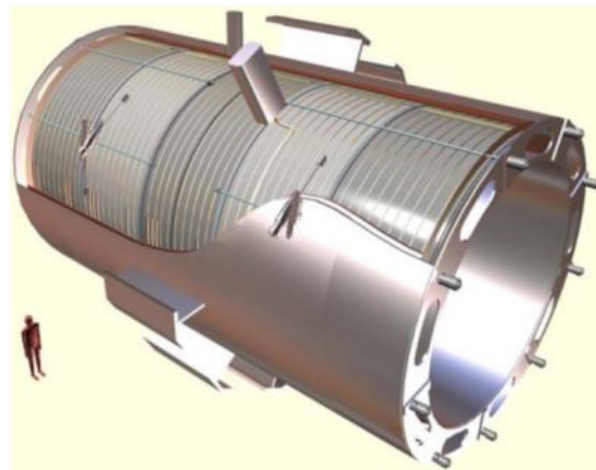
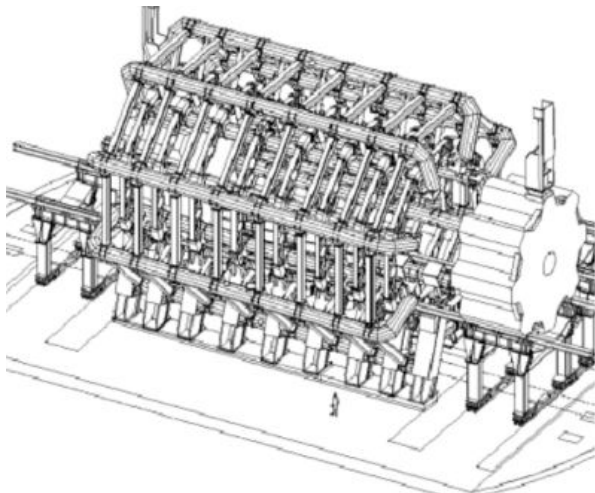
*Desafios* alinhamento espacial  
1.5 GJ energia armazenada

enrolamento do cabo  
2.7 GJ energia armazenada

*Desvantagens* campo toroidal limita capacidades de apontar para origem  
necessita complemento de um solenóide interno (2T)  
requer espaço

espaço e tecnologias limitadas para calorimetria  
curvatura pequena a ângulos maiores

# Campos magnéticos nas grandes experiências



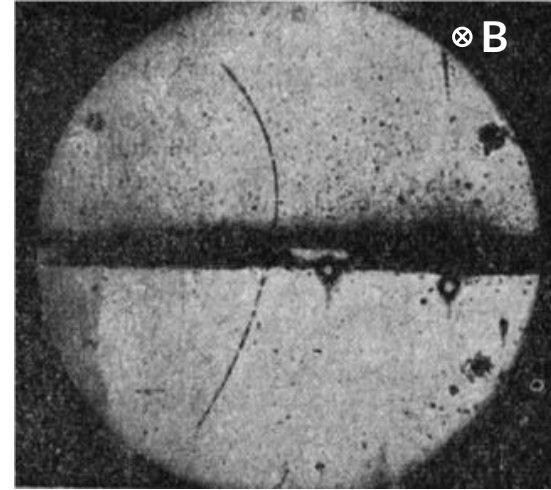
# Como ver a trajetória das partículas?



## Câmara de nuvens

(Wilson, 1911; Prémio Nobel 1927)

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

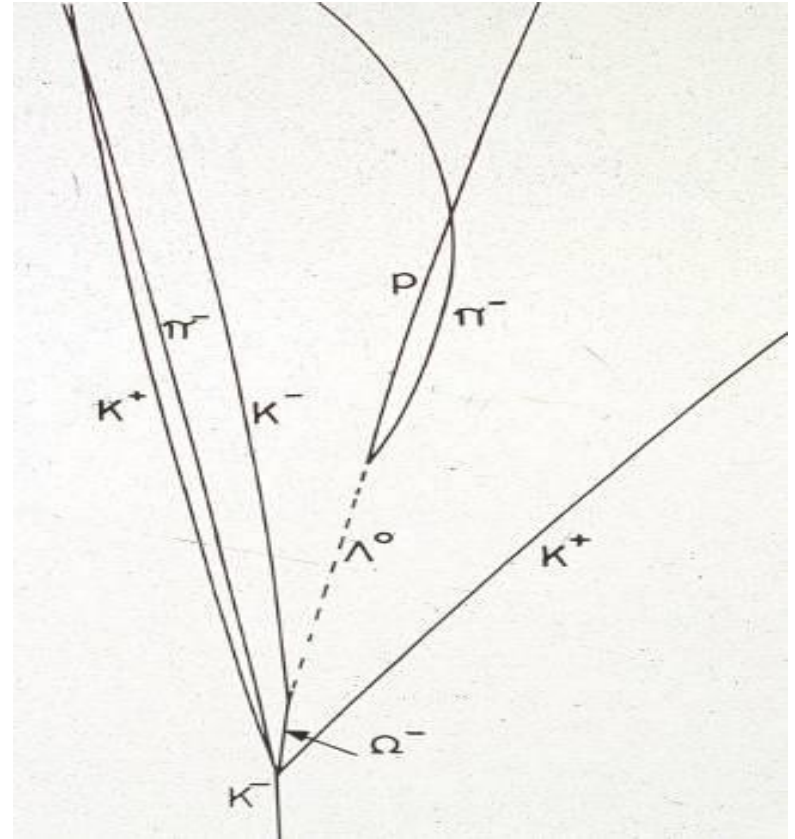


## Descoberta do positrão ( $e^+$ )

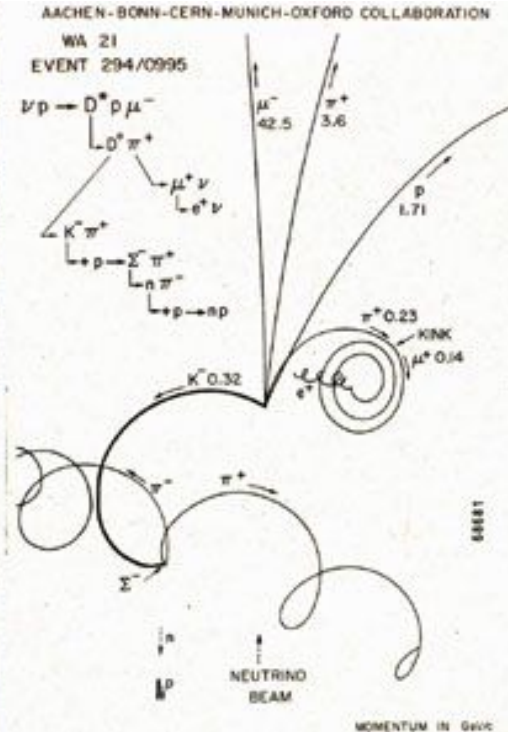
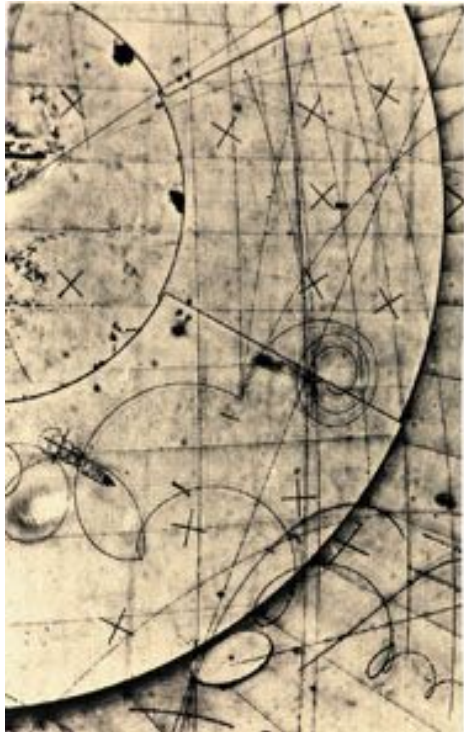
(Anderson, 1932; Prémio Nobel 1936)

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

# Os primeiros reveladores de partículas



# Um exemplo histórico: Gargamelle



Em 1973 a experiência relatou a evidência de existência de correntes neutras - [link](#).



# Câmaras de fios (proportional multi-wire chambers)



Criada em 1968 por Charpak  
(Prémio Nobel 1992)

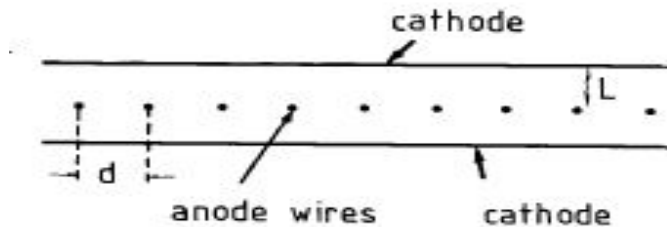
Transcrição do analógico para o digital.

Rapidez e baixo custo.

Alta tensão aplicada a cada fio imerso na câmara de gás.

3 mm de espaçamento entre os fios.

As cargas de ionização colectadas pelo fio mais próximo permitem atingir resolução de cerca de 100ns em tempo.

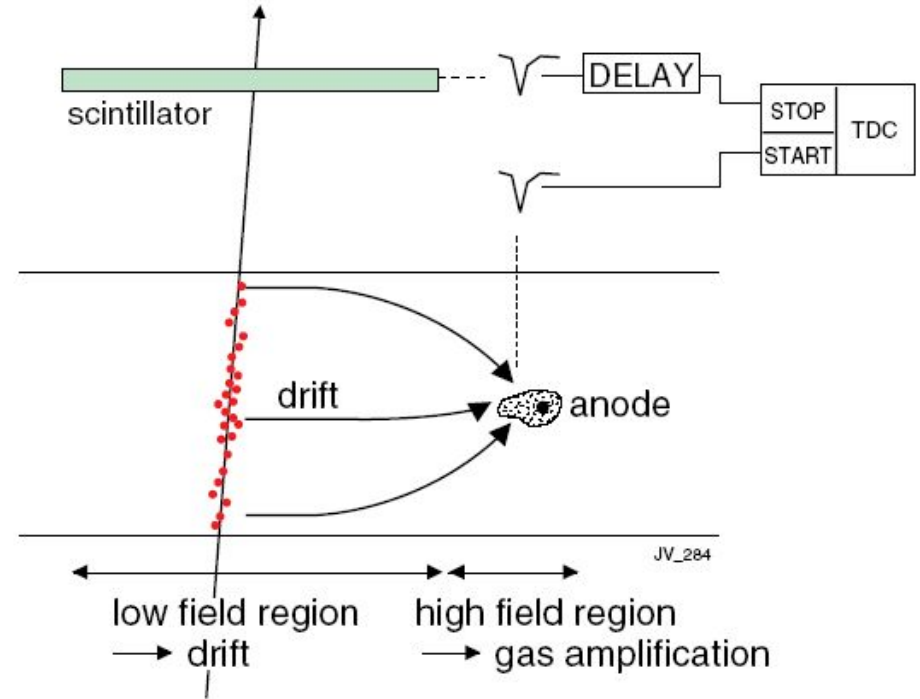


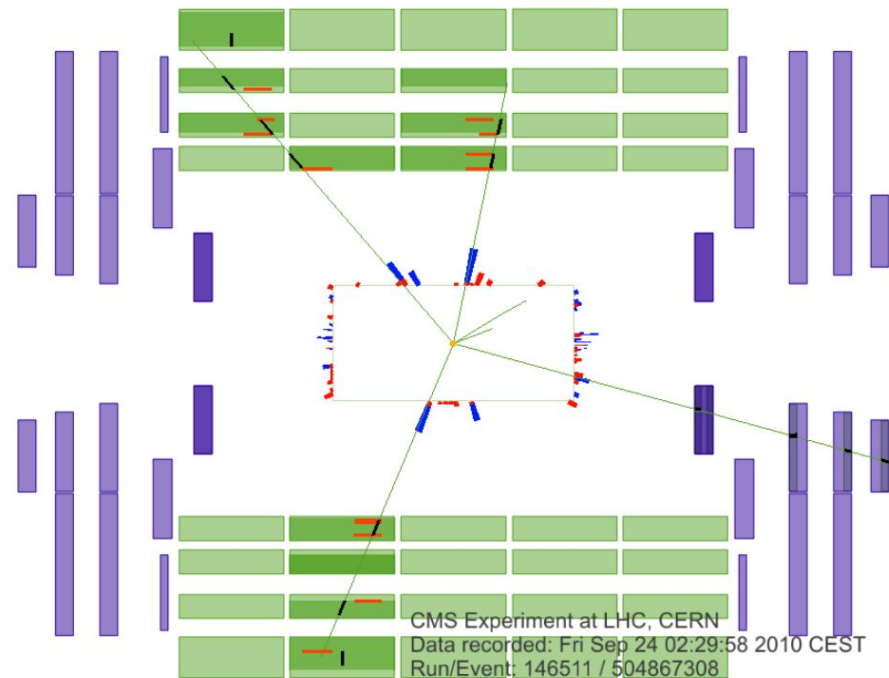
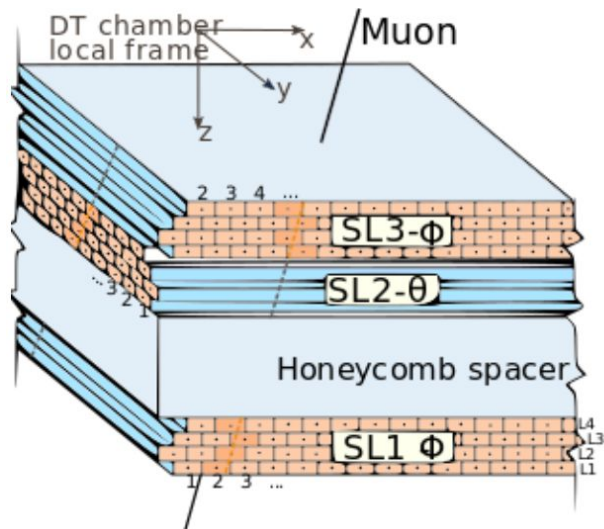
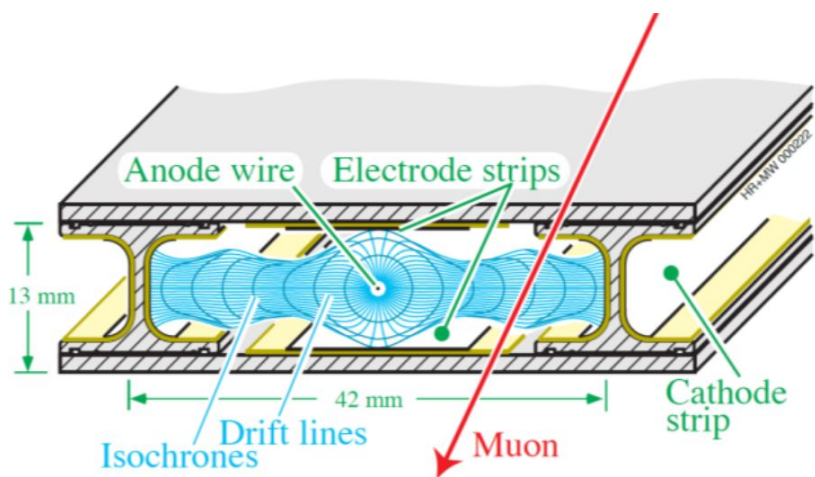
# Câmaras de deriva (drift chambers)

O espaçamento entre anodos nas câmaras de fios e um factor limitativo

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

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  $\mu\text{m}$**

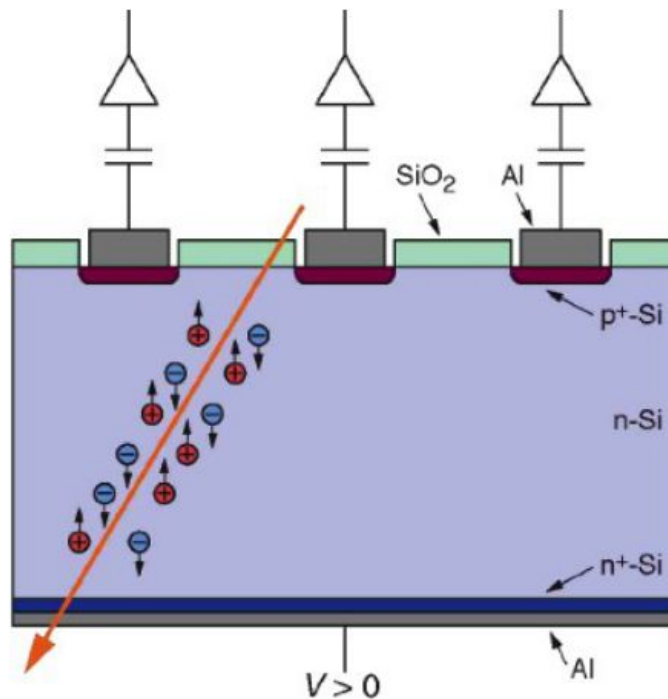
# Detectores de estado sólido I

Princípio de funcionamento semelhante a câmara de gás

**Energia de ionização cria pares electrão-buraco** que  
quais derivam para o catodo/anodo

A carga colectada é proporcional à energia depositada

	Gás		Estado sólido	
<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



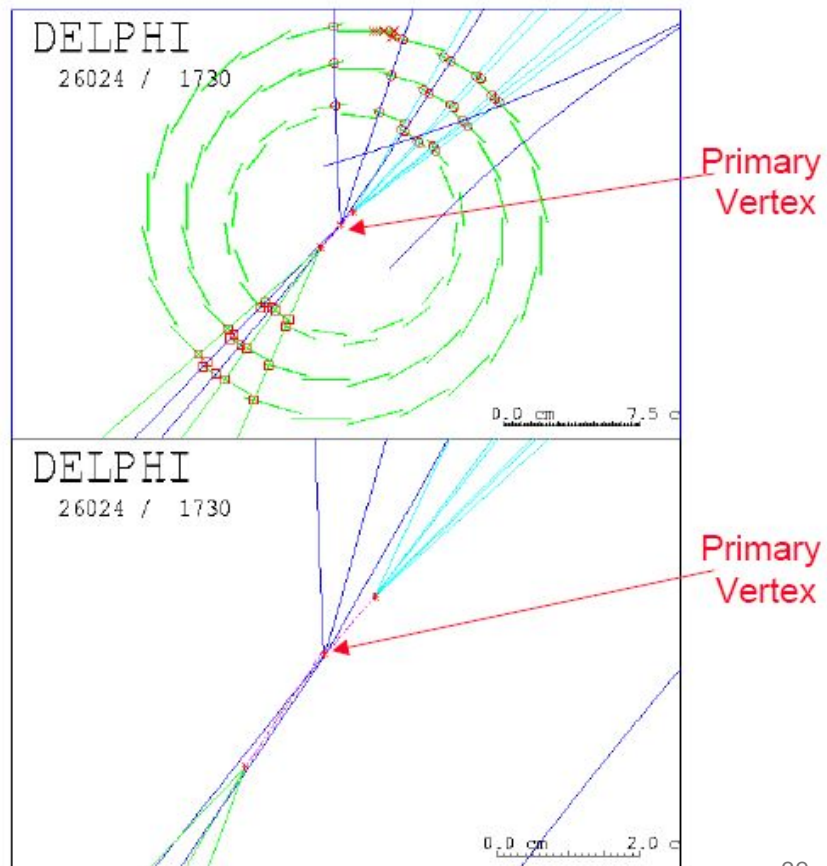
# Detectores de estado sólido II

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

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

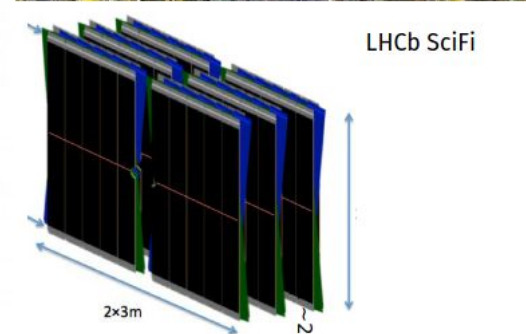
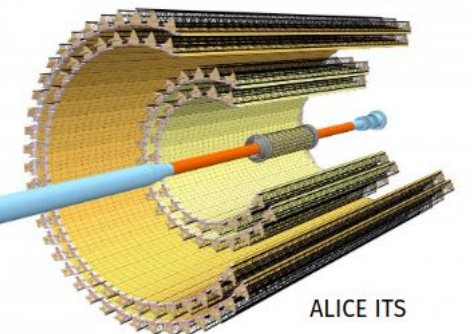
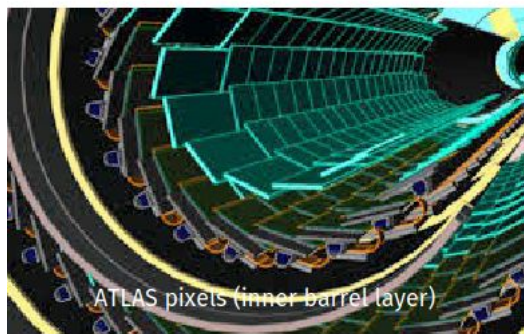
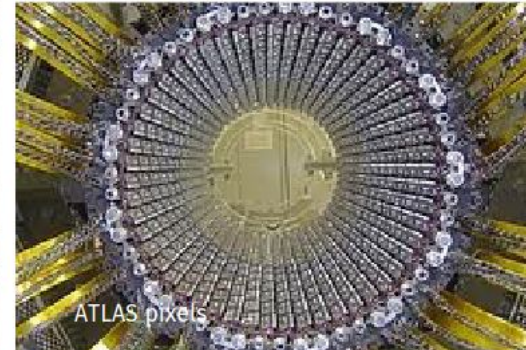
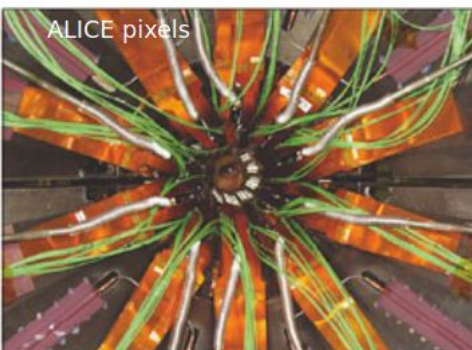
Interacção mínima com as partículas que os atravessam

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

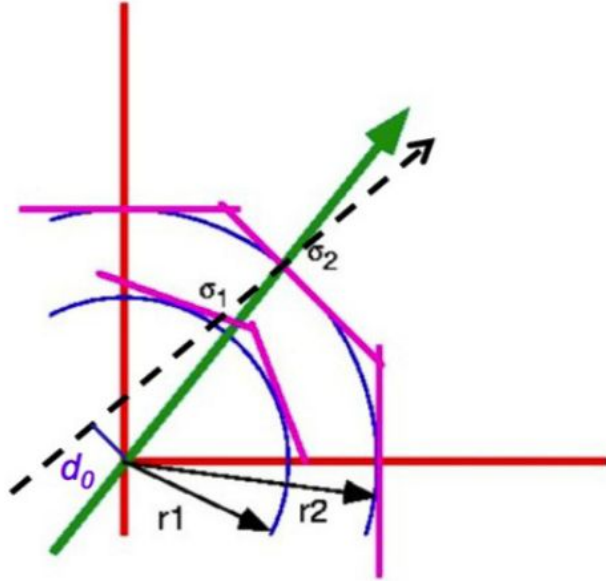


# Complexidade crescente dos detectores de Si

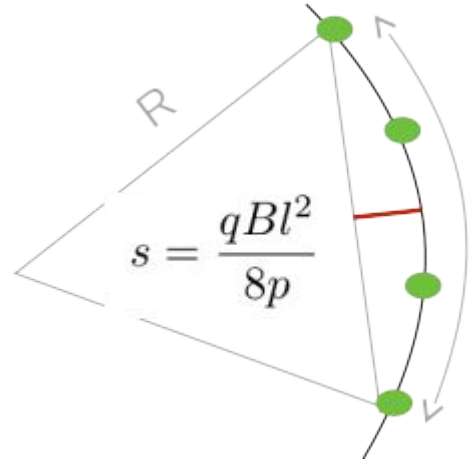
Experiência	Detectores	Canais [ $10^3$ ]	Área de Si [ $m^2$ ]
<i>Aleph (LEP)</i>	144	95	0.49
<i>CDF (Tevatron)</i>	720	405	1.9
<i>DO (Tevatron)</i>	768	793	4.7
<i>AMS II</i>	2300	196	6.5
<i>ATLAS (LHC)</i>	4088	6'300	61
<i>CMS (LHC)I</i>	15148	10'000	200



# Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias I



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

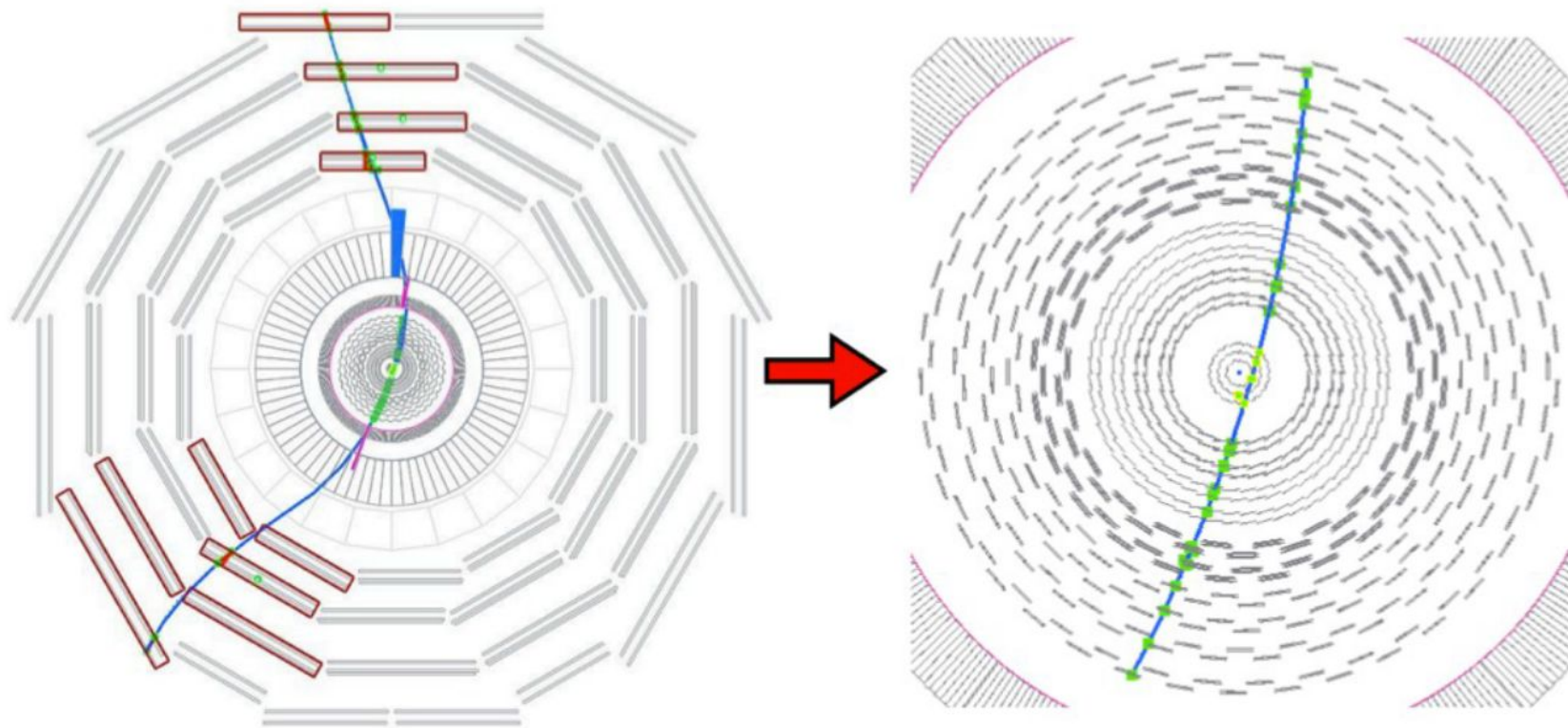


$$s = \frac{qBl^2}{8p}$$

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

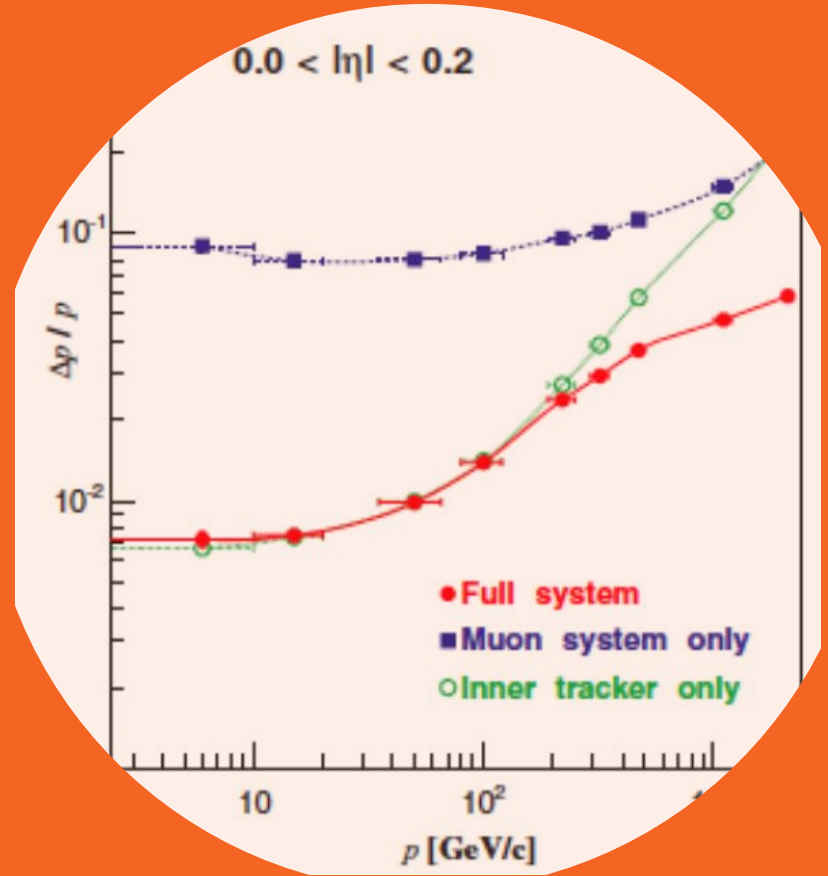


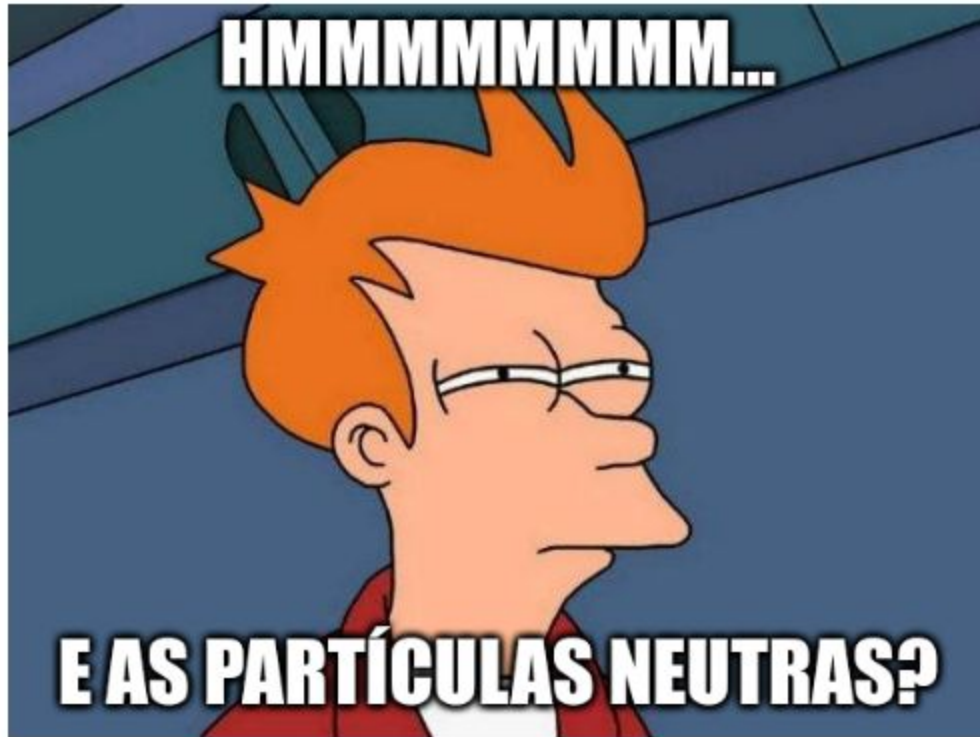
# Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias II



Revelando a passagem de partículas

# Ligando os pontos: reconstrução de trajectórias III





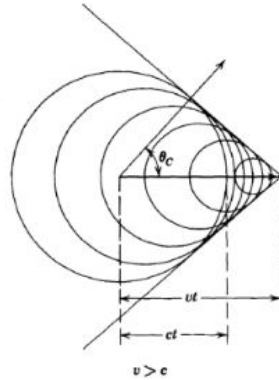
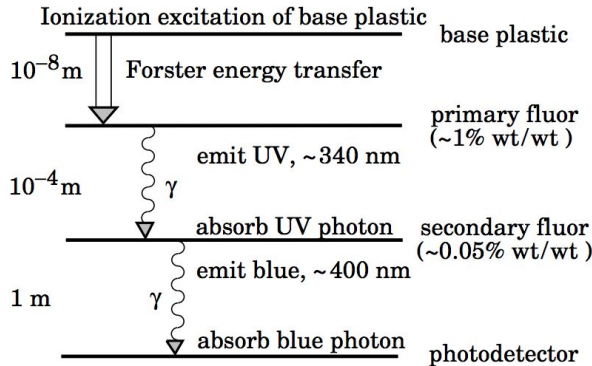
... em última instância temos de as converter em partículas ionizantes

# Princípios de calorimetria

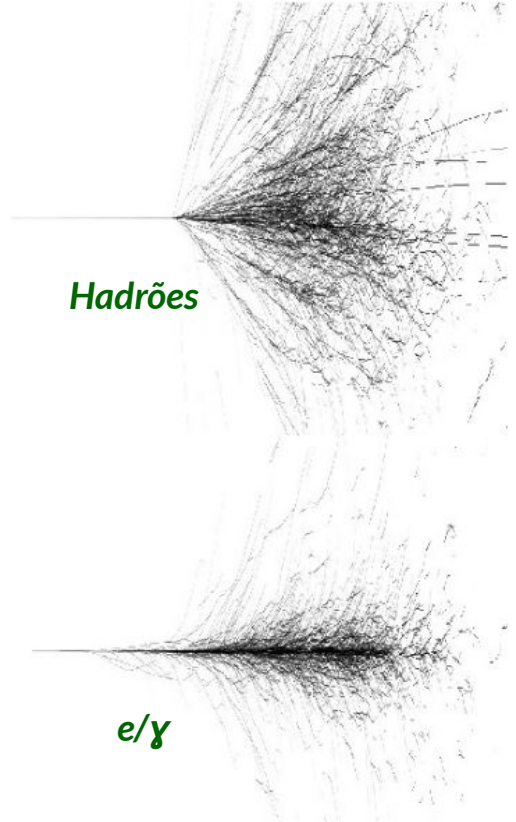
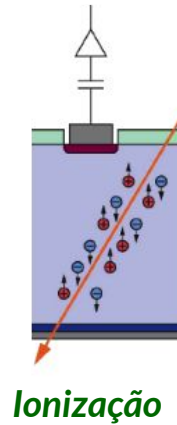
As partículas precisam de interagir na matéria  $\Rightarrow$  interacção destrutiva

- 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

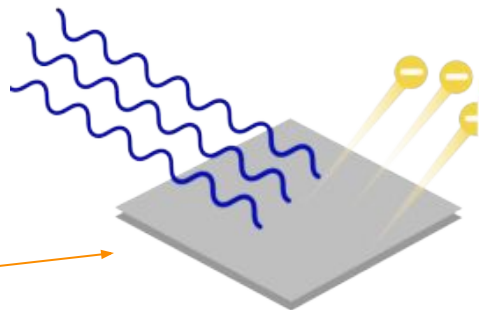
A alta energia os fótons e electrões interagem com núcleos e electrões atómicos

- ionização
- bremsstrahlung

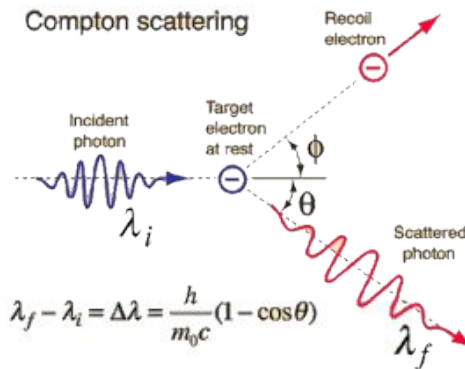
- efeito fotoeléctrico
- dispersão de Compton
- produção de pares

e

γ

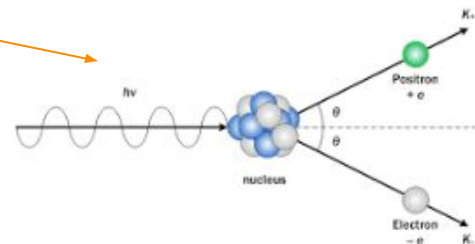


Compton scattering



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

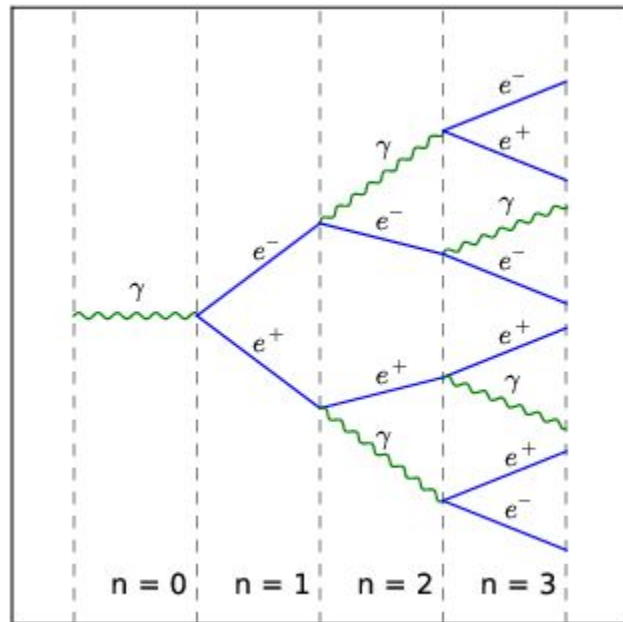
- $E \rightarrow E/2 \rightarrow E/4 \rightarrow \dots$

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  $E_c$

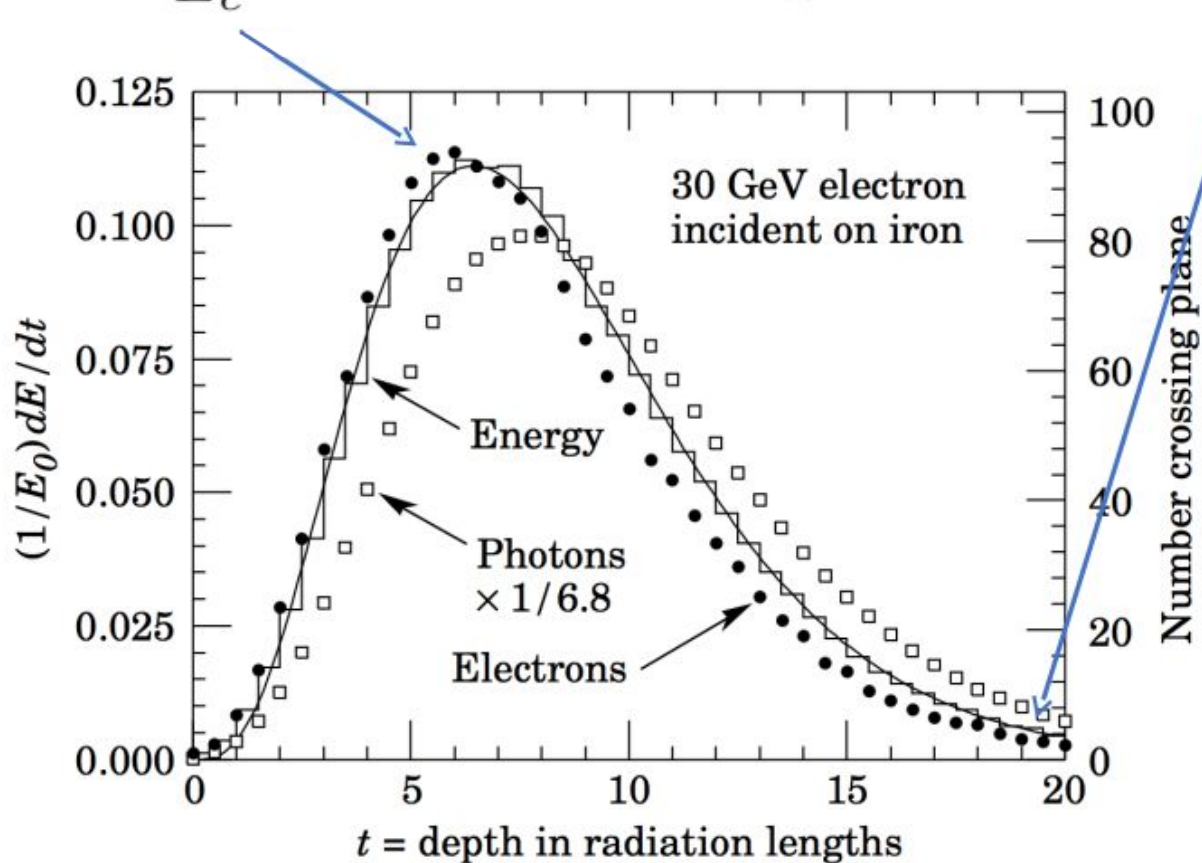
- profundidade do máximo:  $x_{\max} \propto X_0 \log_2 E / E_c$
- $N_{\max} \sim E_0 / E_c$



Este modelo simples não anda longe da realidade!

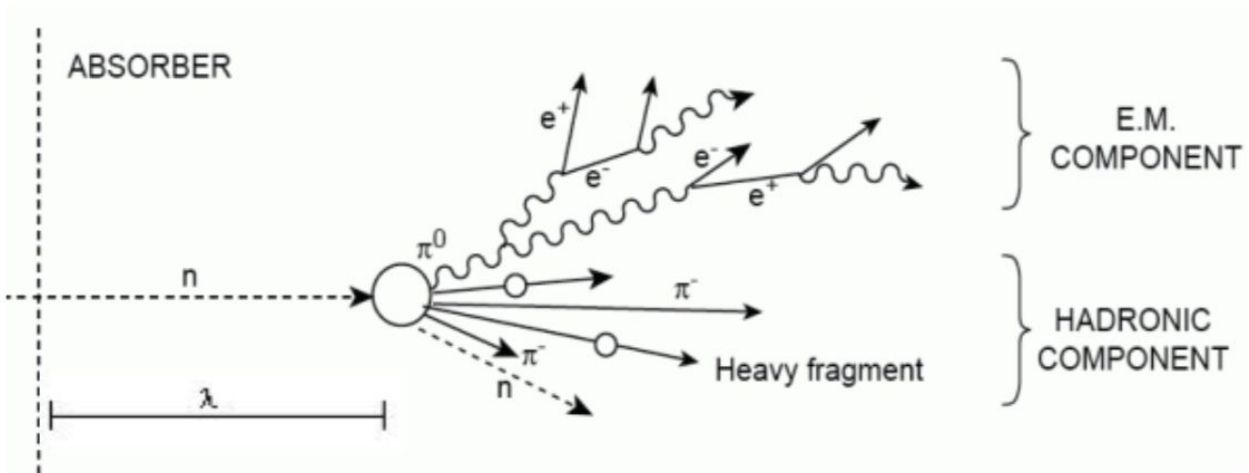
$$t_{max} \approx \log \frac{E}{E_c} \pm 0.5$$

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





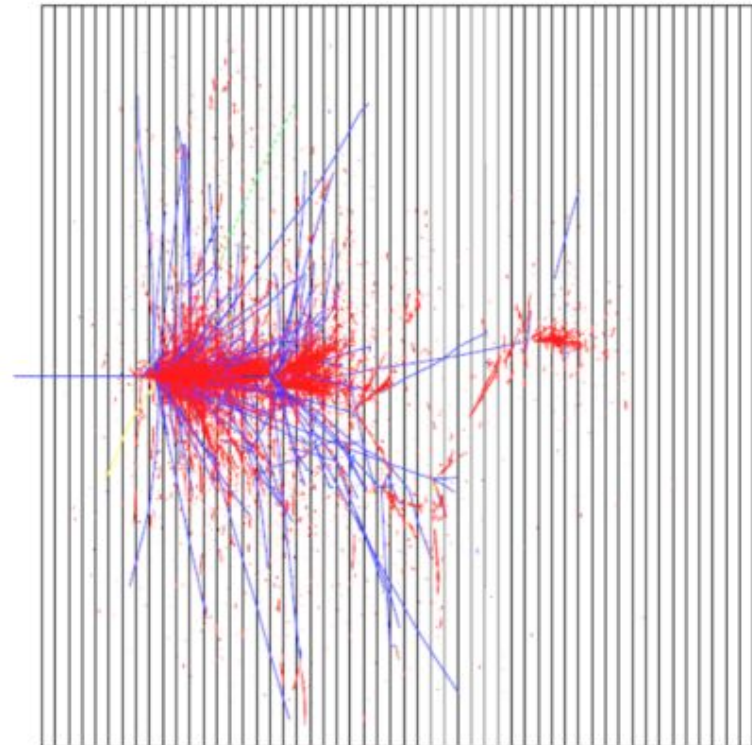
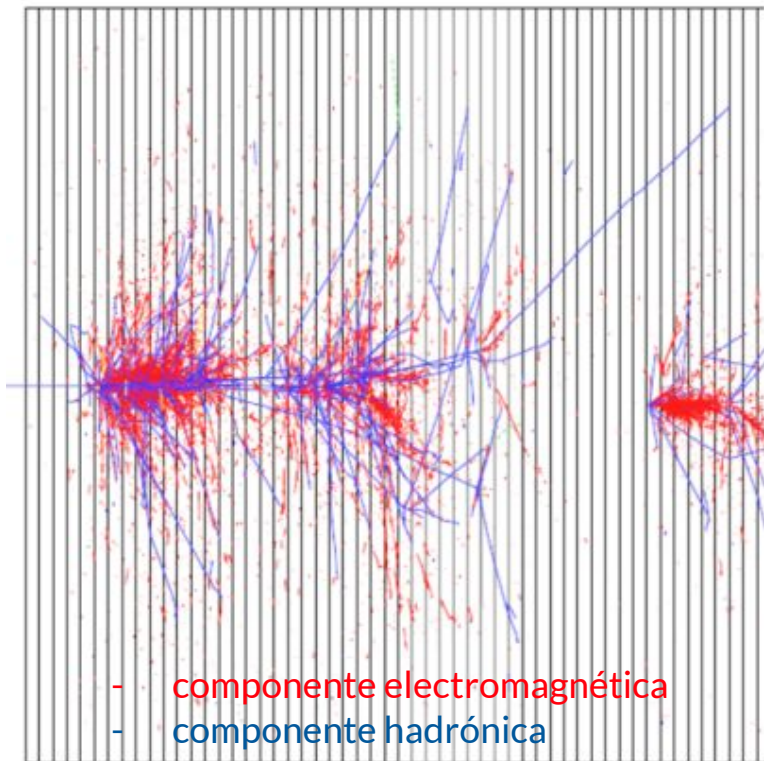
# Cascatas hadrónicas



## As reacções nucleares são mais complexas

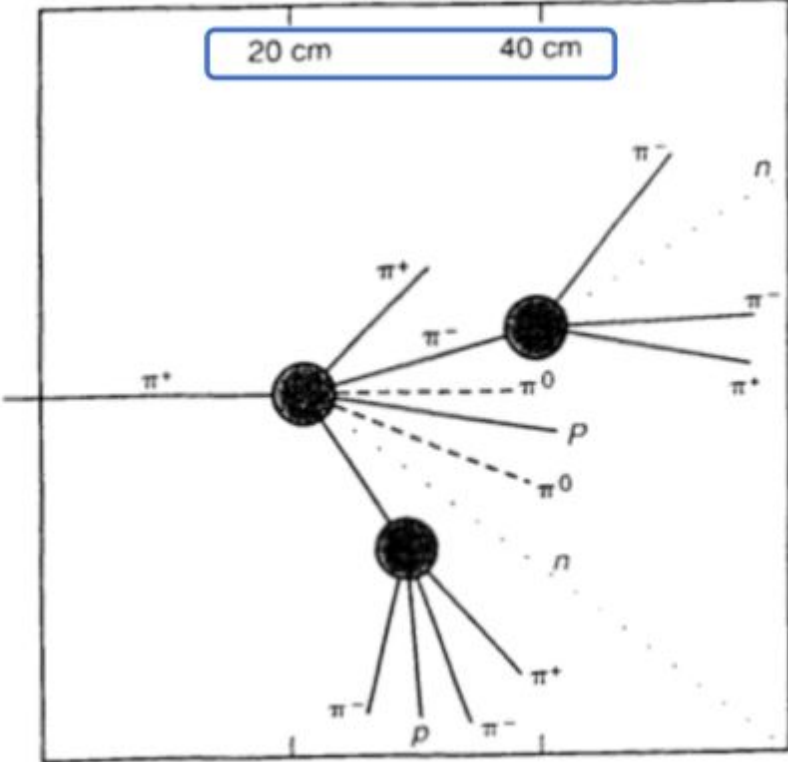
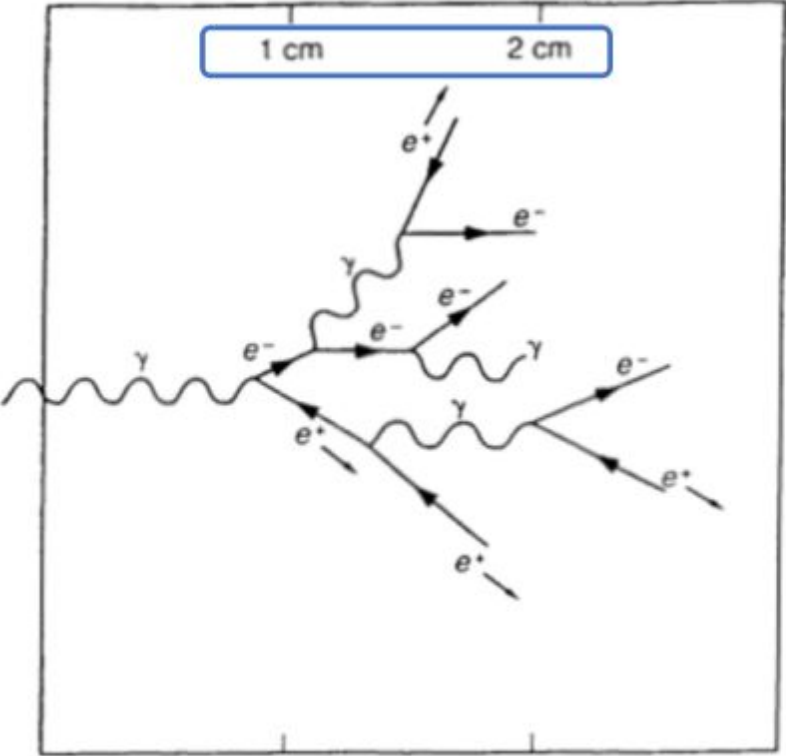
- dependem da energia, da partícula incidente, dos alvos, etc.
- os produtos são uma mistura de fragmentos electromagnéticos e novos hadrões
- contenção das cascatas requiere uma massa elevada no calorímetro

# Cascatas hadrónicas

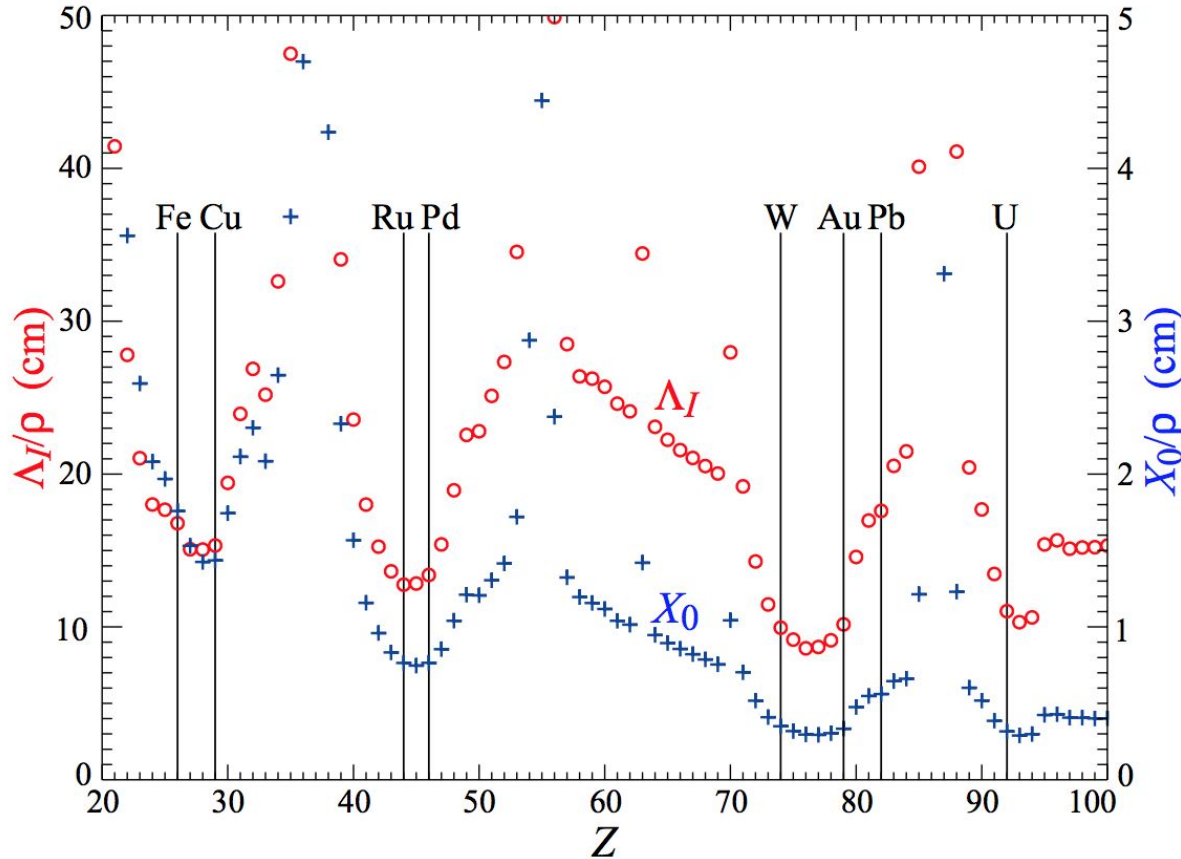


**Não há duas semelhantes: modelos associados com incertezas significativas!**

# Cascatas hadrônicas - contenção



# Materiais tipicamente usados em absorvedores



Quanto menores forem os comprimentos de interacção nuclear e de radiação melhor!

Custo, activação radioactiva, maleabilidade e facilidade de corte são alguns dos pontos a considerar.

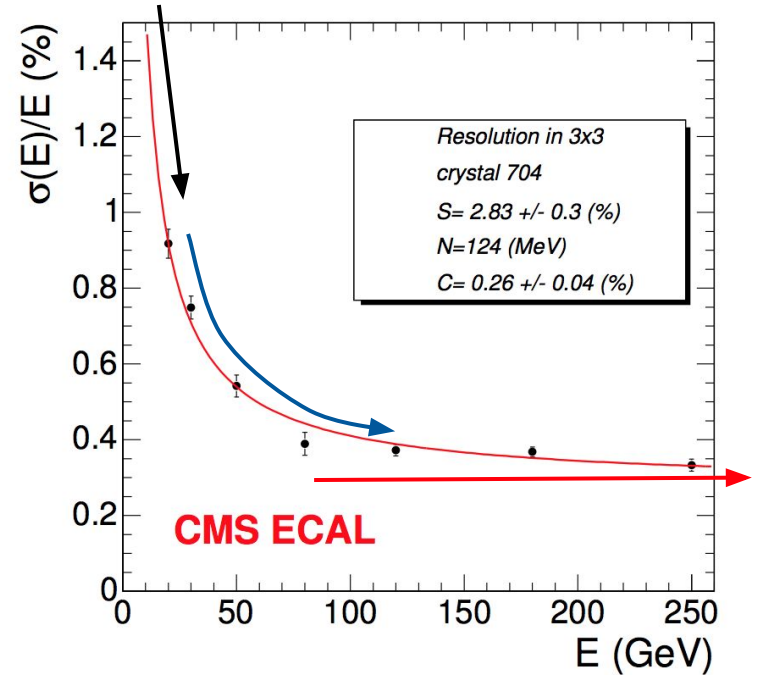
# Modelo de resolução calorimétrica

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

**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.



# Modelo de resolução calorimétrica

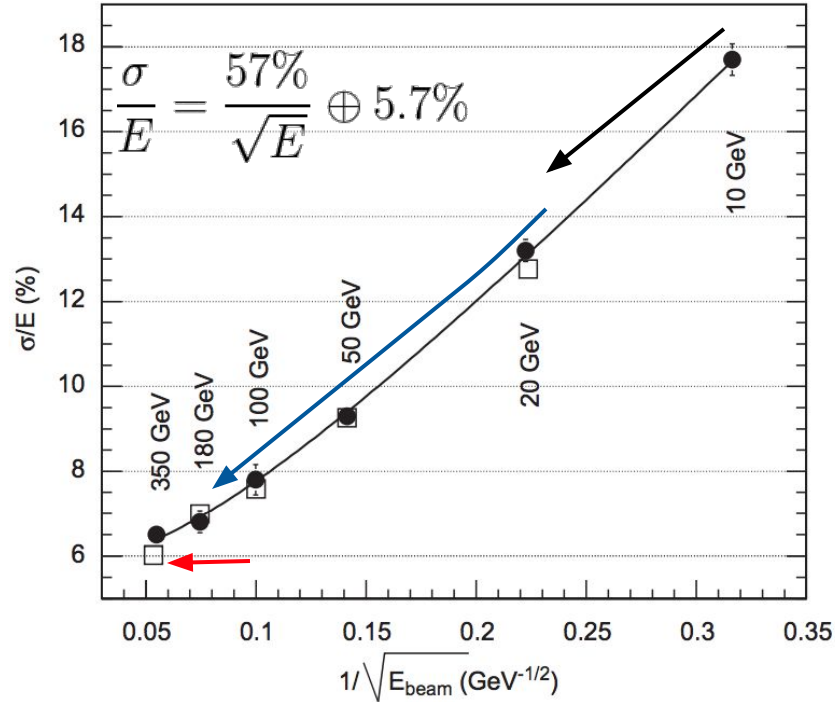
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

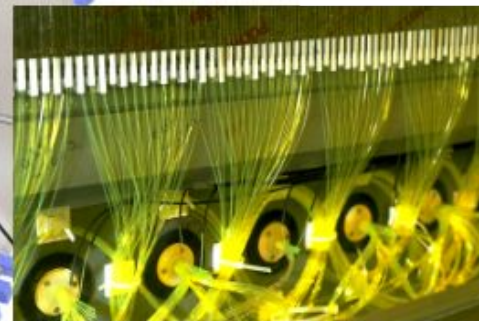
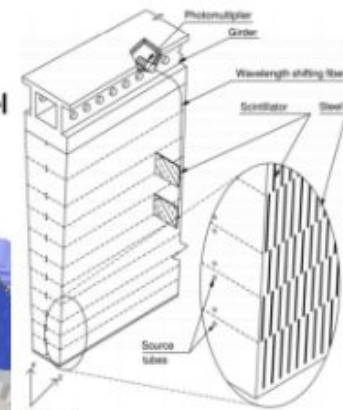
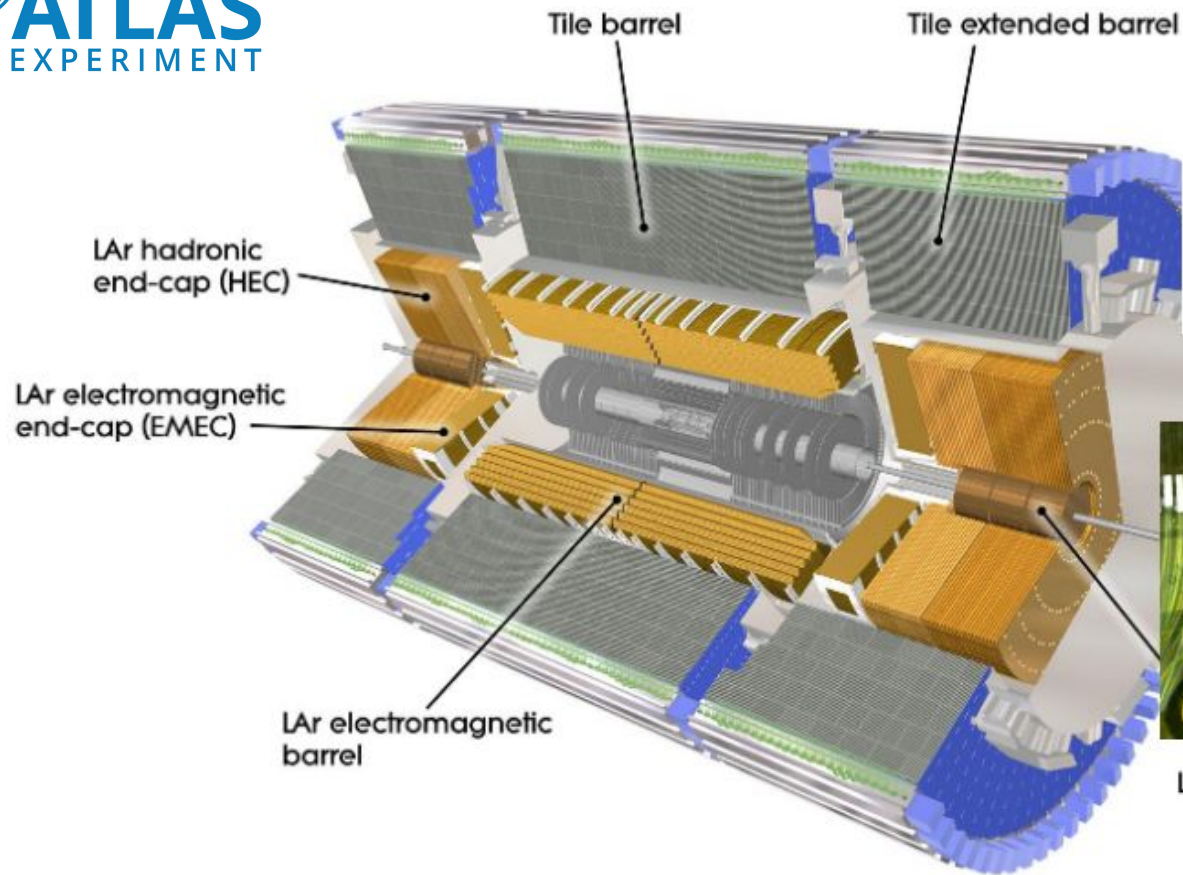
**termo estocástico** - relacionado com as flutuações no desenvolvimento da cascata

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

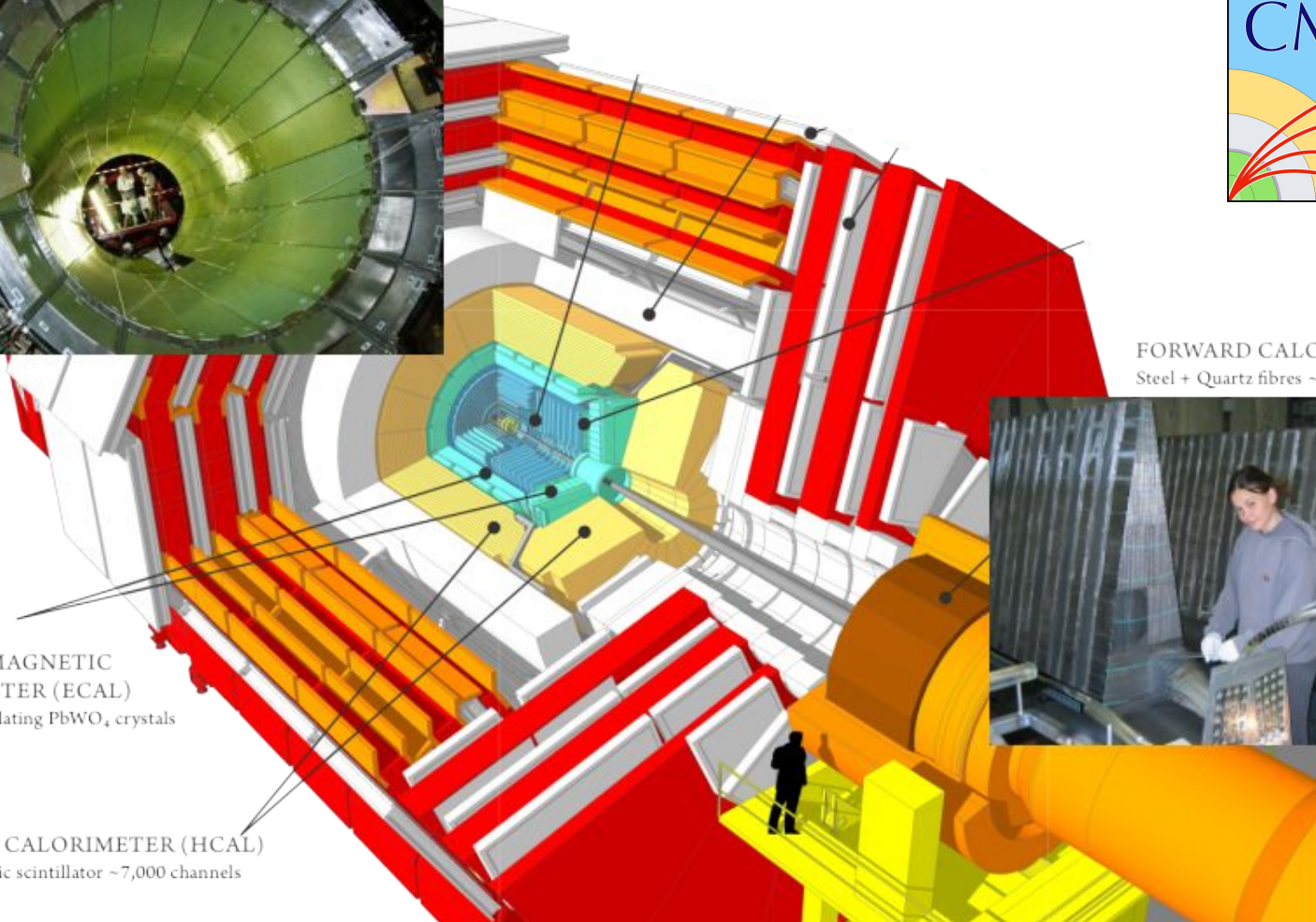
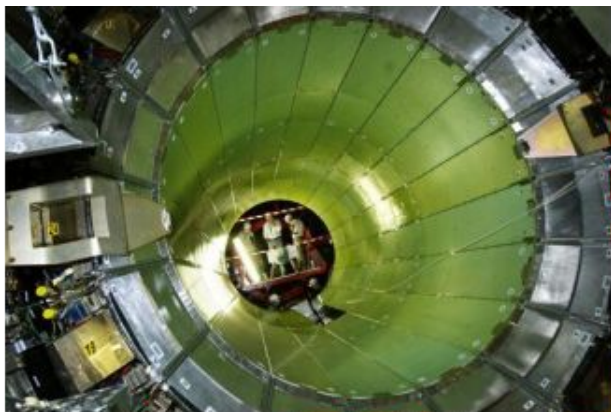
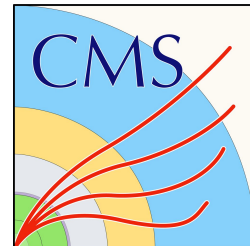
**termo constante** - normalmente devido a falta de contenção da energia das cascatas energéticas, danos de radiação, etc.

ATLAS - TileCal





LAr forward (FCal)



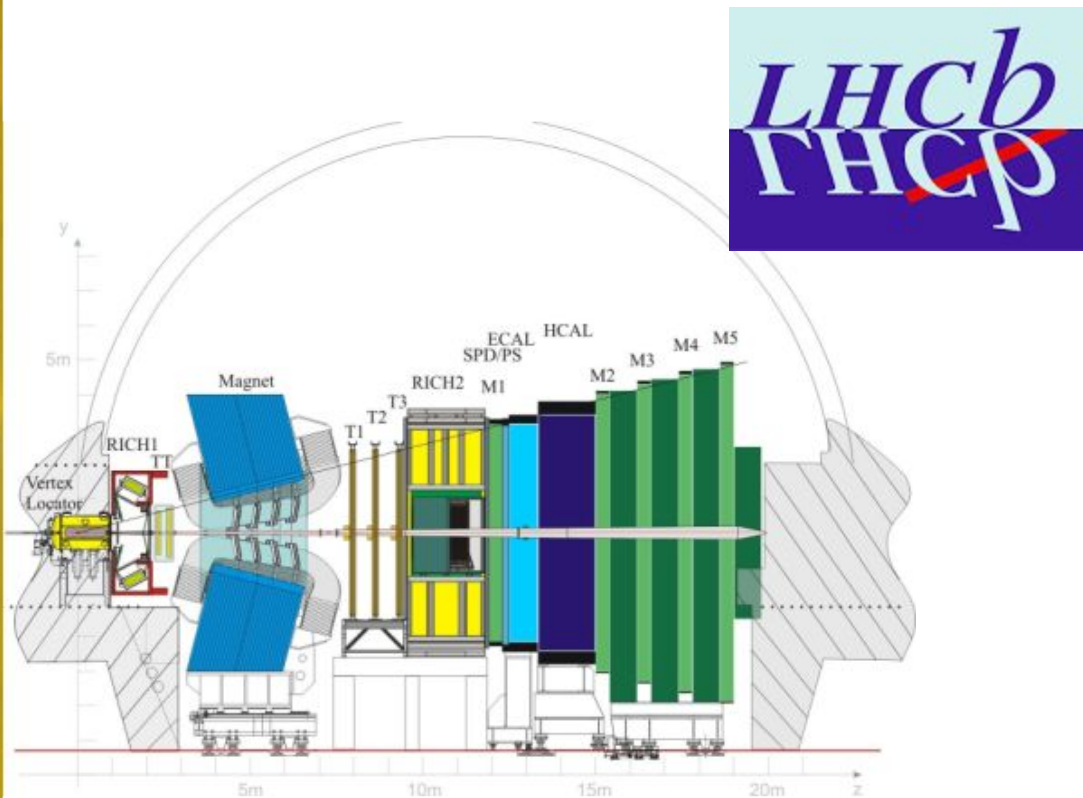
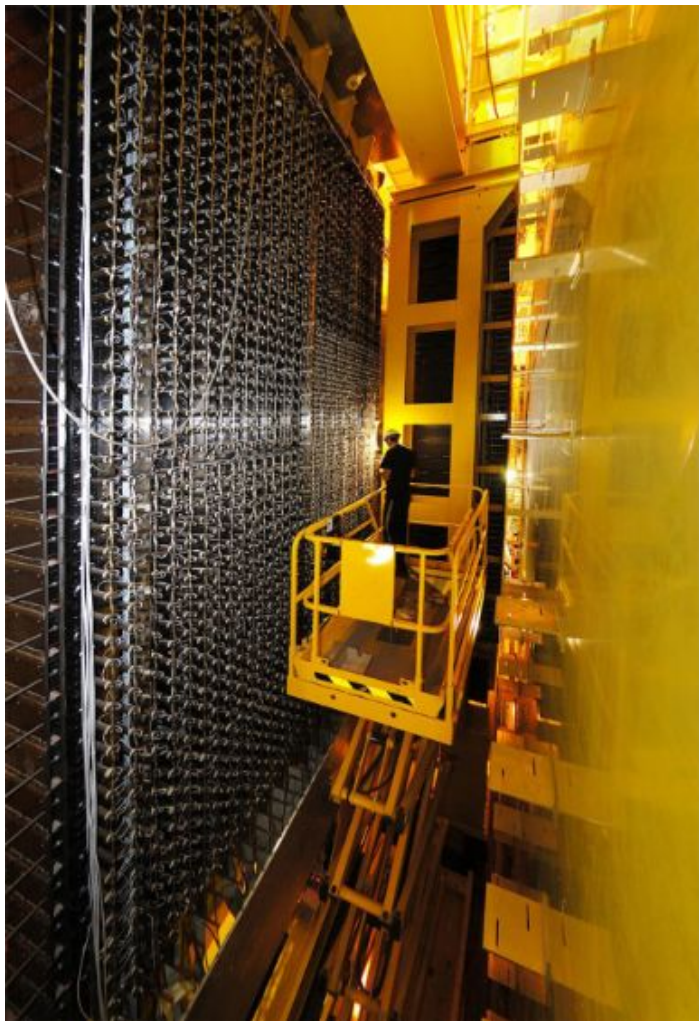
FORWARD CALORIMETER  
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels



CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)  
~76,000 scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

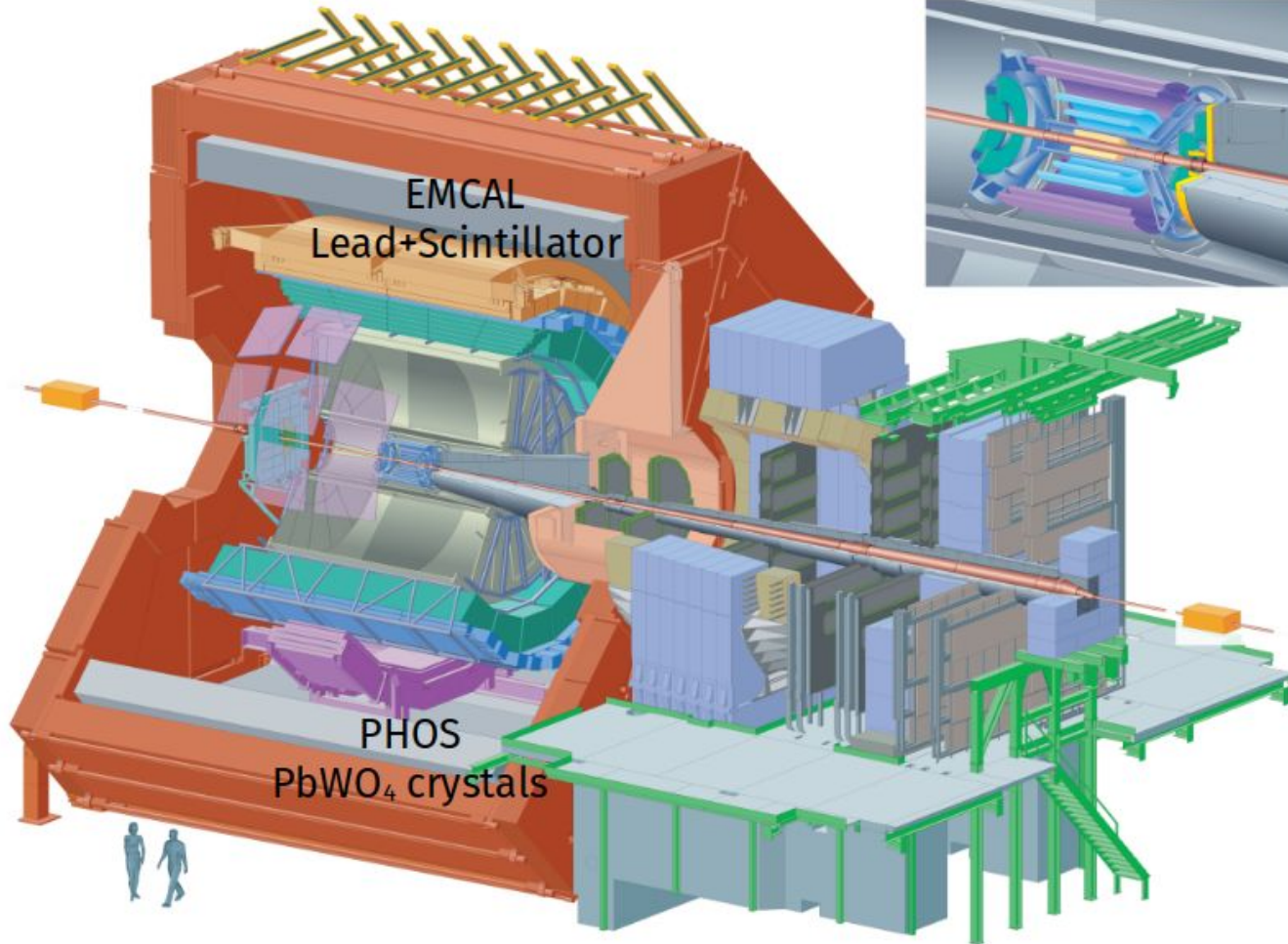
HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels







ALICE



Introdução

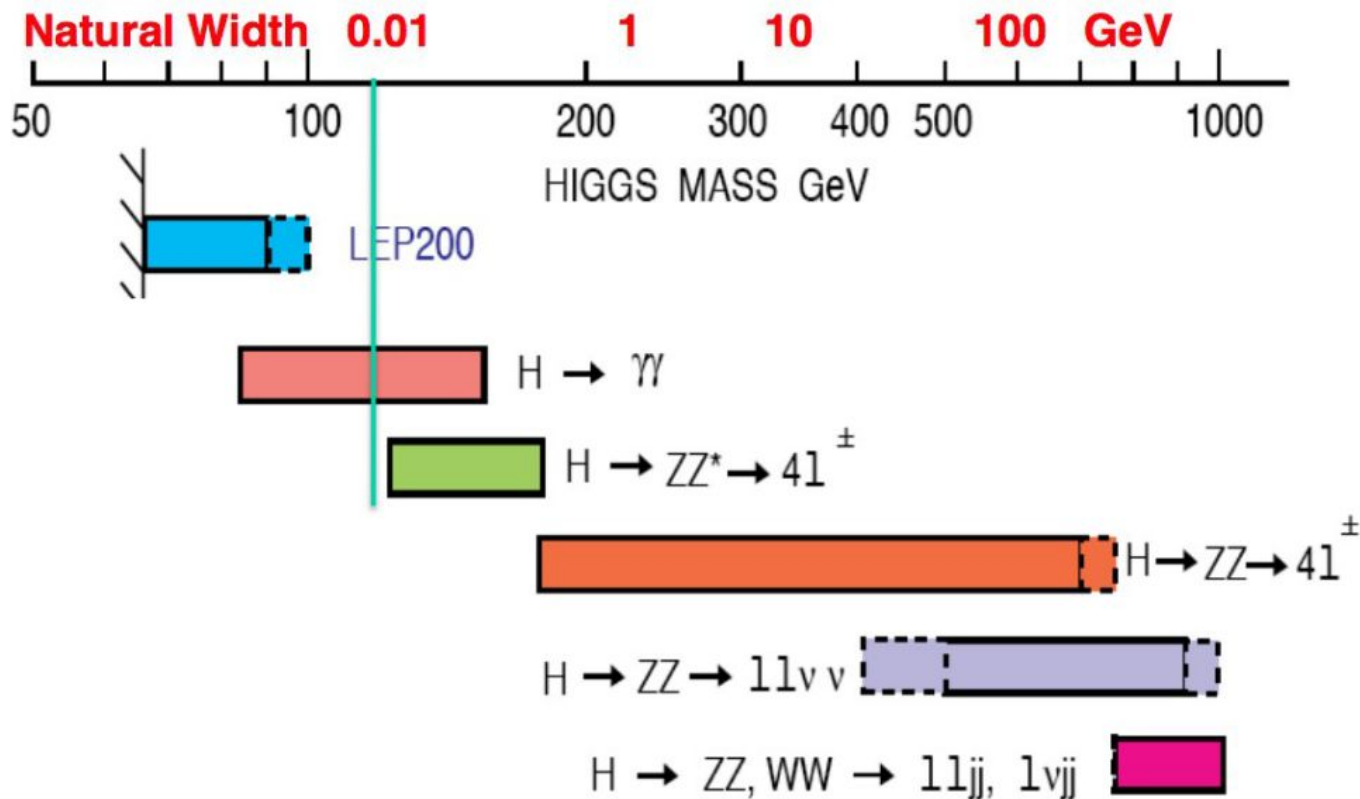
“Revelando” a passagem de partículas

**Filosofia de construção de ATLAS e CMS**

Como a reconstrução complementa a detecção

Conclusões

# A física alinha os princípios gerais



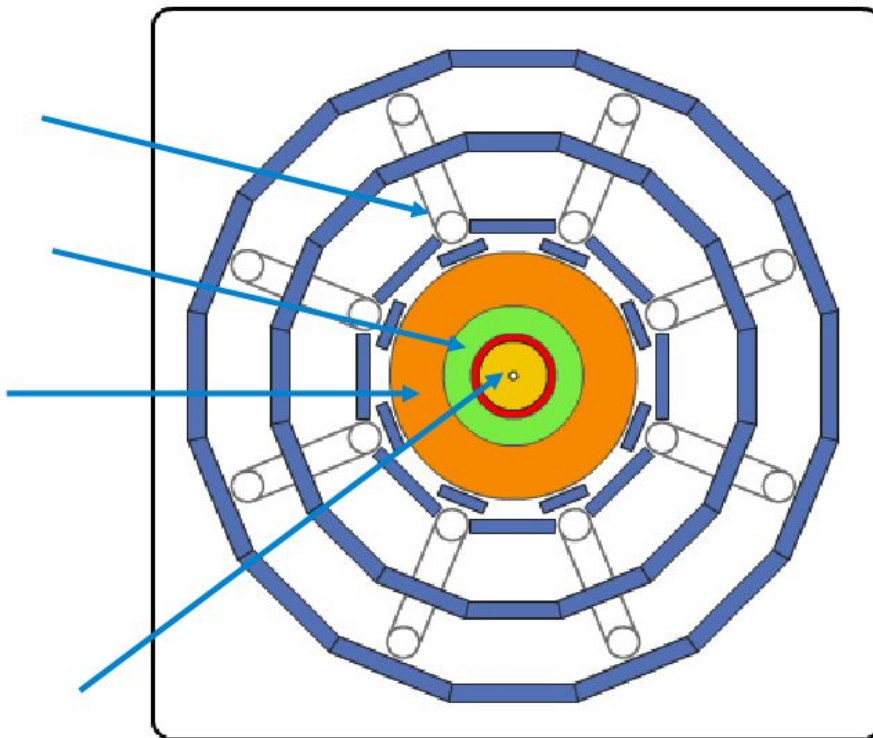
# A engenharia guia a concretização

**B field source**

**High-Z materials**

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

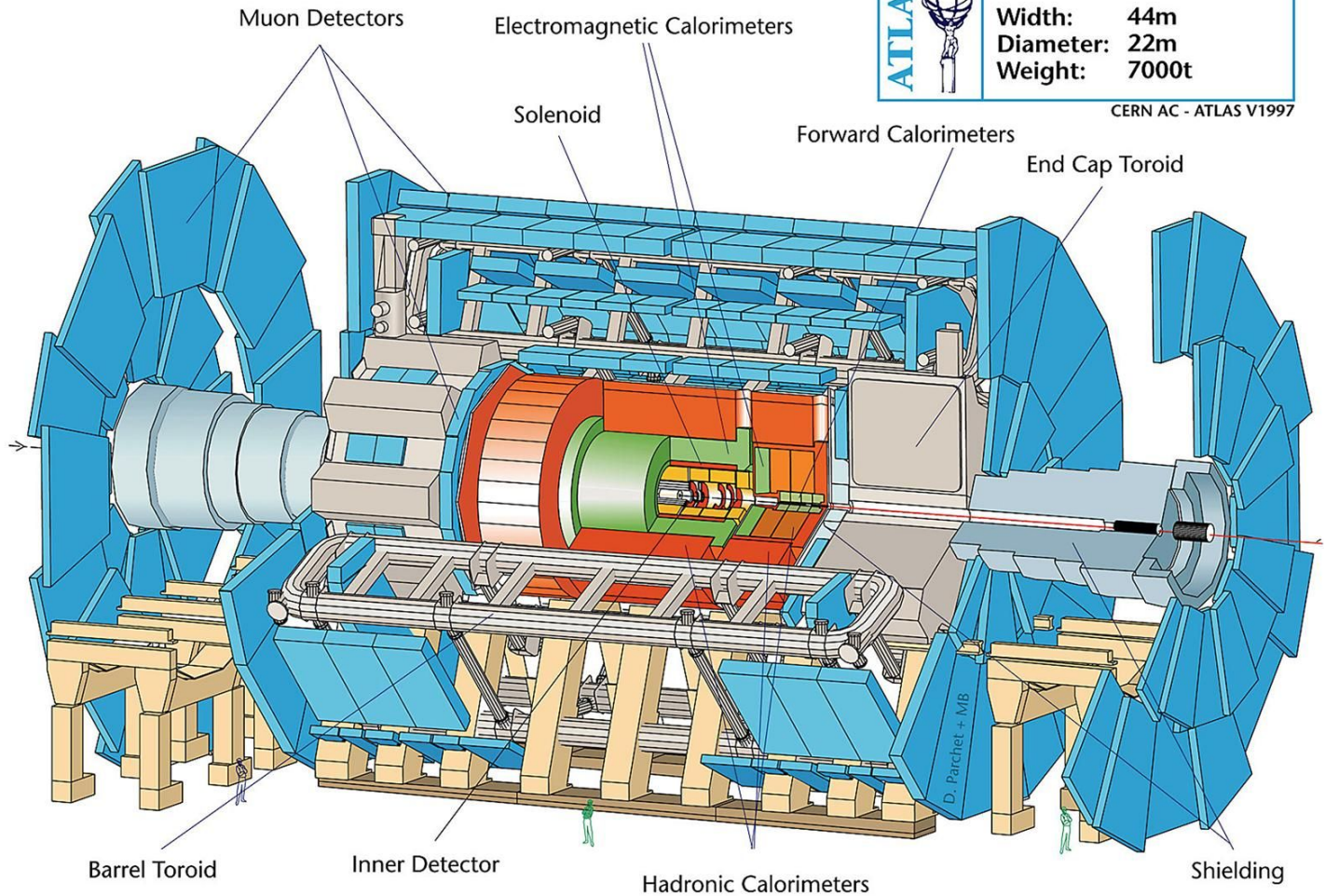
**Lightweight materials**  
(Si, gaseous)





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

CERN AC - ATLAS V1997



Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

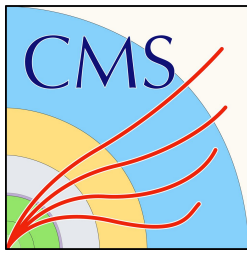
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shimming

D. Panchet + MB



**SUPERCONDUCTING COIL**

**ECAL Scintillating  $PbWO_4$  Crystals**

**CALORIMETERS**

**HCAL Plastic scintillator  
brass sandwich**

**IRON YOKE**

**TRACKER**

Silicon Microstrips  
Pixels

**MUON BARREL**

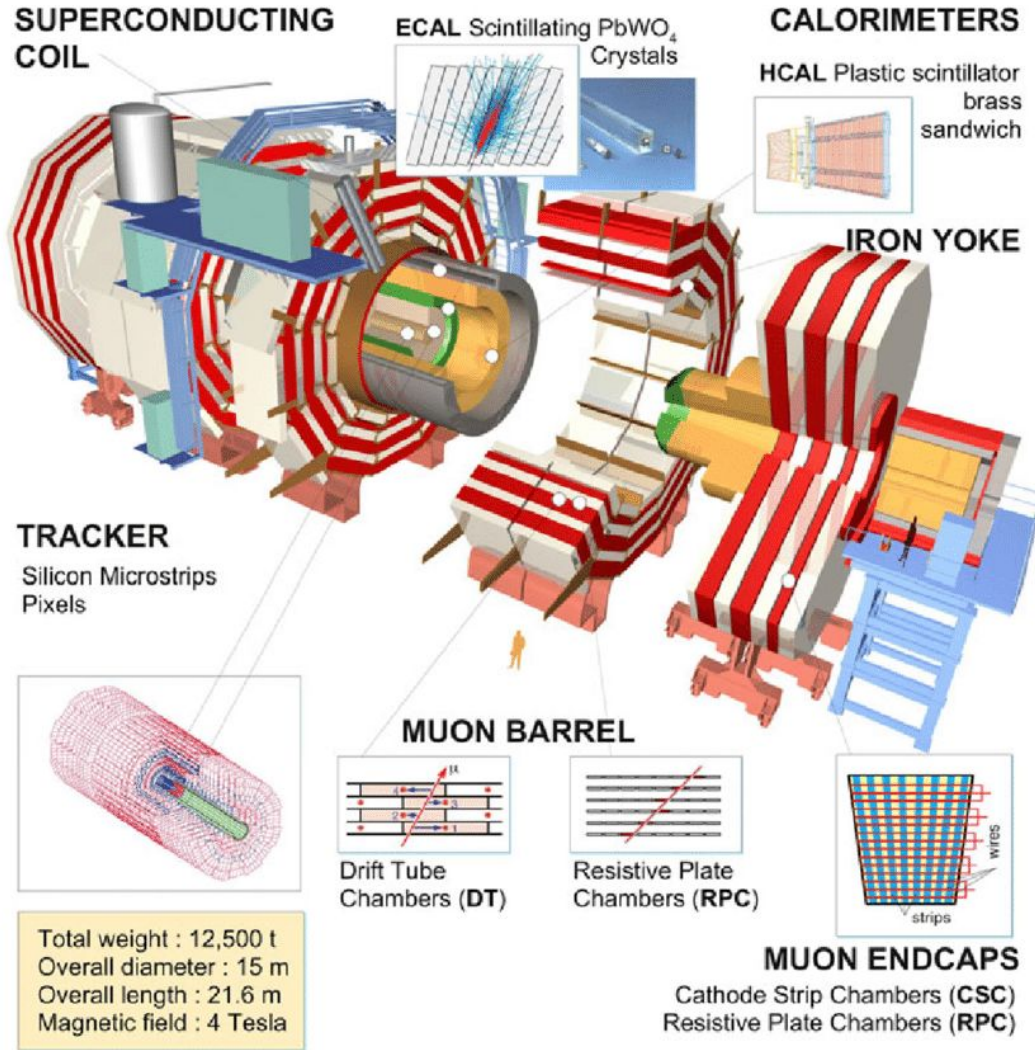
Drift Tube  
Chambers (DT)

Resistive Plate  
Chambers (RPC)

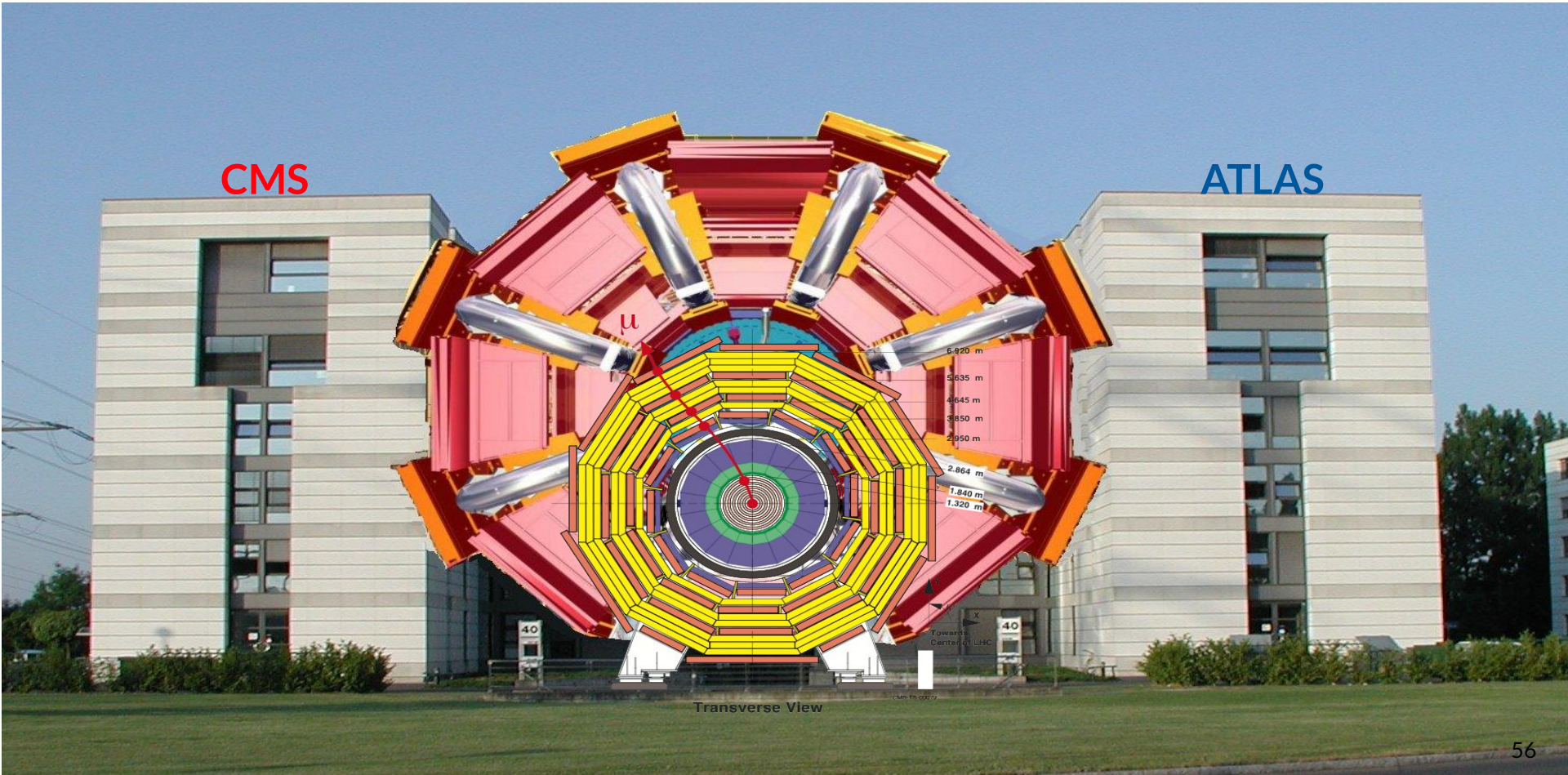
**MUON ENDCAPS**

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

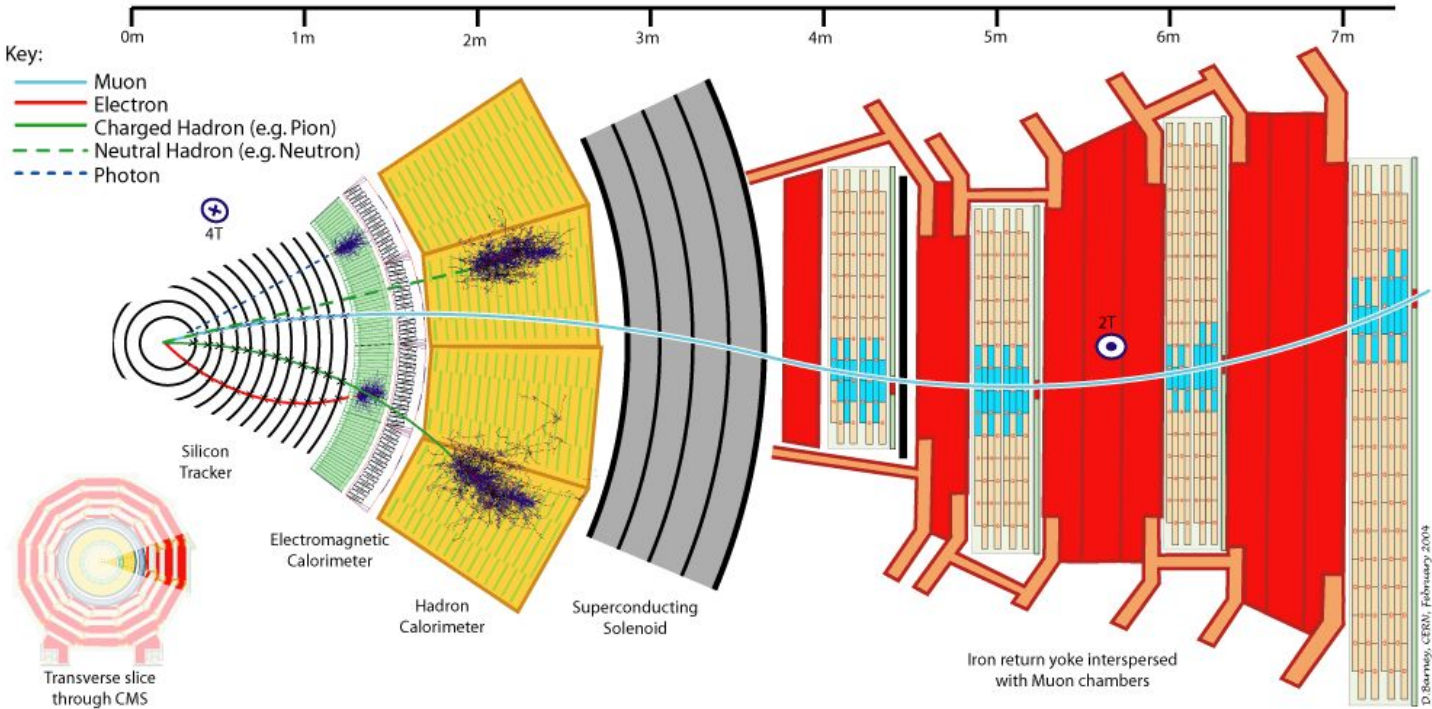


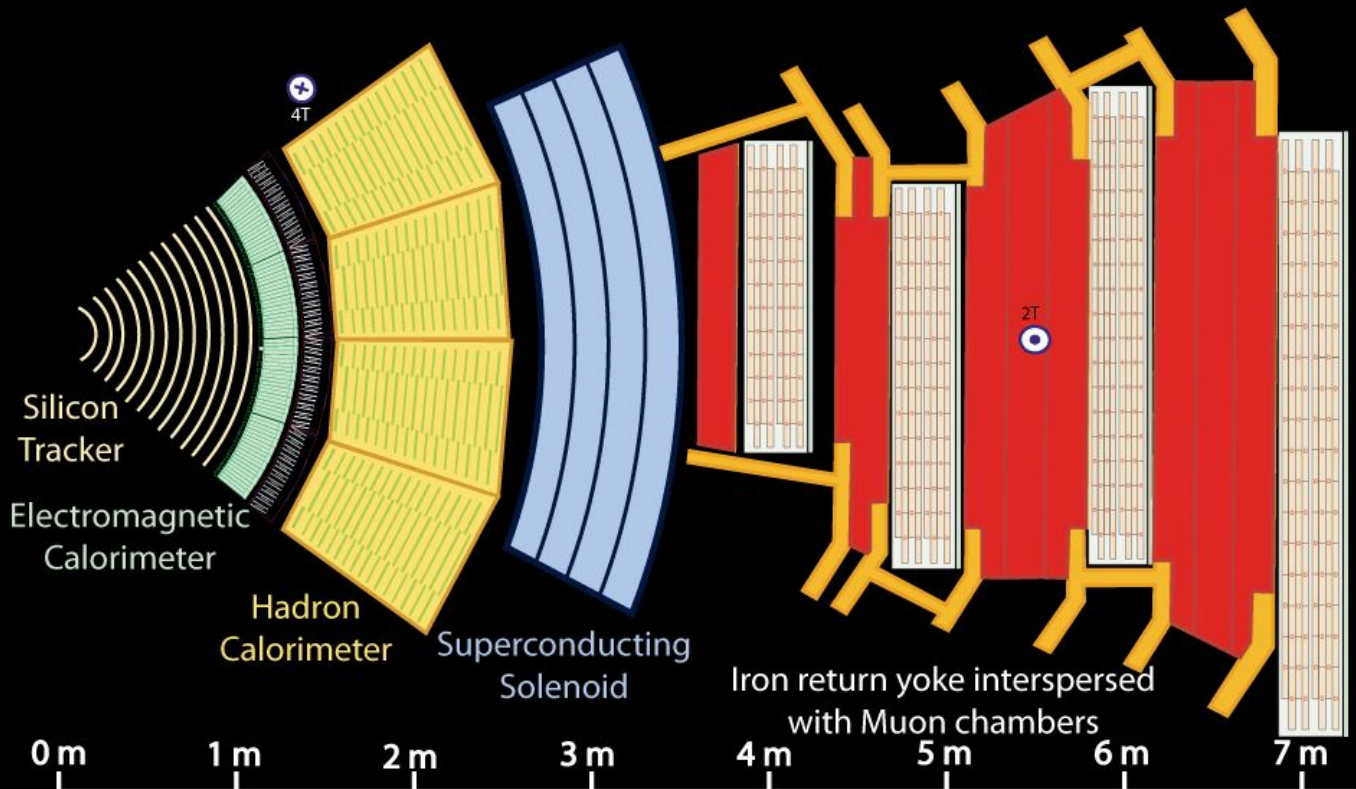
# Os detectores ATLAS e CMS o edifício 40 do CERN





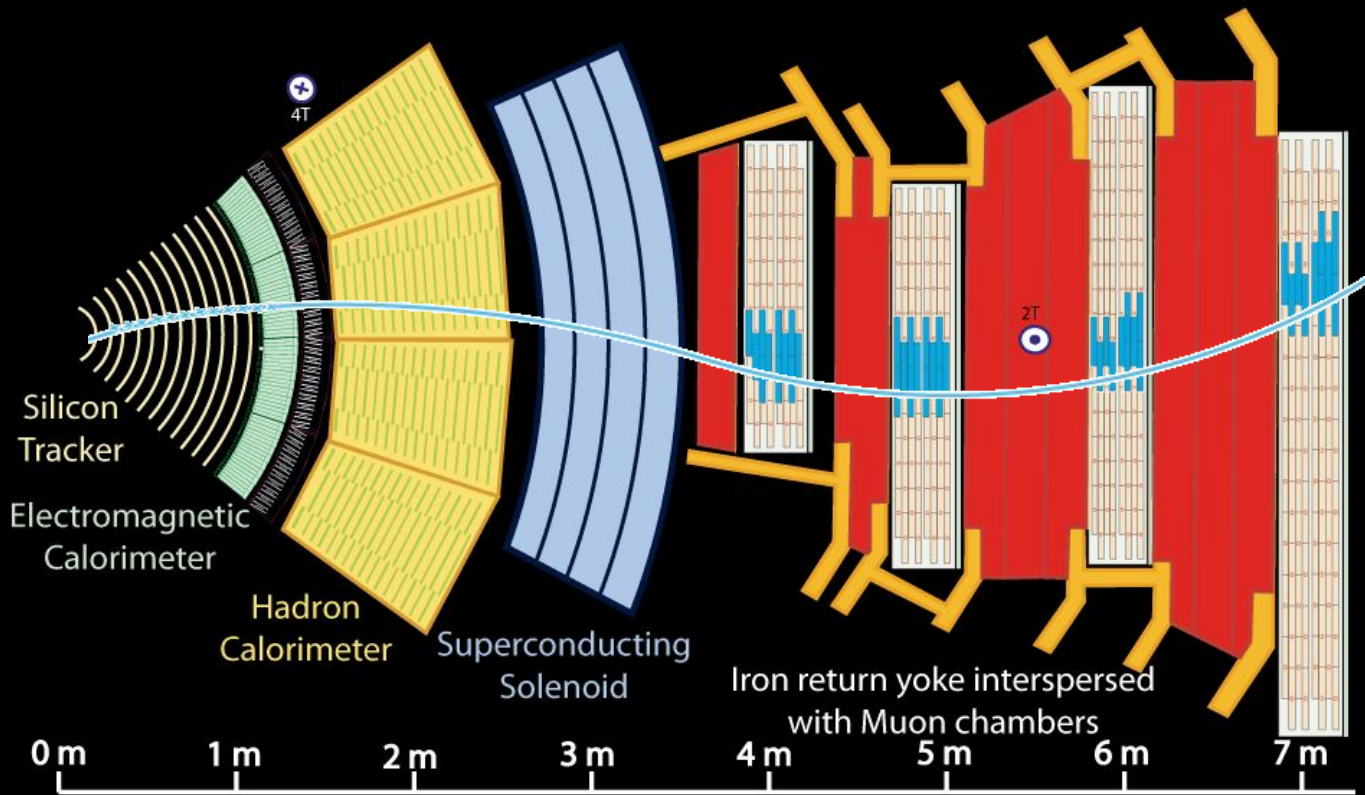
# O detector e as partículas





Key:

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



Key:

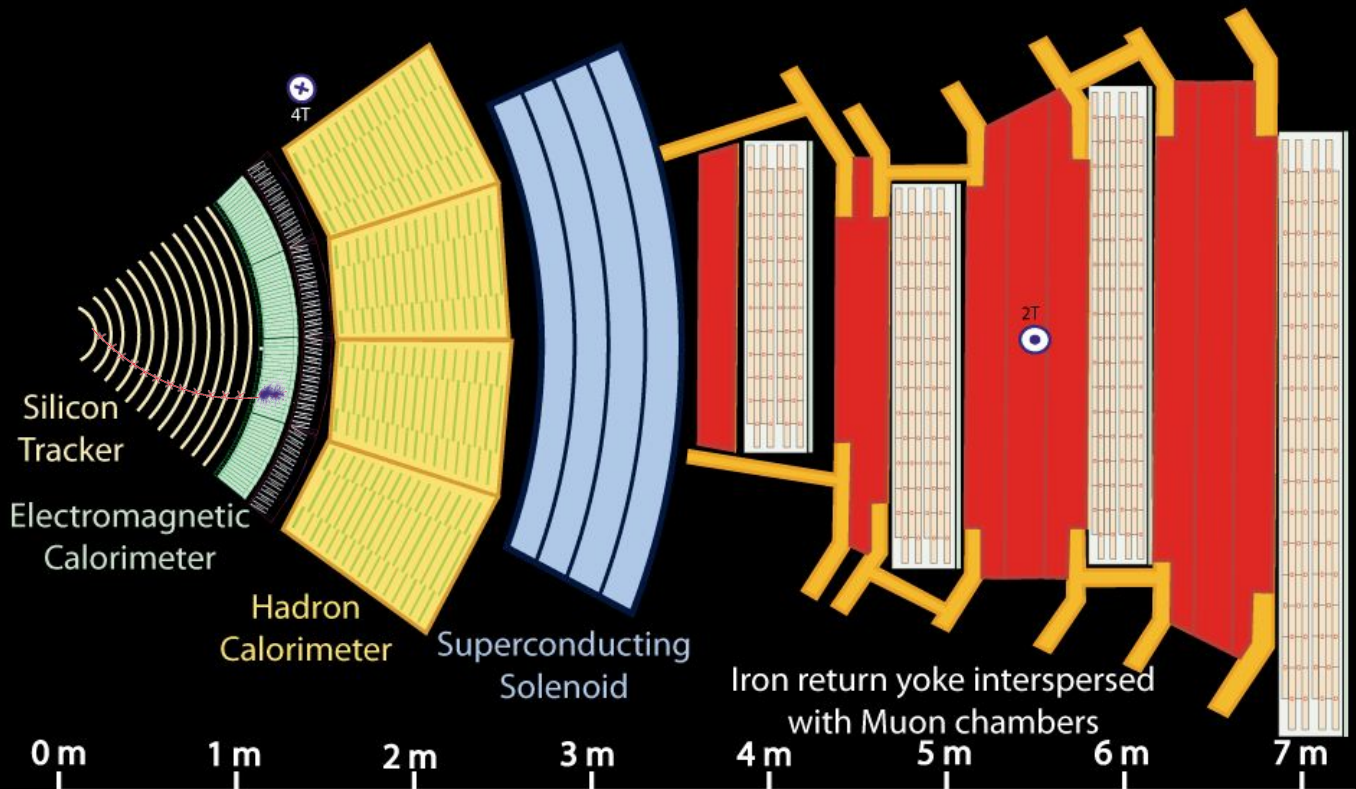
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

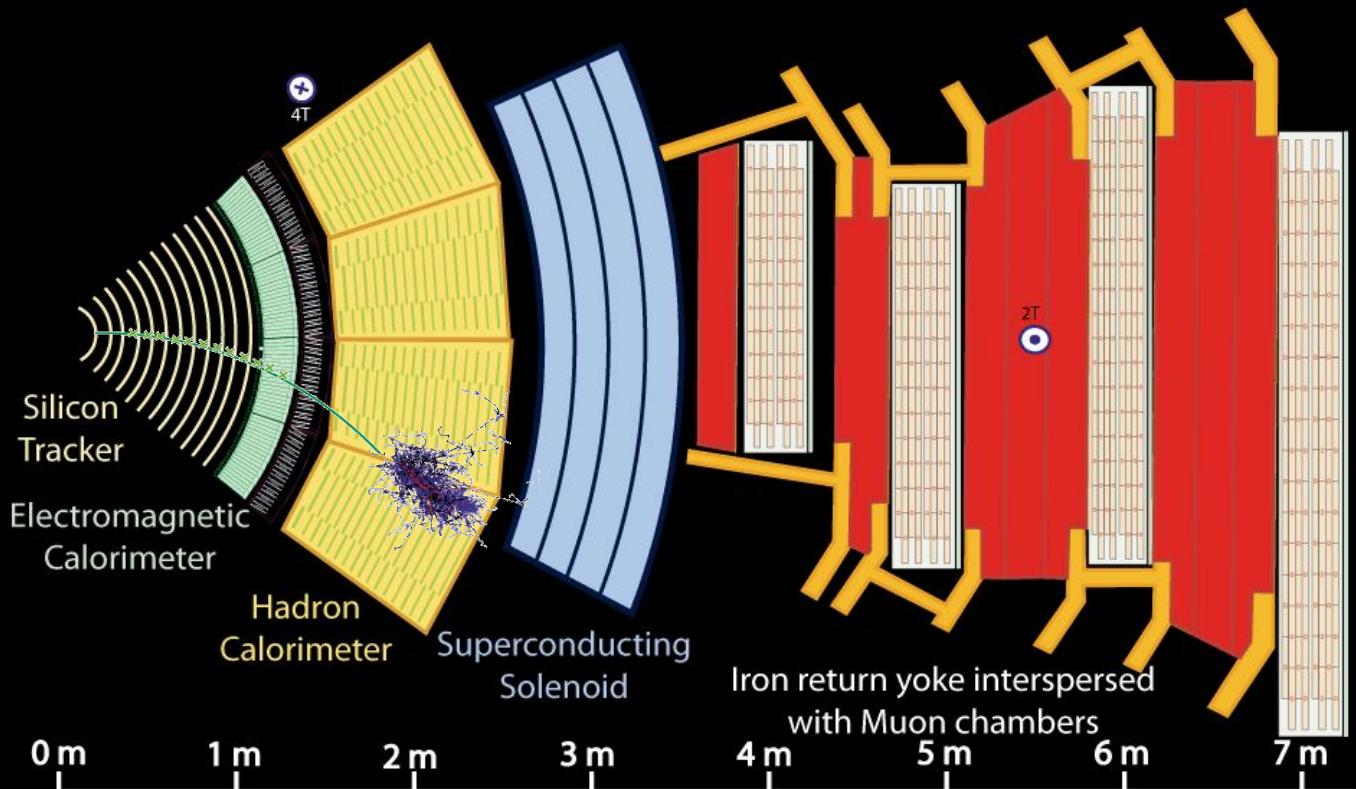
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

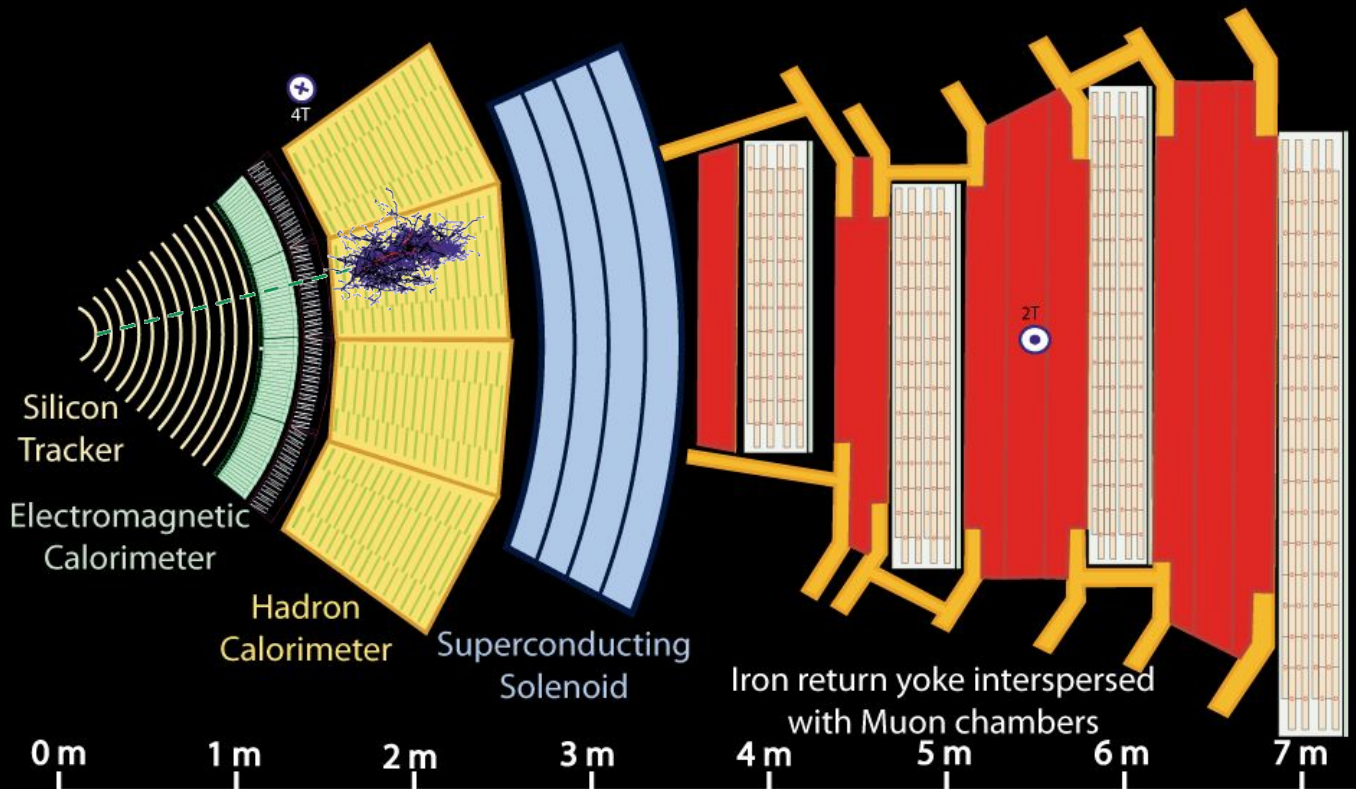
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



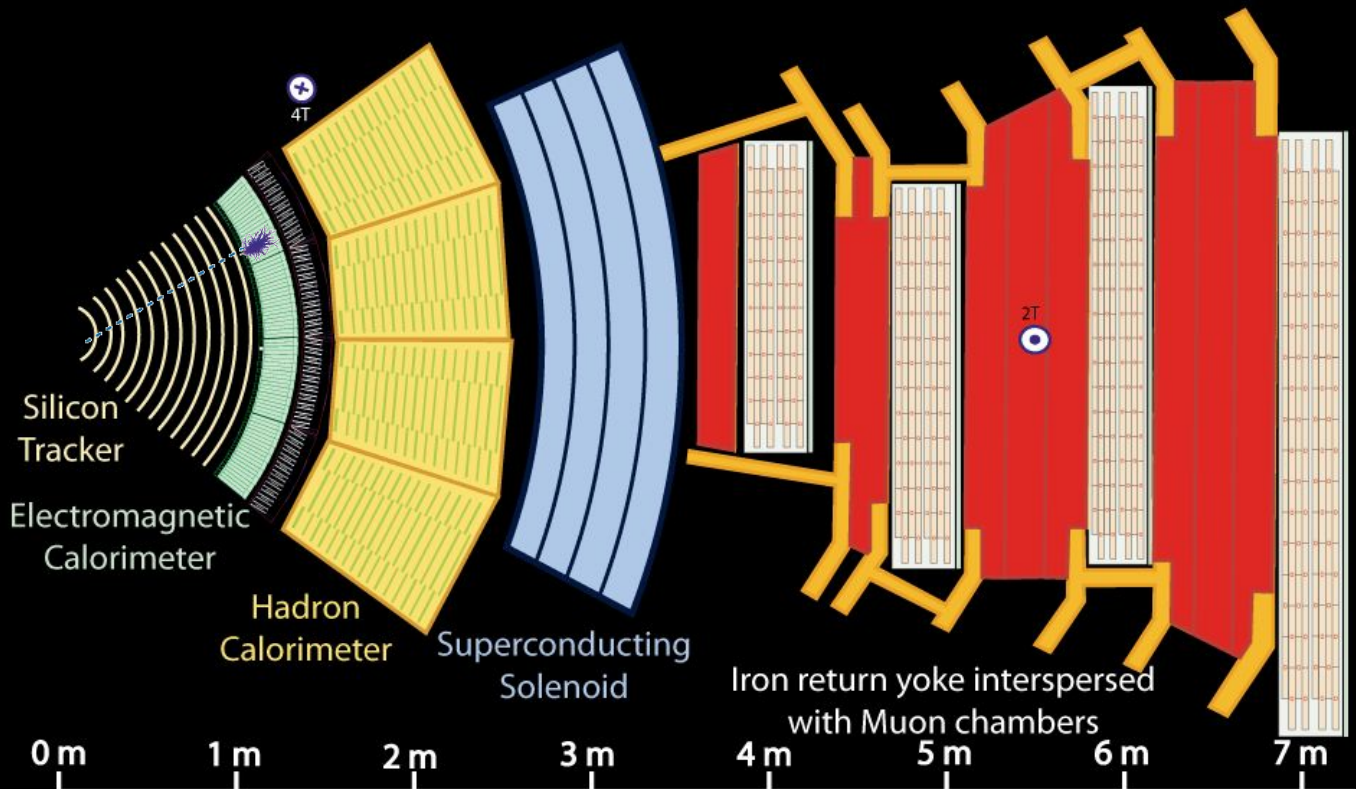
Key:

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



Key:

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



Key:

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

Introdução

“Revelando” a passagem de partículas

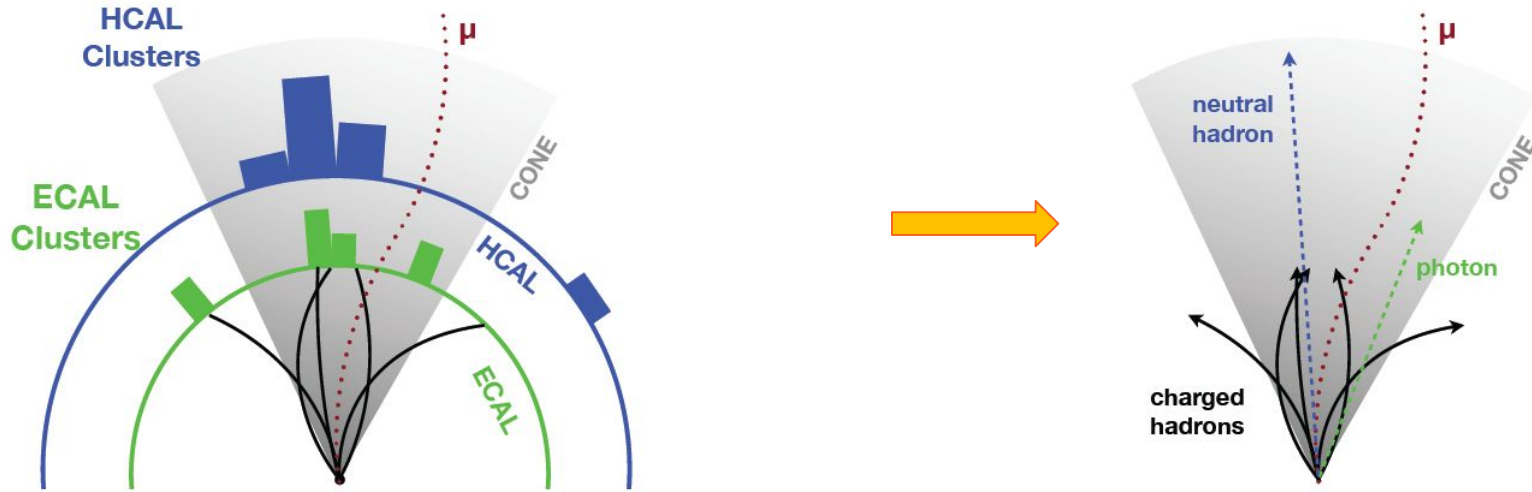
Filosofia de construção de ATLAS e CMS

**Como a reconstrução complementa a detecção**

Conclusões



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

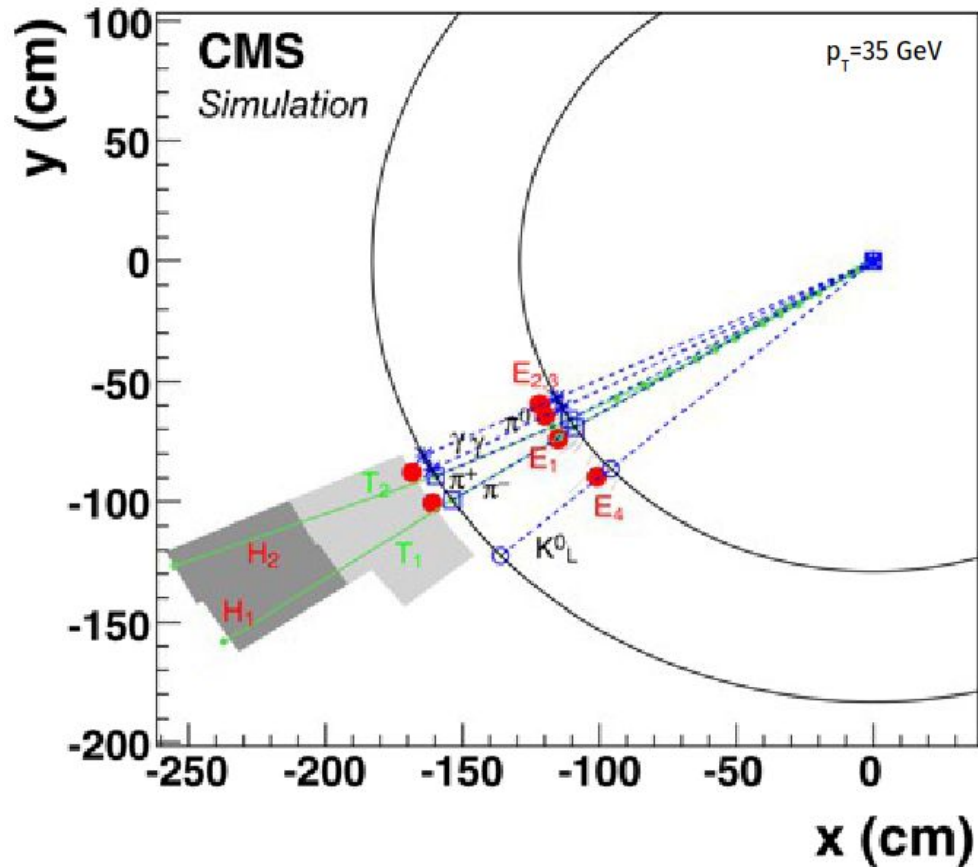


Num evento associamos a informação disponível: hits, traços, aglomerados de hits,...

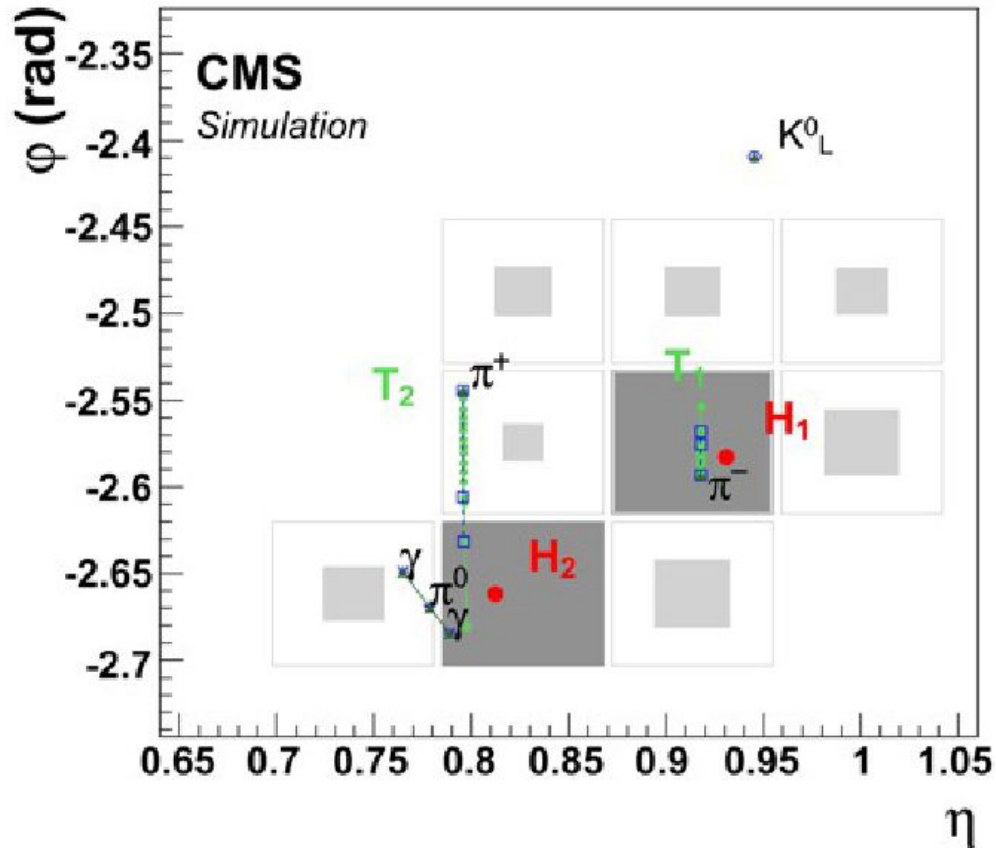
O melhor detector pode ser usado para atribuir a medida final de posição, energia, tempo

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

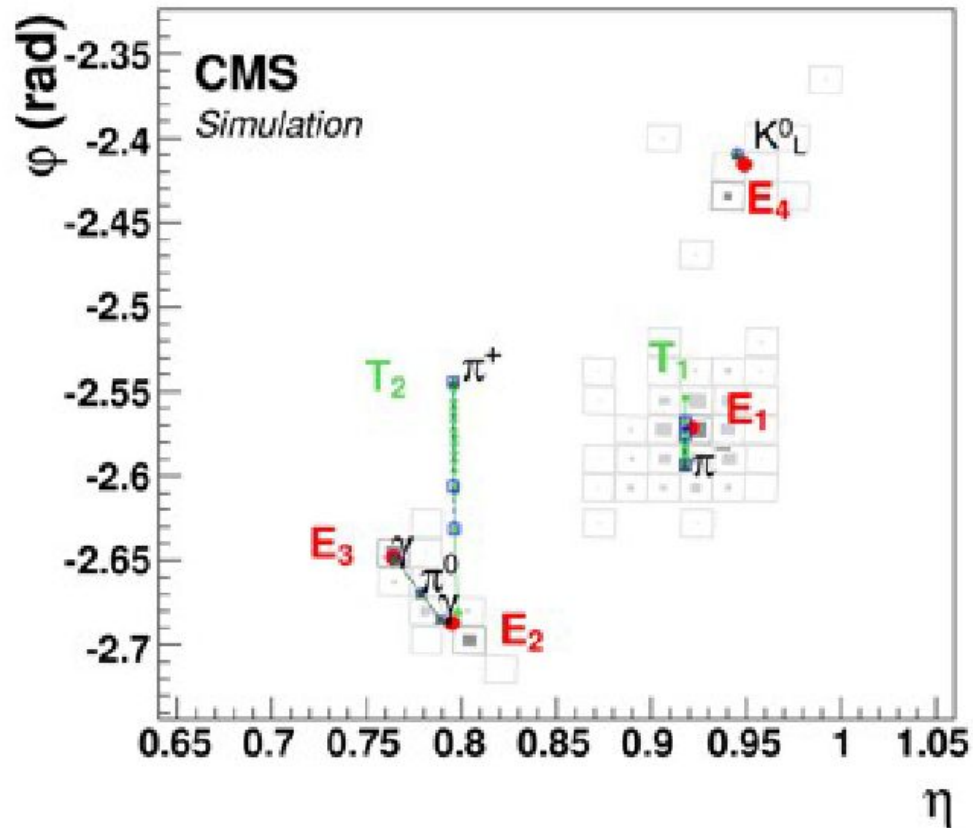
# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas



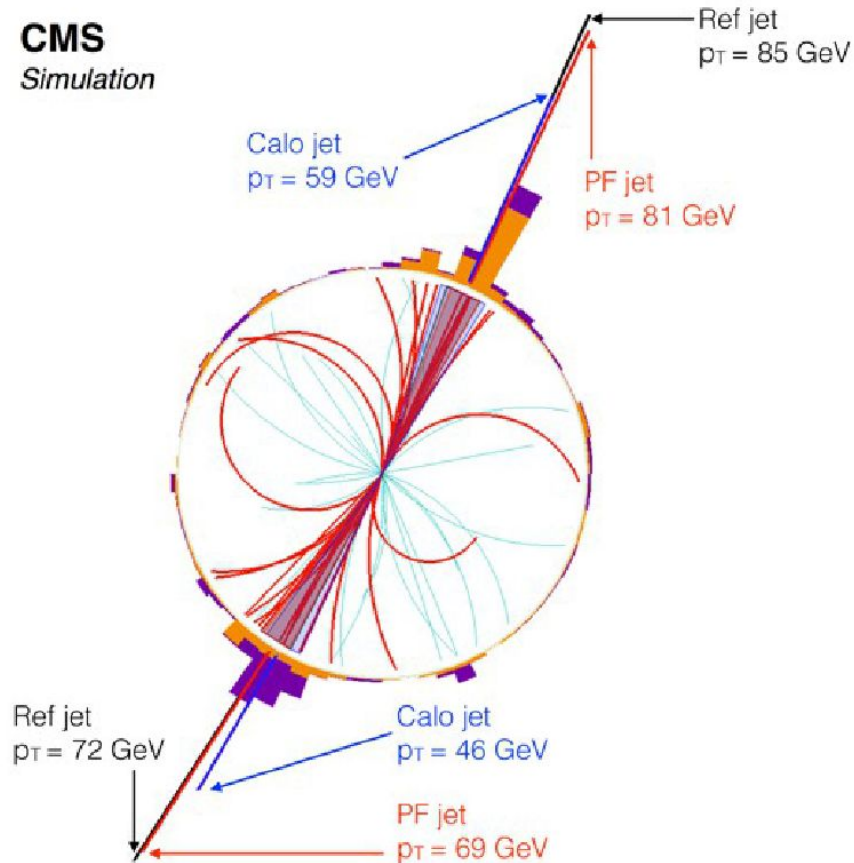
# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas



# Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas

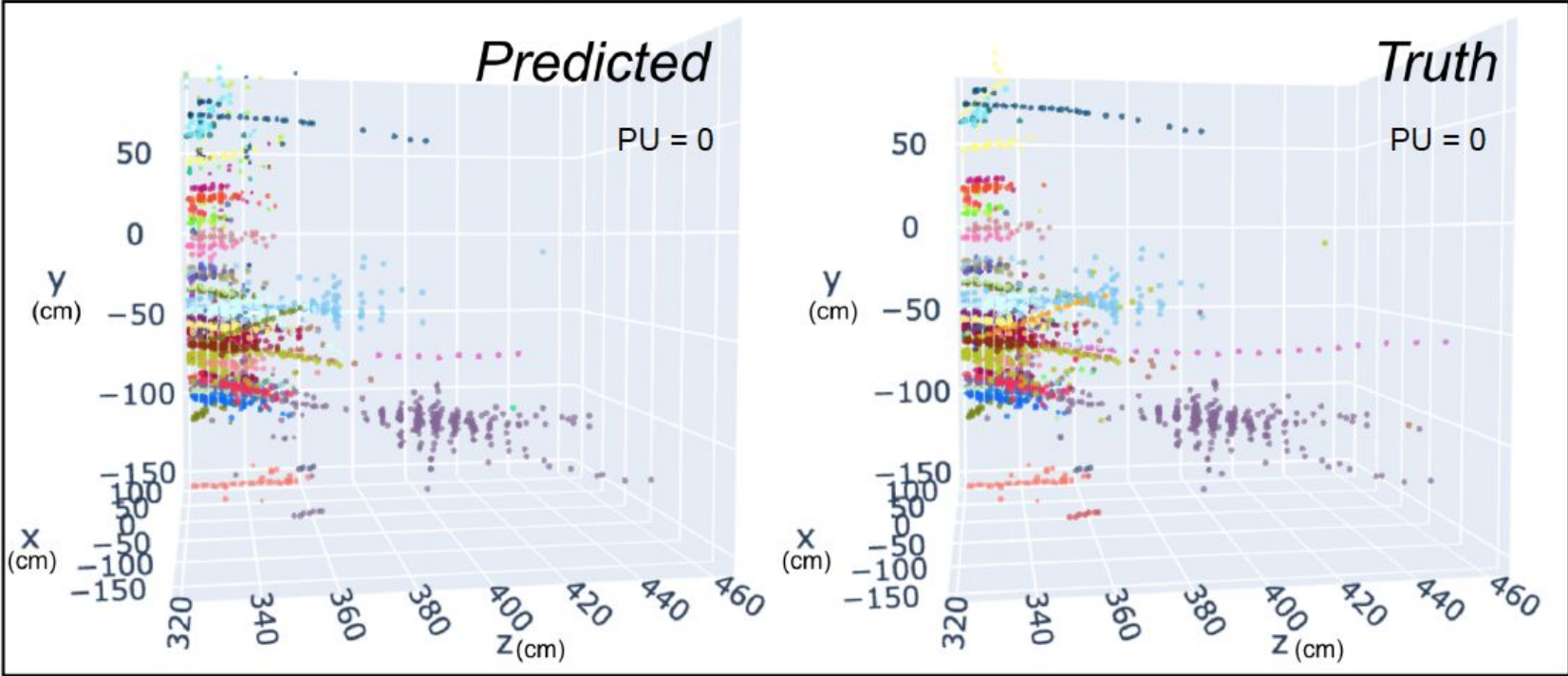


# Particle flow: paradigma actual de reconstrução



# Machine learning: paradigma futuro de reconstrução?

**CMS** *Simulation Preliminary*



**Introdução**

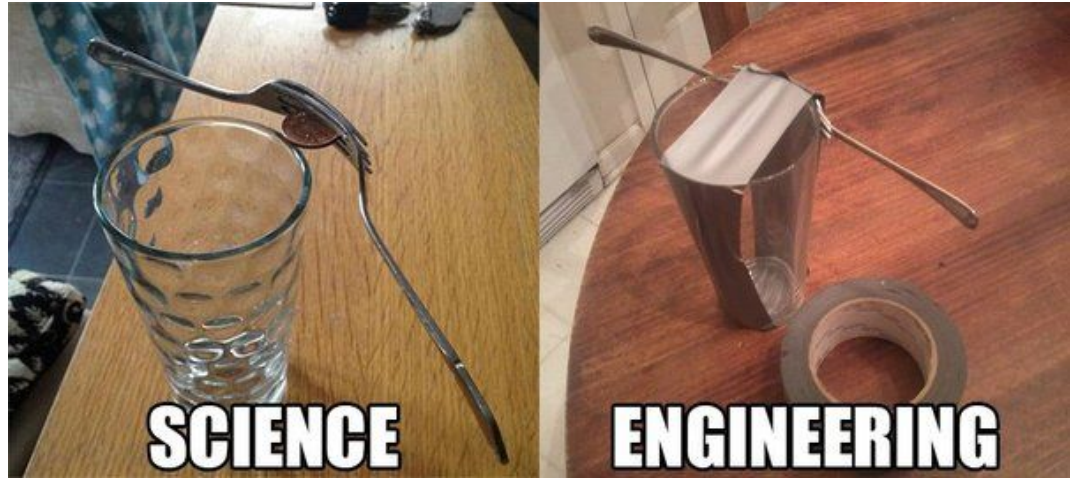
**“Revelando” a passagem de partículas**

**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 no CERN

- tecnologias acompanham a par e passo as questões da física
- maior desafio consiste em atingir o compromisso entre a precisão necessária, as possibilidades actuais da tecnologia e o que poderá ser alcançado no futuro
- complexidade dos detectores do LHC necessária ao seu sucesso:  
descoberta do Higgs e no seu estudo; pesquisa por sinais de nova física