



Princípios básicos de detectores

Pedro Ferreira da Silva (psilva@cern.ch) - CERN

15ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa

Setembro de 2023



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

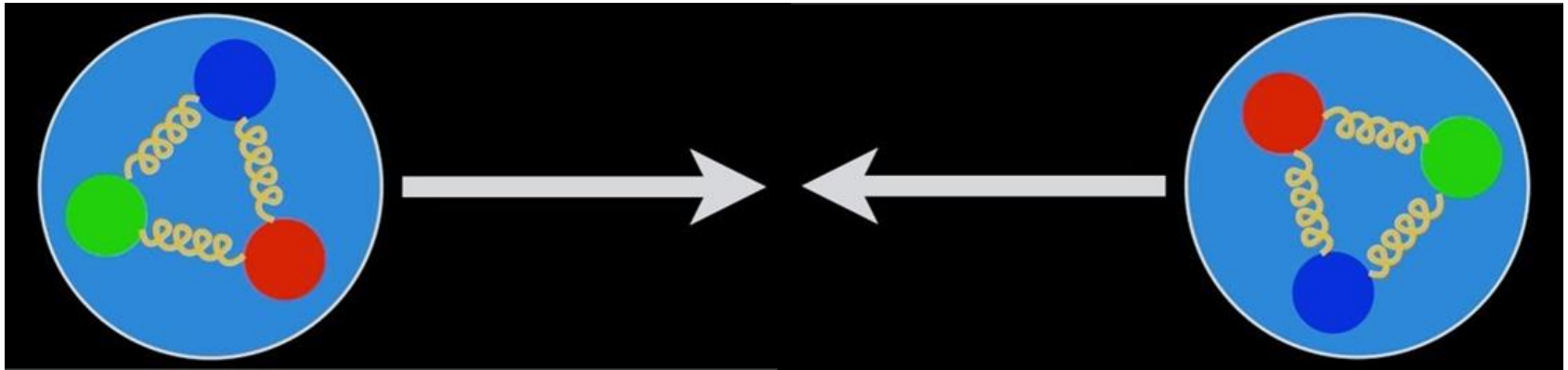
Filosofia de construção de ATLAS e CMS

Como a reconstrução complementa a detecção

Conclusões

p

p



$E_{\text{CM}} = 13.6$
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**

O que se produz maioritariamente?

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

O que se produz maioritariamente? **Hadrões** (estados ligados de quarks)

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

O que se produz maioritariamente? **Hadrões** (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? **Hadrões** (estados ligados de quarks)

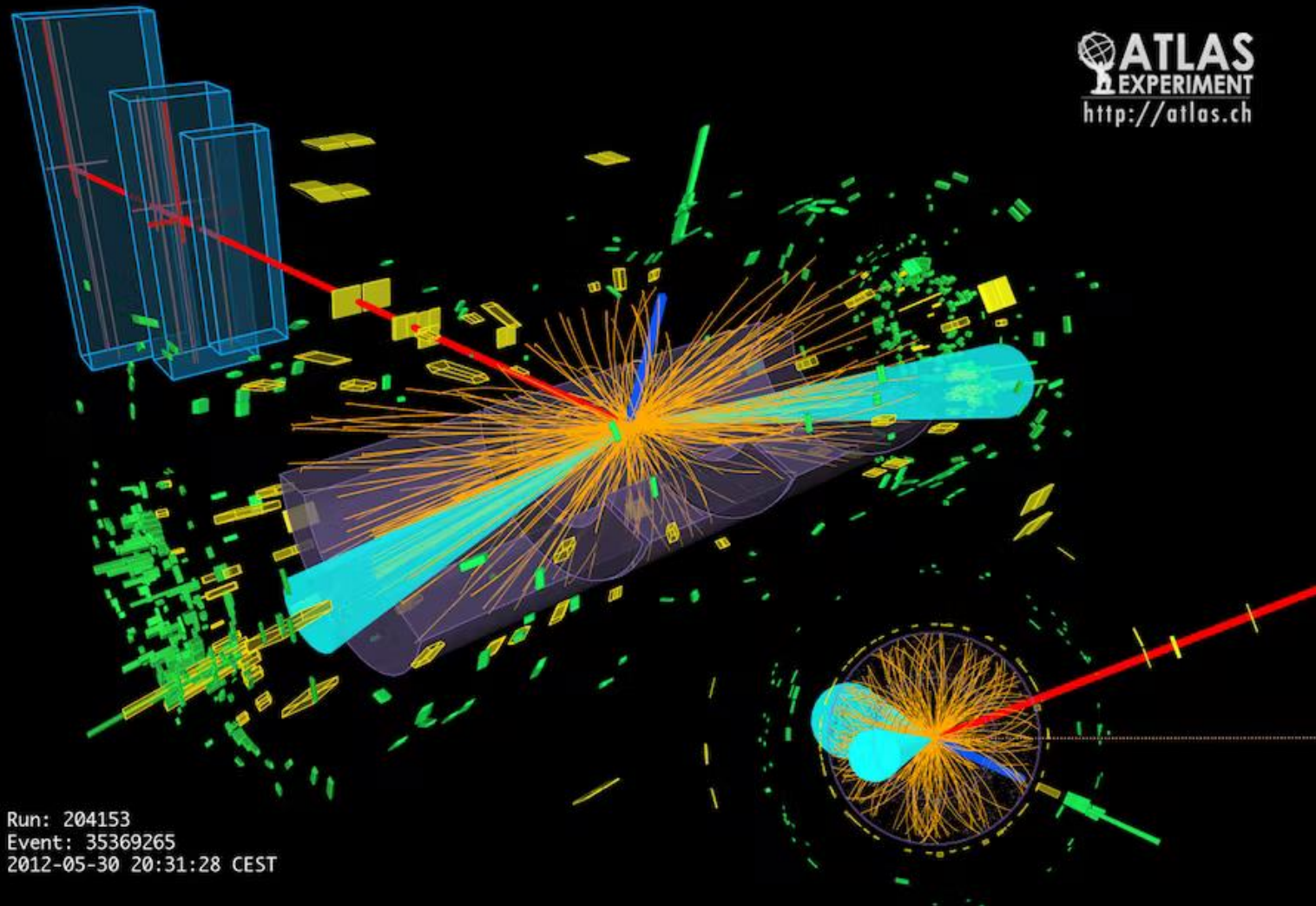
Existe alguma ordem nos estados produzidos?



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

Estados fundamentais de massa e spin :
 π (mesões de quarks leves e com spin 0)

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

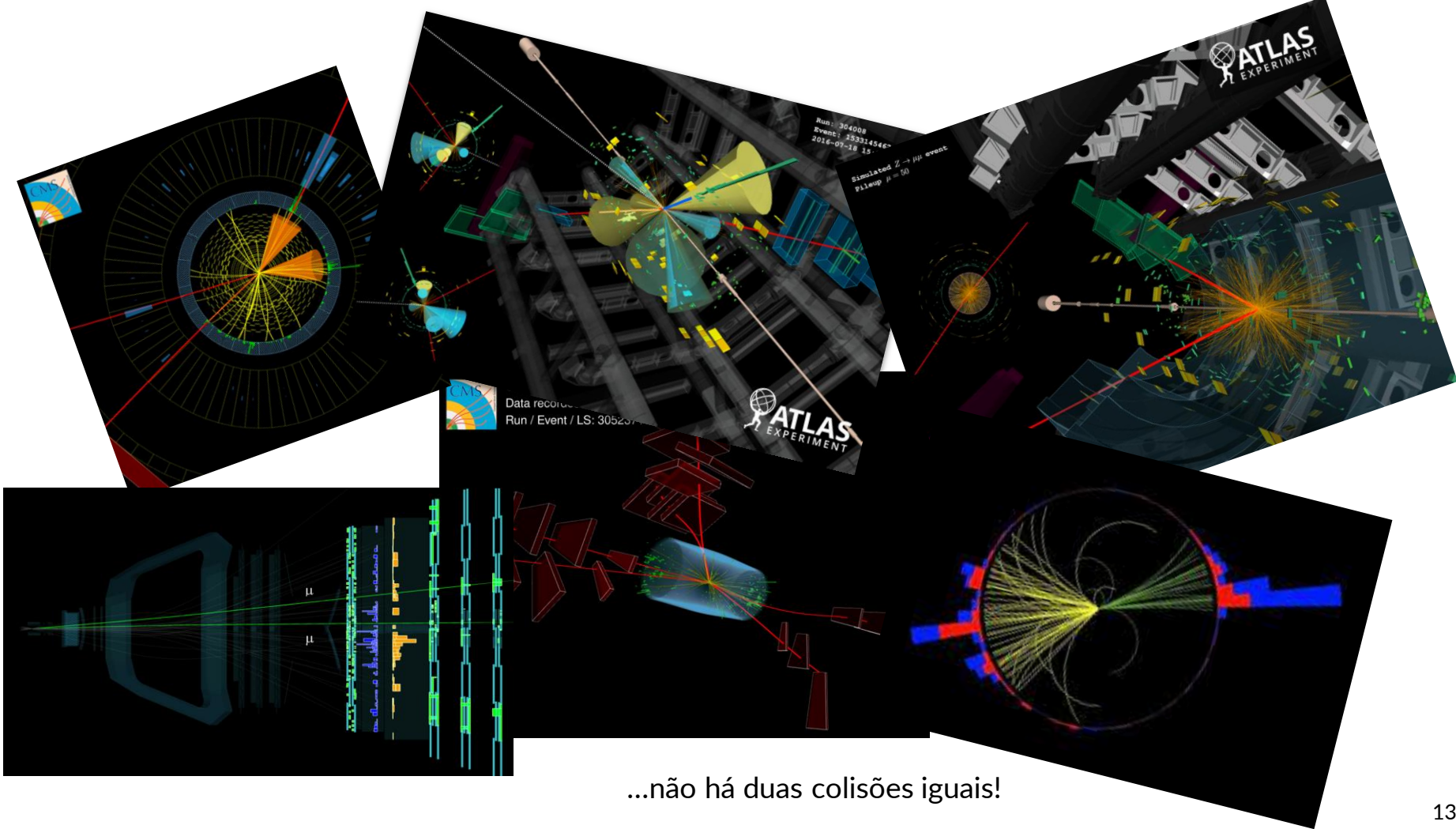


Run: 204153
Event: 35369265
2012-05-30 20:31:28 CEST



Pára de dizer a
Deus o que fazer!

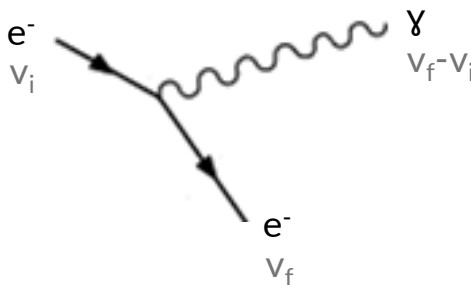




...não há duas colisões iguais!

O efeito do observador I

Para observar este electrão tenho de o obrigar a emitir/trocar um fotão
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: Δt
- proporcional à transferência de momento e afectada por incertezas: Δp



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

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

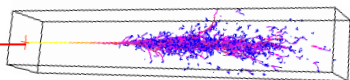
No LHC as energias são tipicamente $> 1 \text{ GeV} \Rightarrow \lambda = hc/E < 10^{-15} \text{ m}$

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

Princípios gerais de detecção no LHC

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

Calorimetria

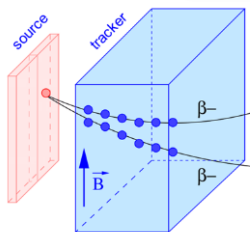


Medição da energia de uma partícula pela absorção completa da cascata de secundários

E x t



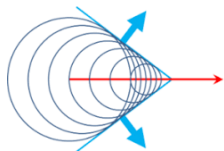
Tracejadores
+
campo magnético



Identificação da passagem de uma partícula através de repetidas interações mínimas



“Velocímetros”



Medidas de velocidade/tempo de voo permitem distinguir diferentes partículas



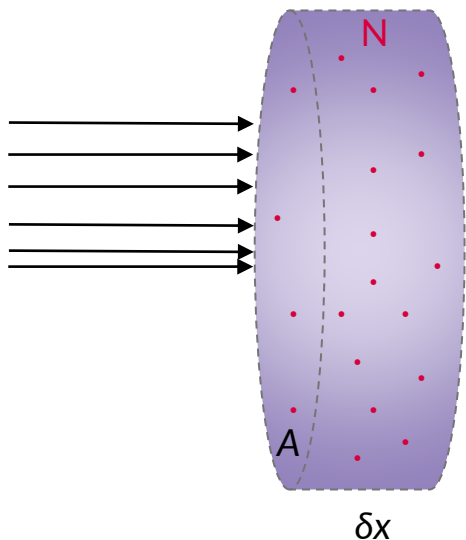
... pela combinação correcta destes elementos atingimos a precisão necessária



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

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

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



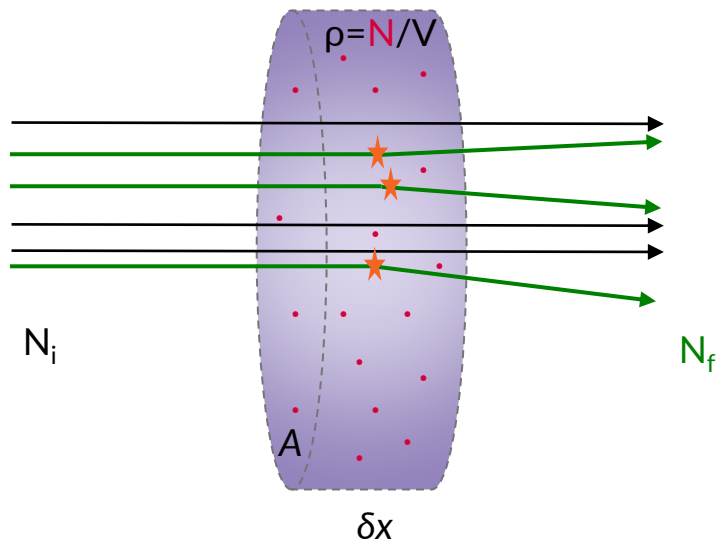
massa
[M]

massa 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 interacção** (σ) entre a radiação e o material



Probabilidade de uma partícula interagir ao percorrer δx

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

espessura
[L]

densidade
[L⁻³]

secção eficaz
[L²]

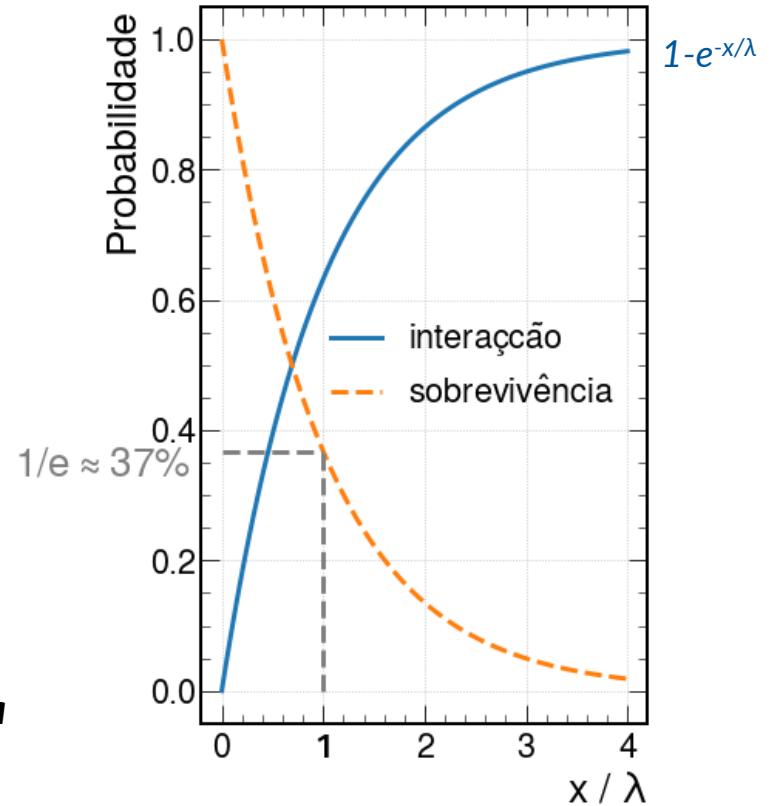
Probabilidade de uma partícula interagir ao percorrer δx

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

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

comprimento de interacção [L]

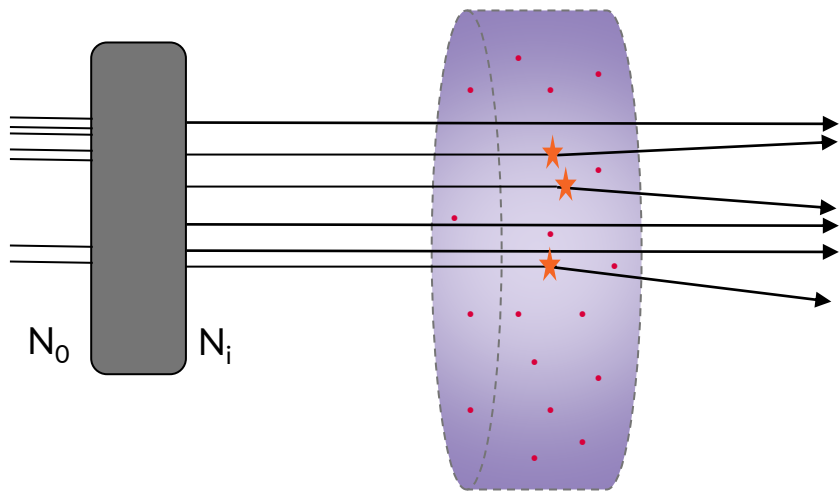
Após percorrer um comprimento correspondente a λ
o fluxo é atenuado em cerca de 37%



Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende

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

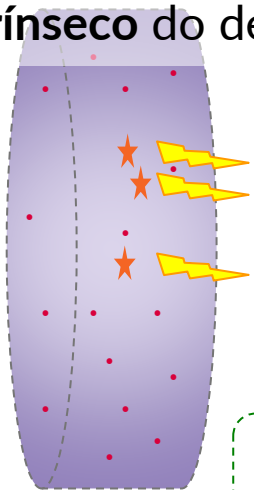


O material interposto entre a fonte e o detector pode absorver, converter, multiplicar, dispersar, ...

Características genéricas de um detector

A sensibilidade de um detector à passagem de radiação depende

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



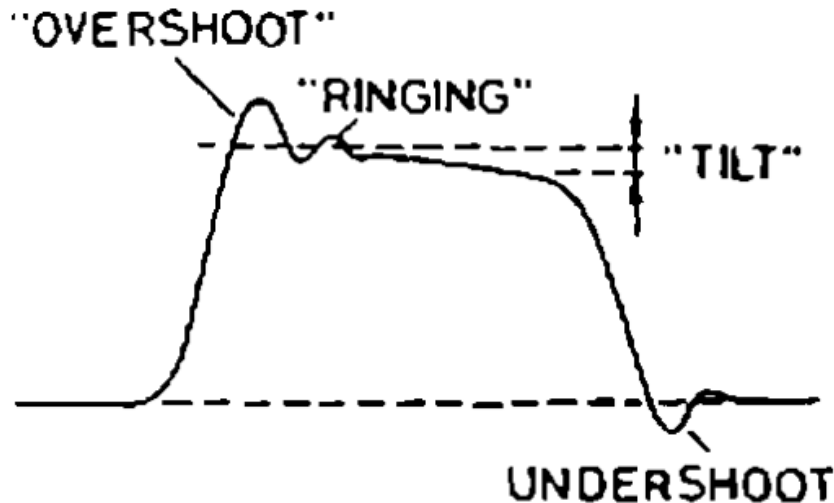
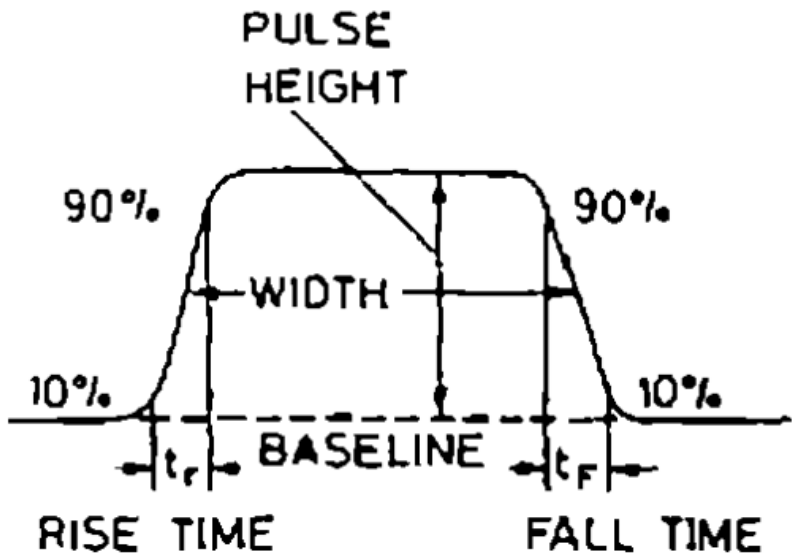
Electrónica de leitura (frontend)



Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

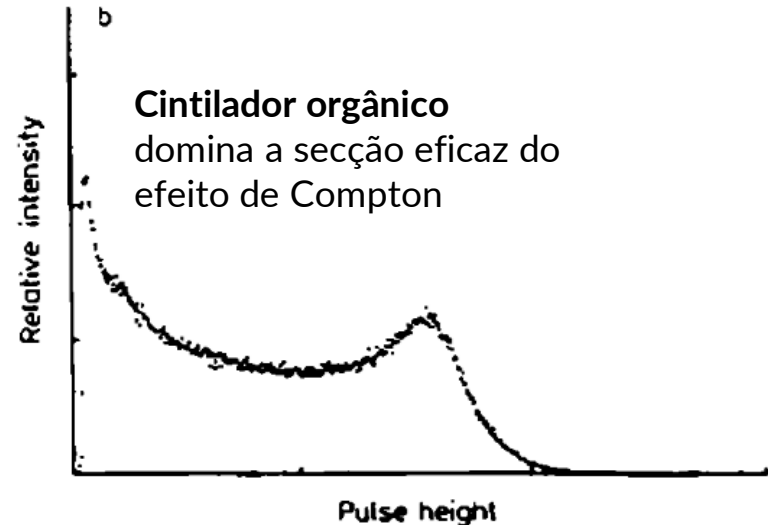
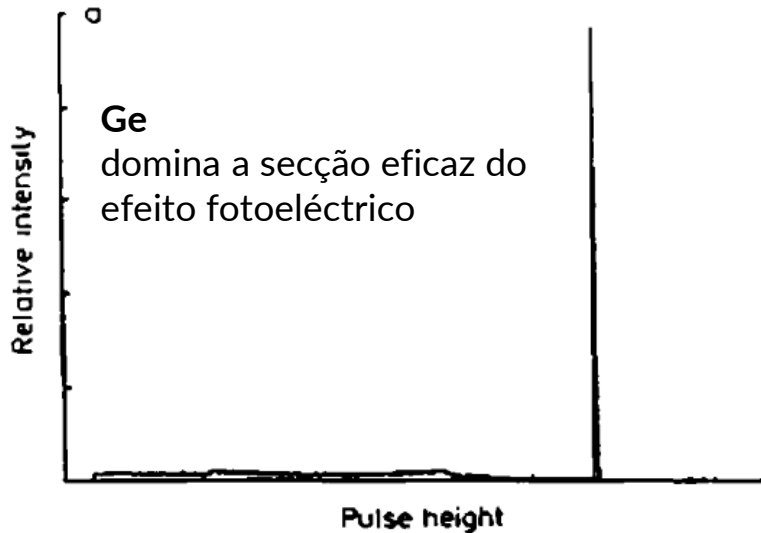
- **a resposta** : tipicamente impulso elétrico gerado pela passagem de radiação



Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

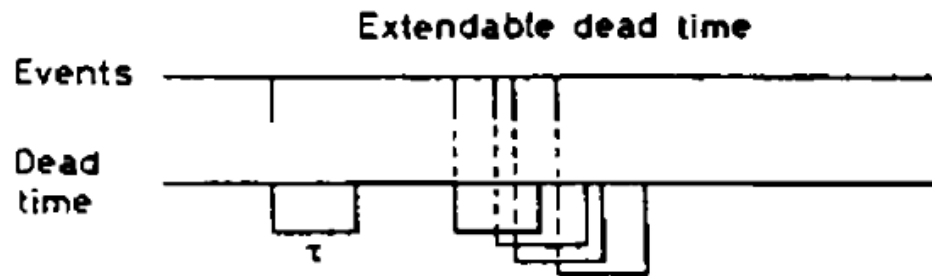
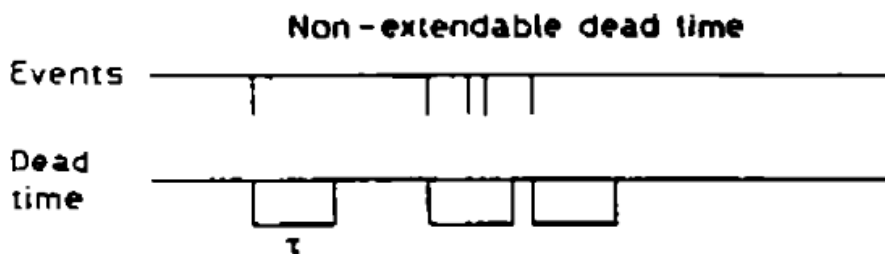
- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
 - **a resolução**: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução
- o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial



Outras características importantes num detector

São ainda importantes as seguintes características

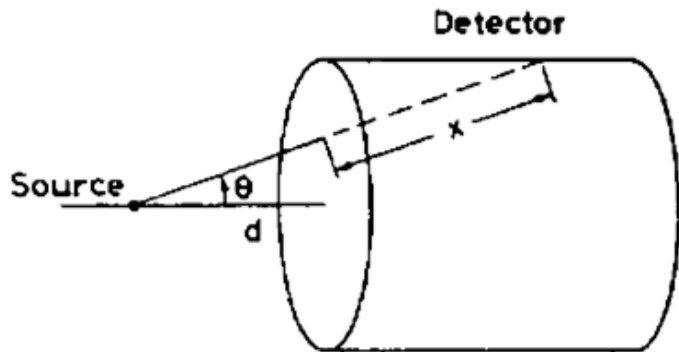
- a resposta : tipicamente impulso eléctrico gerado pela passagem de radiação
- a resolução: quanto maior for o impulso eléctrico maior a resolução
 - o tipo de interacções entre a radiação e o detector é crucial
- **o tempo de resposta**: determina a eficiência em tempo de um detector
 - pode levar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

material

Introdução

“Revelando” a passagem de partículas

Alguns exemplos de detectores do LHC

Como a reconstrução complementa a detecção

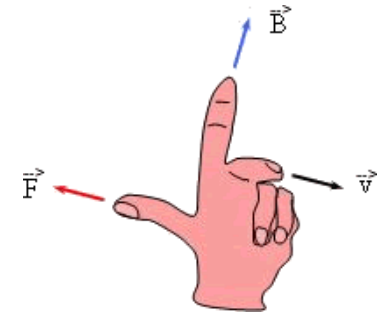
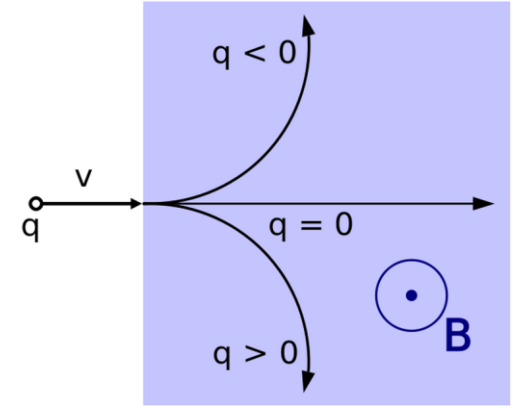
Conclusões

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]

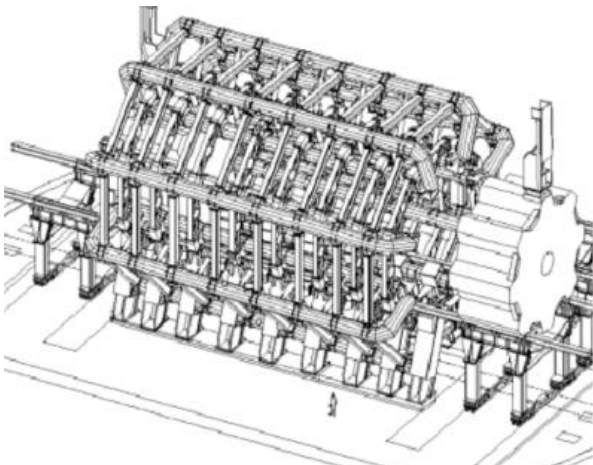
ângulo de inclinação

carga eléctrica [e]

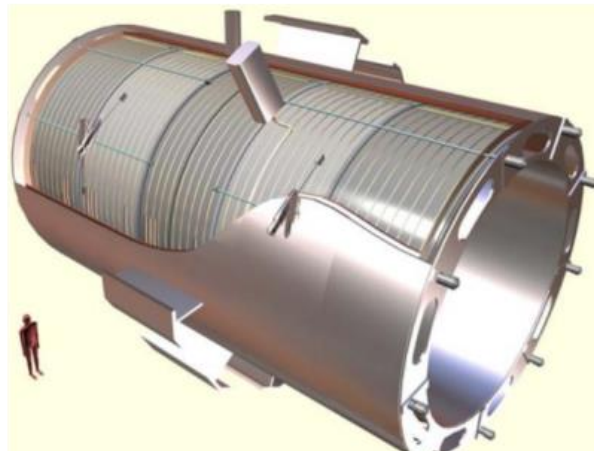
intensidade de campo magnético [T]

Raio de curvatura [L]

Campos magnéticos nas grandes experiências



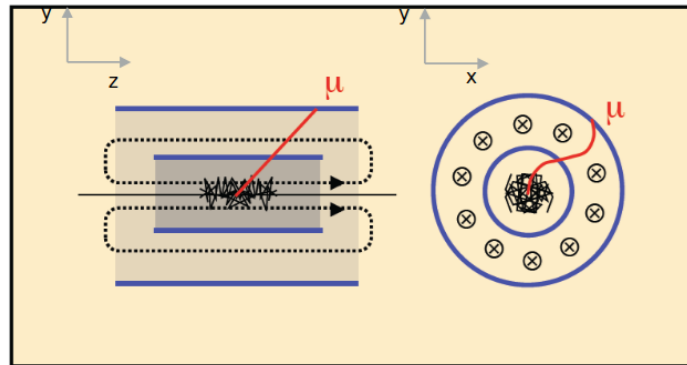
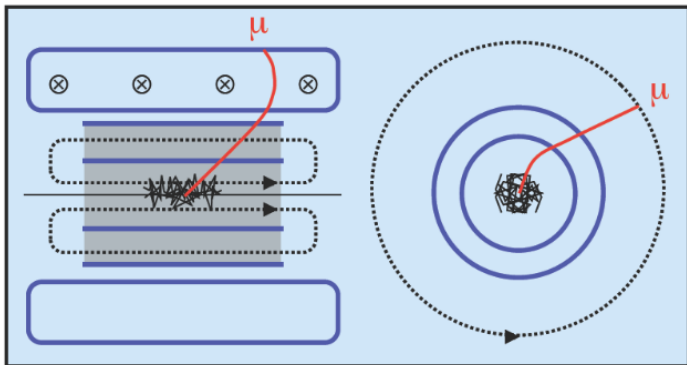
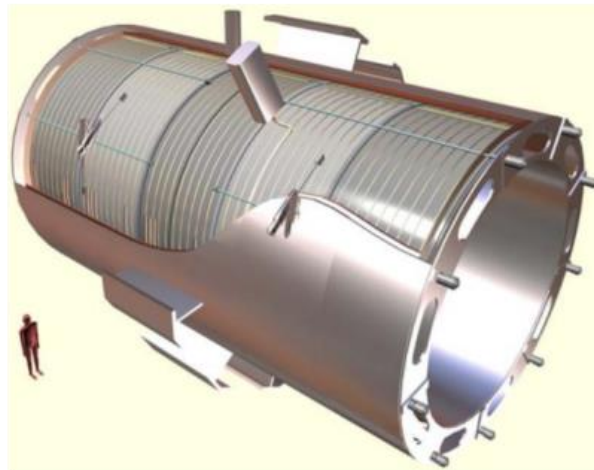
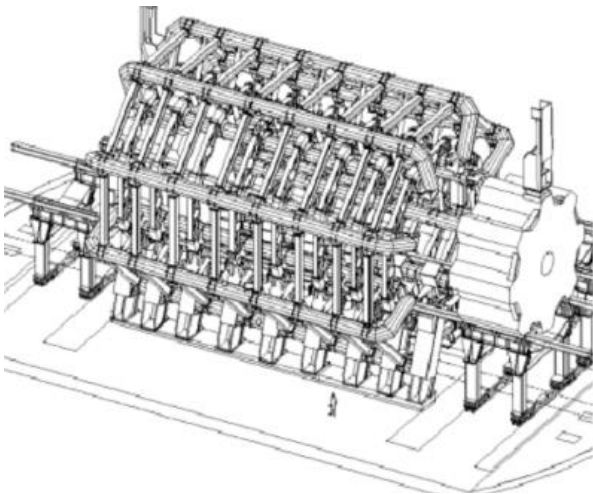
ATLAS



CMS

<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 complemento de um solenóide interno (2T) requer espaço	espaço e tecnologias limitadas para calorimetria curvatura pequena a ângulos maiores

Campos magnéticos nas grandes experiências



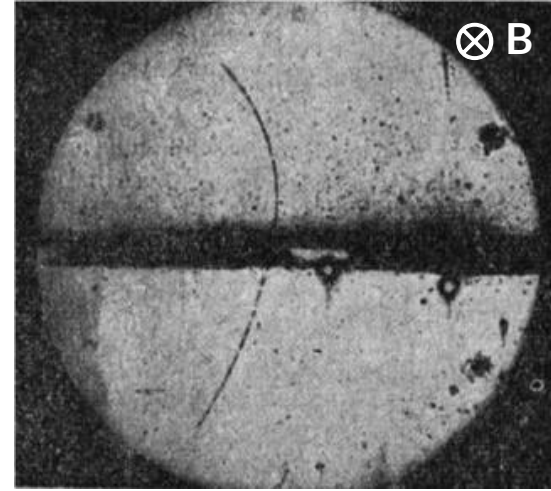
Como ver a trajetória das partículas?



Câmara de nuvens

(Wilson, 1911; Prémio Nobel 1927)

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

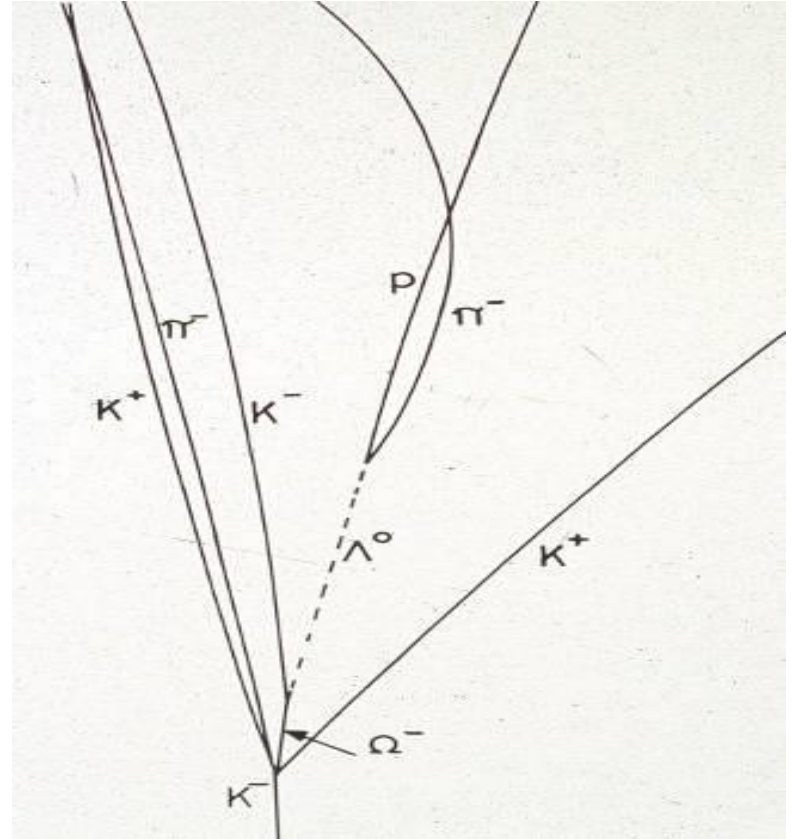


Descoberta do positrão (e^+)

(Anderson, 1932; Prémio Nobel 1936)

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

Os primeiros reveladores de partículas



Câmaras de fios (proportional multi-wire chambers)



Criada em 1968 por Charpak
(Prémio Nobel 1992)

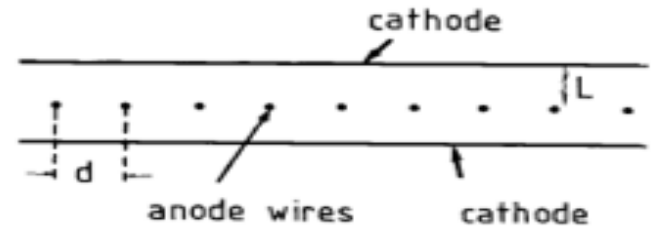
Transcrição do analógico para o digital.

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.

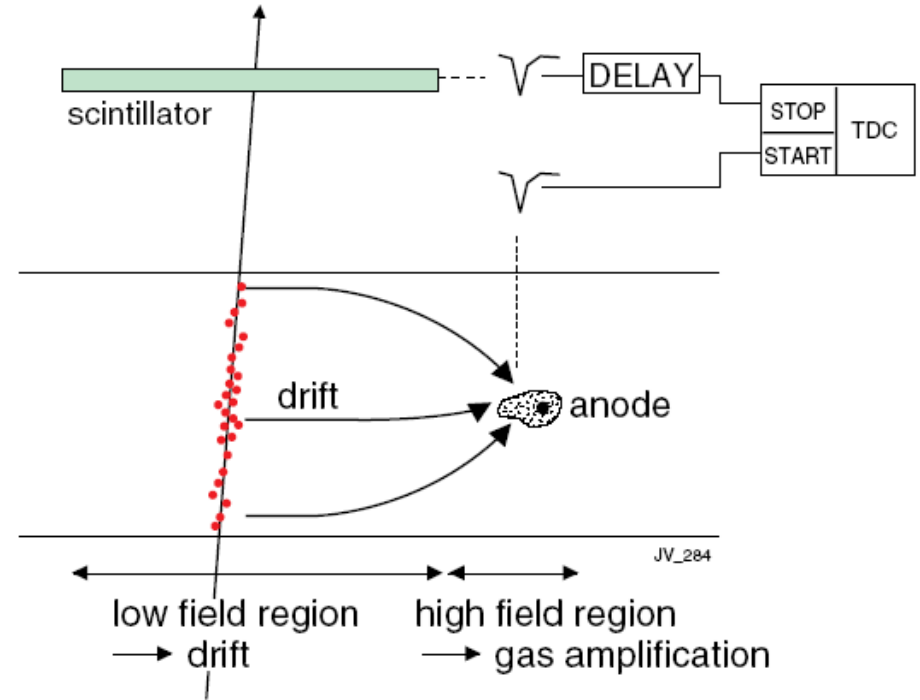


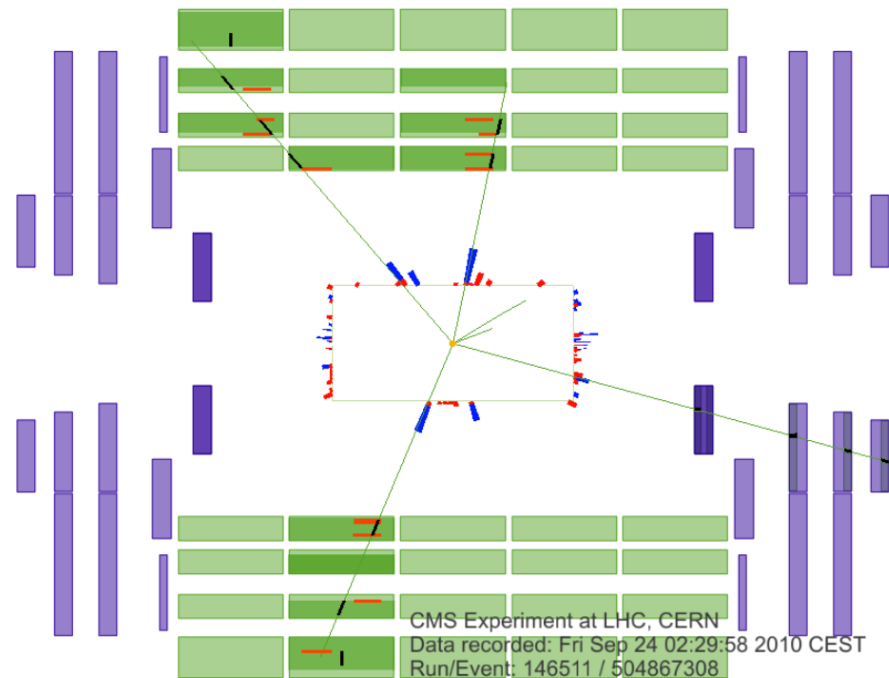
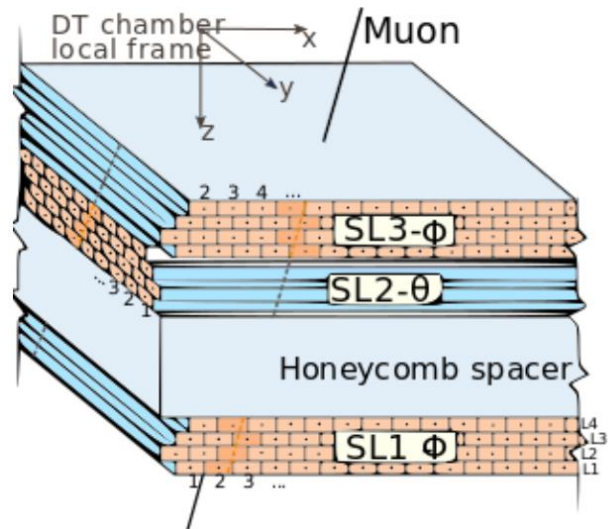
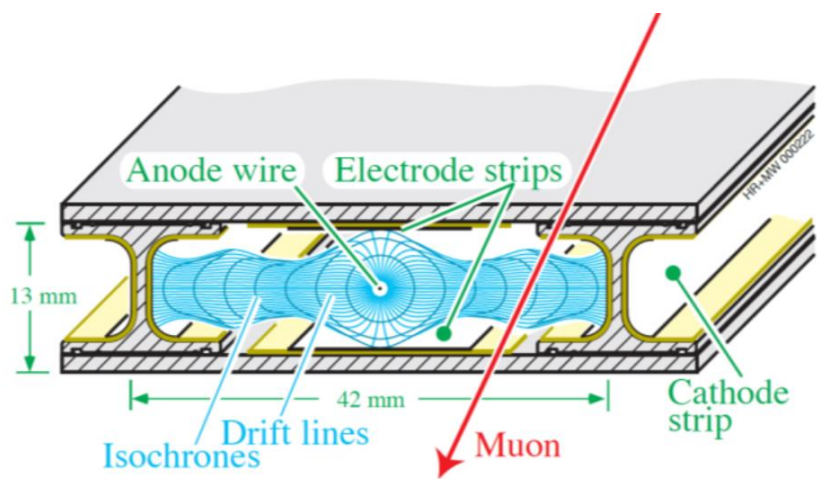
Câmaras de deriva (drift chambers)

O espaçamento entre 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 μm

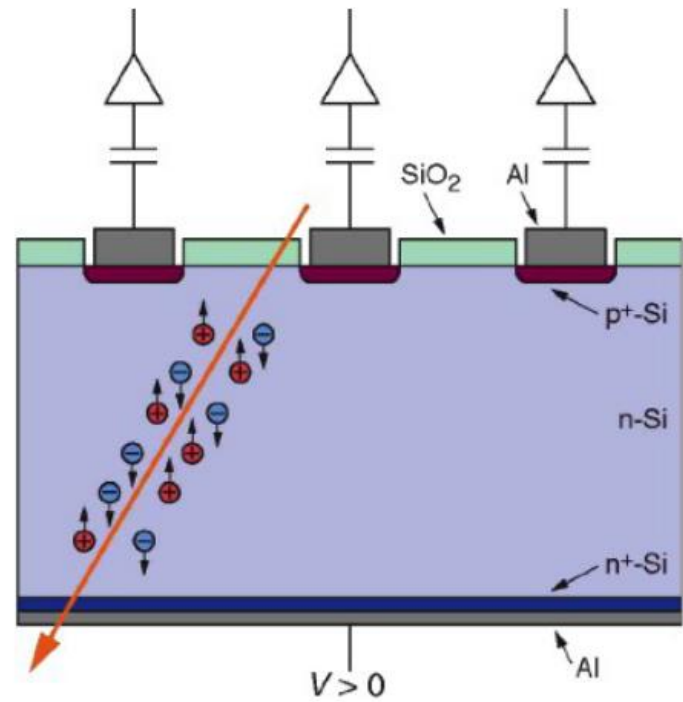
Detectores de estado sólido I

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 ³ (C ₂ H ₂ F ₄)	Alta	2.33 g/cm ³ (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



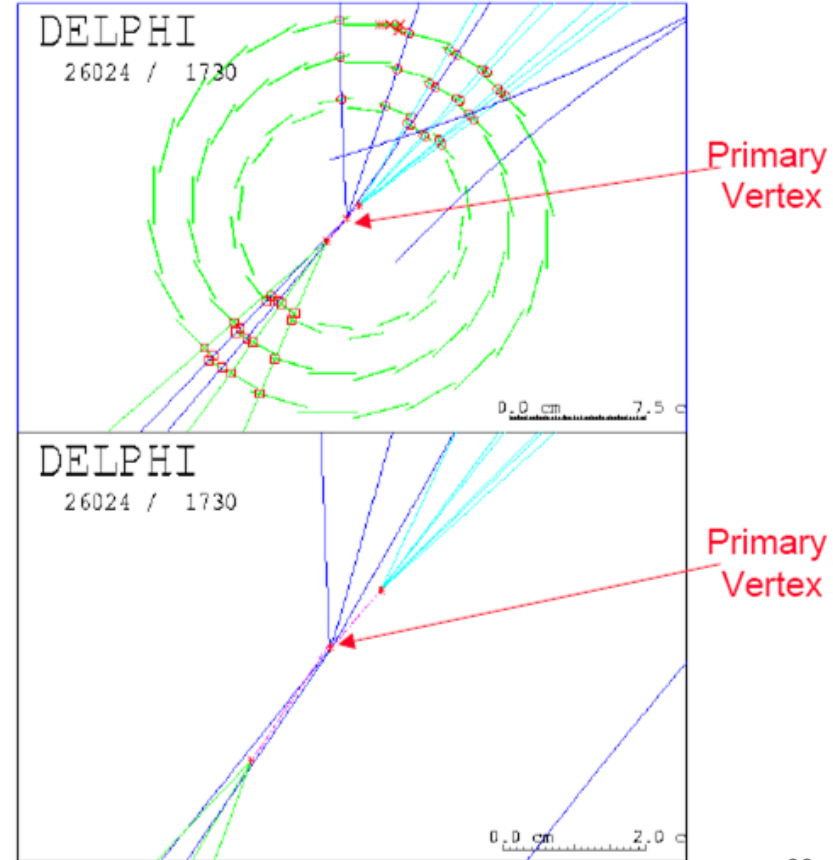
Detectores de estado sólido II

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

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

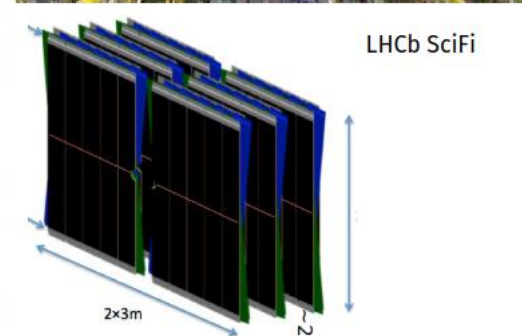
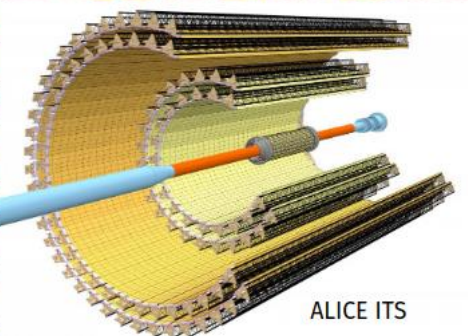
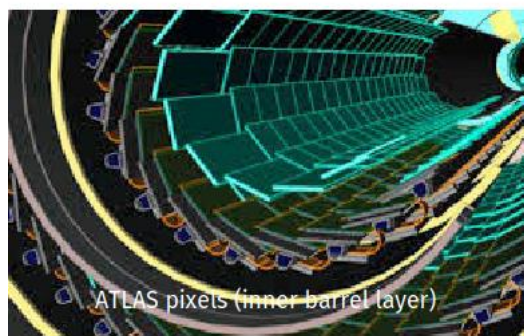
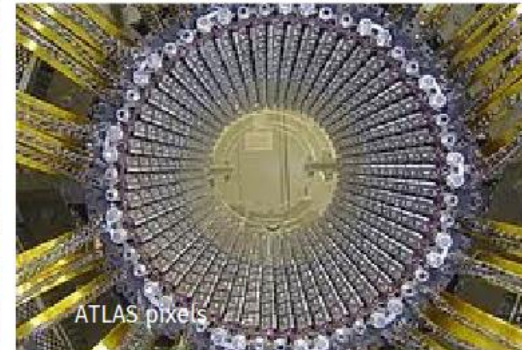
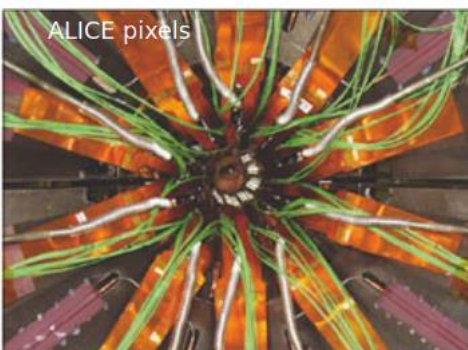
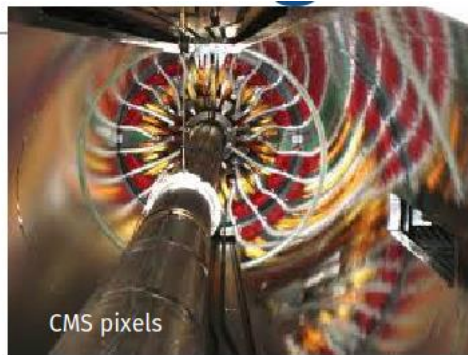
Baixa energia de ionização \Rightarrow minizam a interacção com as partículas que os atravessam

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

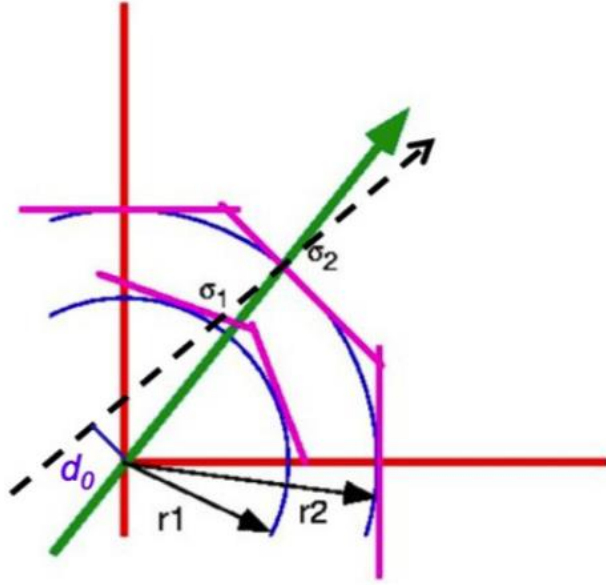


Complexidade crescente dos detectores de Si

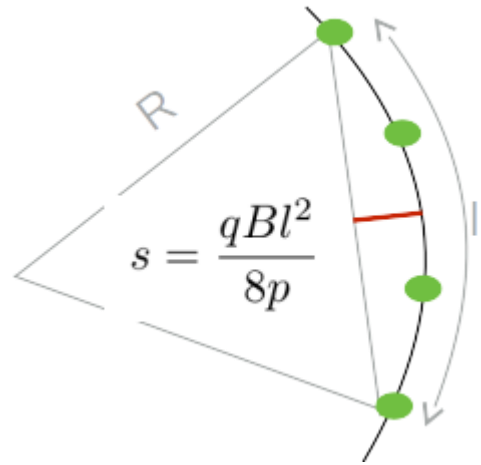
Experiência	Detectores	Canais [10^3]	Área de Si [m^2]
<i>Aleph (LEP)</i>	144	95	0.49
<i>CDF (Tevatron)</i>	720	405	1.9
<i>D0 (Tevatron)</i>	768	793	4.7
<i>AMS II</i>	2300	196	6.5
<i>ATLAS (LHC)</i>	4088	6'300	61
<i>CMS (LHC)I</i>	15148	10'000	200



Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias I

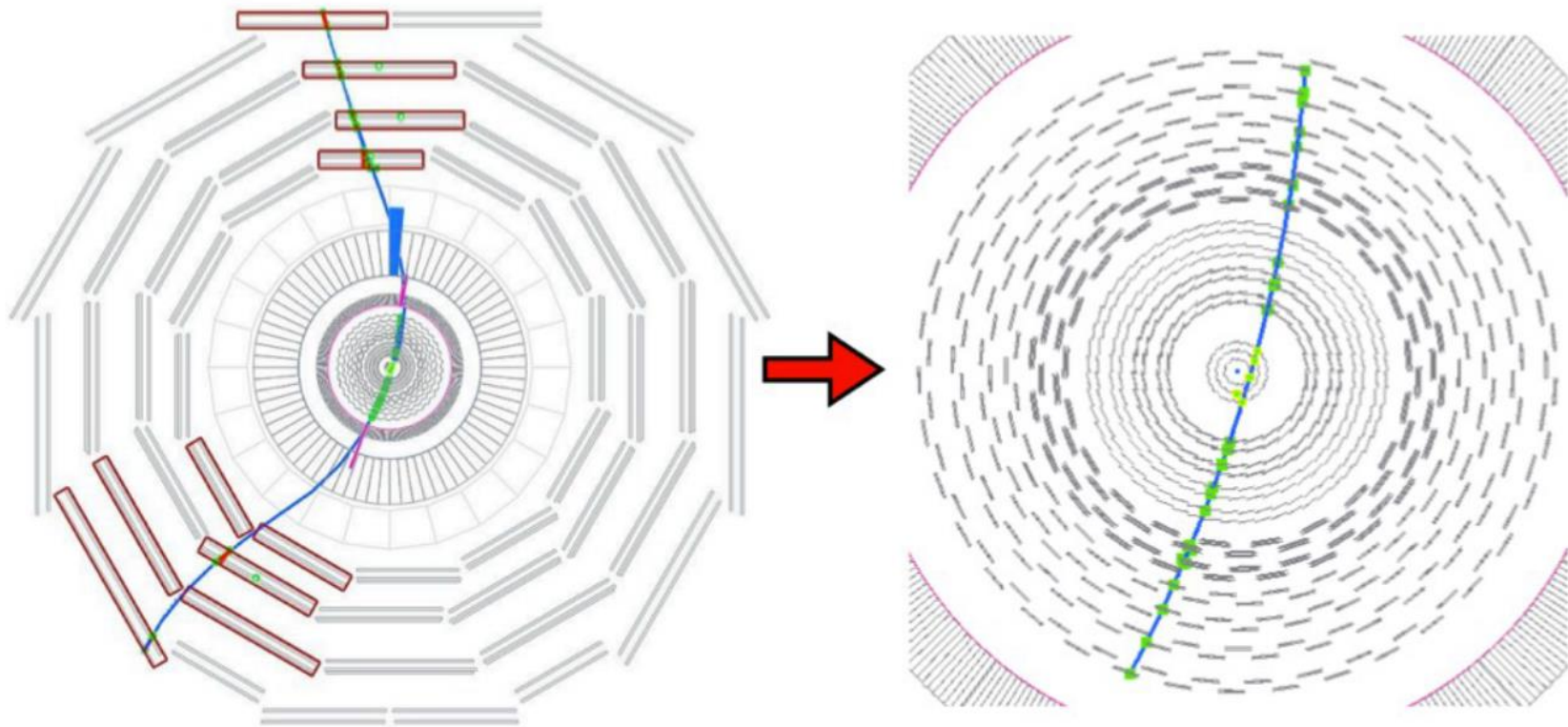


$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}$$



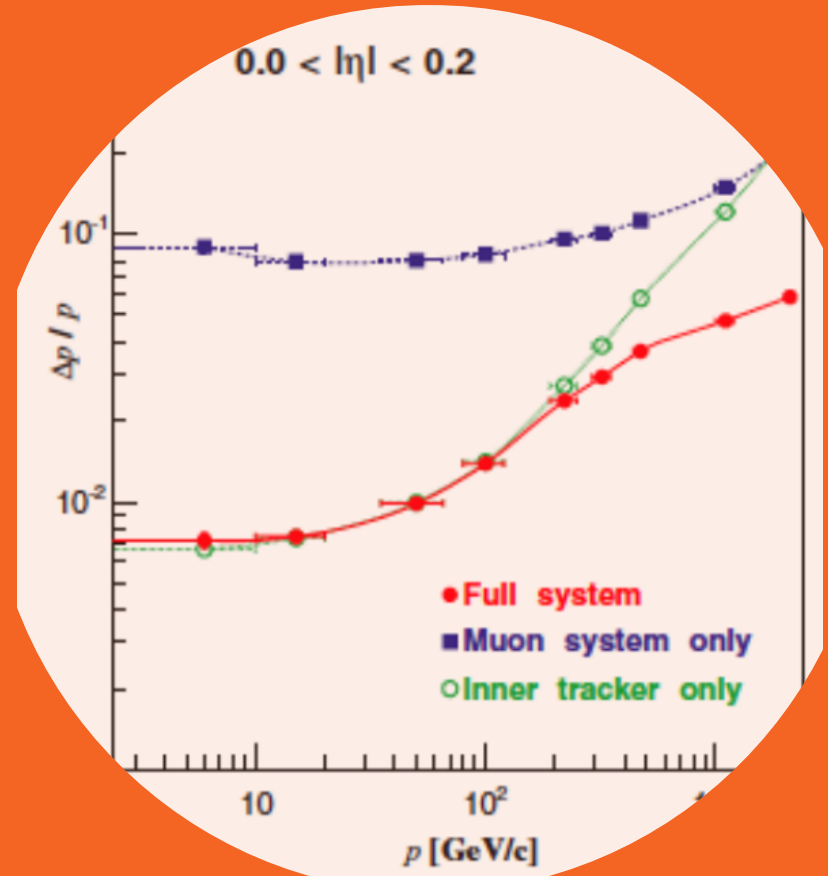
$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \equiv \frac{8p_T}{0.3BL^2} \sigma_s$$

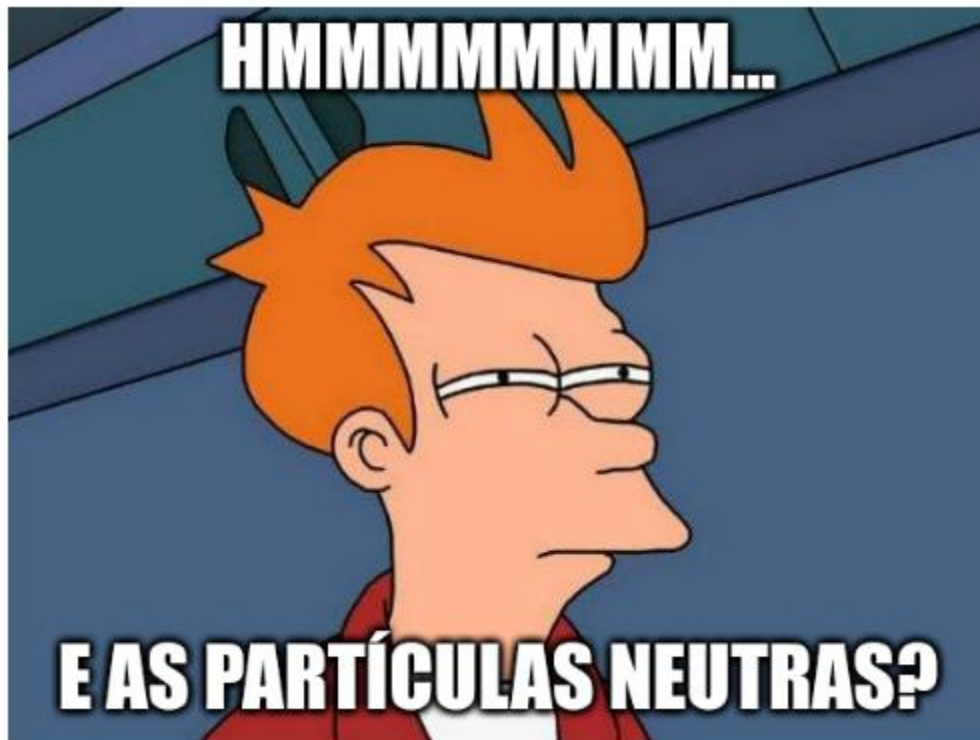
Ligando os pontos: reconstrução de trajetórias II



Revelando a passagem de partículas

Ligando os pontos: reconstrução de trajectórias III





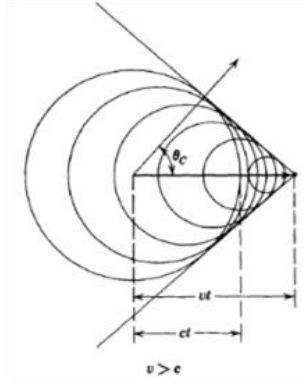
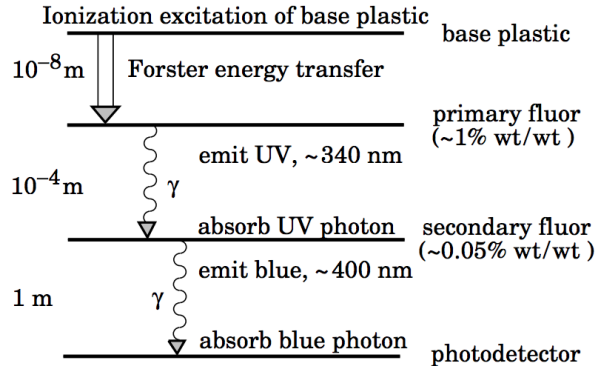
... em última instância temos de as converter em partículas ionizantes

Princípios de calorimetria

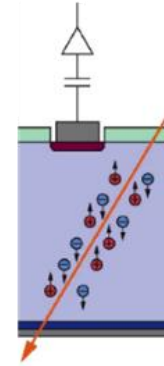
As partículas precisam de interagir na matéria \Rightarrow interação destrutiva

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

Cintilação



Radiação de Čerenkov



Hadrões

e/ γ

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!

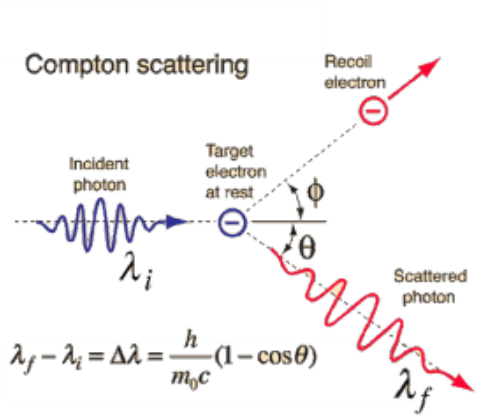
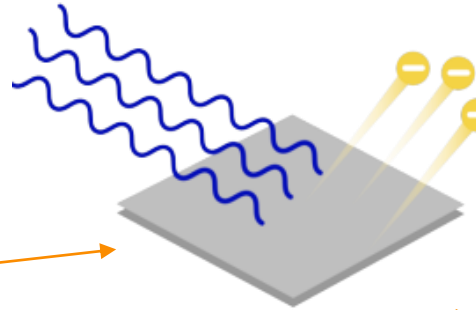


Cascatas eletromagnéticas

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

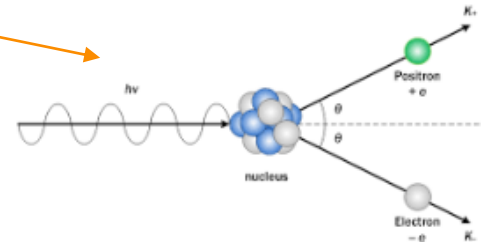
- e
- ionização
 - bremsstrahlung

- γ
- efeito fotoeléctrico
 - dispersão de Compton
 - produção de pares



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

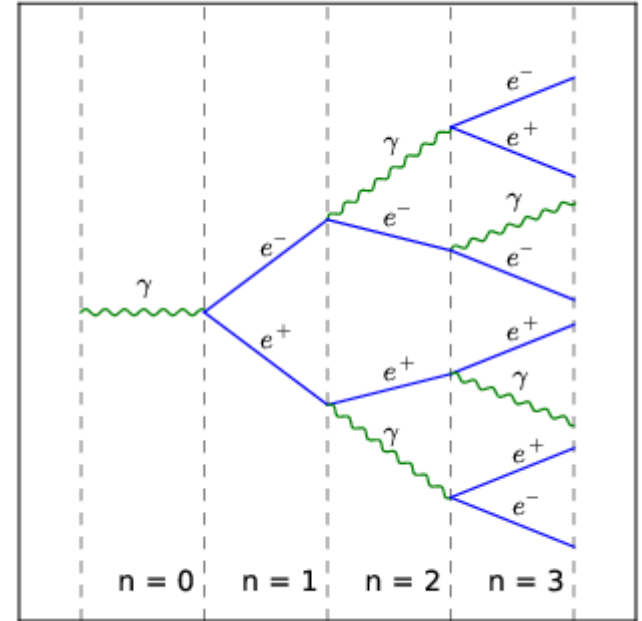
- $E \rightarrow E/2 \rightarrow E/4 \rightarrow \dots$

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

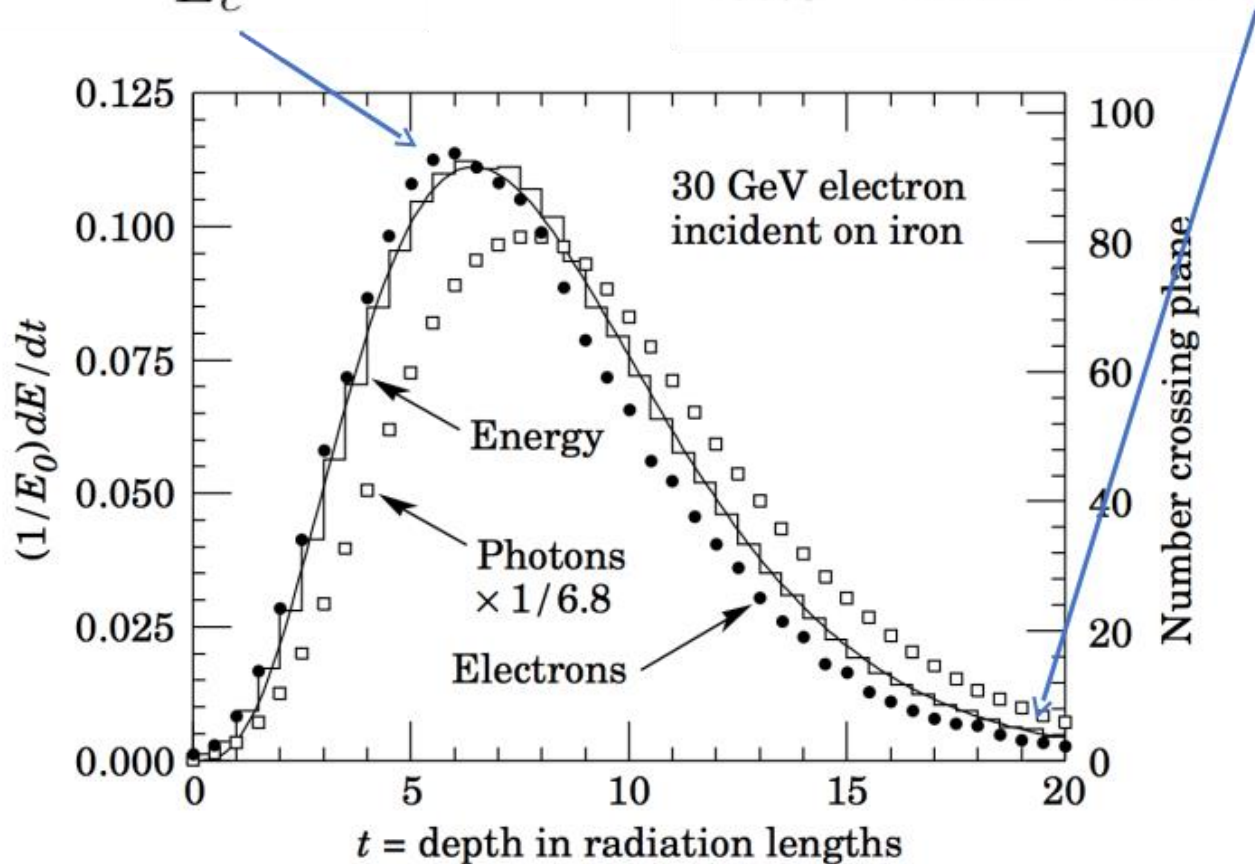
- profundidade do máximo: $x_{\max} \propto X_0 \log_2 E / E_c$
- $N_{\max} \sim E_0 / E_c$



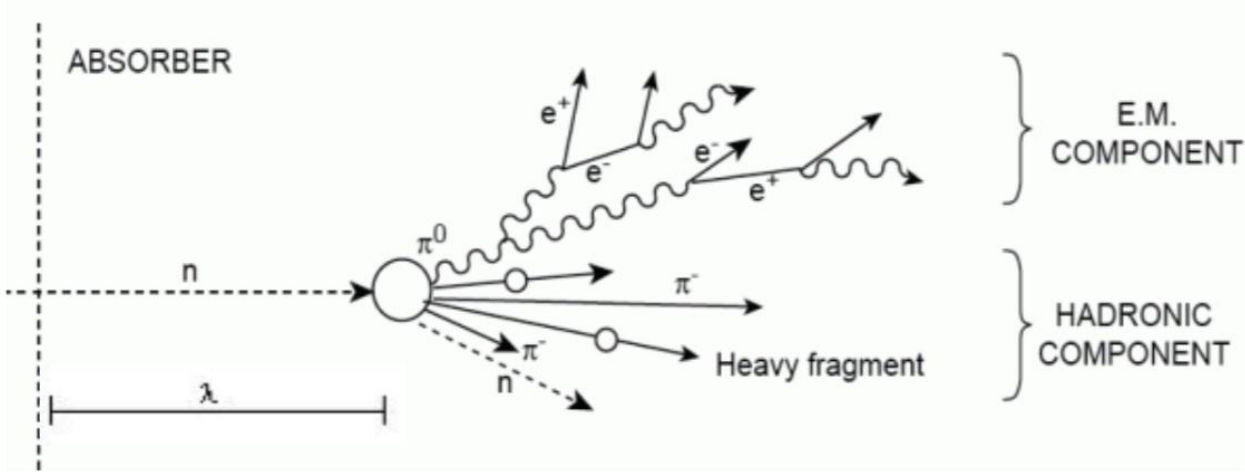
Este modelo simples não anda longe da realidade!

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

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



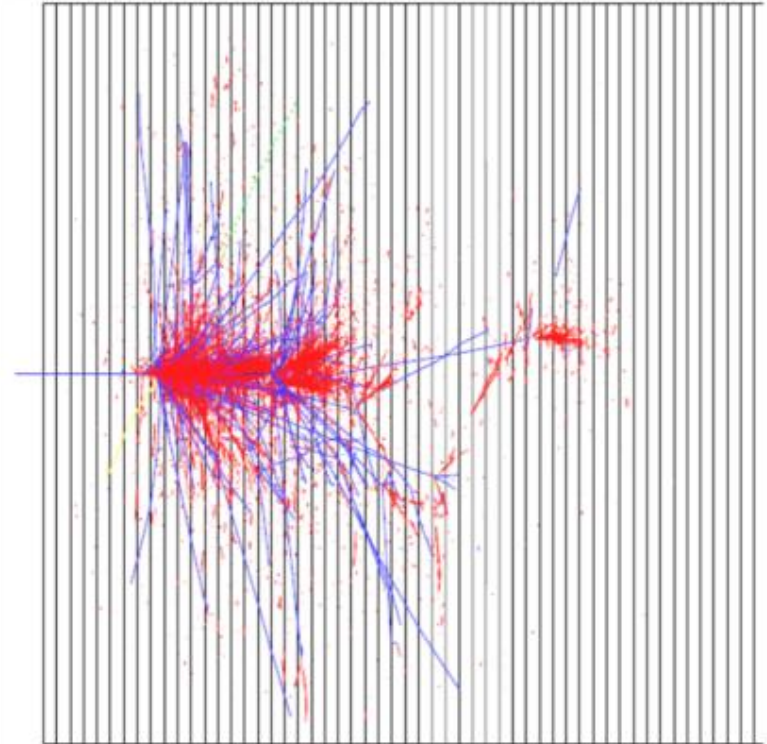
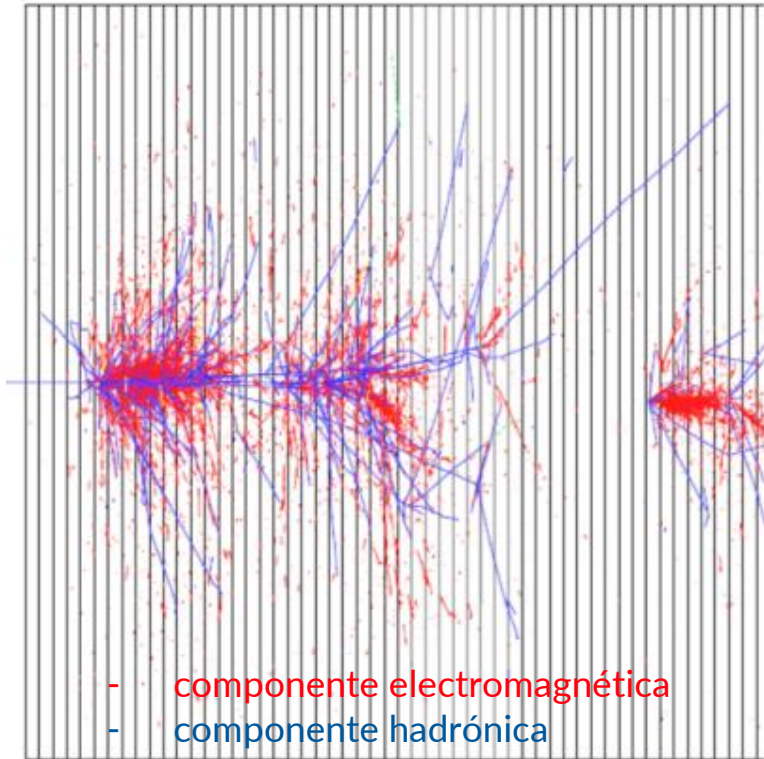
Cascatas hadrónicas



As reacções nucleares são mais complexas

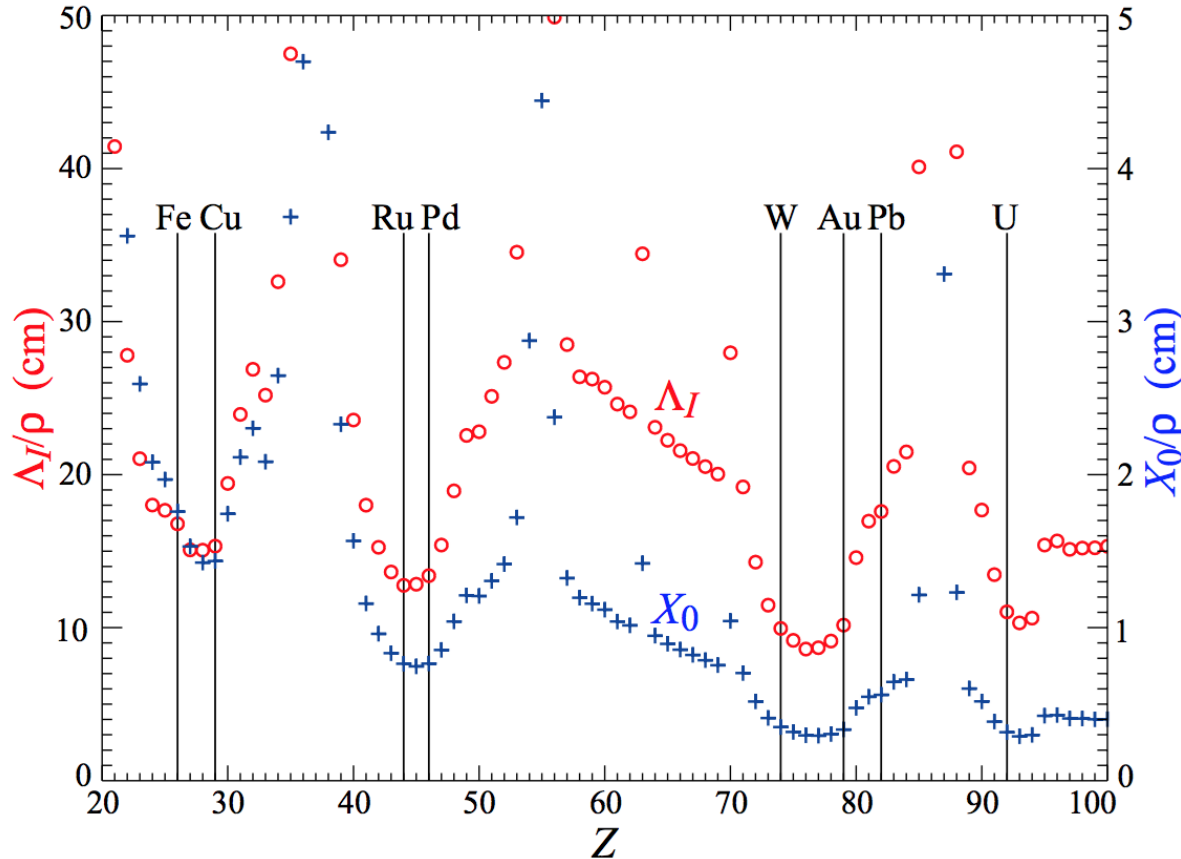
- dependem da energia, da partícula incidente, dos alvos, etc.
- os produtos são uma mistura de fragmentos electromagnéticos e novos hadrões
- contenção das cascatas requiere uma massa elevada no calorímetro

Cascatas hadrónicas



Não há duas semelhantes: modelos associados com incertezas significativas!

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

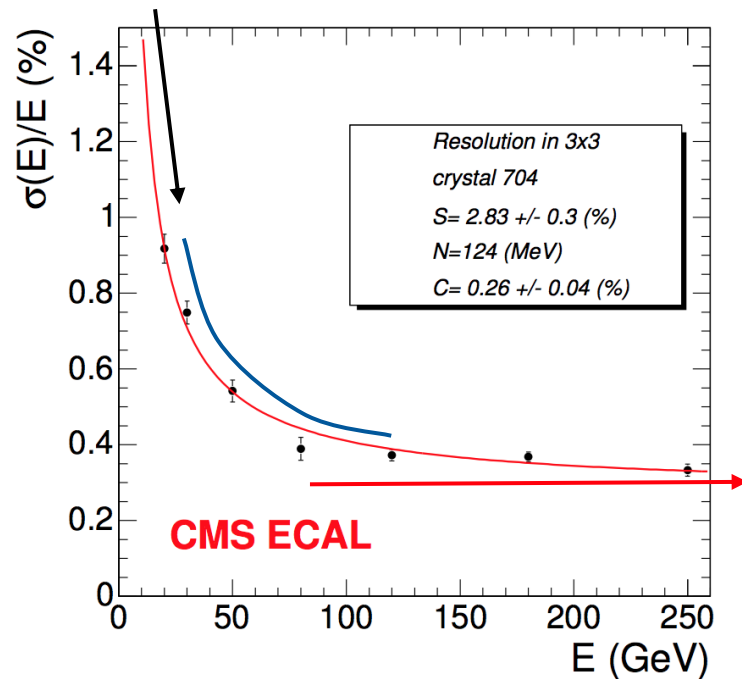
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

termo estocástico - relacionado com as flutuações no desenvolvimento da cascata

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

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

\oplus = soma em quadratura



resolução de reconstrução de energia de electrões

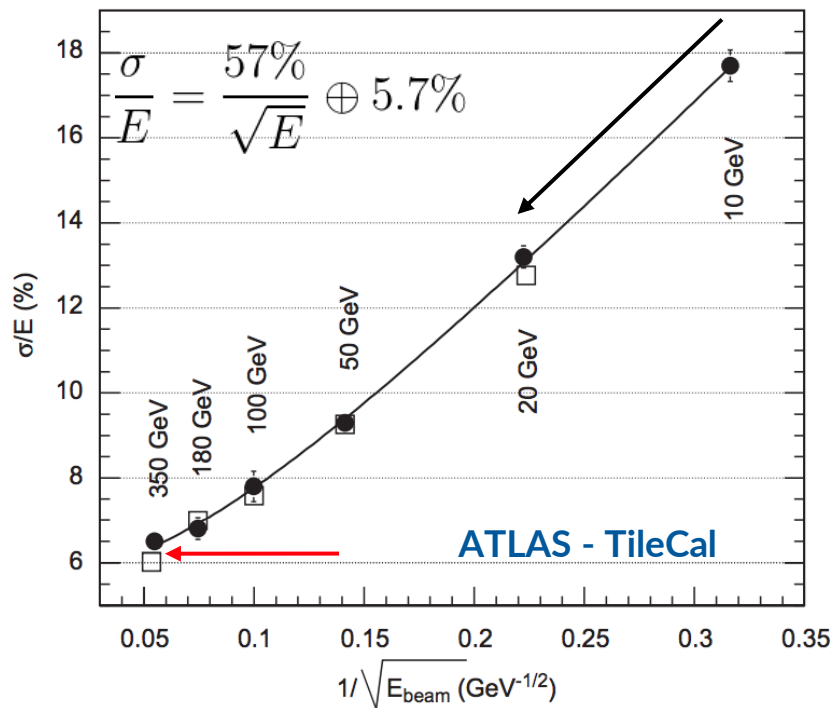
Modelo de resolução calorimétrica

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

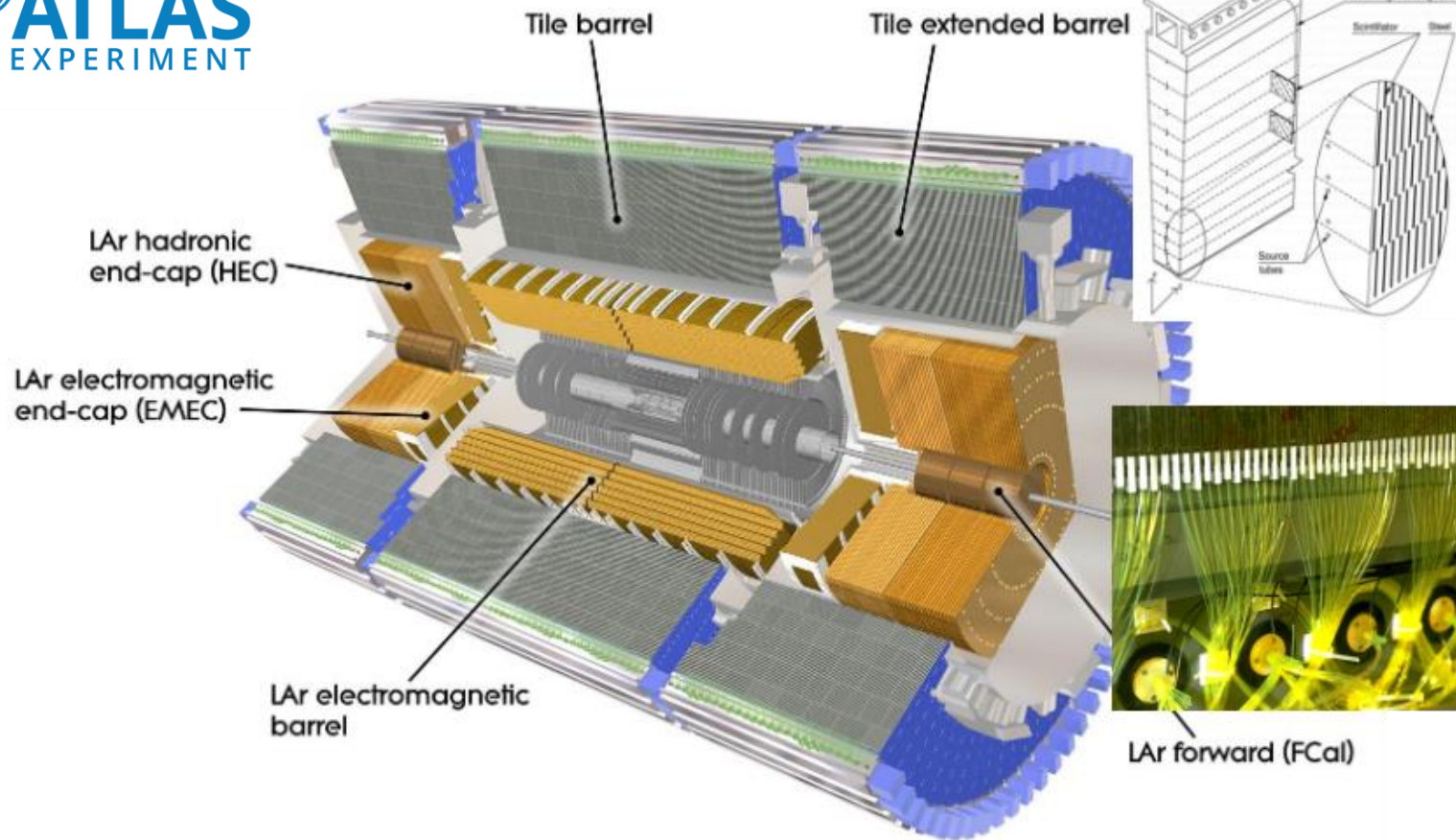
termo estocástico - relacionado com as flutuações no desenvolvimento da cascata

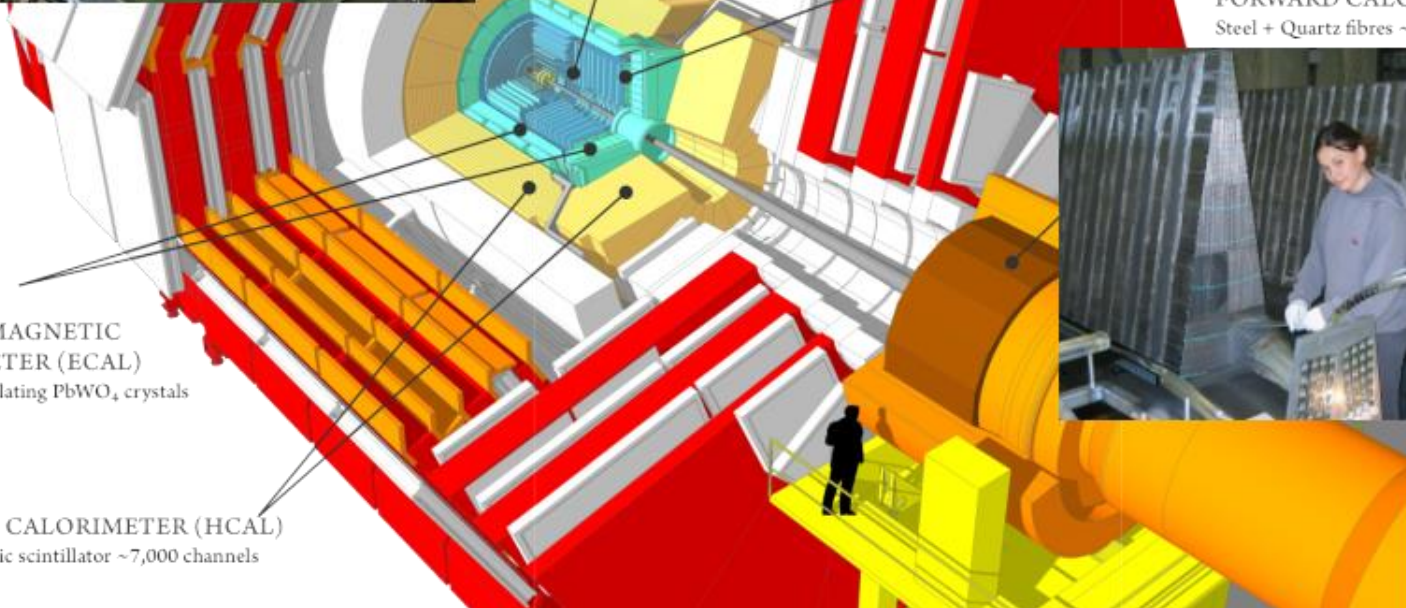
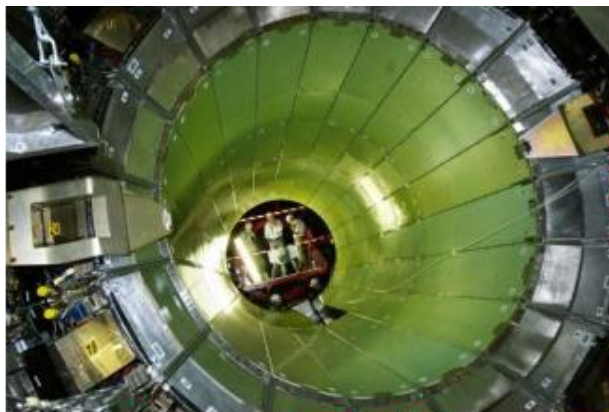
termo de ruído - degradação adicional introduzida a baixa energia pela eletrónica, sobreposicoes, ...

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



resolução de reconstrução de energia de piões carregados



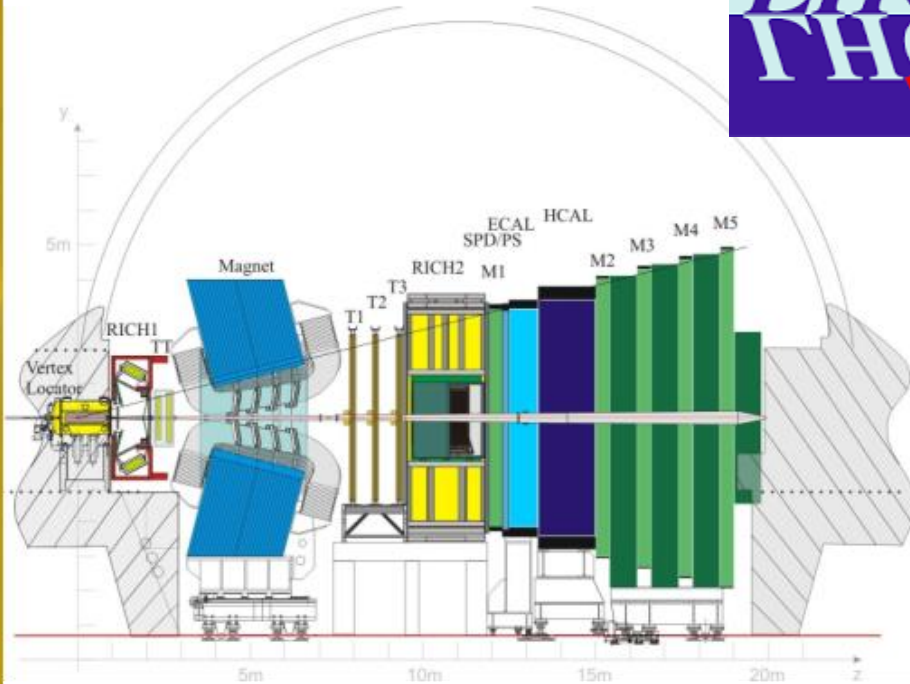
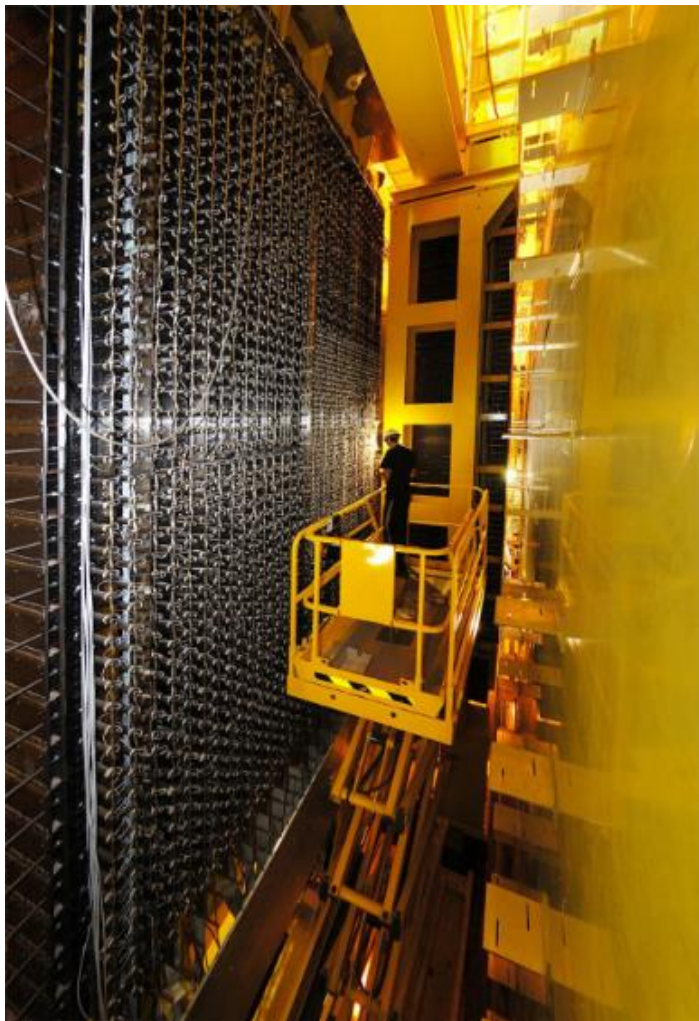


FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels



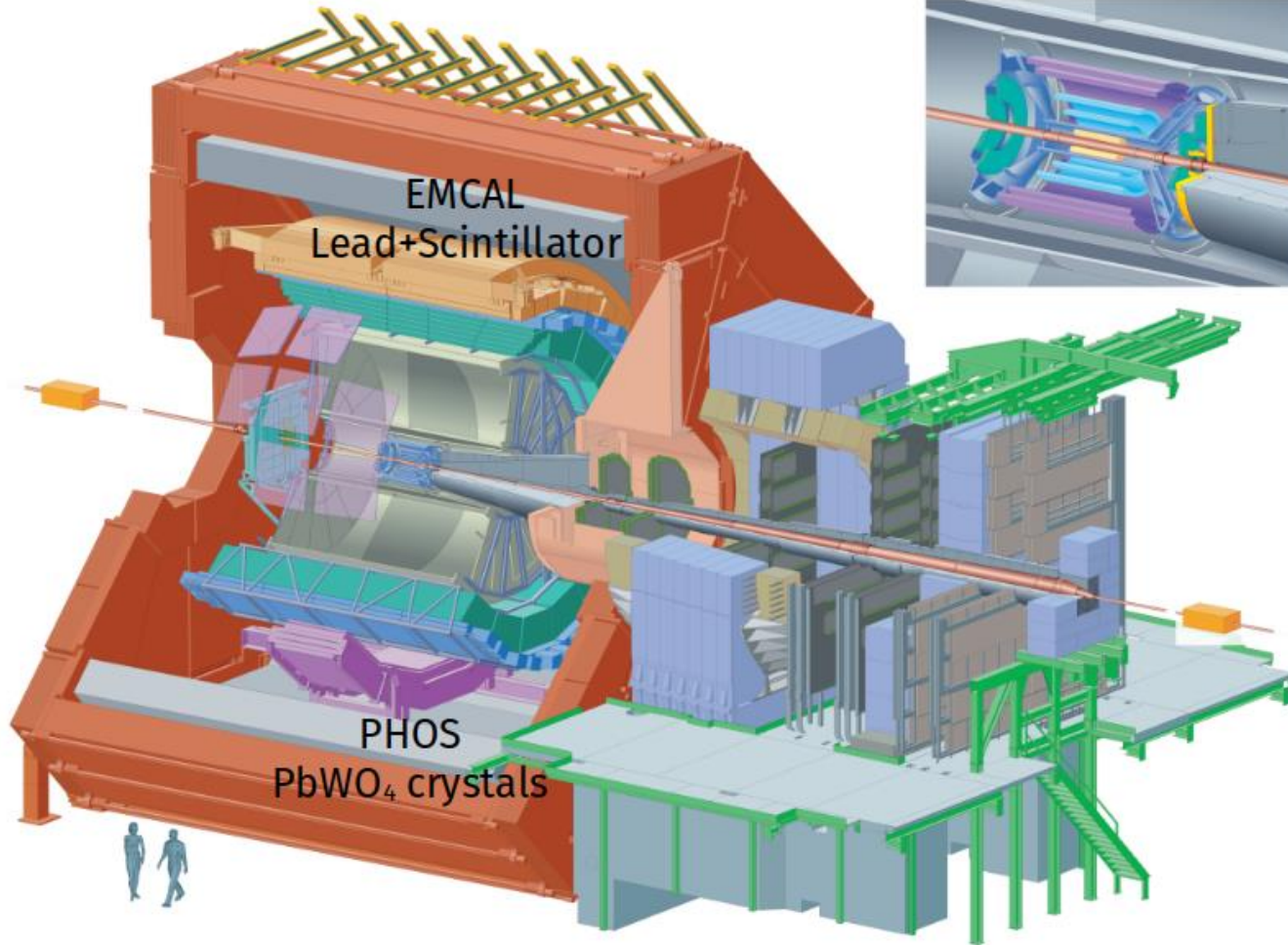
**CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)**
~76,000 scintillating PbWO_4 crystals

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





ALICE



Introdução

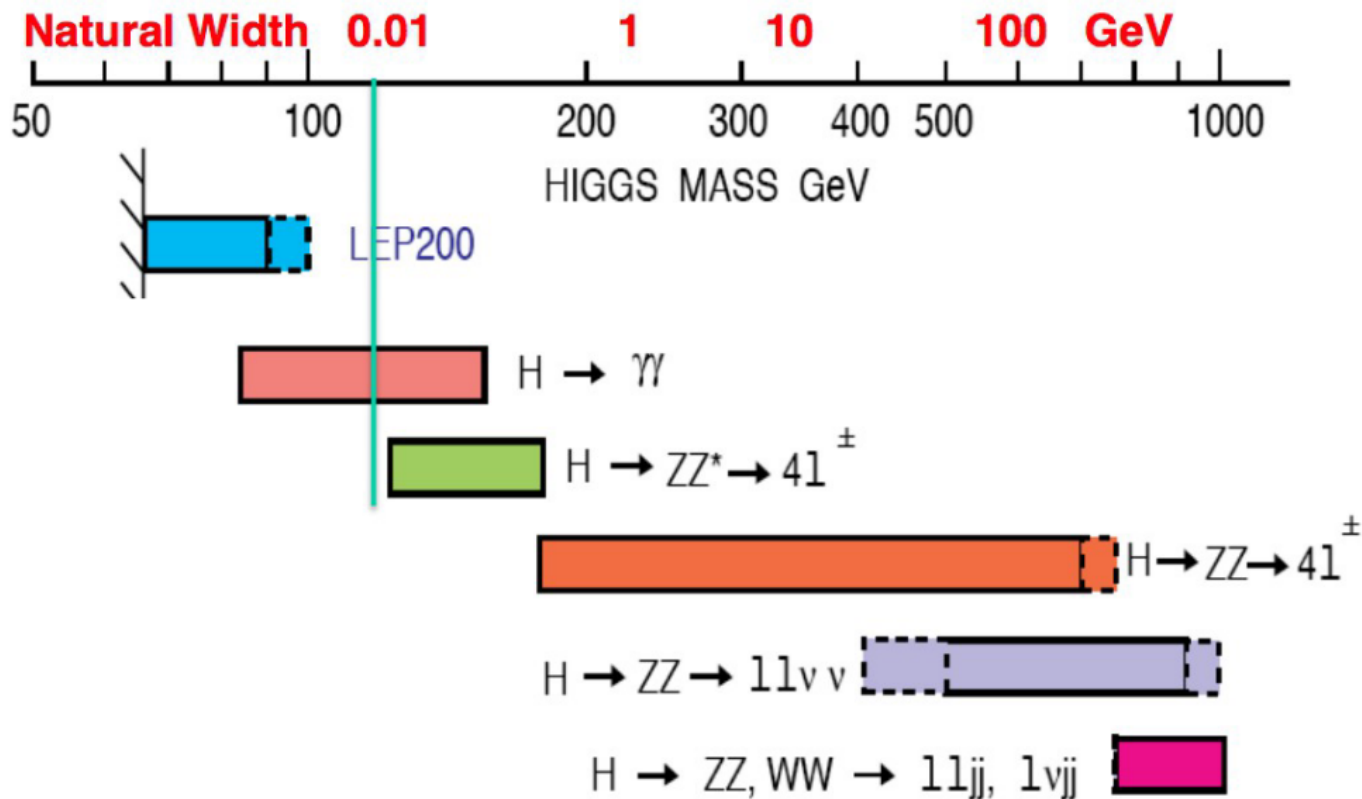
“Revelando” a passagem de partículas

Filosofia de construção de ATLAS e CMS

Como a reconstrução complementa a detecção

Conclusões

A física alinha os princípios gerais



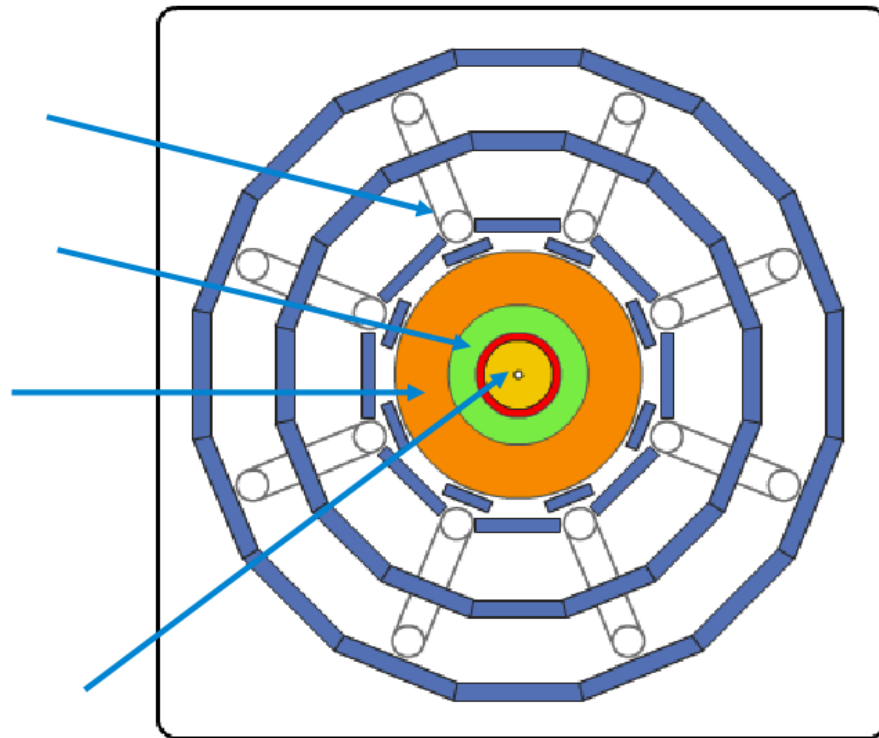
A engenharia guia a concretização

B field source

High-Z materials

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

Lightweight materials
(Si, gaseous)

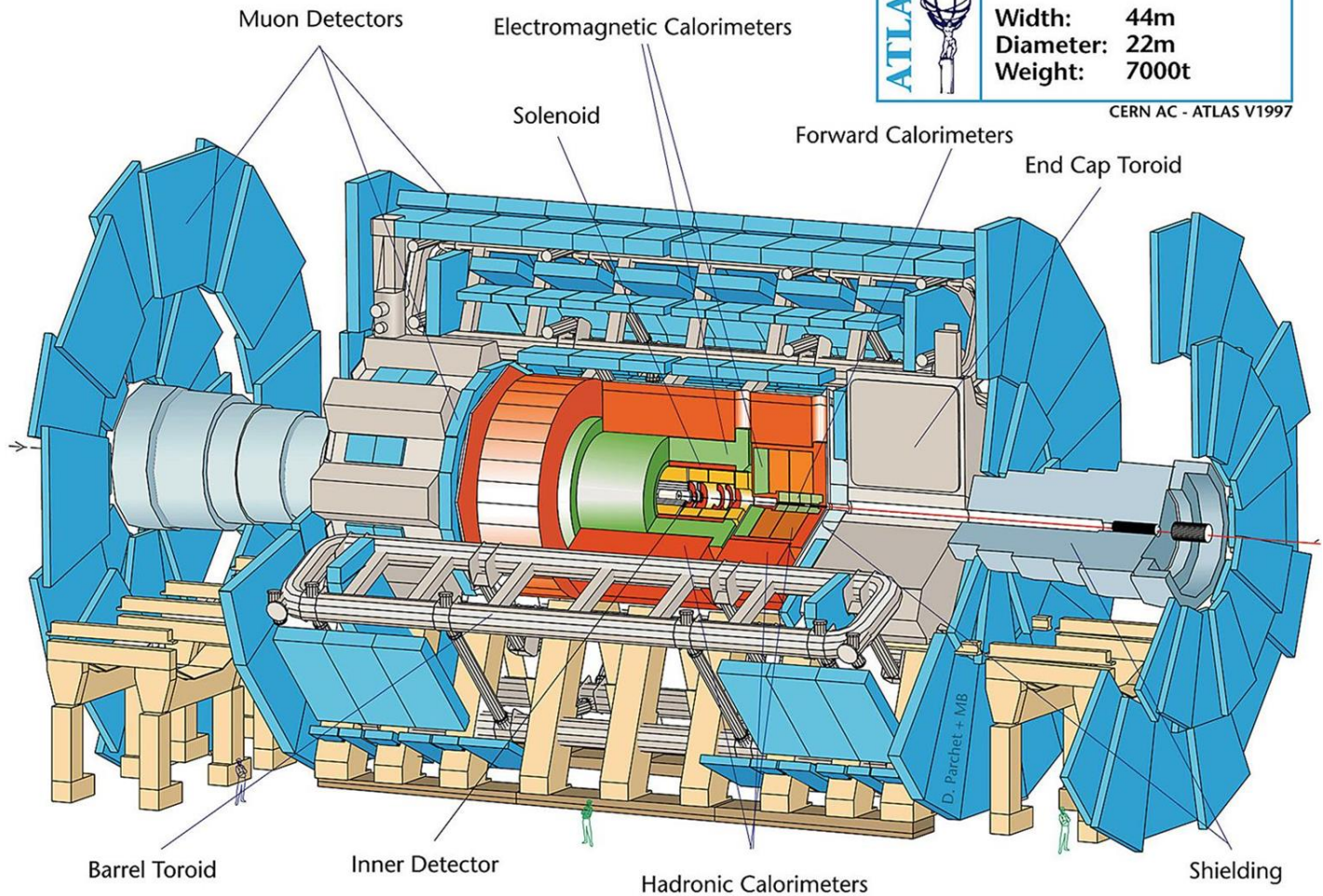


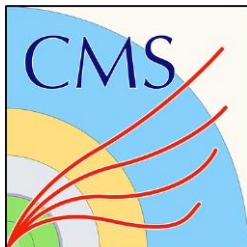


Detector characteristics

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

CERN AC - ATLAS V1997





SUPERCONDUCTING COIL

ECAL Scintillating PbWO_4 Crystals

CALORIMETERS

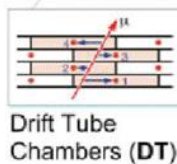
HCAL Plastic scintillator brass sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Silicon Microstrips
Pixels

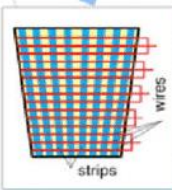
MUON BARREL



Drift Tube
Chambers (DT)



Resistive Plate
Chambers (RPC)



MUON ENDCAPS

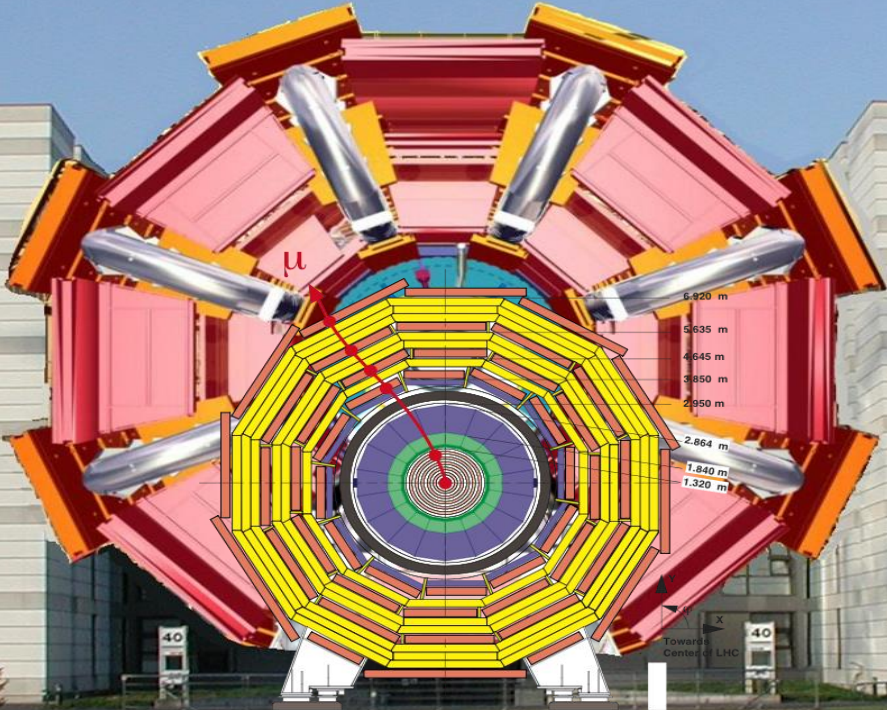
Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

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

CMS

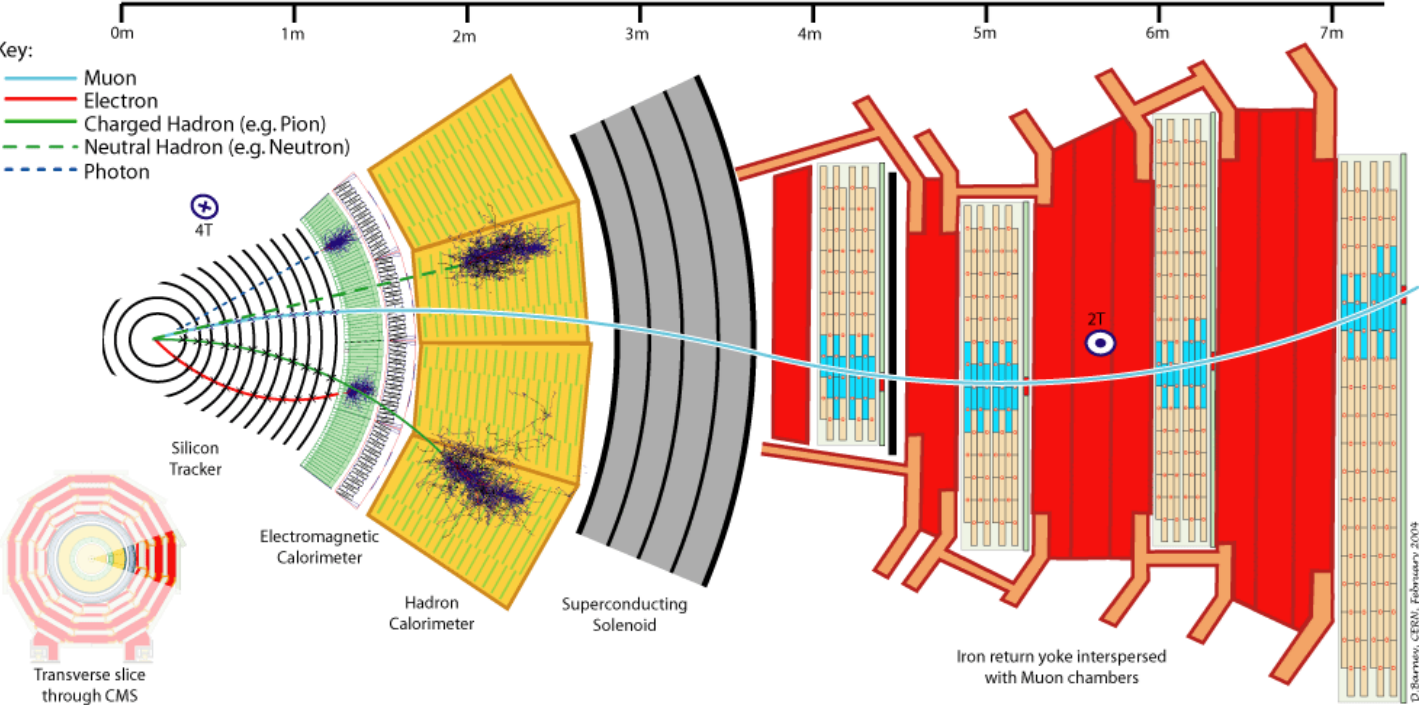
ATLAS

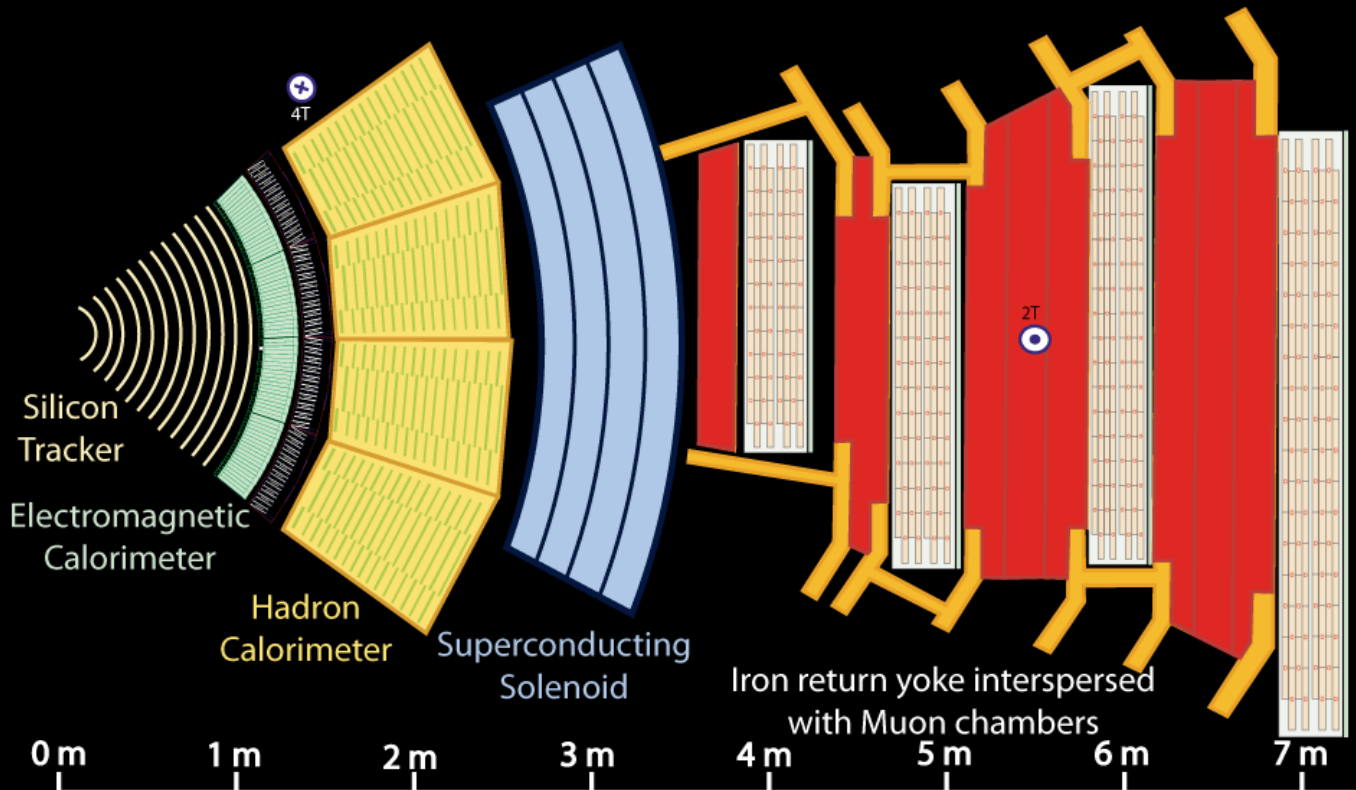


Transverse View

CMS-TS-00079

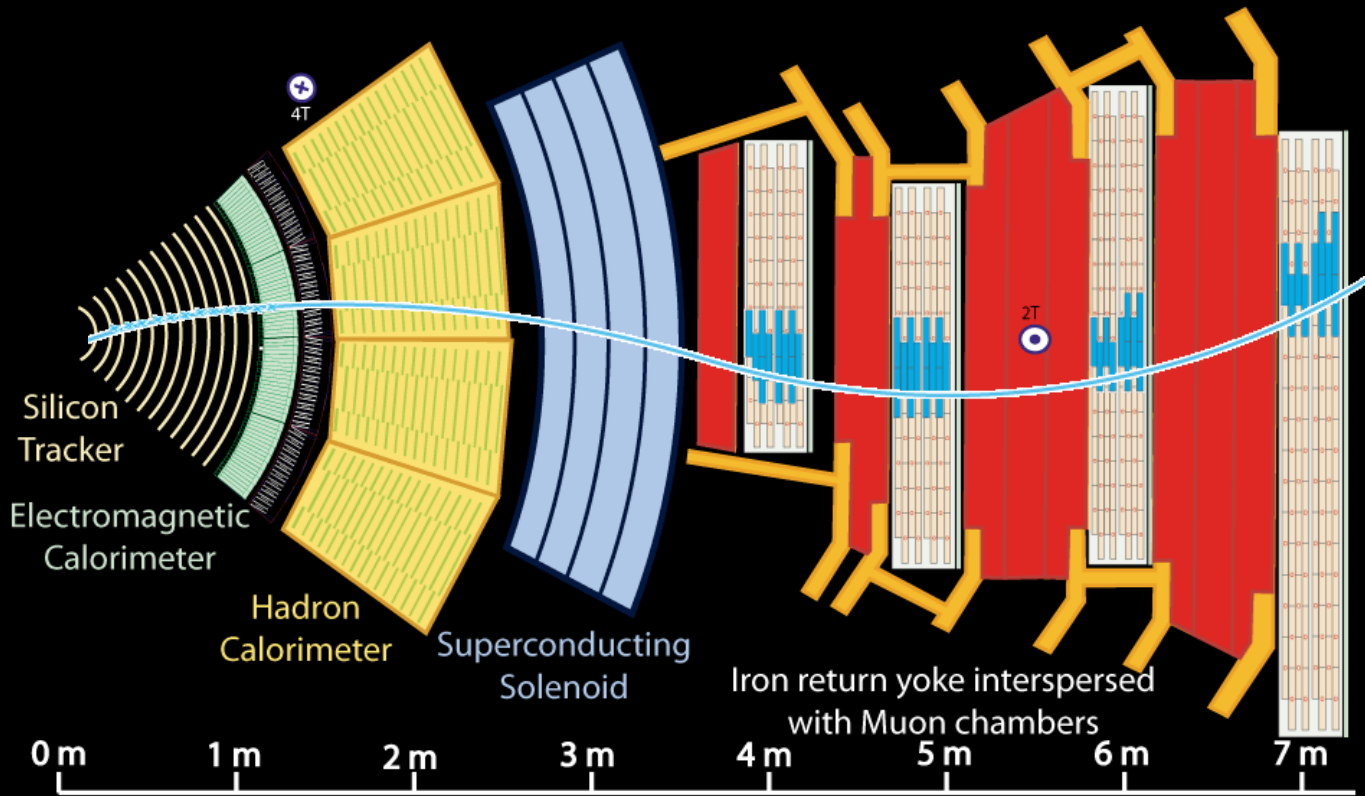
O detector e as partículas





Key:

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



Key:

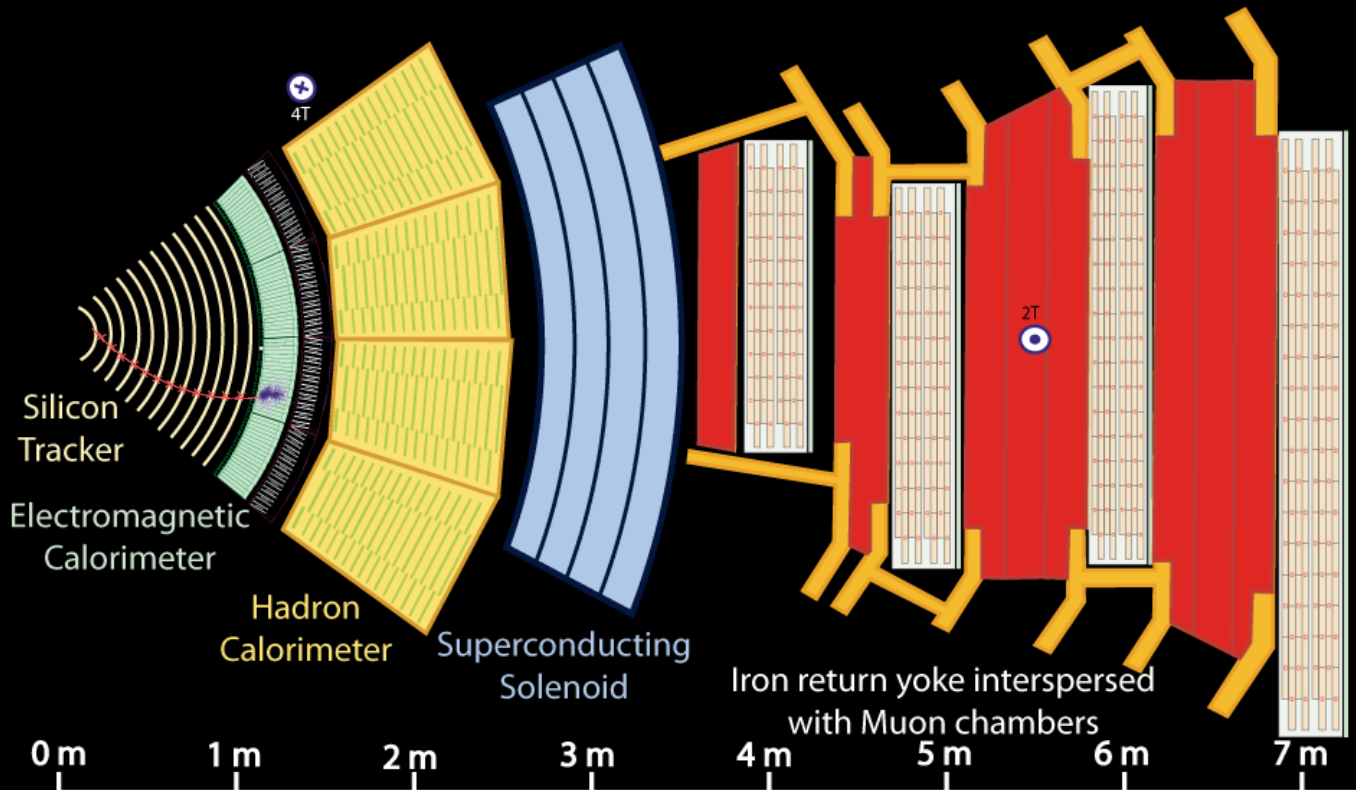
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

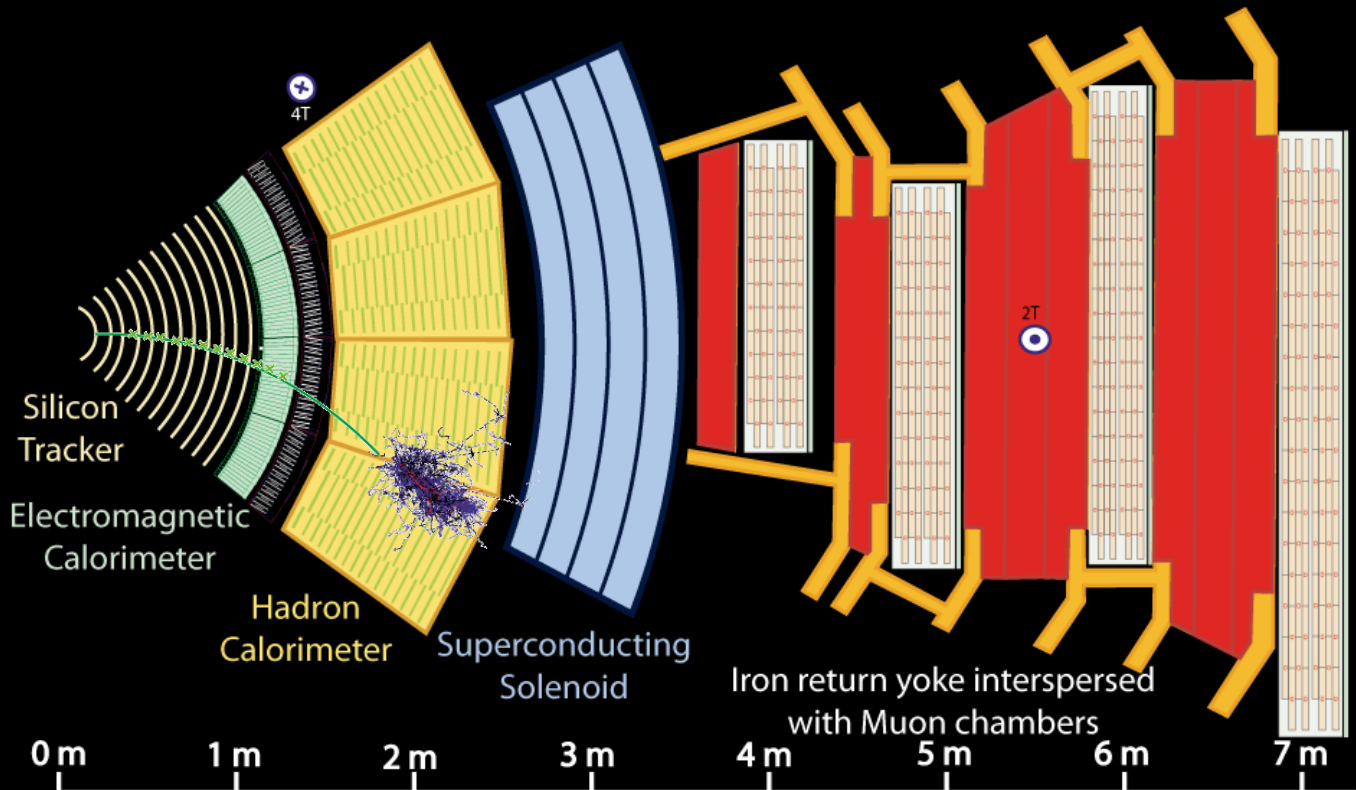
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

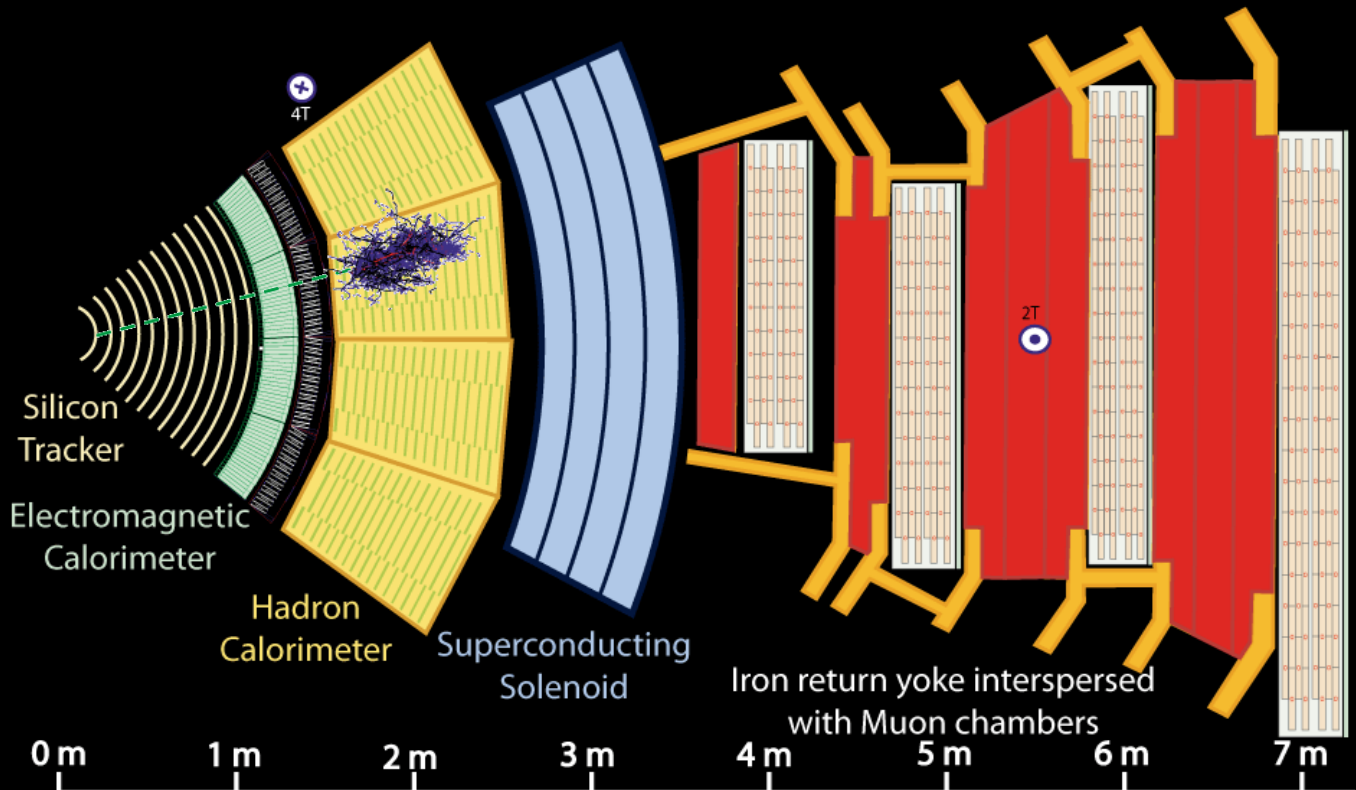
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



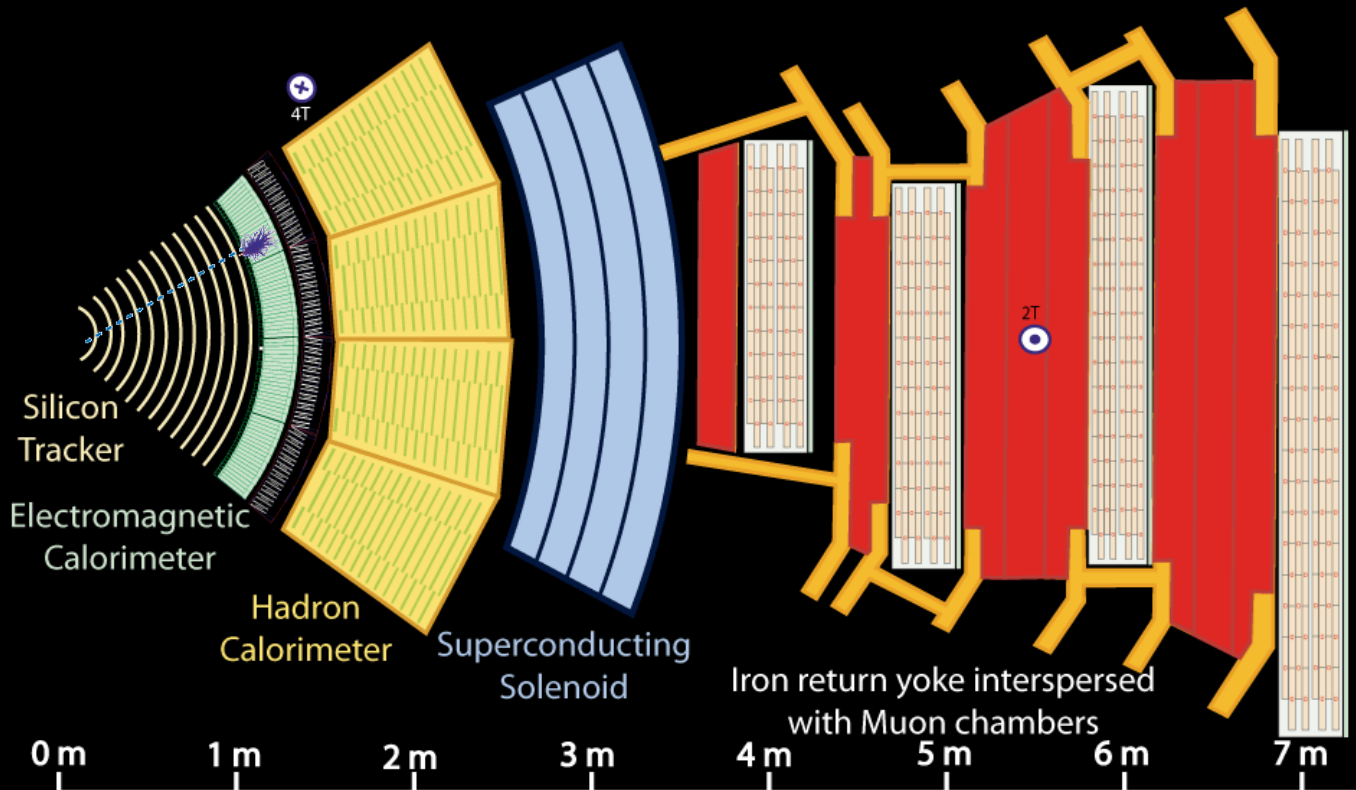
Key:

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



Key:

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



Key:

— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon

Introdução

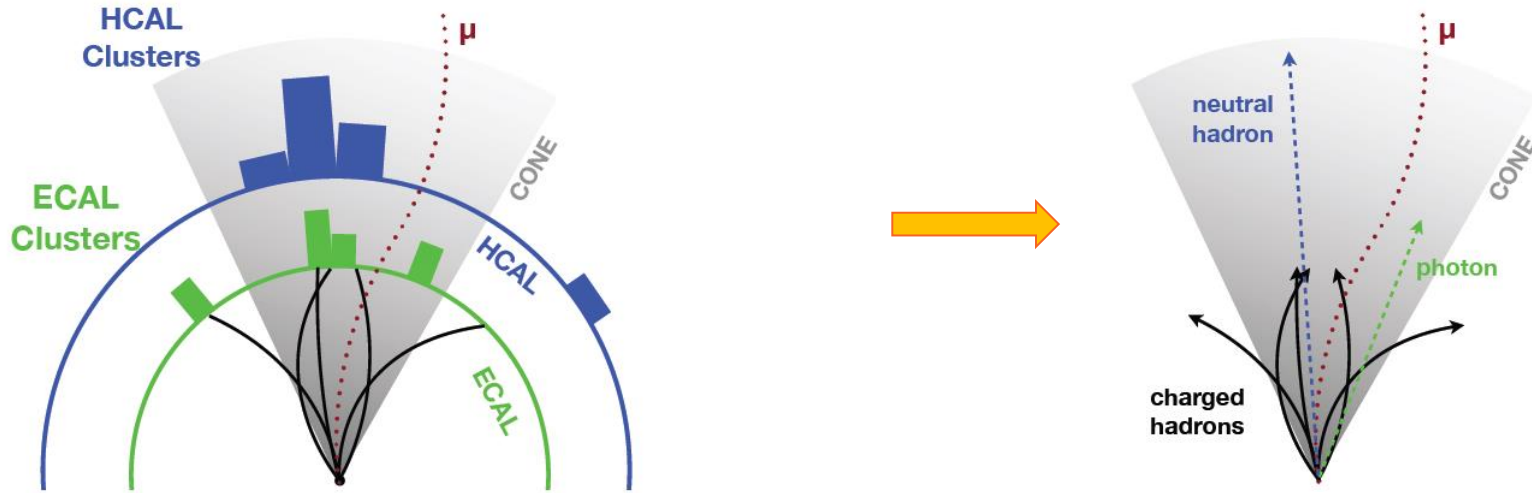
“Revelando” a passagem de partículas

Filosofia de construção de ATLAS e CMS

Como a reconstrução complementa a detecção

Conclusões

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

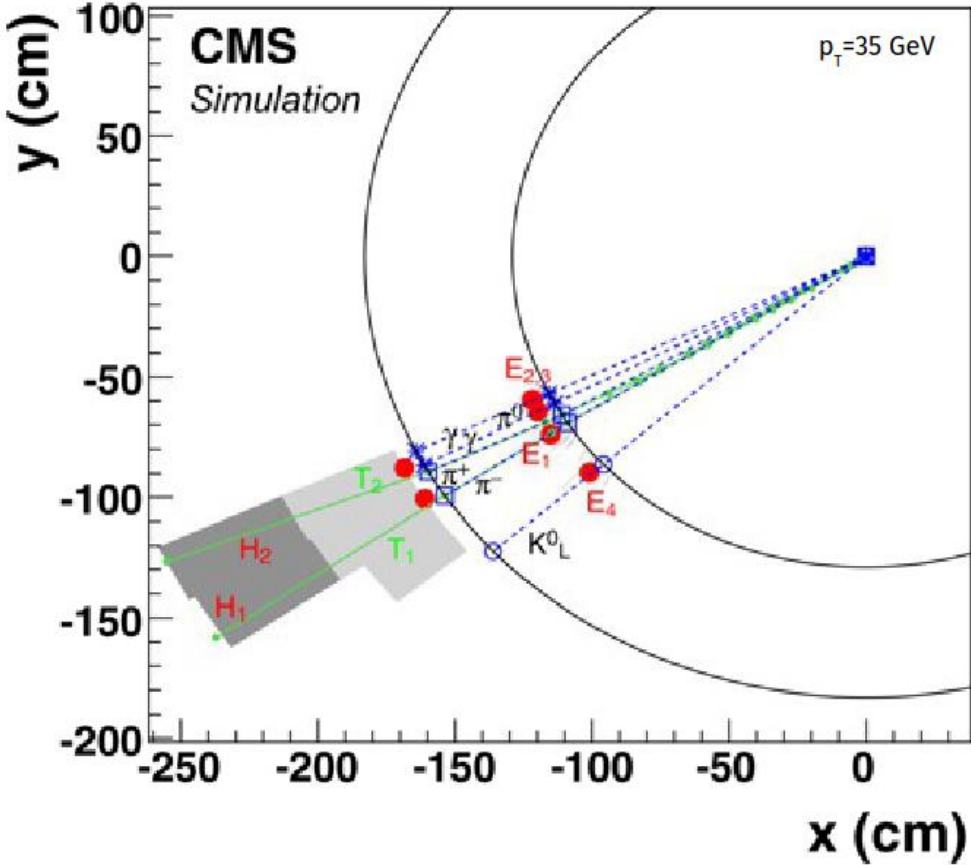


Num evento associamos a informação disponível: hits, traços, aglomerados de hits,...

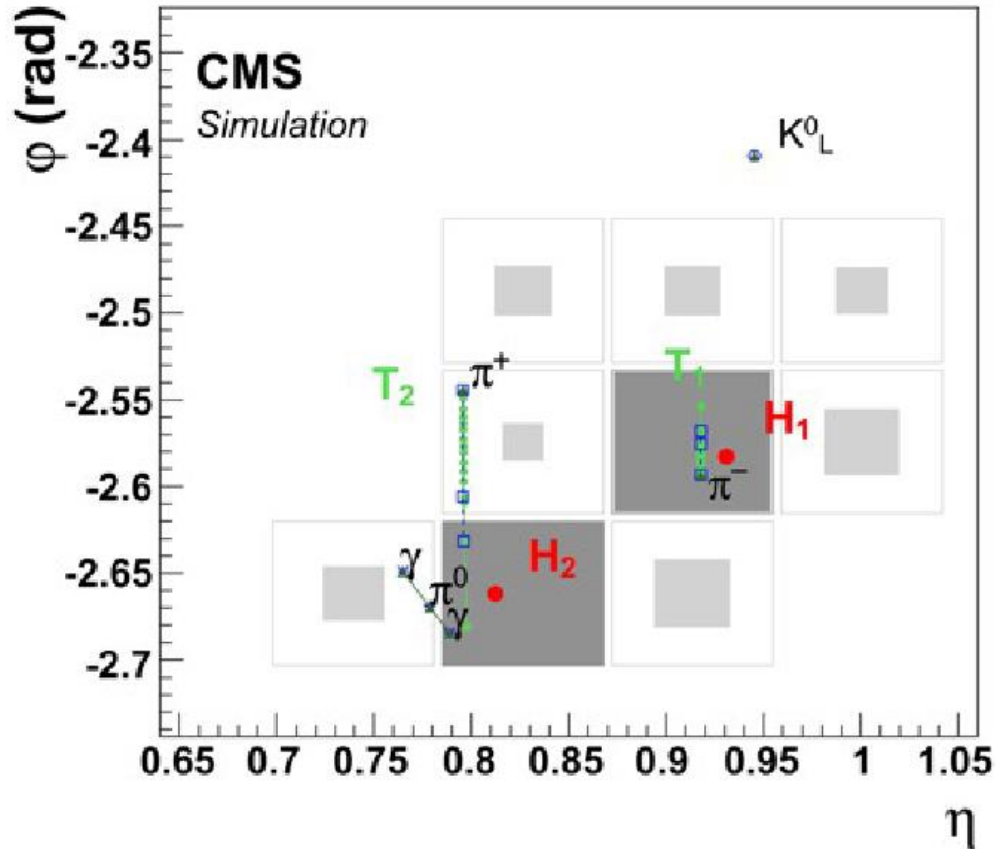
O melhor detector pode ser usado para atribuir a medida final de posição, energia, tempo

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

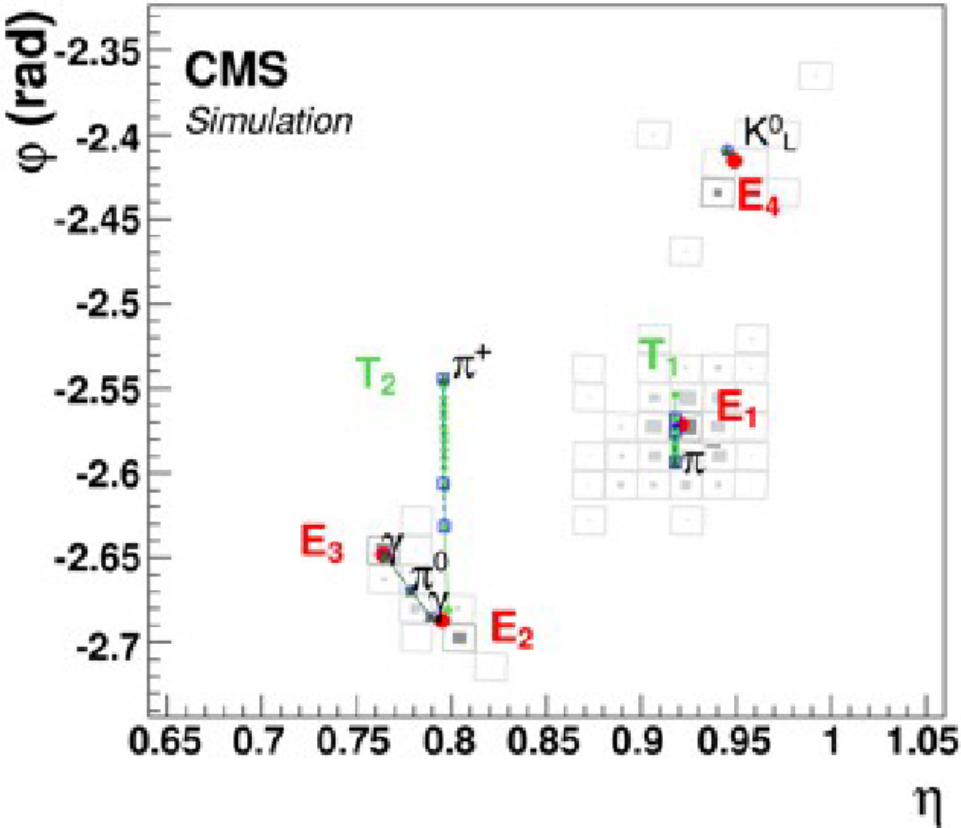
Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas



Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas

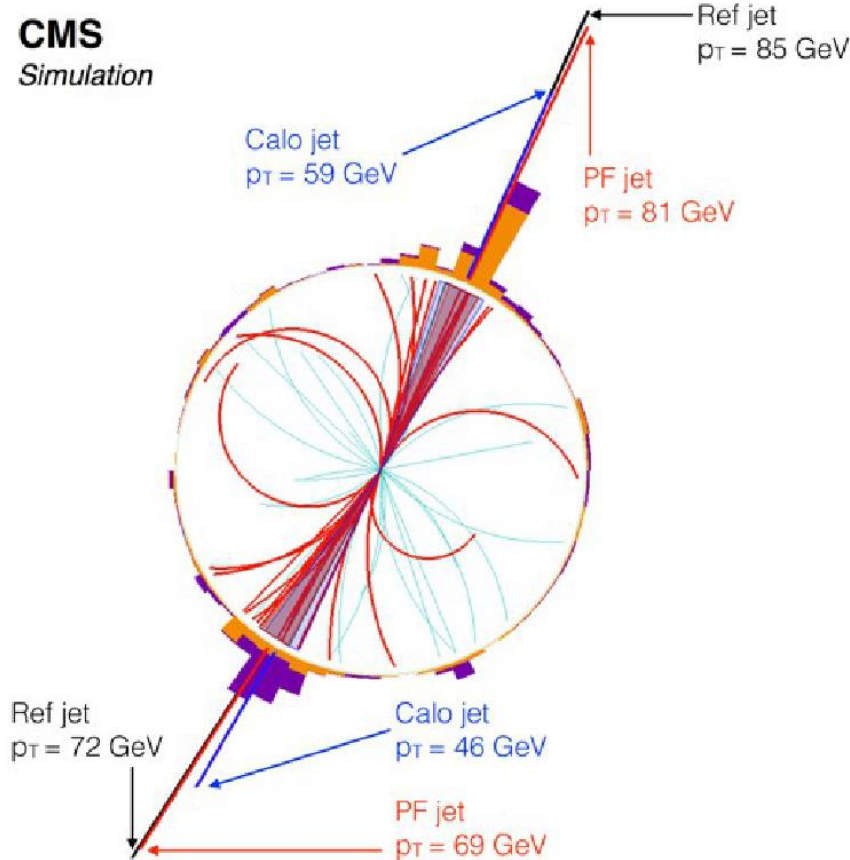


Um exemplo na prática: um jato de 5 partículas



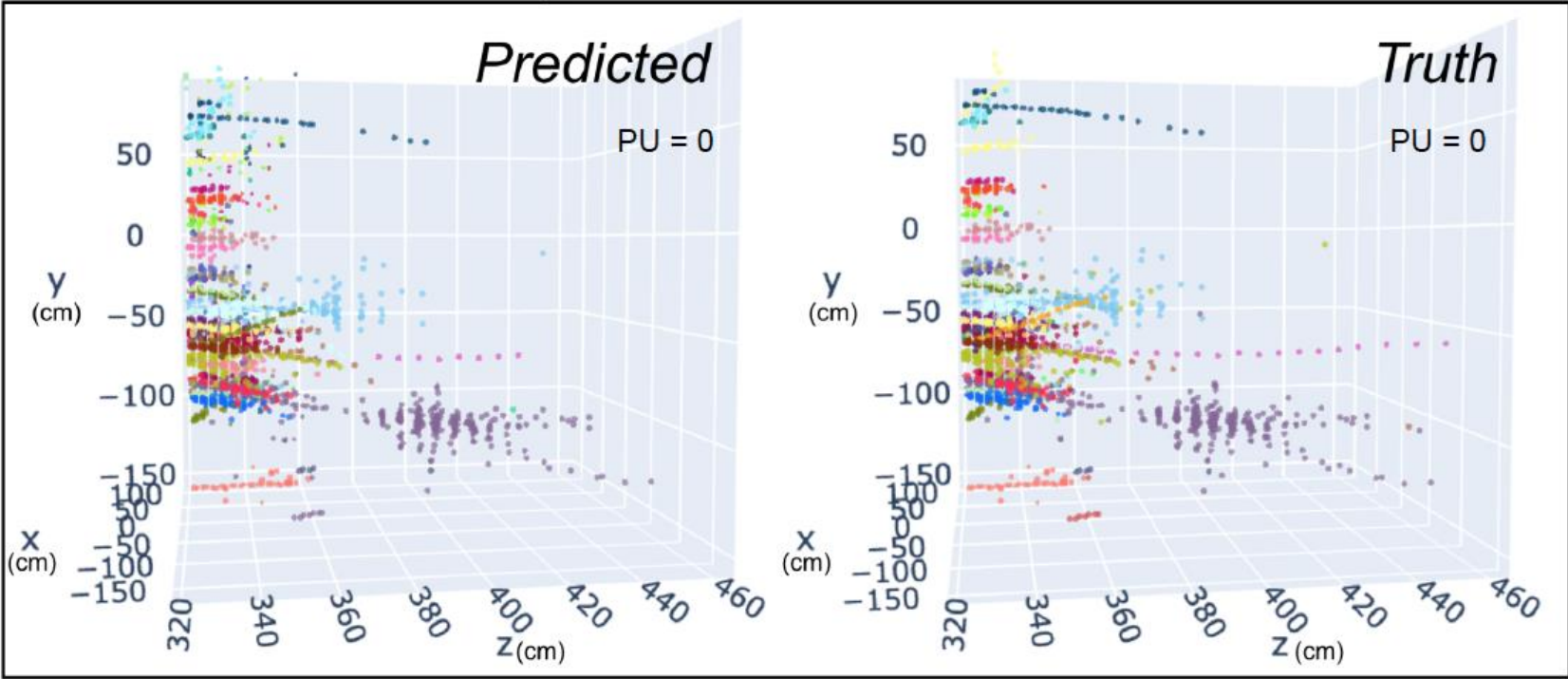
Particle flow: paradigma actual de reconstrução

CMS
Simulation



Machine learning: paradigma futuro de reconstrução?

CMS *Simulation Preliminary*



Introdução

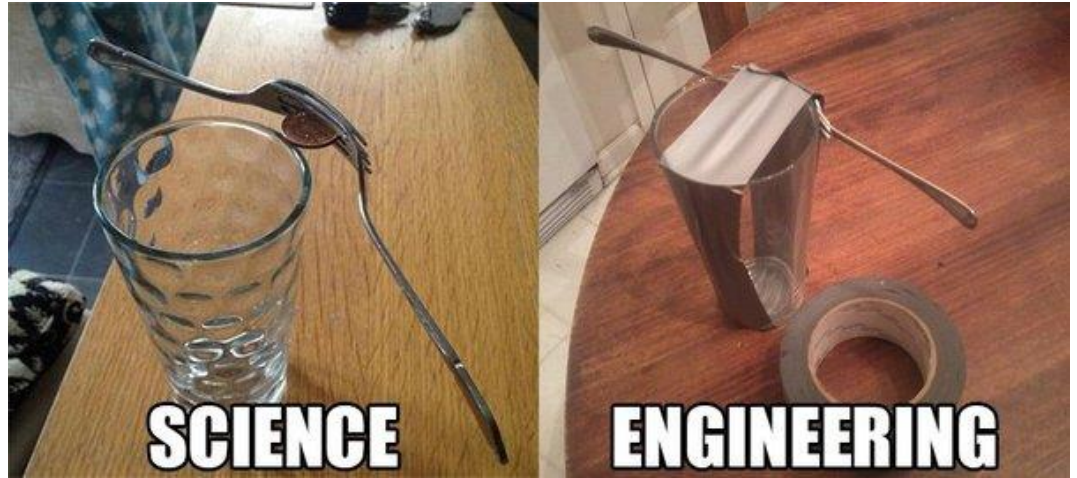
“Revelando” a passagem de partículas

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 do CERN

- tecnologias acompanham a par e passo as questões da física
- maior desafio consiste em atingir o compromisso entre a precisão necessária versus possibilidades actuais da tecnologia
- complexidade dos detectores do LHC é fundamental ao seu sucesso:
 - descoberta e estudo do Higgs; pesquisa por sinais de nova física; medidas precisão