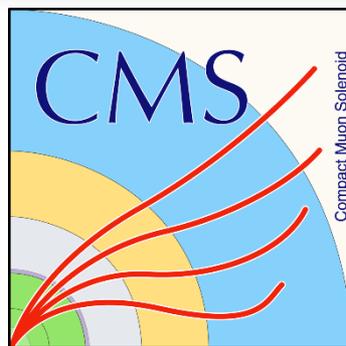




A experiência CMS como funciona o que procura e o que encontrou ...



até hoje



P. Ferreira da Silva (CERN)

12ª Escola de Professores CERN em Língua Portuguesa

3 de Setembro de 2018

Esta apresentação em perspectiva

2

- Motivação
- Construção e operação da experiência CMS
- As primeiras descobertas
- GPS para a física do LHC na era (pós-)Higgs
- CMS: uma experiência em mutação
- Sumário

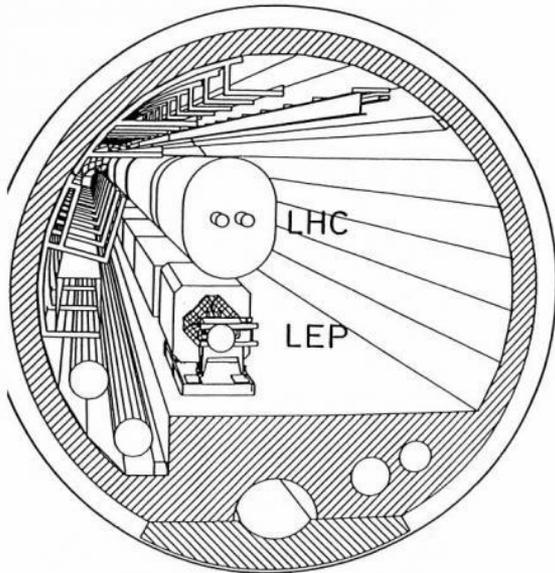
Motivação

Como surgiu e foi o CMS pensada?

Como surgiram o LHC e as suas experiências

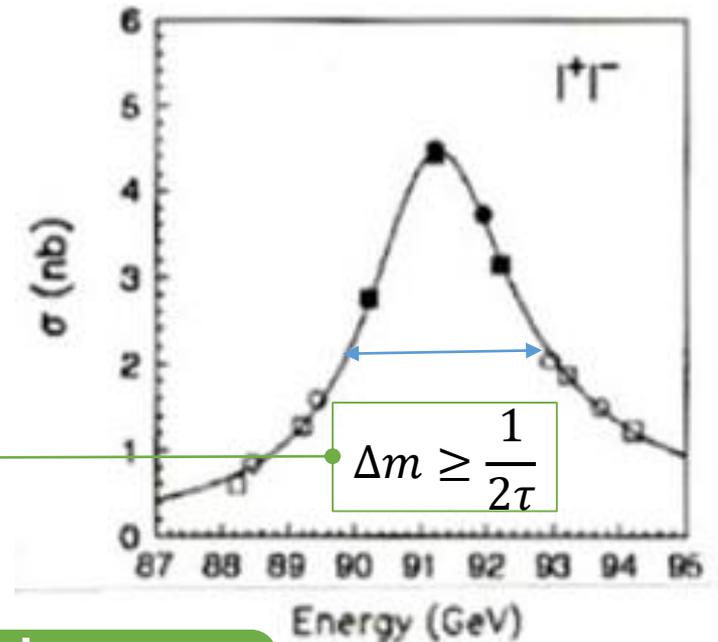
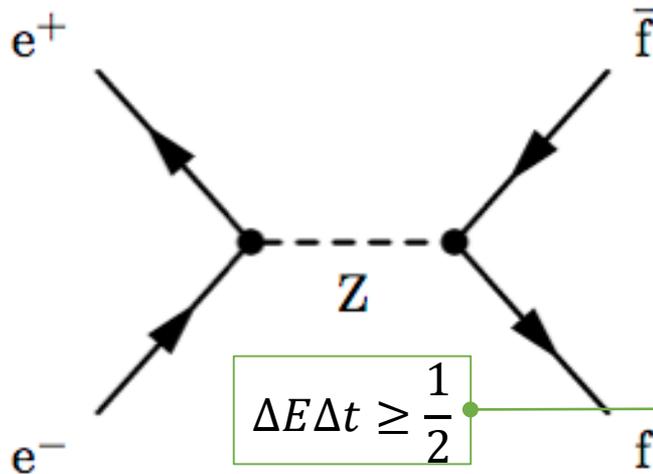
- **Lausanne (Suíça), 1984**

- 1 ano após a **descoberta dos bosões fracos W e Z** é proposto o LHC
- LEP (colisionador e^+e^-) dimensionado de modo a maximizar as energias do LHC
- Fevereiro 1988: termina a escavação do túnel de 27 km (± 1 cm)
- Julho 1989: primeiros feixes injectados no LEP



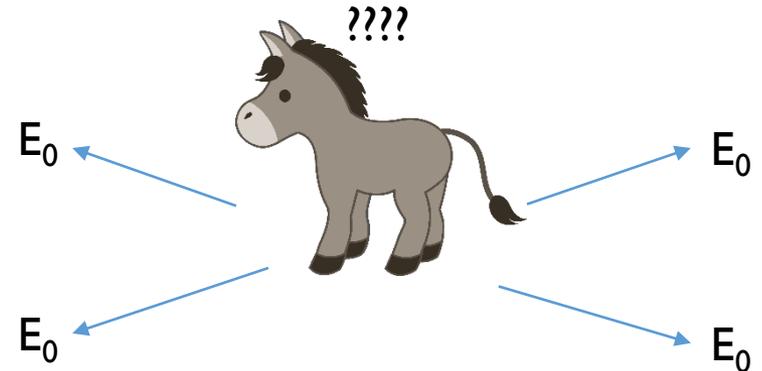
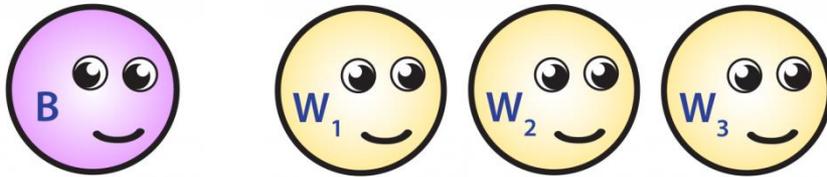
Questão central: como é que o W e o Z adquirem massa?

- No modelo padrão todas as interações são mediadas
 - troca de um quanta entre partículas
 - sujeita a regras de conservação (energia-momento, carga, etc.)
 - transformação padrão (gauge) num grupo de simetria abstracto



• Mas... em geometria não há conceito de massa

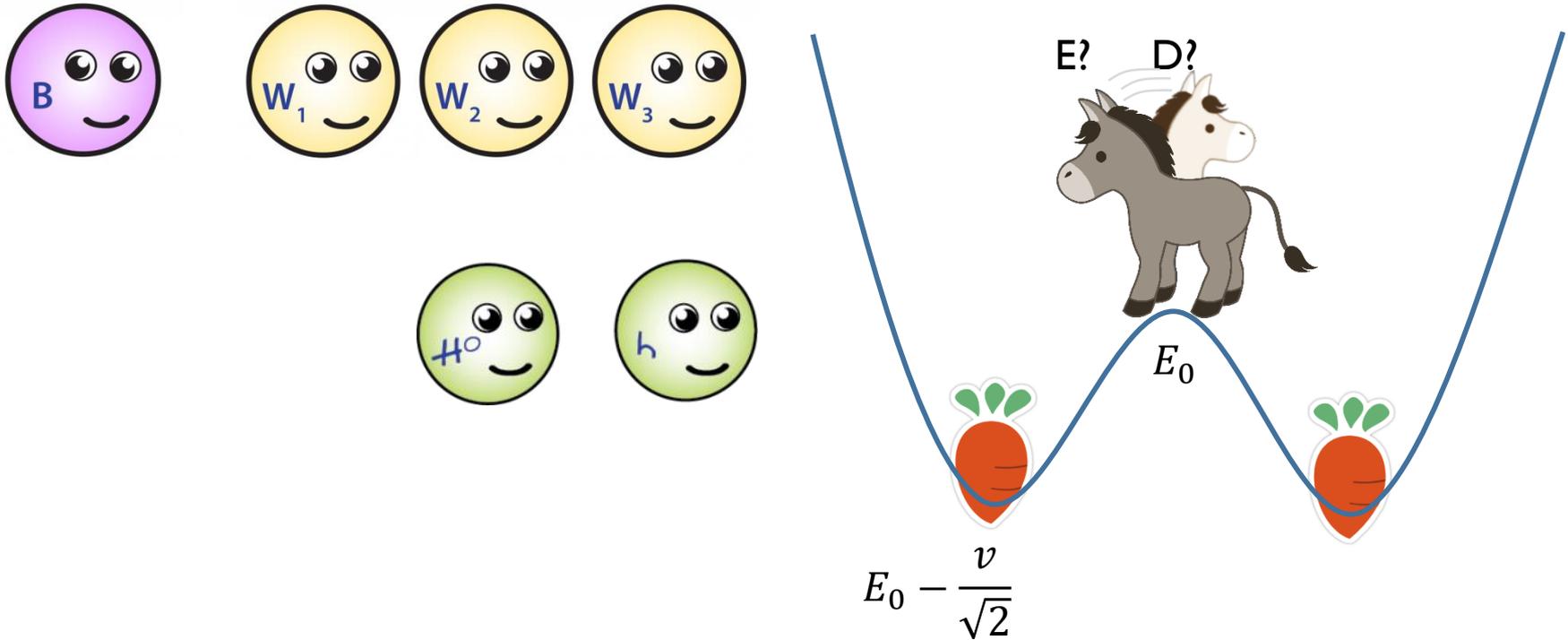
⇒ existe um mecanismo que quebra a simetria original



- Inicialmente (= a uma escala de energia elevada \gg TeV)

- há $1+3$ geradores de interações electrofracas
- mas, num estado fundamental simétrico, nenhum tem massa associada

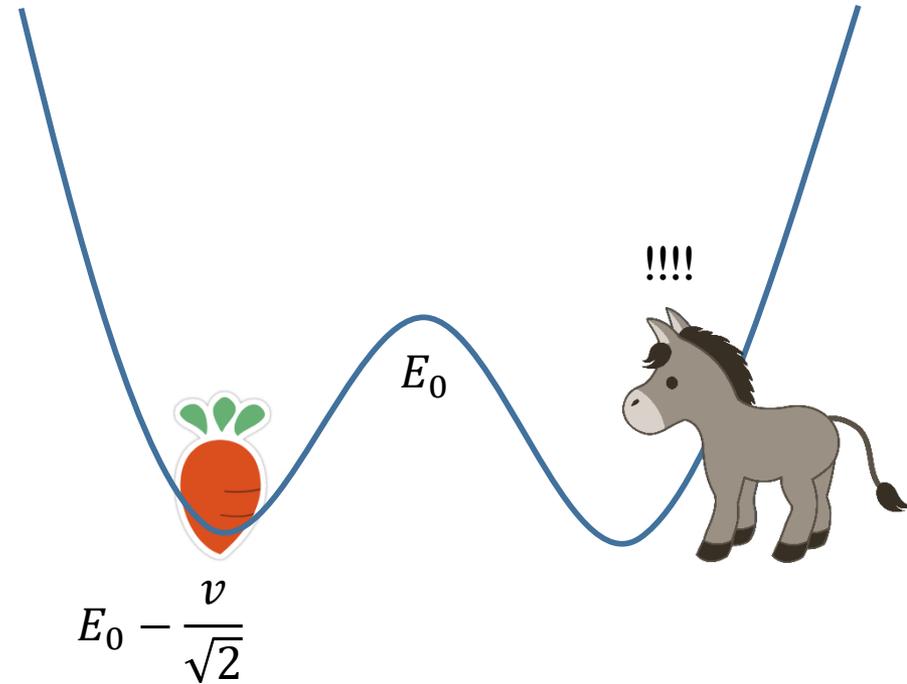
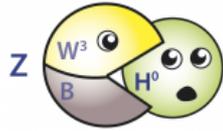
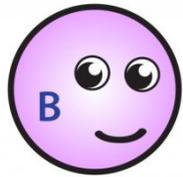
O mecanismo de Higgs



- Dilema se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico
 - gerado pela interacção com um novo campo

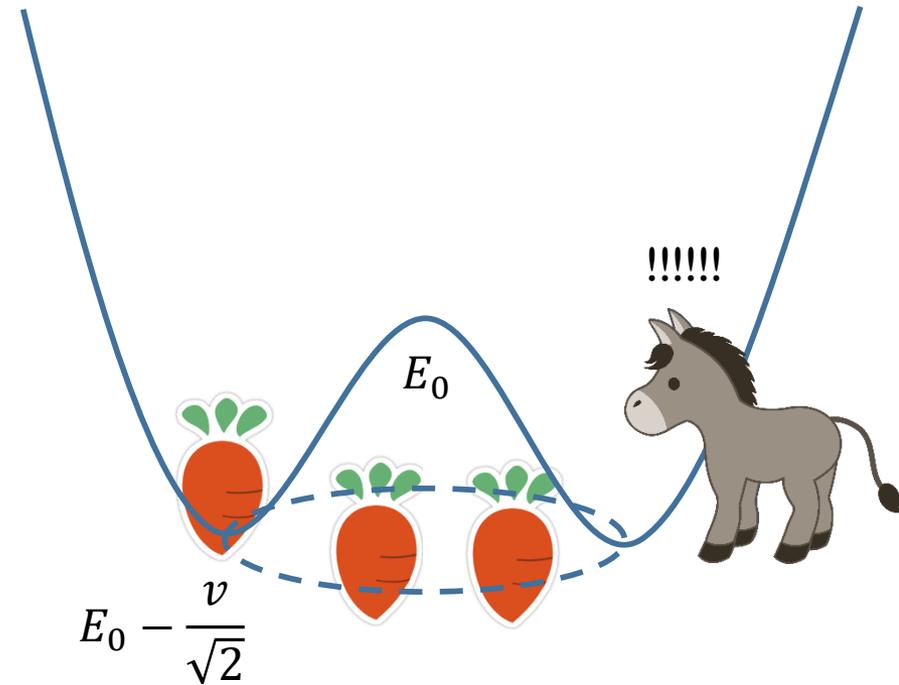
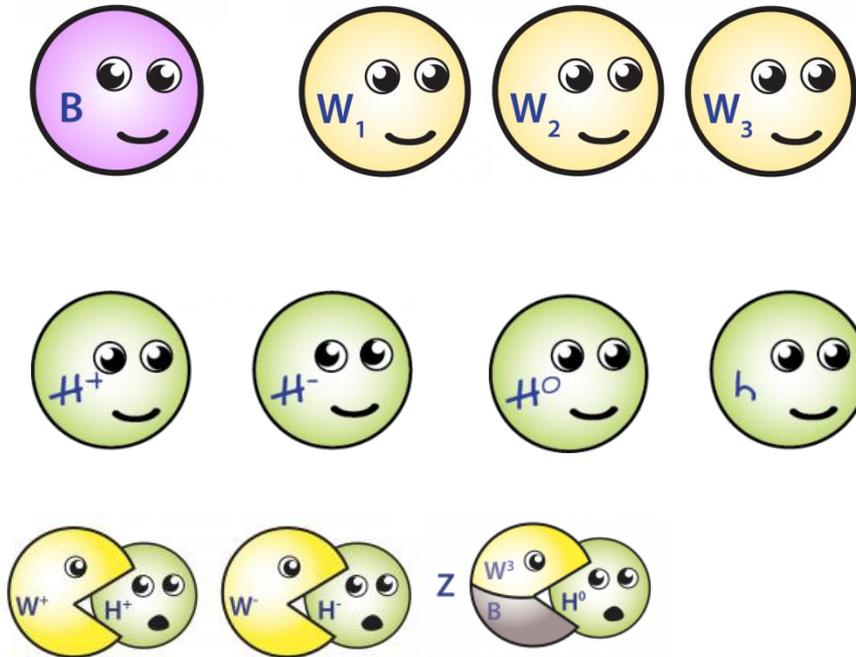
1964 Englert-Brout, Higgs, Guralnik-Hagen-Kibble

O mecanismo de Higgs



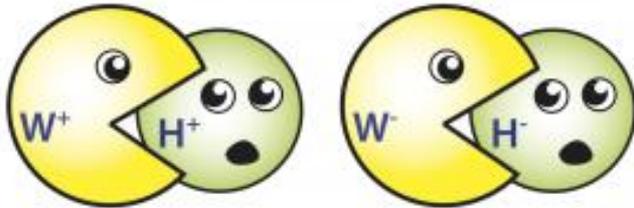
- Dilema se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico
 - gerado pela interacção com um novo campo (o campo de Higgs)

O mecanismo de Higgs



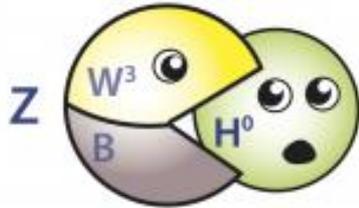
- Dilema se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico
 - gerado pela interacção com um campo extra (o campo de Higgs)
 - com direcções privilegiadas (estados degenerados de energia)

O mecanismo de Higgs

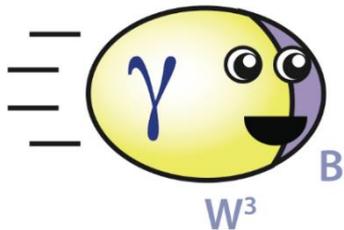
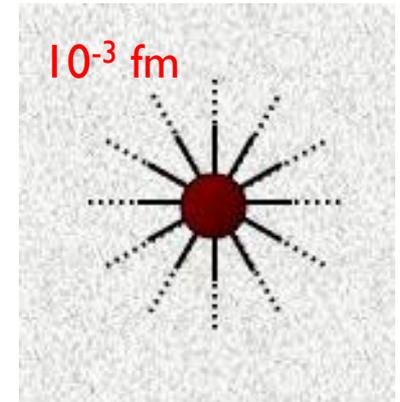


$$M_W = \frac{vg}{2} = 80.4 \text{ GeV}$$

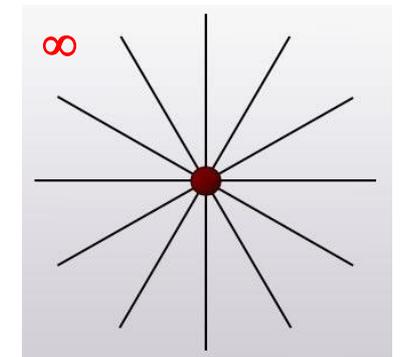
$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \Leftrightarrow \Delta x \sim \frac{1}{2M}$$



$$M_Z = \frac{v\sqrt{g^2+g'^2}}{2} = 91.2 \text{ GeV}$$



$$M_\gamma = 0$$



- Interação com o campo de Higgs

- origina a massa do W e do Z
- confina o alcance das interações fracas a distâncias nucleares

...e então?

Quando o Rádio (Ra) foi descoberto ninguém saberia dizer que seria útil nos hospitais. Foi **pura ciência**. Ser útil hoje em dia é uma demonstração de como **o trabalho científico não deve ser meramente encarado do ponto de vista utilitário**. Deve ser feito por si mesmo, pela beleza da ciência e **haverá sempre uma probabilidade de que uma descoberta científica se torne, tal como o Rádio, útil à humanidade**.

trad. de uma aula de M. Curie no [Colégio Vassar \(NY\), 1921](#)

Uma descoberta fundamental a fazer

- Sem o Higgs...

...difícil conceber átomos

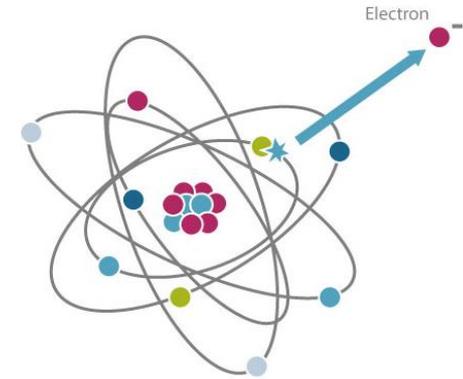
os electrões, sem massa, escapam à velocidade da luz

...mais difícil ainda formar núcleos estáveis

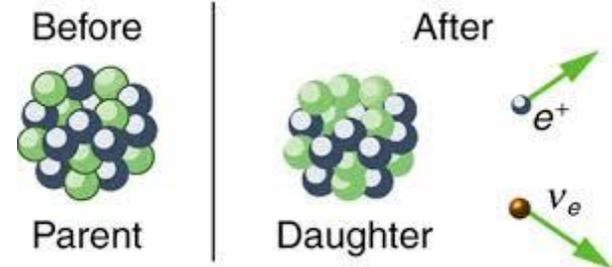
as interacções fracas não teriam nada de fraco

...tudo seria radioactivo

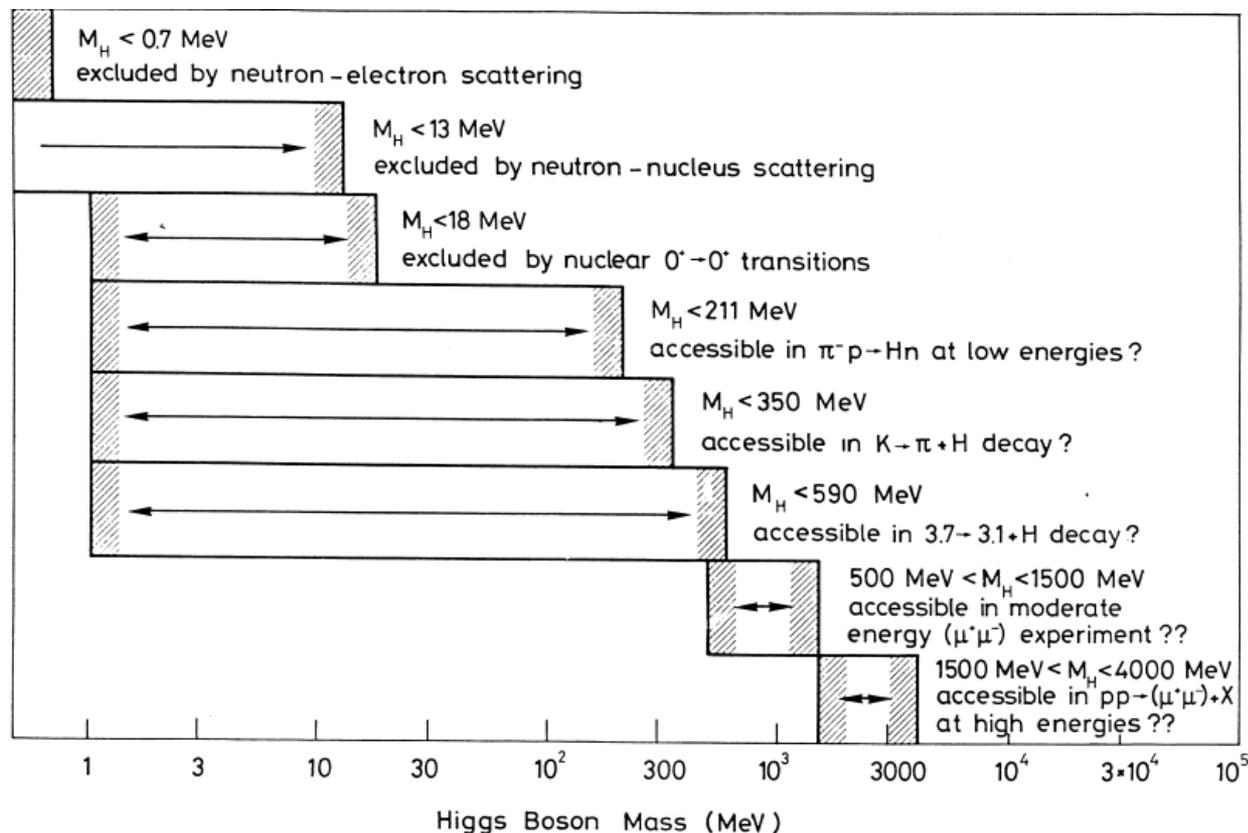
⇒ impossível estarmos aqui, agora



β^+ decay



Mas... onde procurar o Higgs?

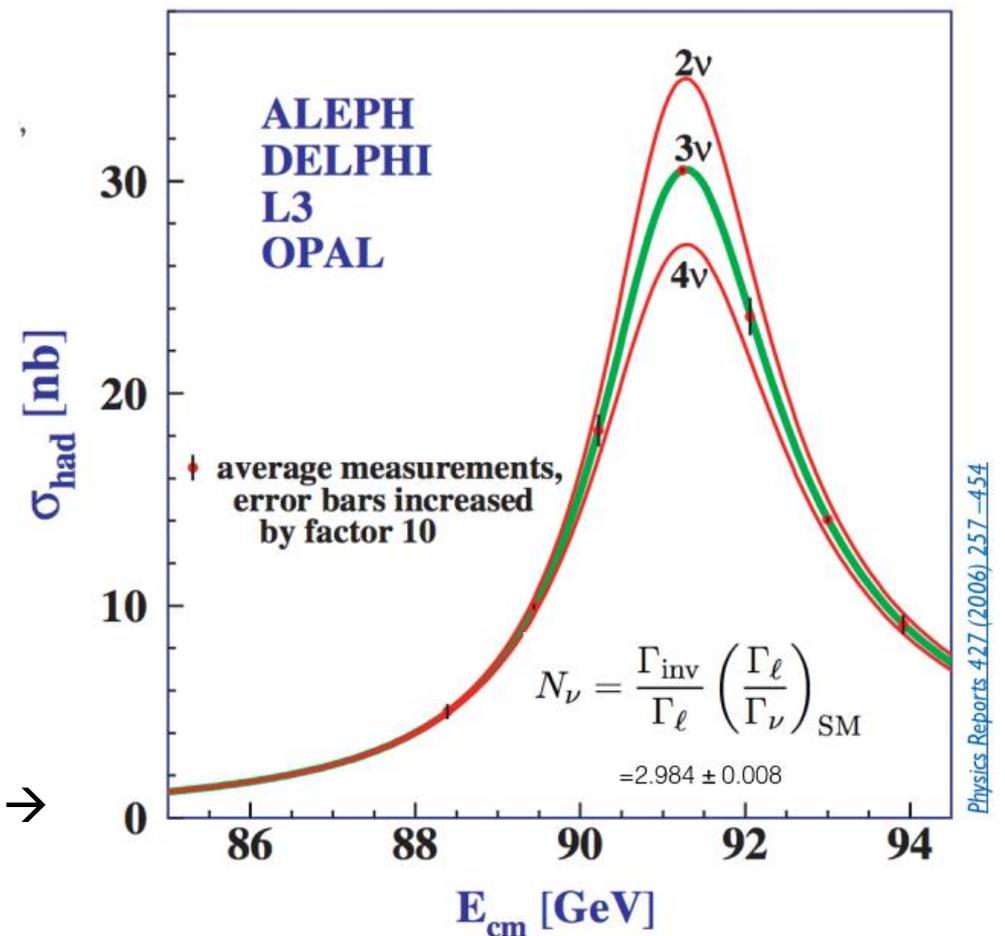


Pedimos desculpa aos experimentalistas pois não temos nenhuma ideia de qual é a massa do bóson de Higgs (...) nem sabemos prever os seus acompanhamentos.

Desencorajamos assim a sua pesquisa em grandes experiências...

Panorama da física na alvorada do LHC I 14

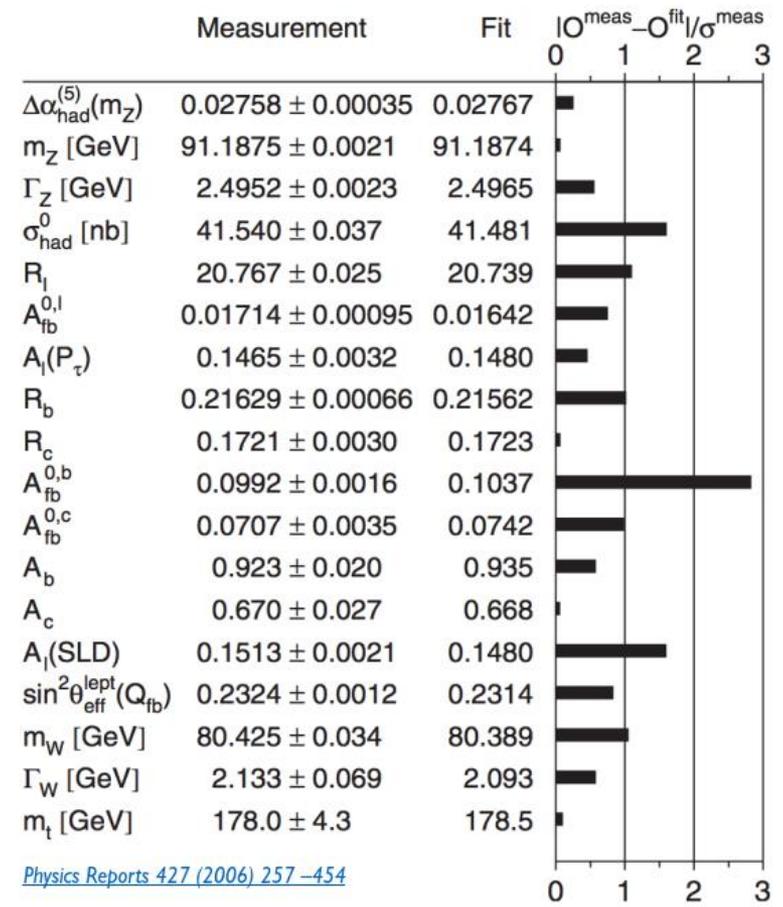
- Terminados os programas de física do LEP (e SLC)
 - medidas de precisão aprovam o model padrão (SM)



*largura de decaimento do Z
implica 3 famílias activas de neutrinos →*

Panorama da física na alvorada do LHC II ₁₅

- Terminados os programas de física do LEP (e SLC)
 - medidas de precisão aprovam o model padrão (SM)

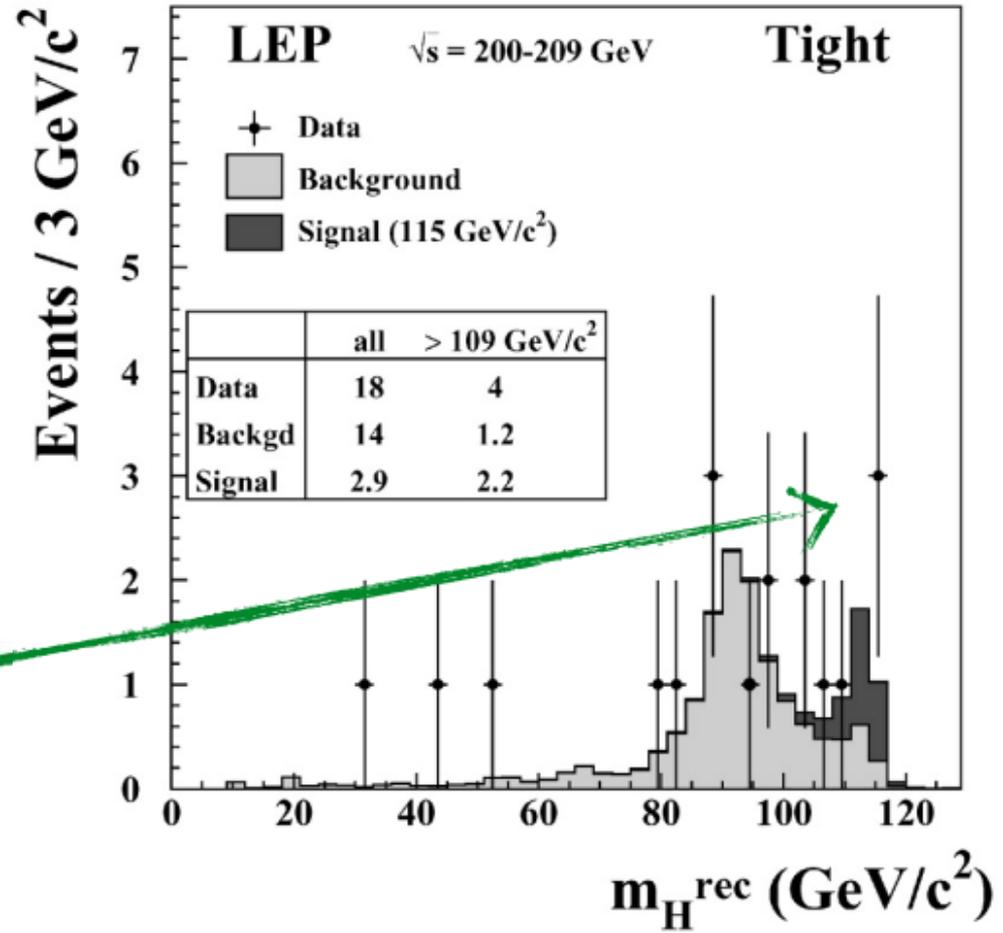


(quase) nenhum desvio significativo entre dados e previsões →

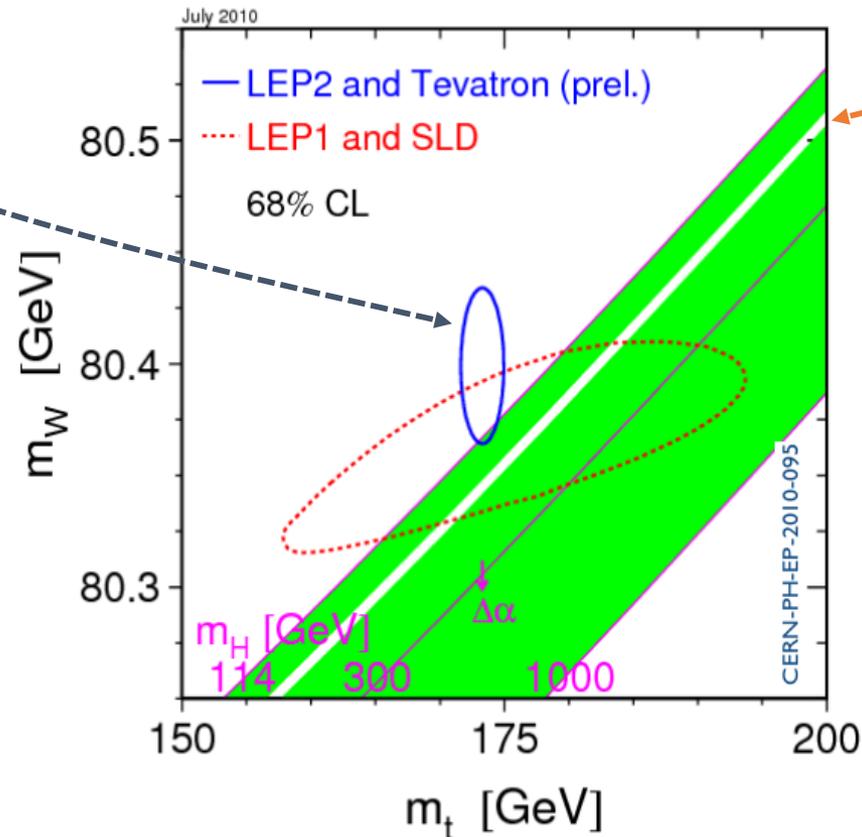
[Physics Reports 427 \(2006\) 257–454](#)

- Terminados os programas de física do LEP (e SLC)
 - medidas de precisão aprovam o model padrão (SM)

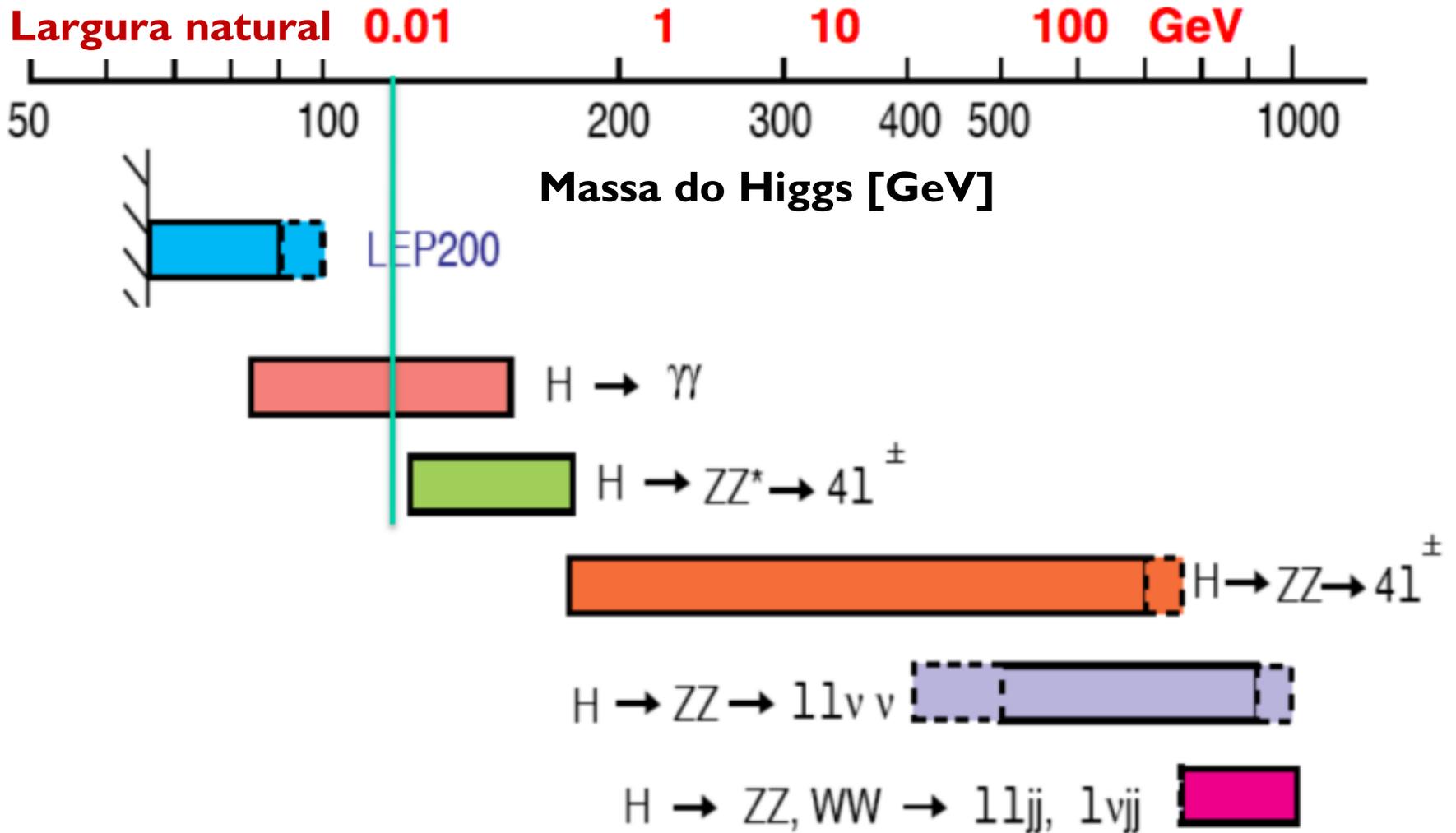
pesquisas directas excluem $m_H < 114 \text{ GeV}$ (95% CL) \rightarrow

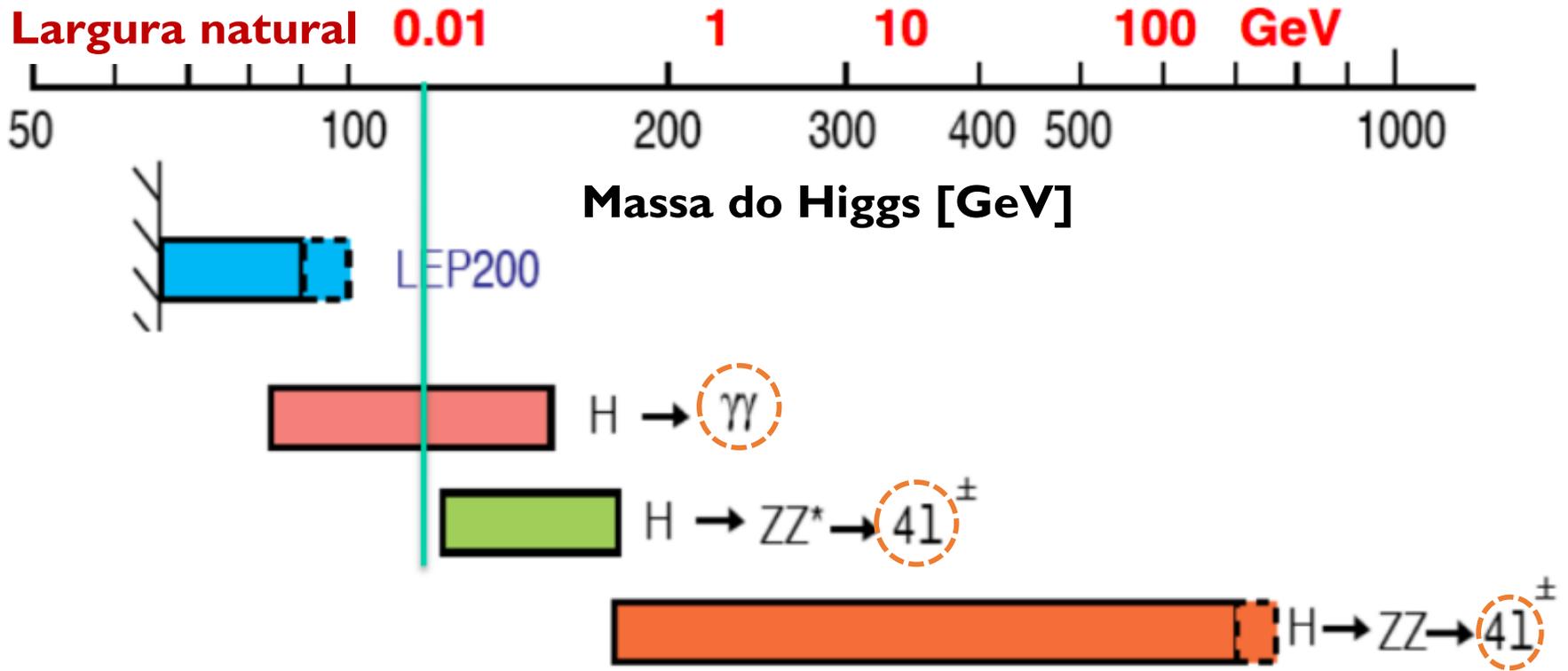


- As experiências do Tevatrão (Fermilab)
 - 1995: descobrem o quark top completando 3 gerações de quarks
 - expandem apenas ligeiramente a janela de exclusão do Higgs



Se a massa do Higgs é desconhecida...





- Requer-se que o detector:
 - reconstrua leptões, fótons, jatos
 - seja hermético
 - cubra 4π em ângulo sólido

Construção e operação da experiência CMS

Da teoria à prática

O detector e os seus objectivos

Propomos construir um *detector de uso geral* para funcionar à *luminosidade mais elevada do LHC*. O detector CMS foi *otimizado para pesquisar o bosão de Higgs* (como previsto pelo modelo padrão) numa região de massa entre os *90 GeV e os 1 TeV*; permitirá igualmente detectar uma extensa gama de estados finais produzidos em *modelos alternativos de quebra de simetria electro-fracas*.

Colaboração global

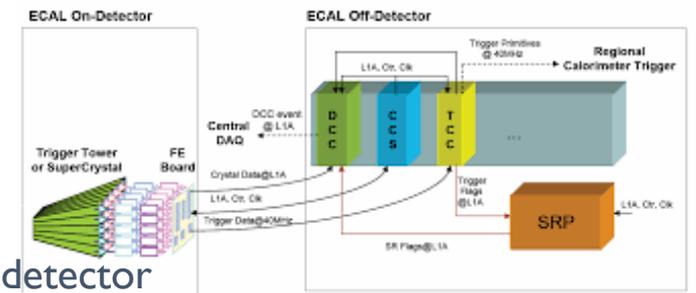
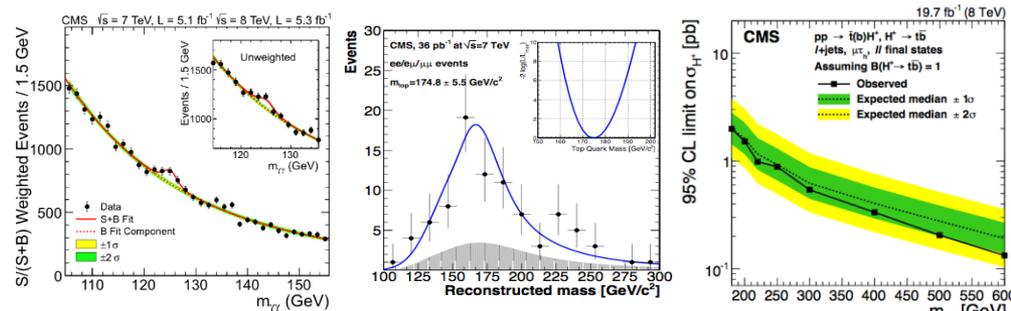
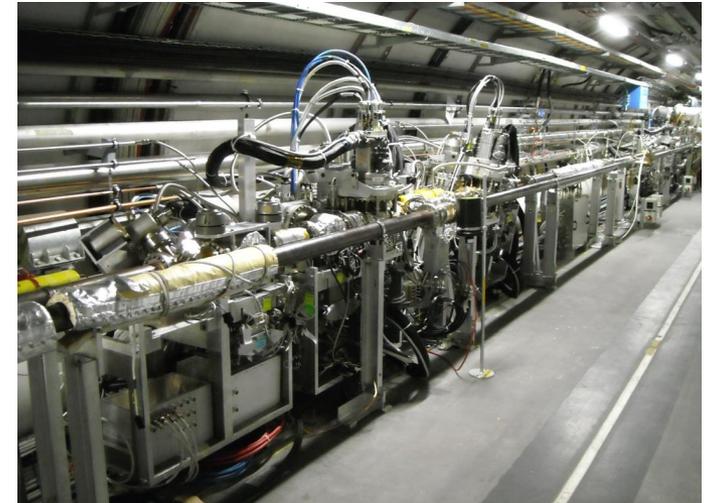
Empreendimento global de 180 institutos de 40 nações!



Participação portuguesa em CMS



mais @ <http://www.lip.pt/cms/>



- **Física:** top, Higgs, SUSY, plasma qg, quarkonia
- **HW+SW:** operação CMS, ECAL, CT-PPS, grid, actualização detector

Participação brasileira em CMS



São Paulo Research and Analysis Center (SPRACE)



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)



Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



mais @ <http://cms.uerj.br/group/>
<https://www.sprace.org.br/>
<http://www.cbpf.br>

- **Física:** modelo padrão, Higgs, nova física (exótica, SUSY), plasma qg
- **HW+SW:** operação CMS, Grid, CT-PPS, HCAL, HF, atualização detector

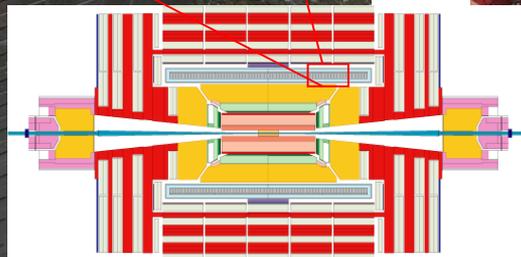
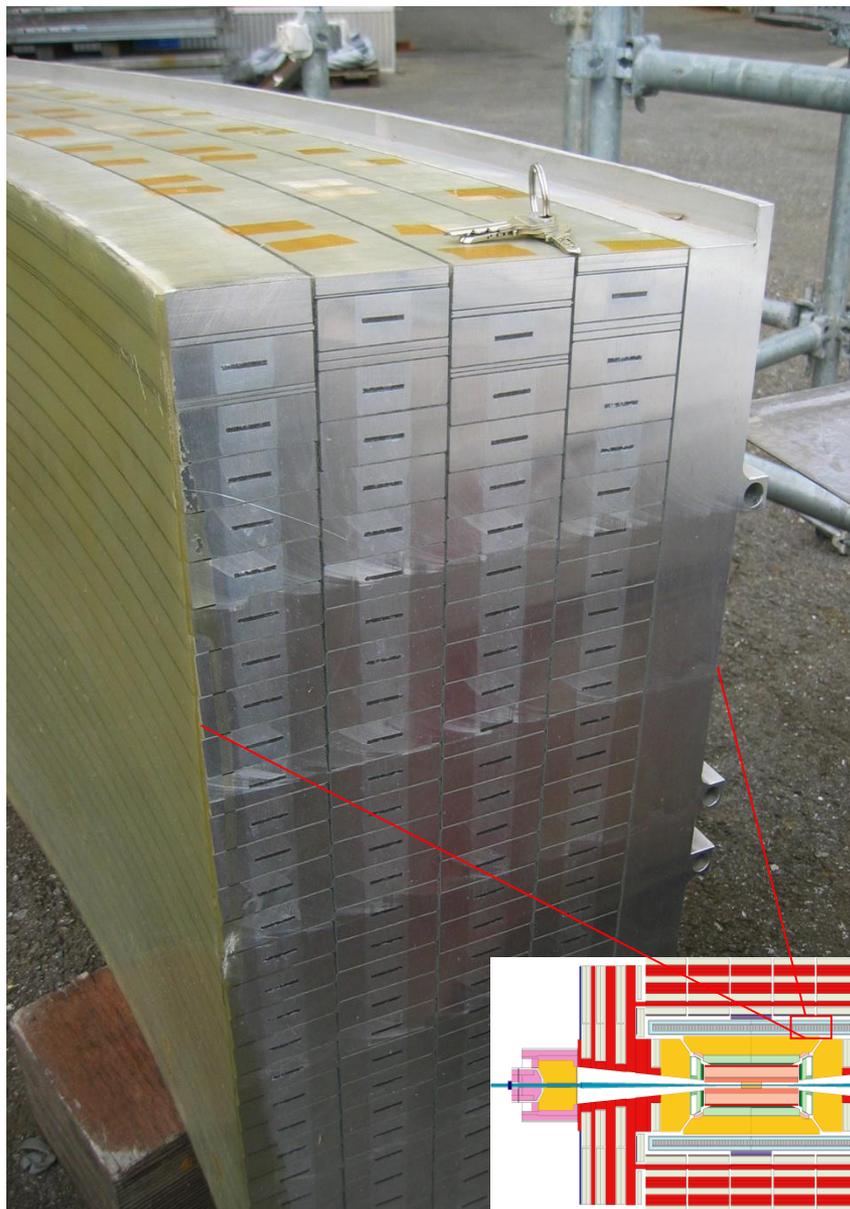
1993-2008: I&D e construção do detector



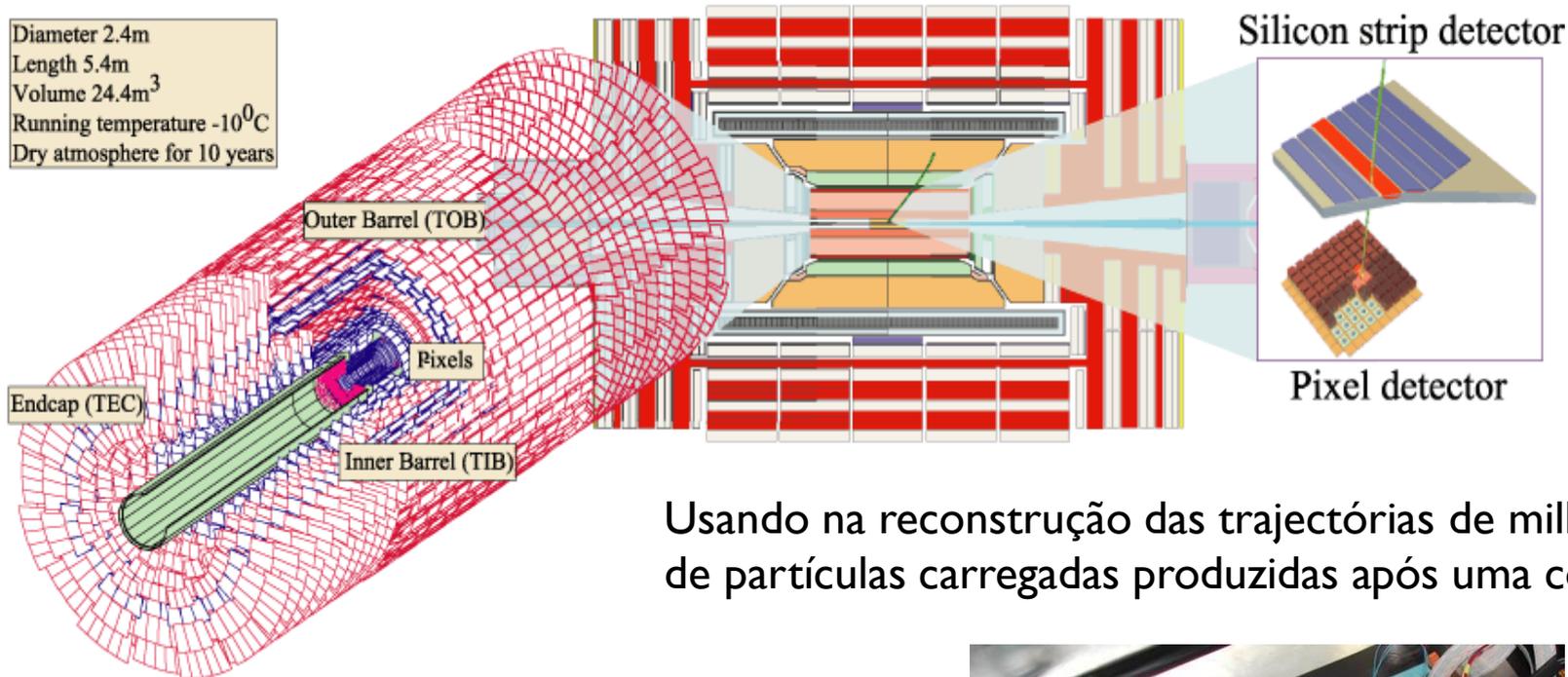
15 anos !



Solenóide super-condutor de 3.8 T

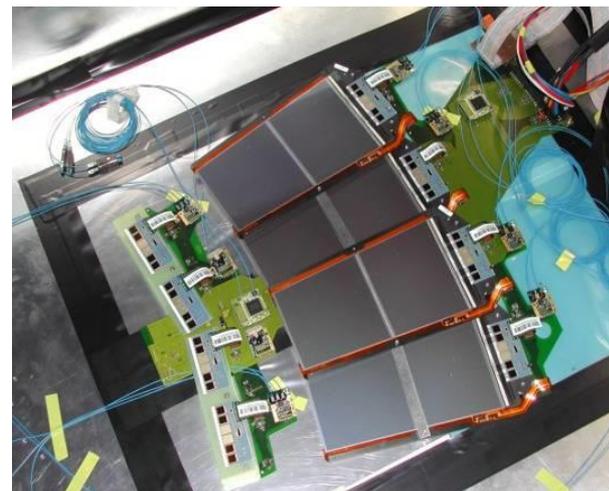


Tracejador de Silício



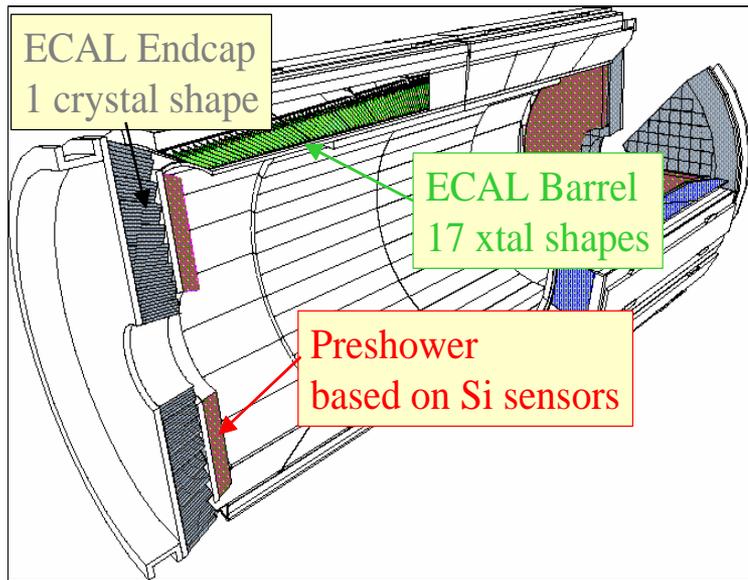
Usando na reconstrução das trajetórias de milhares de partículas carregadas produzidas após uma colisão

214m² sensores Si
11.4 milhões de tiras de Si
65.9 milhões de pixels de Si

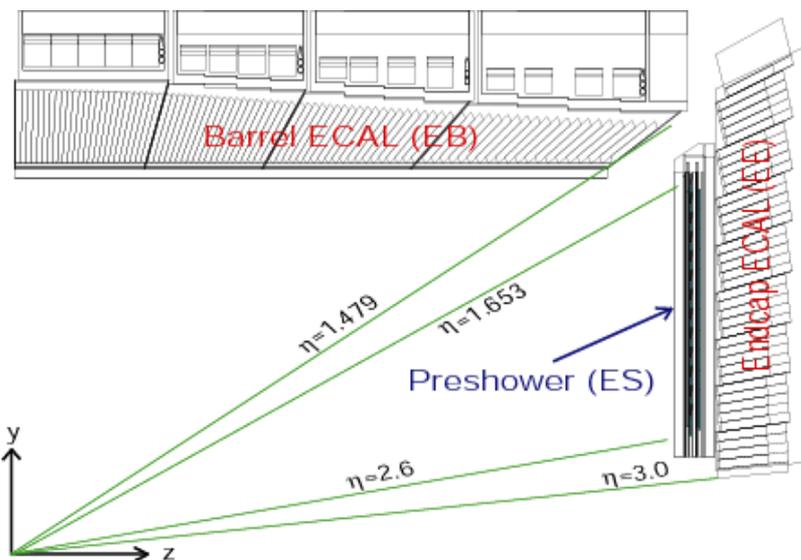




Calorímetro electromagnético



Detecção de fótons e electrões
Cristais cintiladores de PbWO_4
Lidos por fotodíodos de avalanche



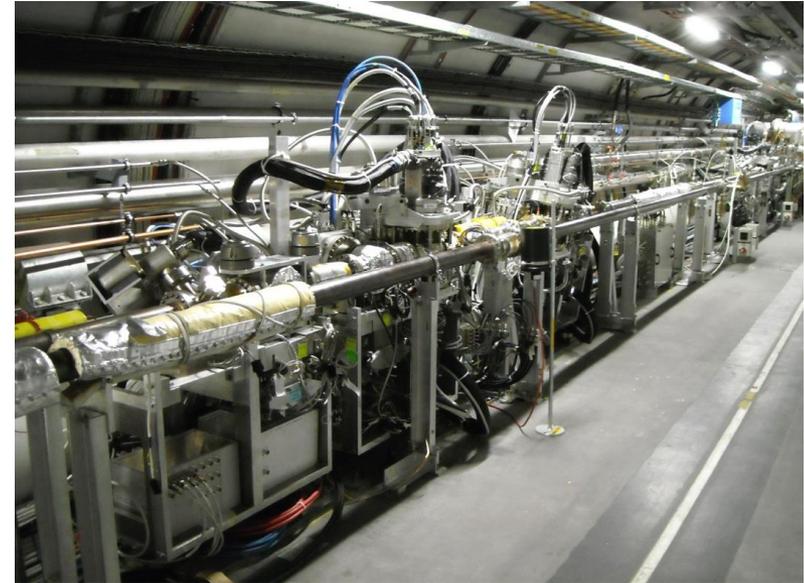
Requerimento: medir a energia dos fótons de um decaimento Higgs com uma precisão $\leq 0.5\%$

	Barril (EB)	Tampas (EE)
# cristais	61200	14648
Volume [m ³]	8.14	2.7
Massa total [t]	67.4	22.0

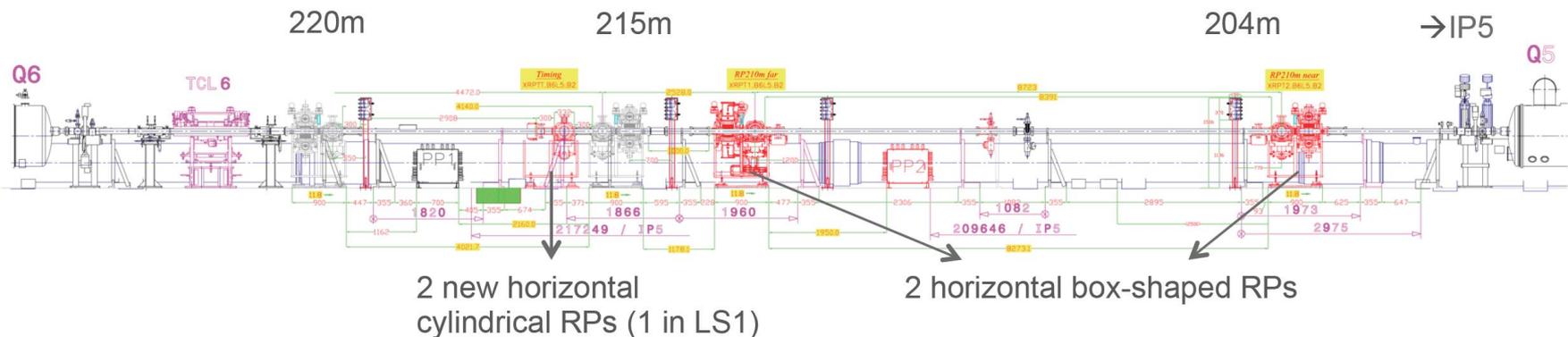
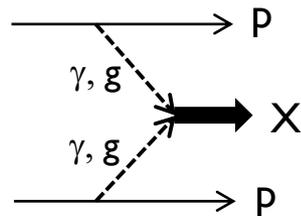


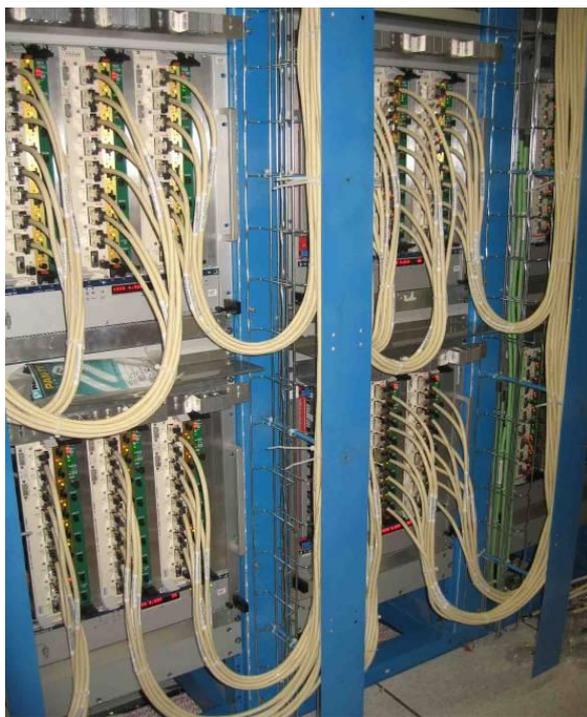
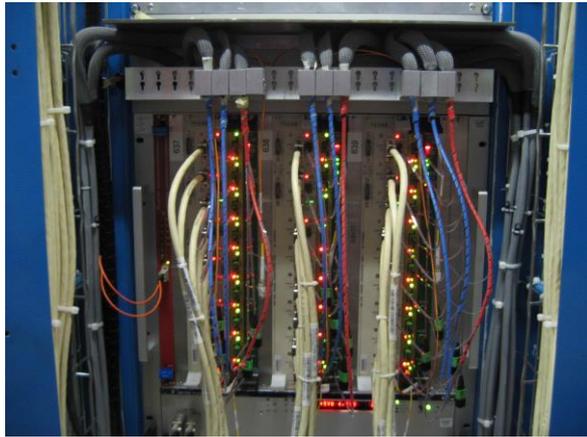
CT-PPS espectrómetro de prótons

- Dedicado a identificar colisões elásticas
 - Prótons sobrevivem à interacção
 - são detectados a distâncias $>200\text{m}$ (desviam-se da trajectória do feixe)
 - Interacção pura de mediadores fracos/fortes
 - Processos raros: potencial para nova física

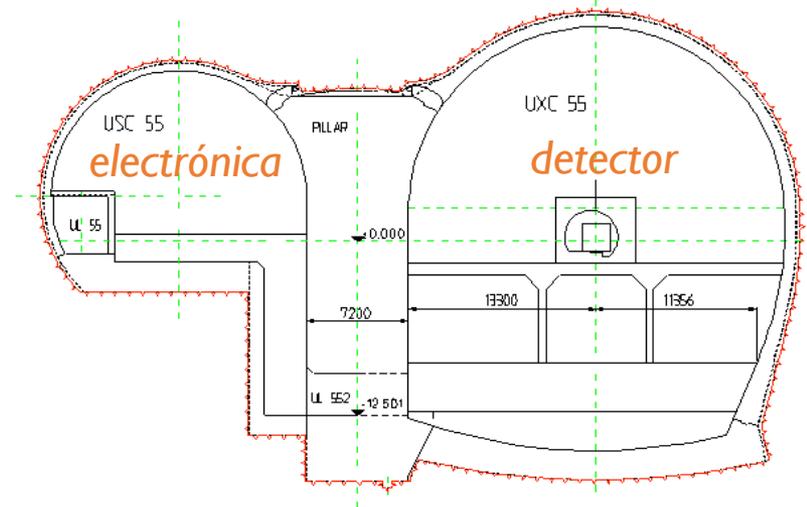


Projecto liderado pelo Prof. João Varela e outros membros do grupo LIP-CMS, UERJ





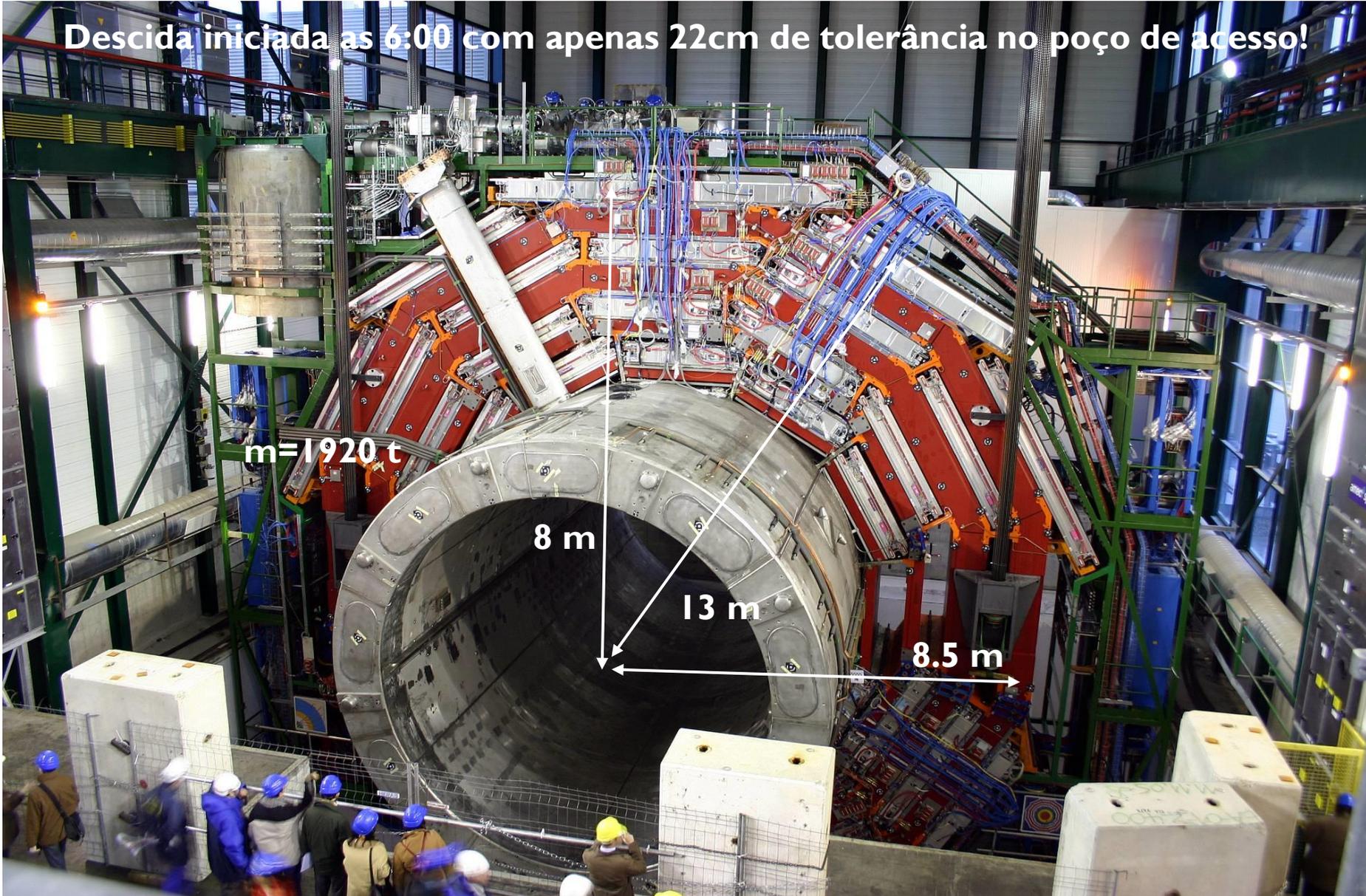
- O sistema de electrónica encontra-se numa caverna de serviço, protegida da radiação
- 2 andares com ≈ 150 prateleiras



- Arquitectura e implementação específicas à experiência CMS
 - requer software dedicado

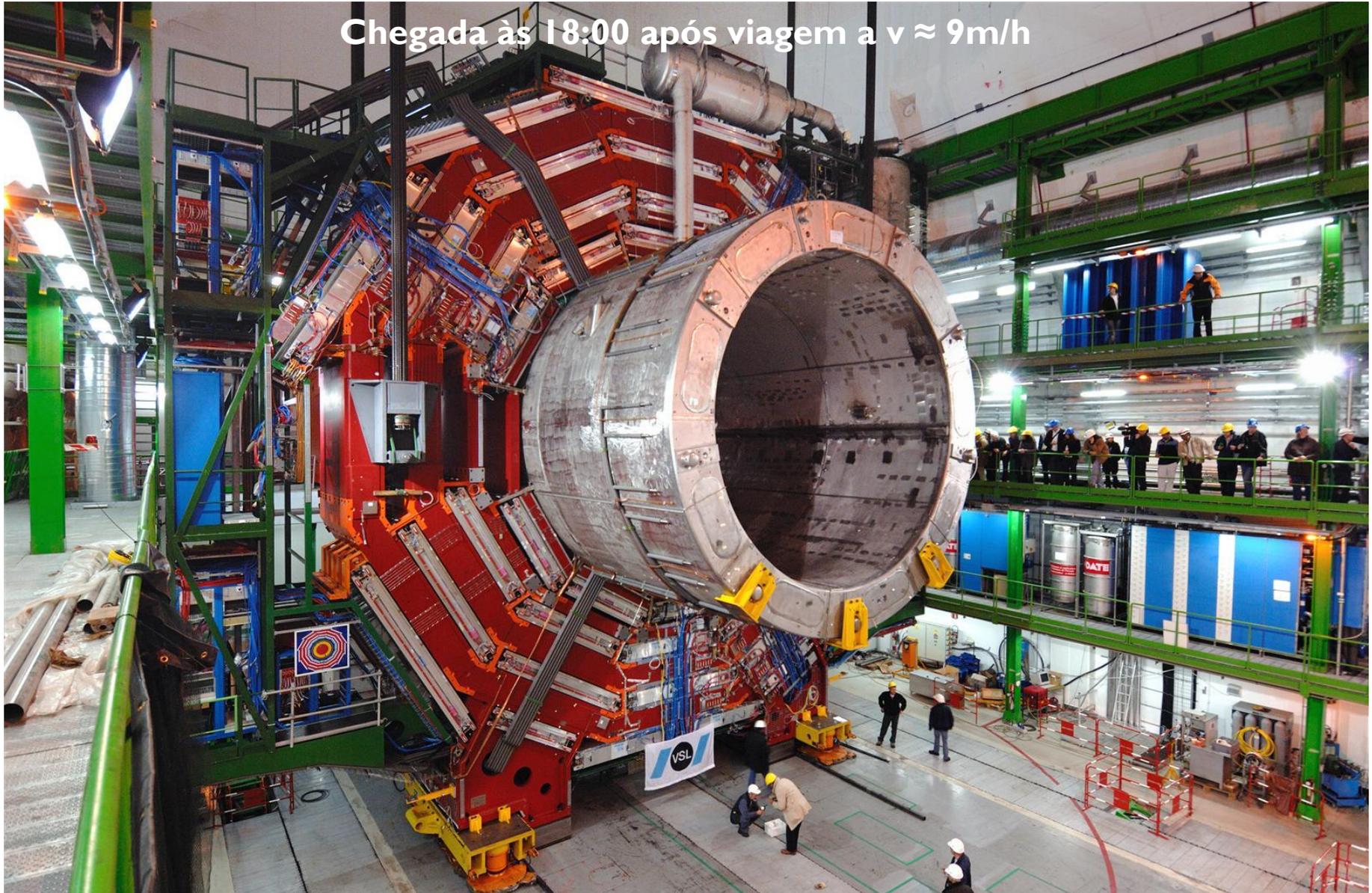
2007: o magnete desce à caverna

Descida iniciada às 6:00 com apenas 22cm de tolerância no poço de acesso!



2007: o magnete desce à caverna

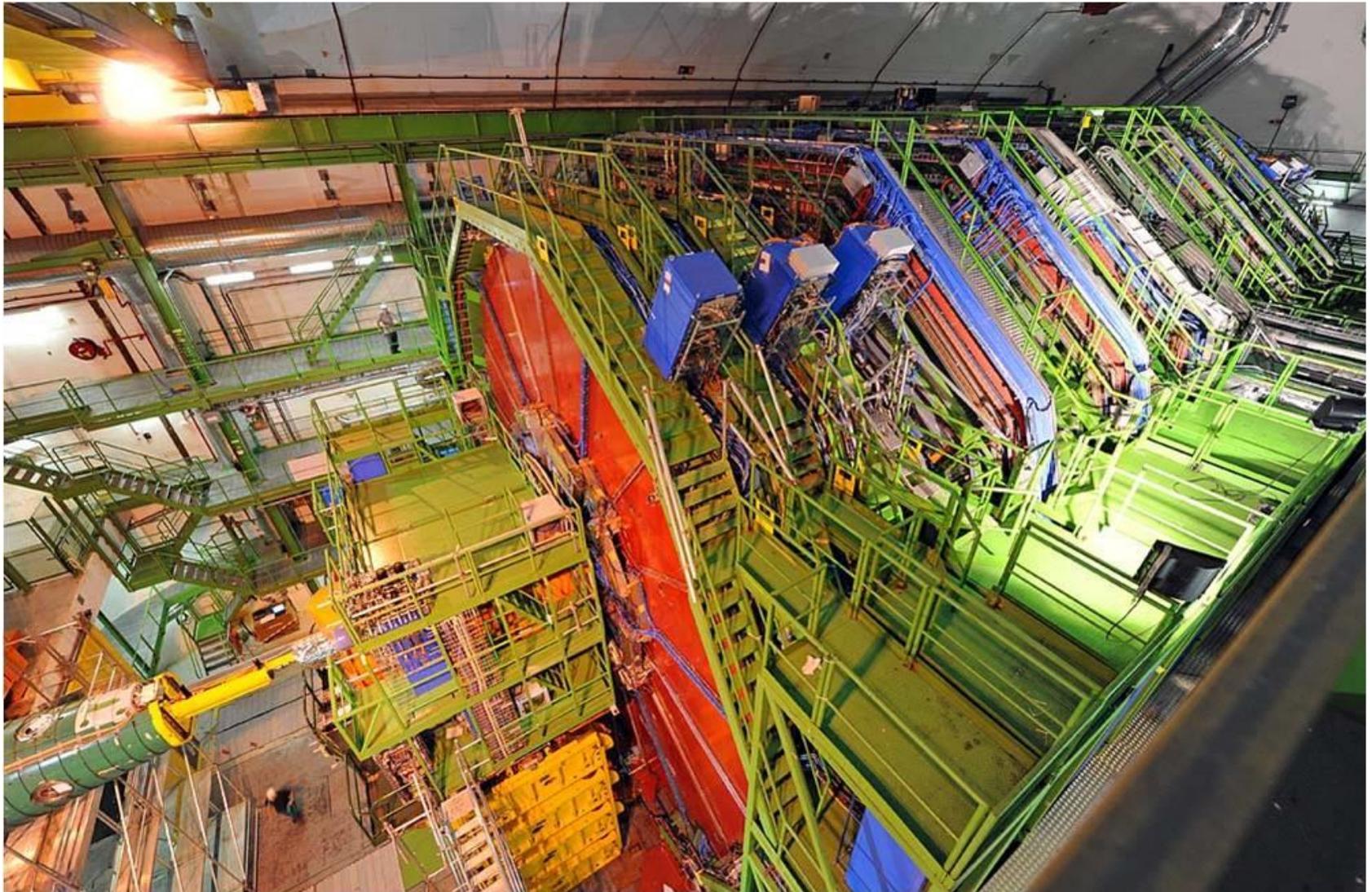
Chegada às 18:00 após viagem a $v \approx 9\text{m/h}$



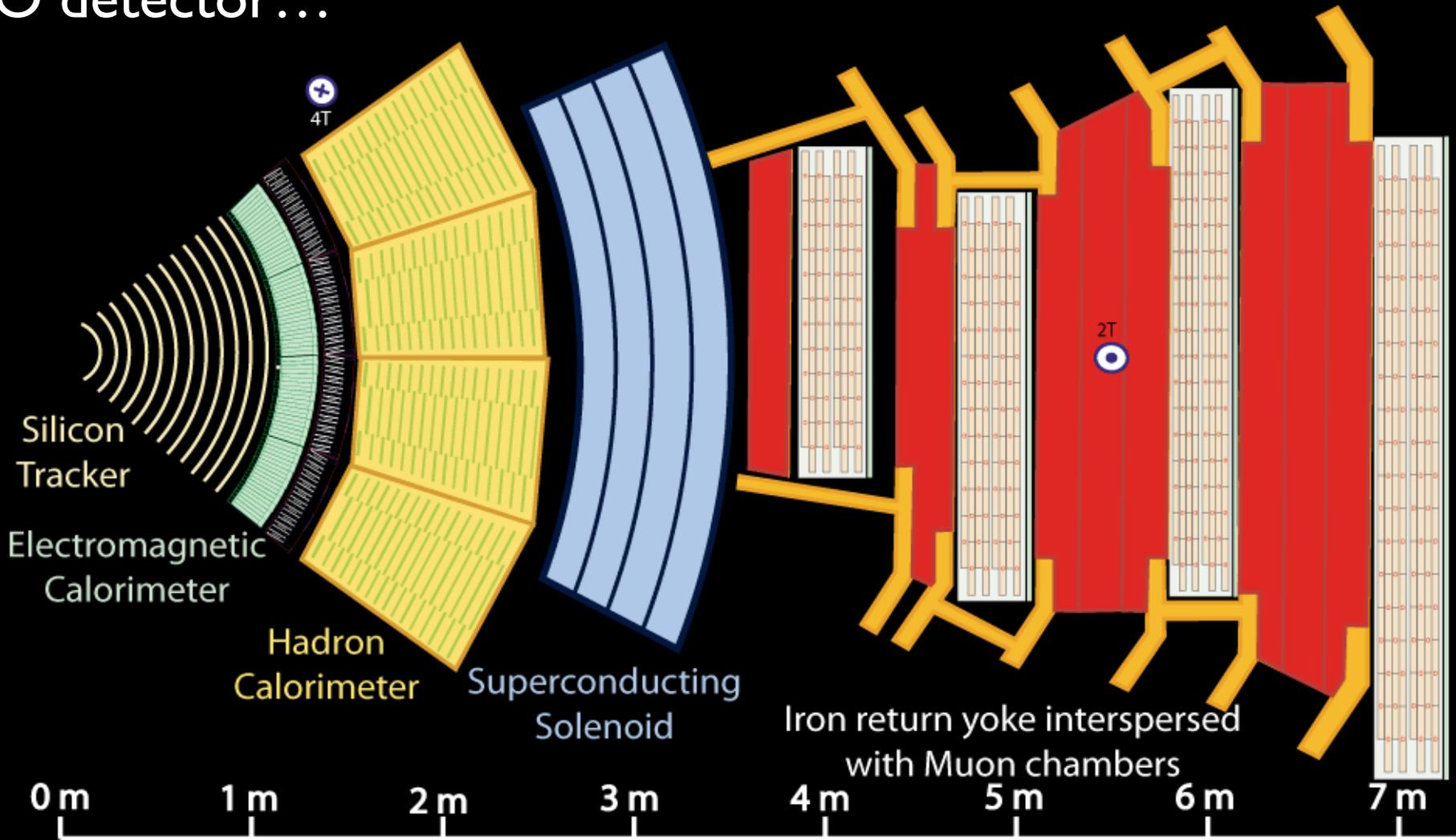
Construção e operação da experiência CMS

Setembro de 2008: CMS está pronta para registrar dados

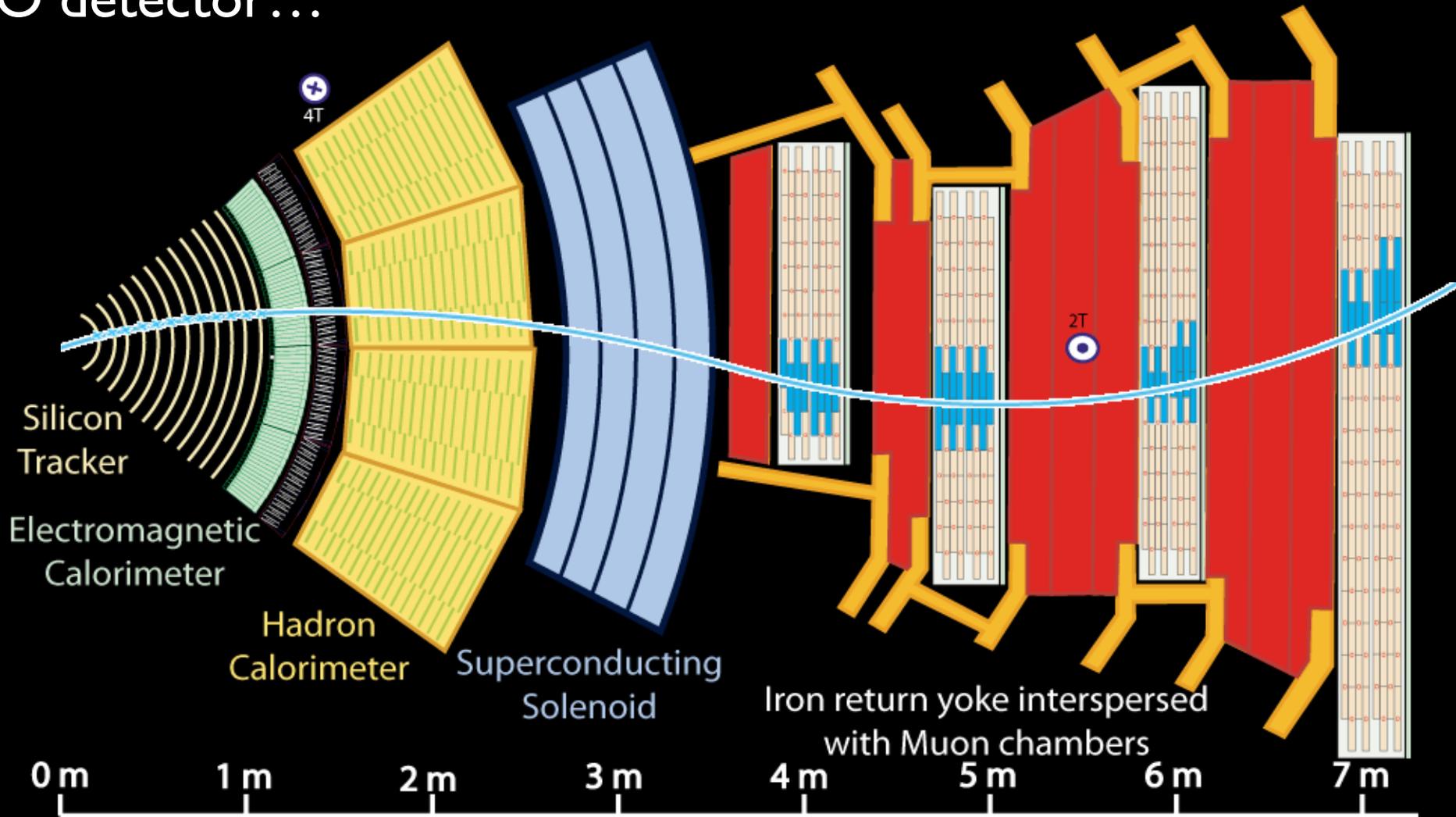
33



○ detector...



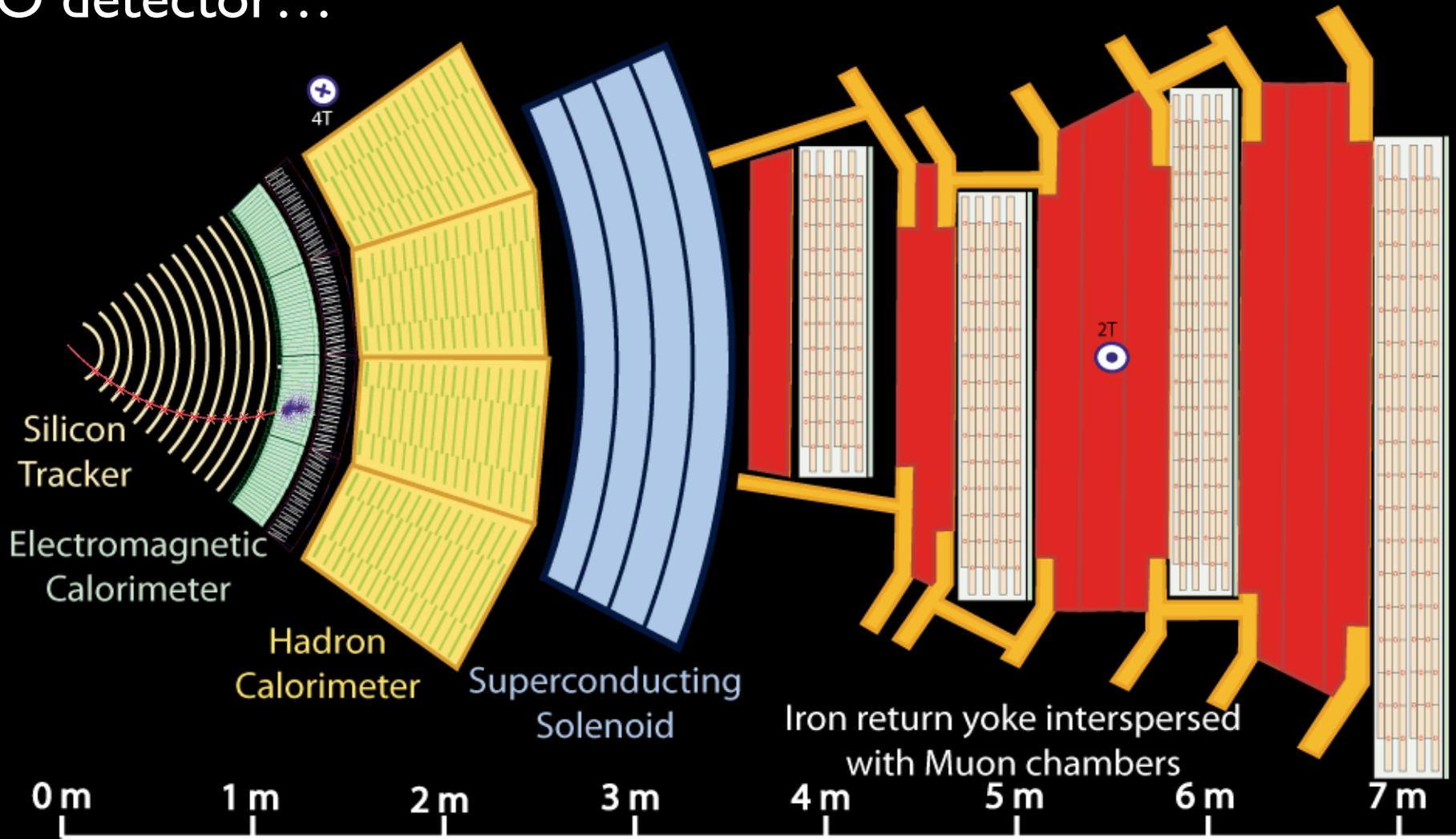
○ detector...



...e as partículas

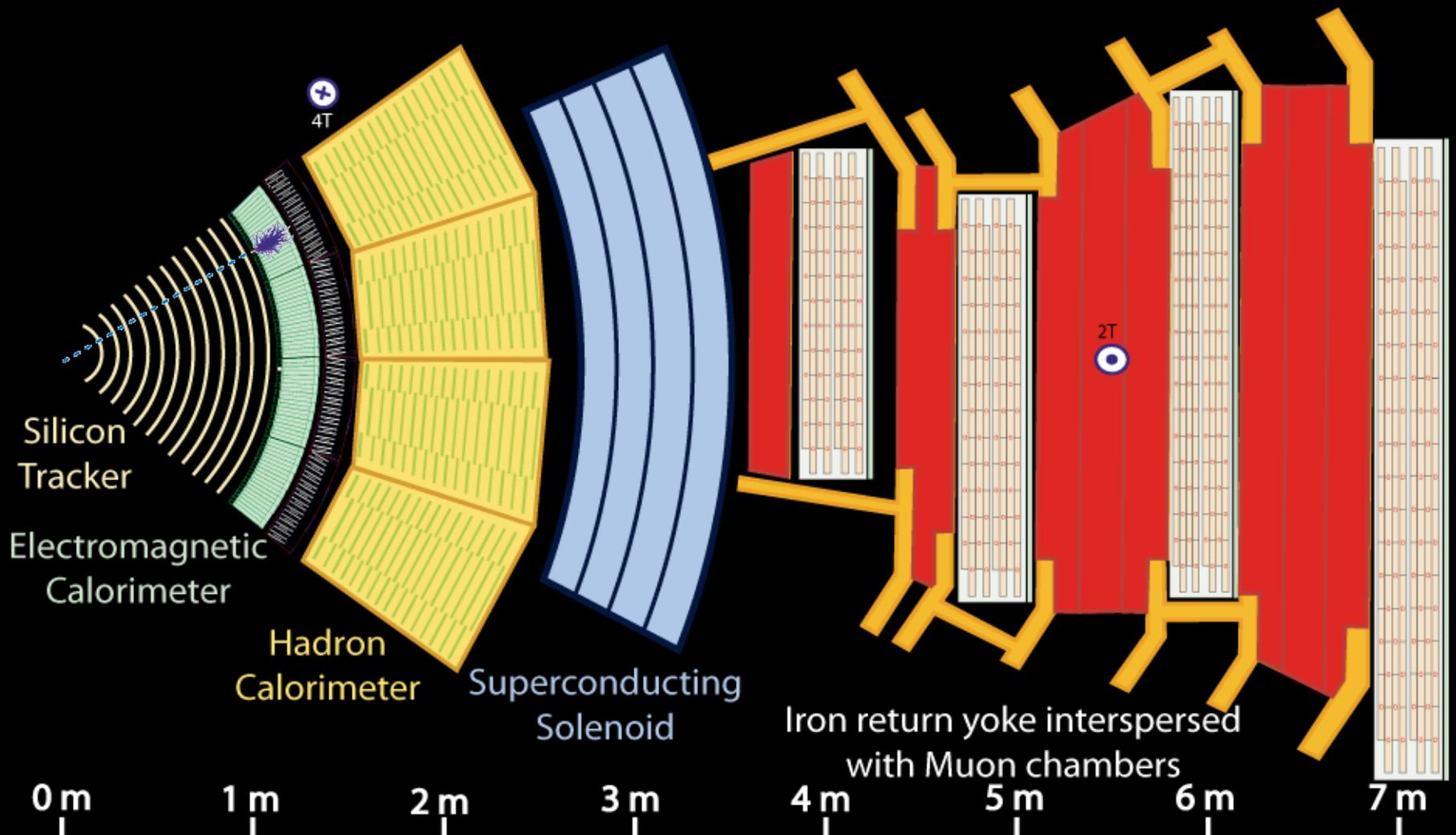
Muão (μ^\pm)

○ detector...



...e as partículas

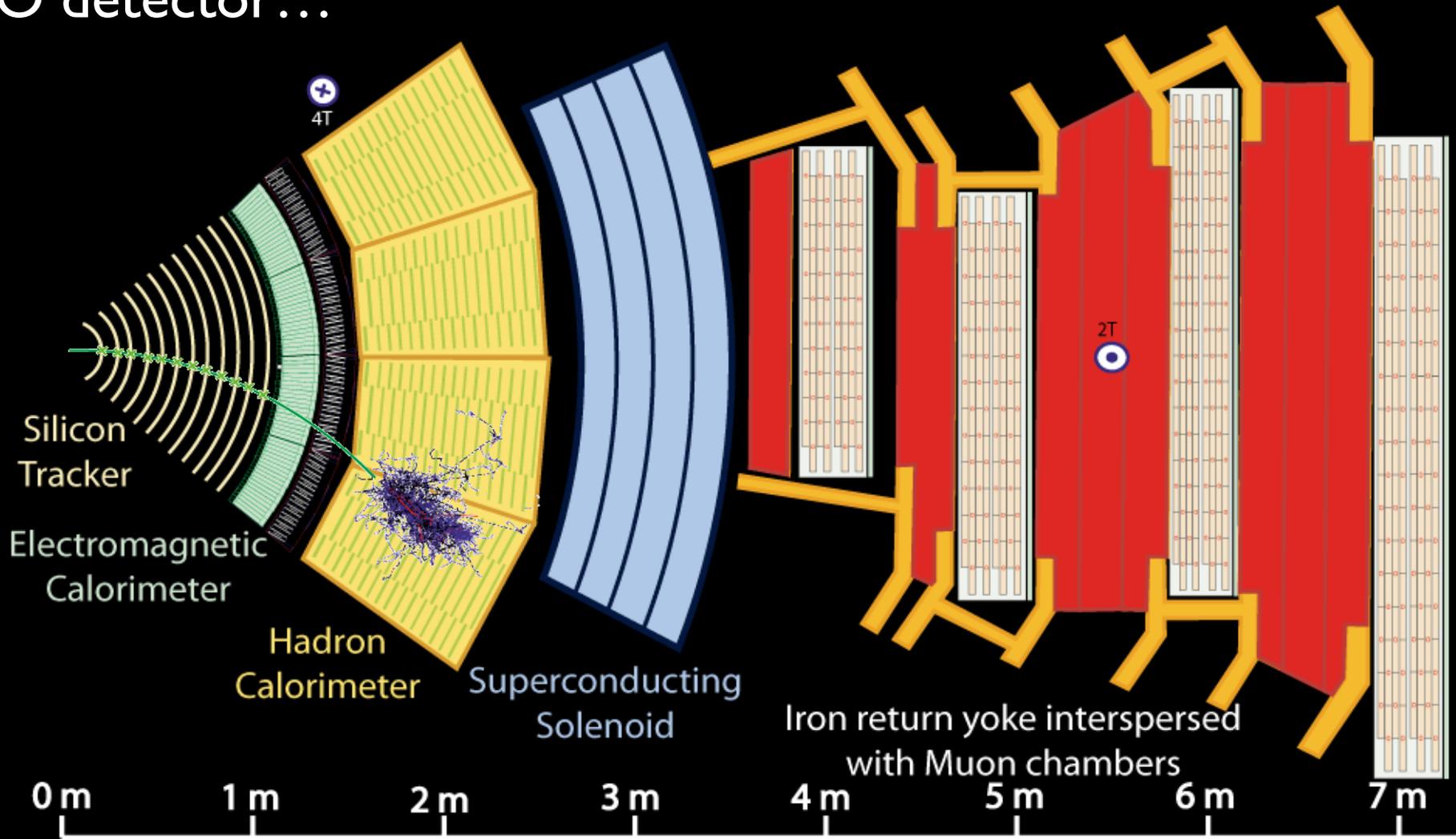
Eléctron (e^\pm)



...e as partículas

Fotão (γ)

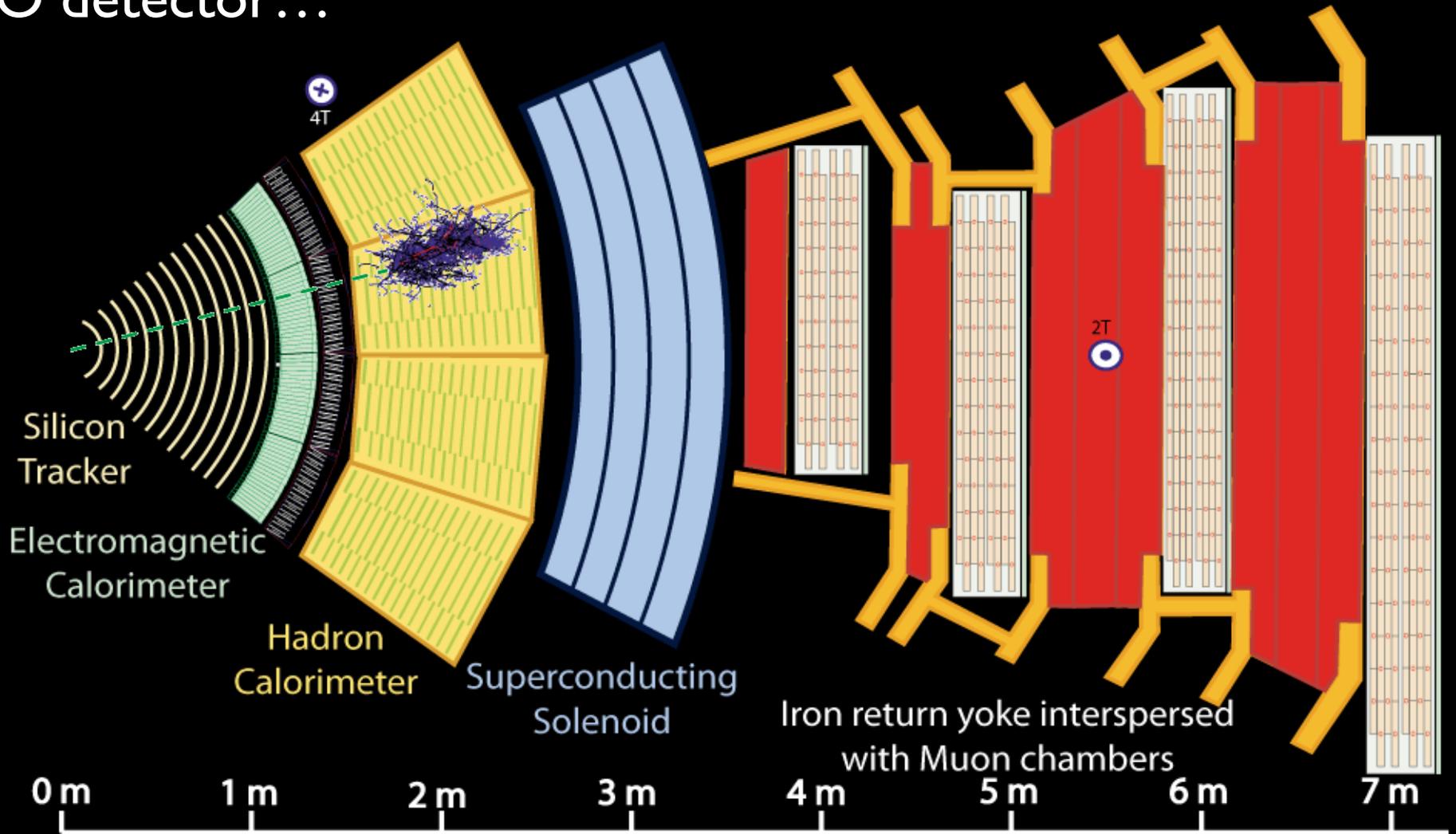
○ detector...



...e as partículas

Hadrão carregado ($p^\pm, \pi^\pm, K^\pm, \dots$)

○ detector...

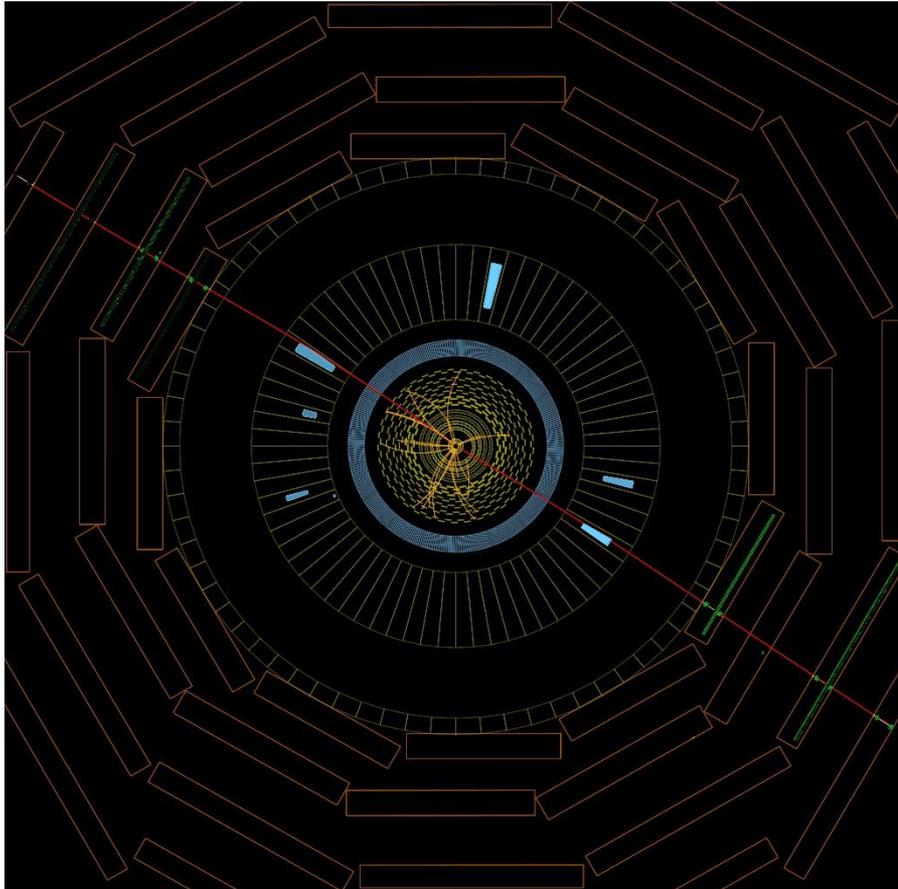


...e as partículas

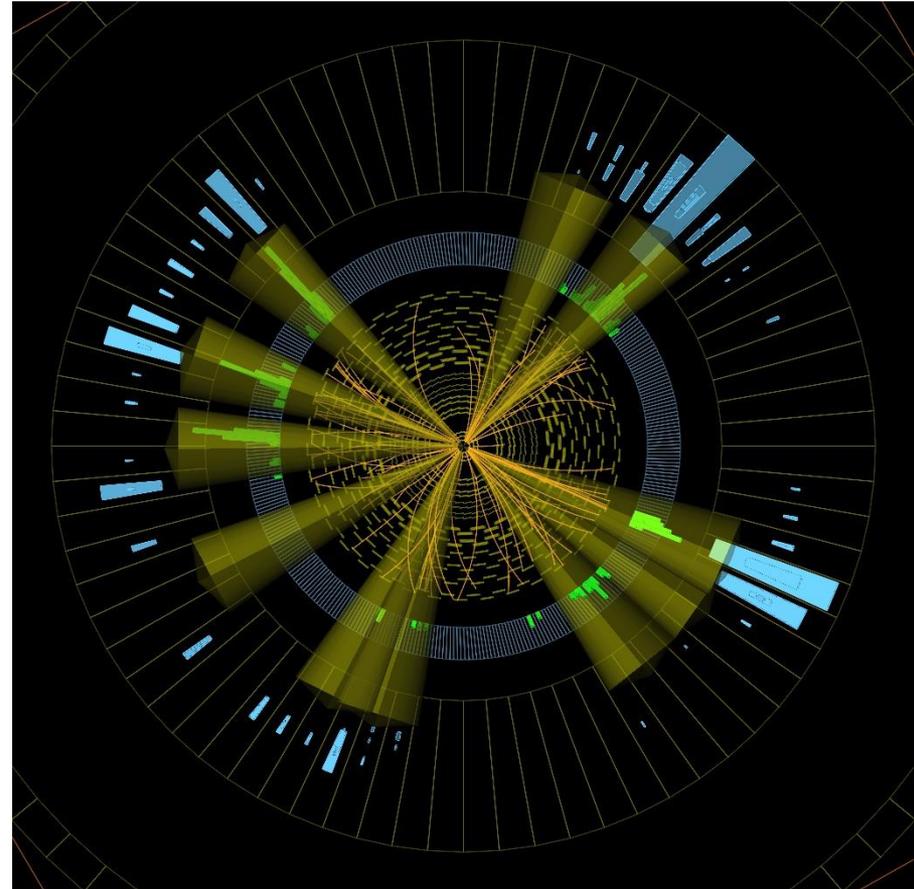
Hadrão neutro (n, K_S^0, \dots)

Eventos reais

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Múltiplos jatos

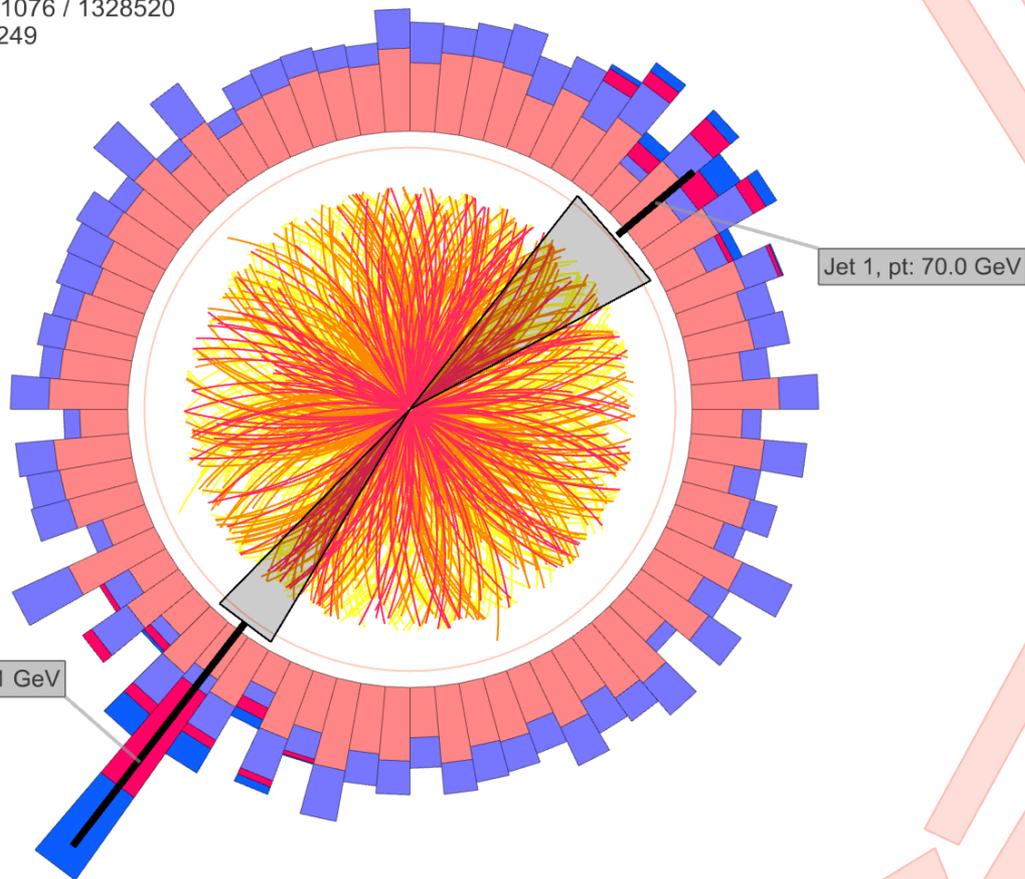


Eventos reais

Dois jatos após uma colisão PbPb

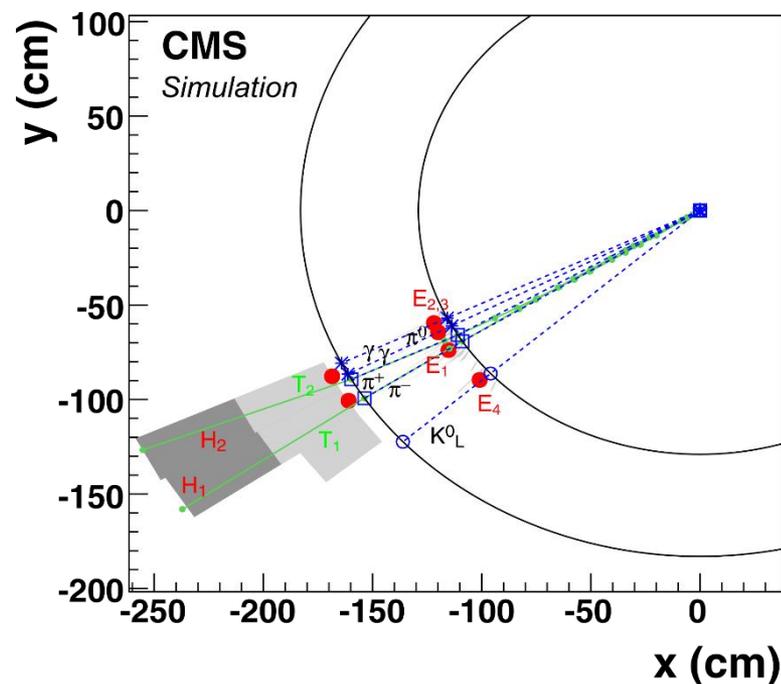


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST
Run/Event: 151076 / 1328520
Lumi section: 249



Reconstrução dos dados I

- Algoritmos sofisticados são usados para:
 - Remover o ruído dos detectores
 - Aglomerar depósitos de energia
 - Correlacionar aglomerados de energia
 - num único sub-detector
 - entre sub-detectores
 - Identificar as partículas reconstruídas

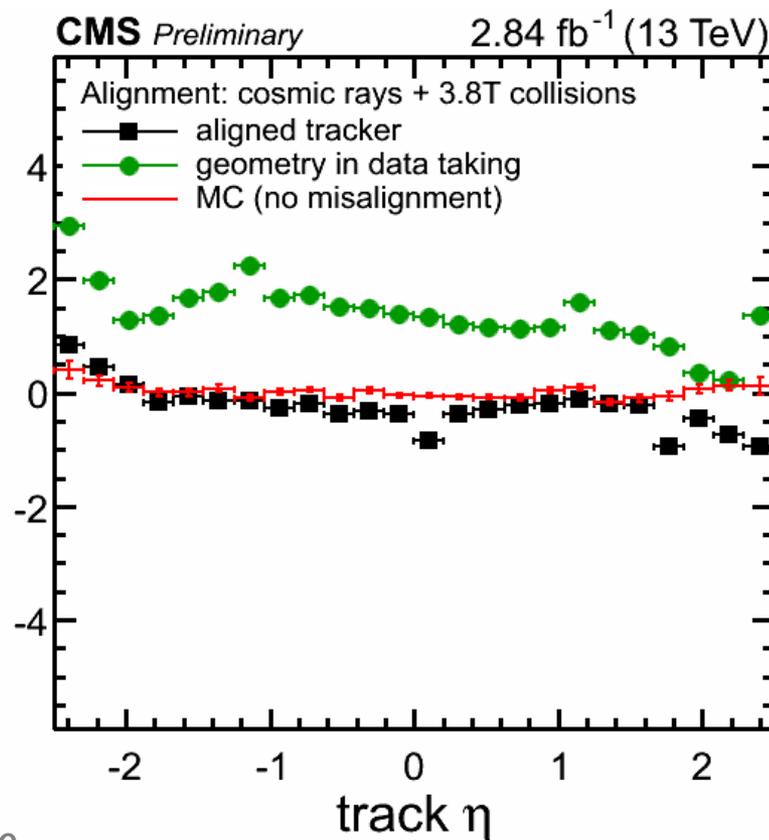
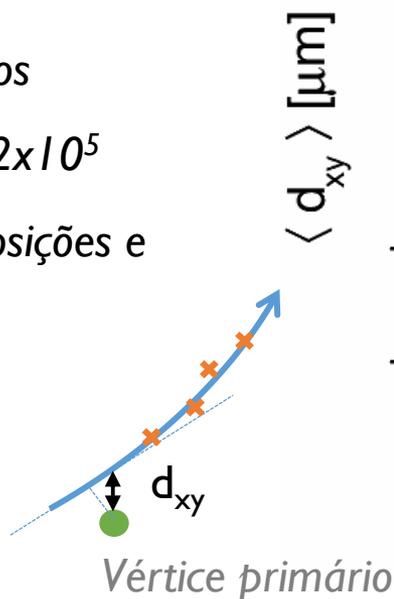


Exemplo do algoritmo “Particle Flow” usado em CMS

Reconstrução dos dados II

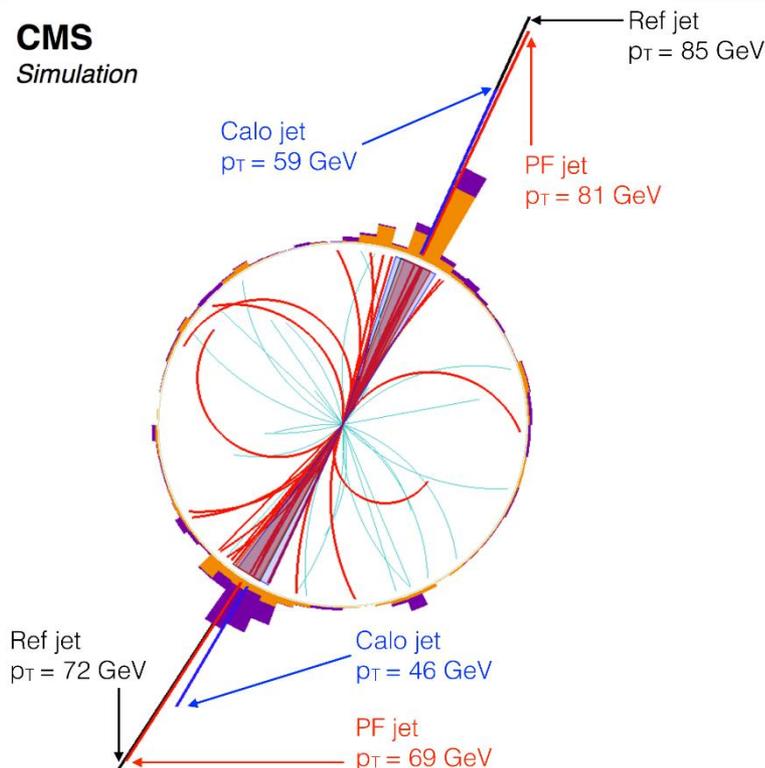
- Para que a reconstrução funcione é necessário calibrar:
 - coordenadas (alinhamento)
 - tempo (sincronização)
 - energia (escala e resolução)

Exemplo: o alinhamento de todos os módulos de Si requer o ajuste de 2×10^5 parâmetros para determinar as posições e orientações com precisão $< 10 \mu\text{m}$



Reconstrução dos dados III

- Com o(s) (sub-)detector(es) calibrado:
 - ganho substancial em precisão ao conjugar a informação global
 - sub-detectores menos precisos são usados para guiar a reconstrução de fluxo
 - sub-detectores mais precisos são usados para estabelecer as energias

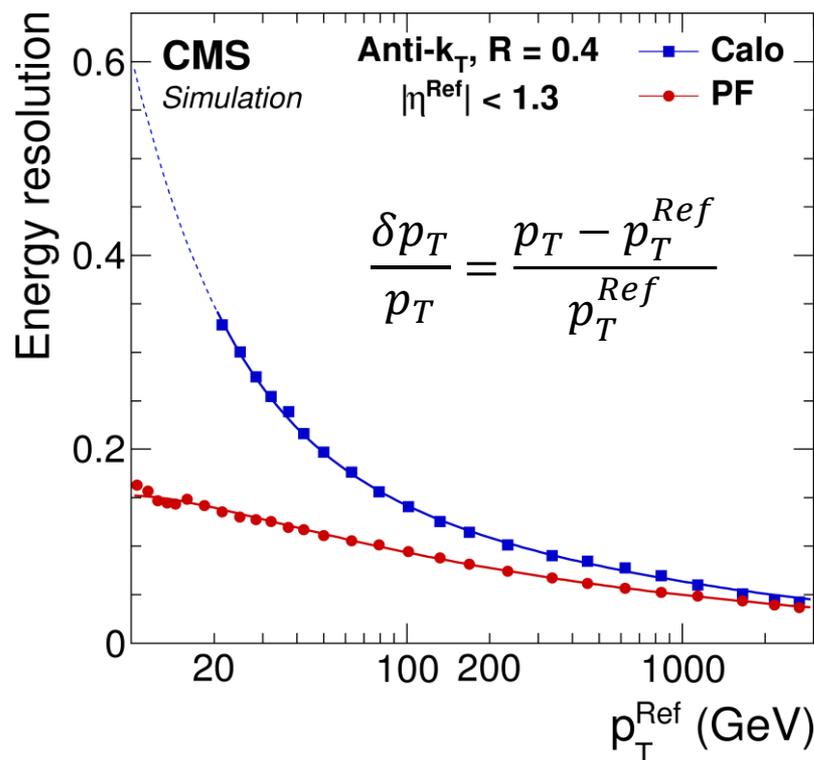


Reconstrução de um jato (jet) em CMS

- **Calo** – usando apenas calorimetria
- **PF** – usando todos os sub-detectores
- **Ref** – referência simulada

Reconstrução dos dados III

- Com o(s) (sub-)detector(es) calibrado:
 - ganho substancial em precisão ao conjugar a informação global
 - sub-detectores menos precisos são usados para guiar a reconstrução de fluxo
 - sub-detectores mais precisos são usados para estabelecer as energias



Reconstrução de um jato (jet) em CMS

- *Calo* – usando apenas calorimetria
- *PF* – usando todos os sub-detectores
- *Ref* – referência simulada

As primeiras descobertas

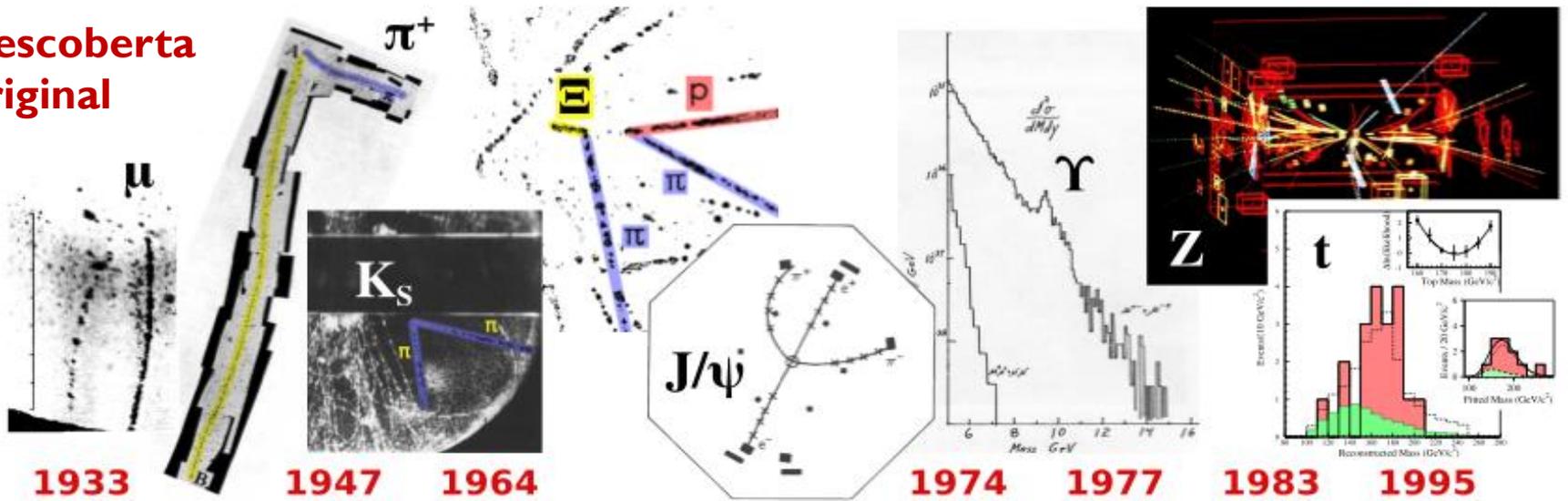
Um século de Física em menos de um segundo no LHC

O bóson Higgs

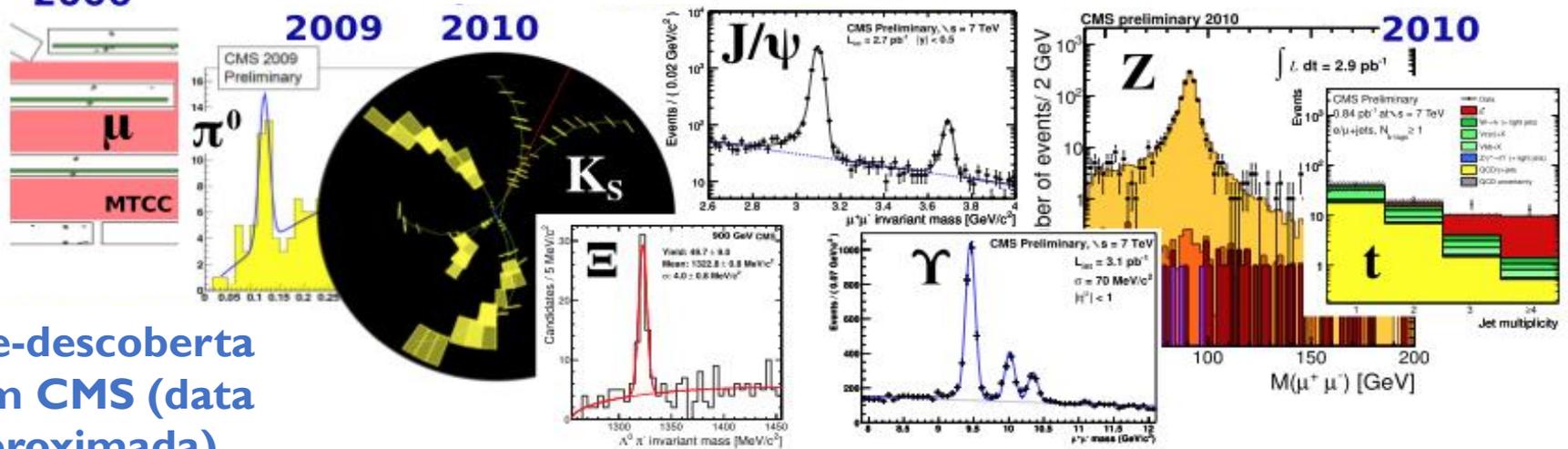
Outras supresas

As primeiras descobertas

Descoberta original



Re-descoberta em CMS (data aproximada)



A luminosidade é o ingrediente principal 48

- A taxa de eventos é dada por:

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

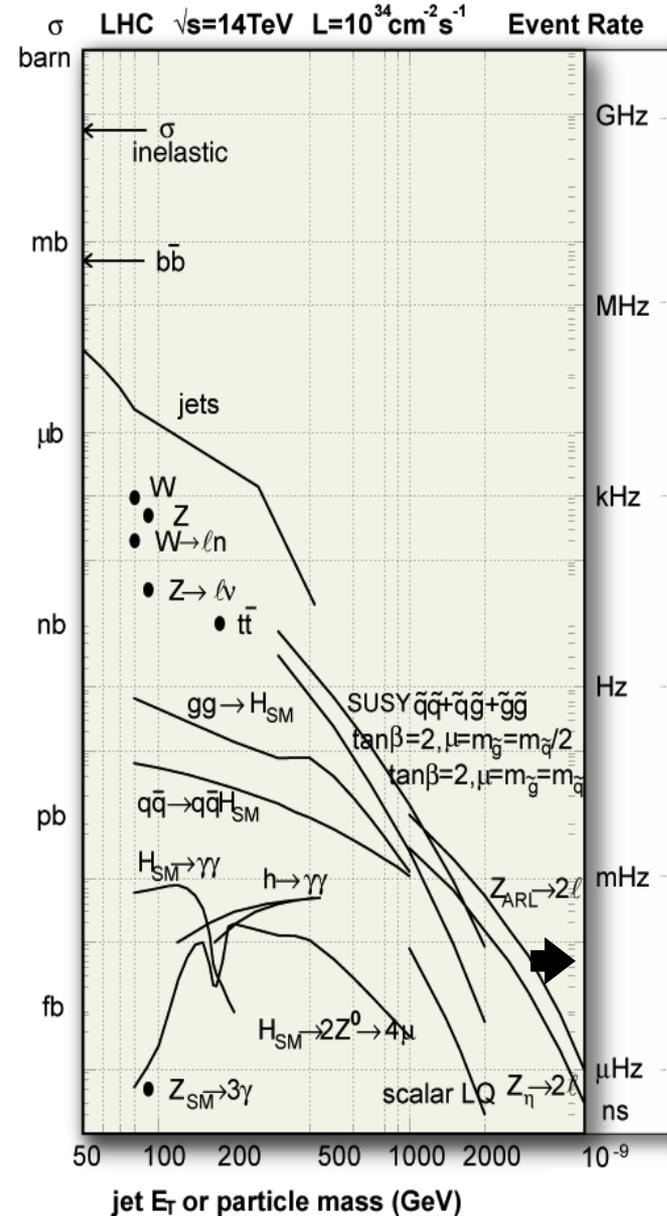
Luminosidade [cm⁻²s⁻¹]

depende dos parâmetros do feixe: densidade, extensão espacial, frequência...

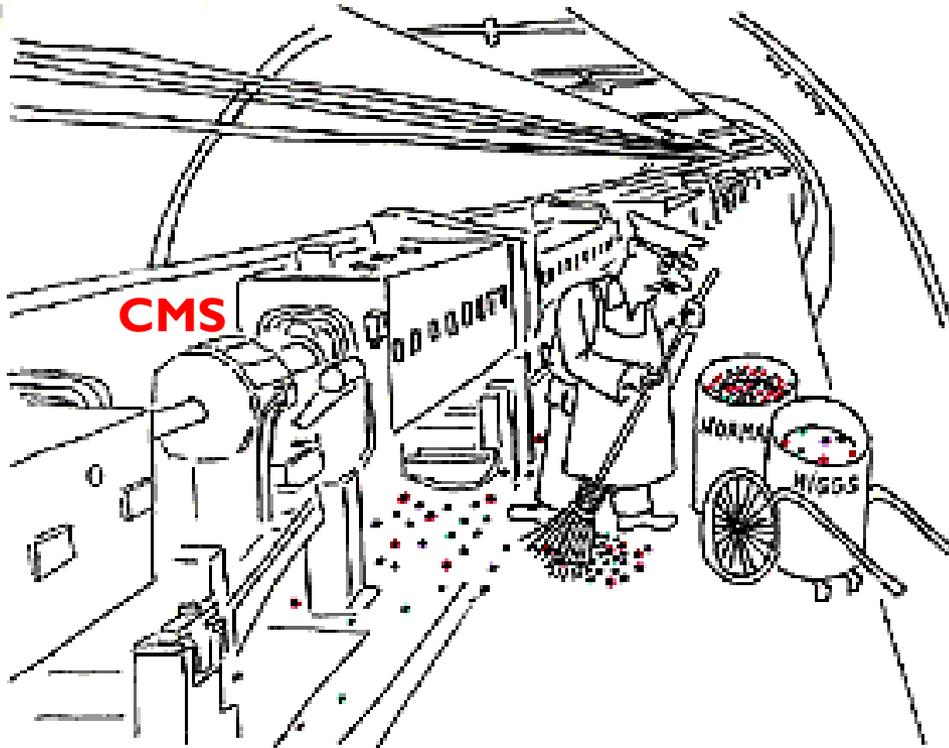
Secção eficaz [barn=10⁻²⁴cm²]

depende da energia transferida, dos consituintes do protão, da intensidade da interacção fundamental...

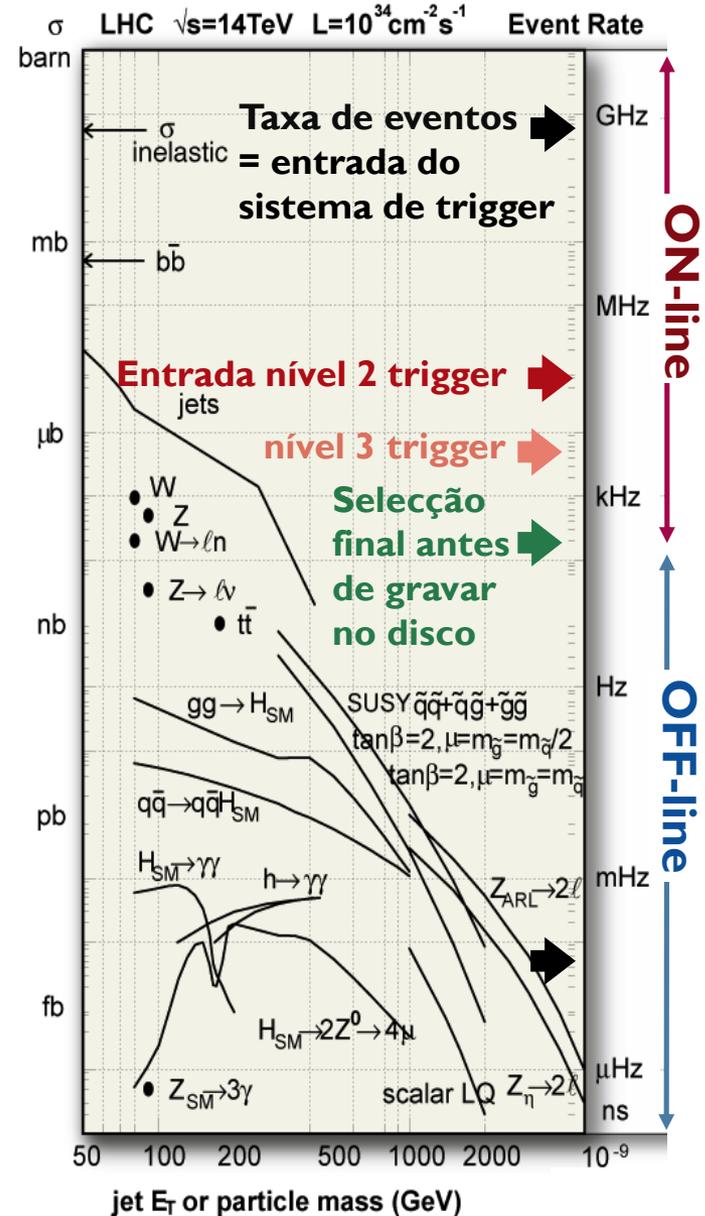
Potencial para produzir todas as partículas descobertas no sec. XX em aproximadamente 200ms!



A luminosidade é o ingrediente principal



Potencial para produzir todas as partículas descobertas no sec. XX em aproximadamente 200ms!



Em busca do Higgs (pequeno formulário)₅₀

- De acordo com a teoria da relatividade (Einstein)

$$E^2 = p^2 + M^2 \Leftrightarrow M^2 = E^2 - p^2$$

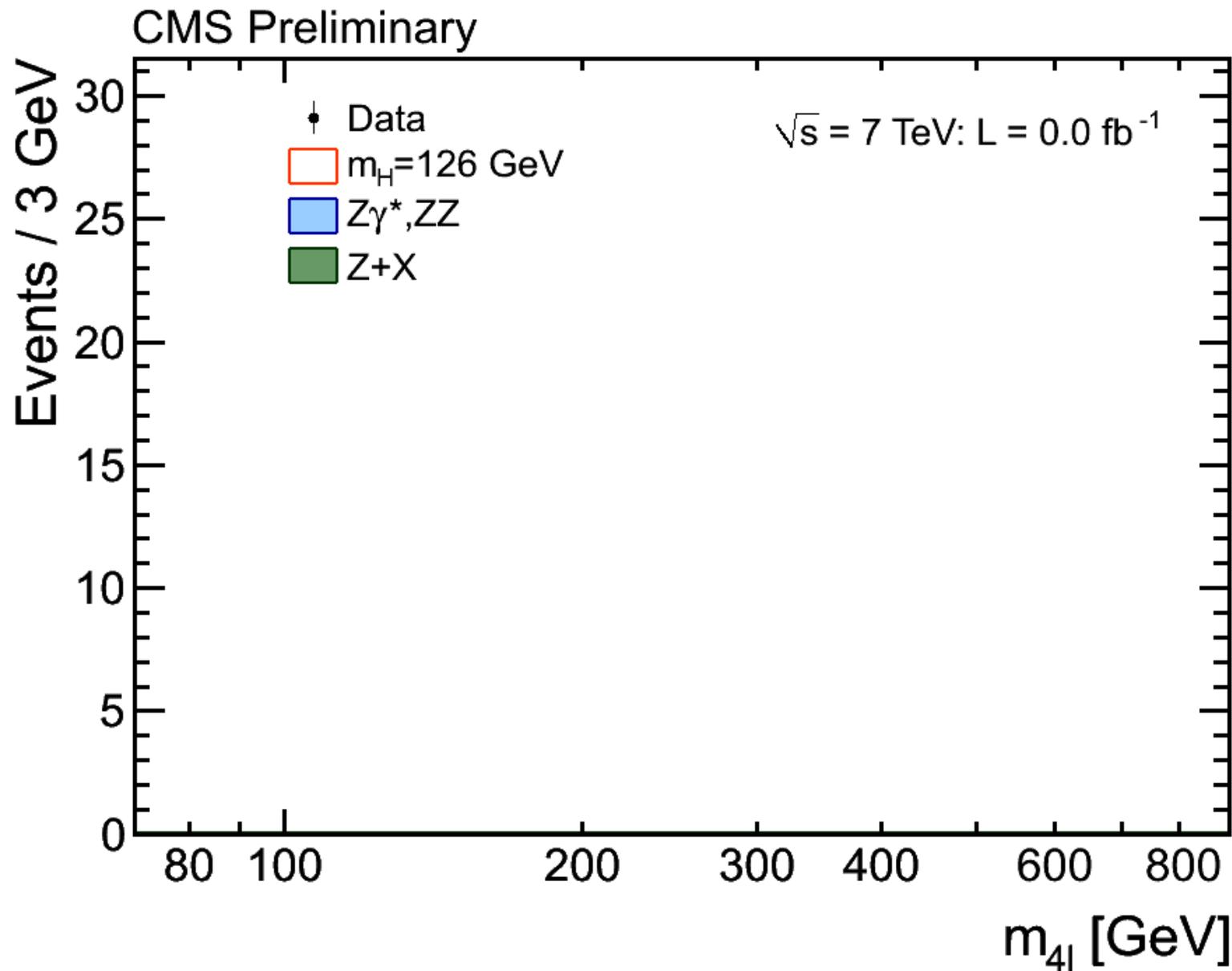
- O bóson de Higgs é instável: decai em pares de partículas

- Se duas partículas observadas resultam de um decaimento

$$M^2 = (E_A + E_B)^2 - \|\vec{p}_A + \vec{p}_B\|^2 = 2E_A E_B (1 - \cos \theta_{A,B})$$

- “basta-nos” contar quantos pares têm uma massa na vizinhança de M
- se os dados preferirem M fixo encontramos uma ressonância 😊

Em busca do Higgs com pares ZZ

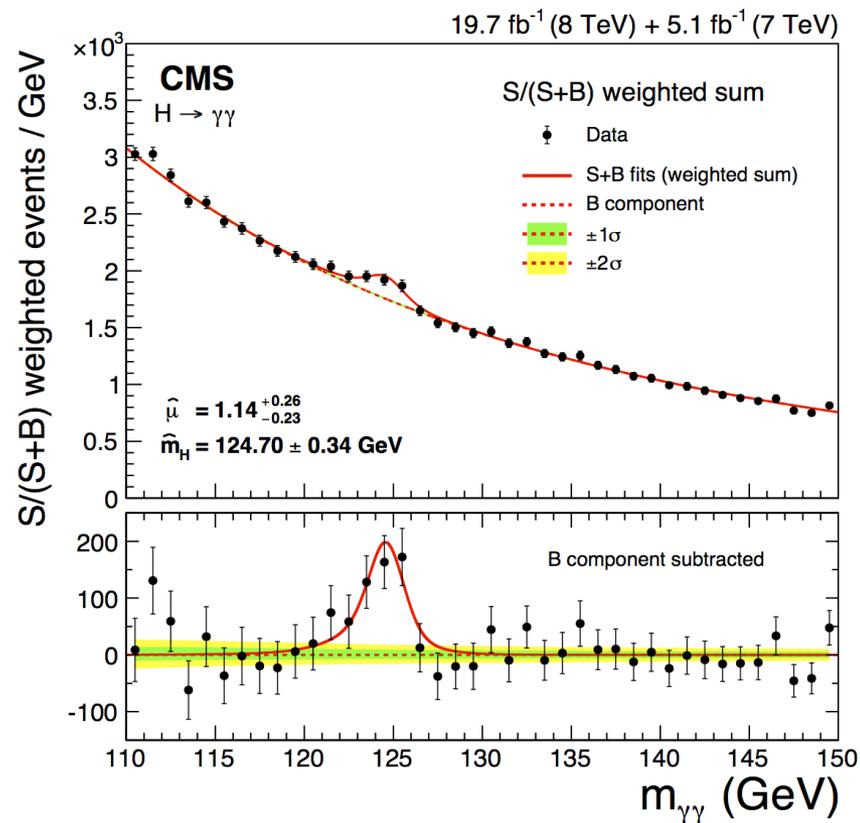
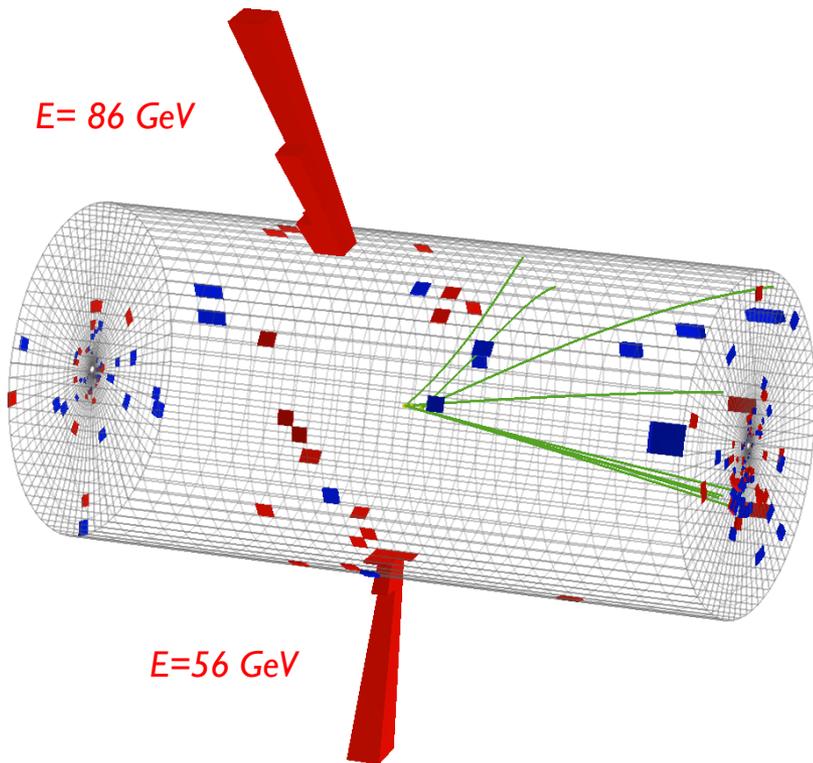


Em busca do Higgs com pares $\gamma\gamma$

$$M^2 = 2E_A E_B (1 - \cos \theta_{A,B}) \Rightarrow \frac{\Delta M}{M} \sim \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta E_A}{E_A} \oplus \frac{\Delta E_B}{E_B} \oplus \cot \frac{\theta_{A,B}}{2} \Delta \theta_{A,B} \right]$$

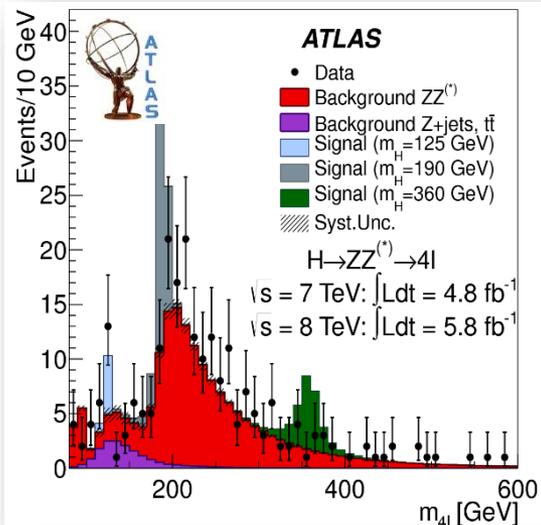
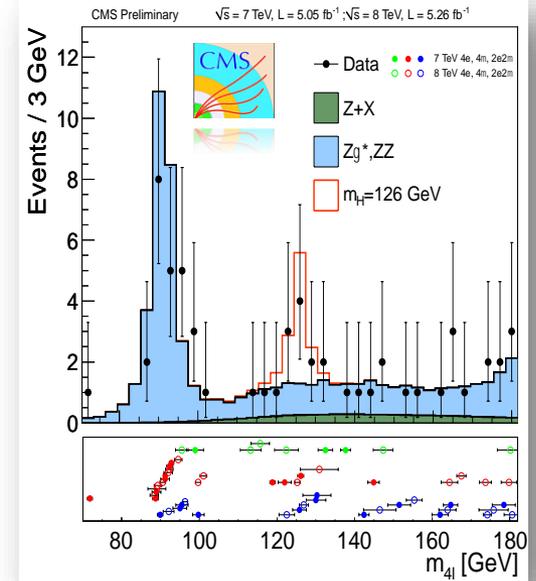
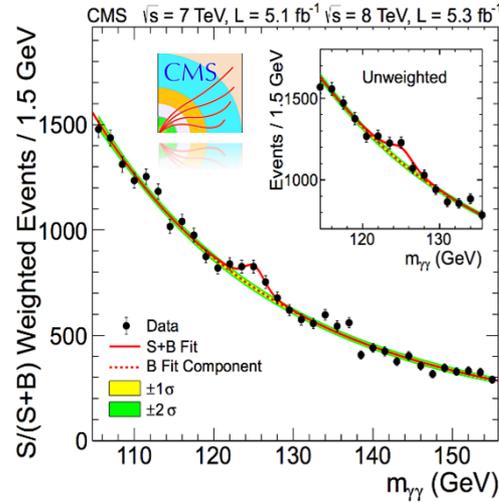
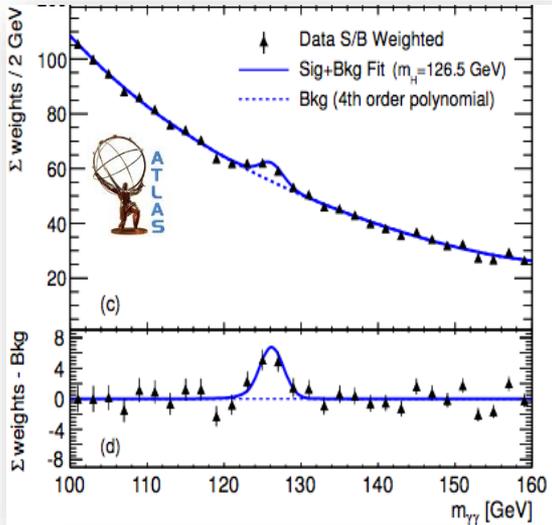
Resolução do calorímetro

Granularidade + identificação do ponto de produção (=vértice primário)



As primeiras descobertas

4 de Julho de 2012: Higgs encontrado no CERN!



As primeiras descobertas

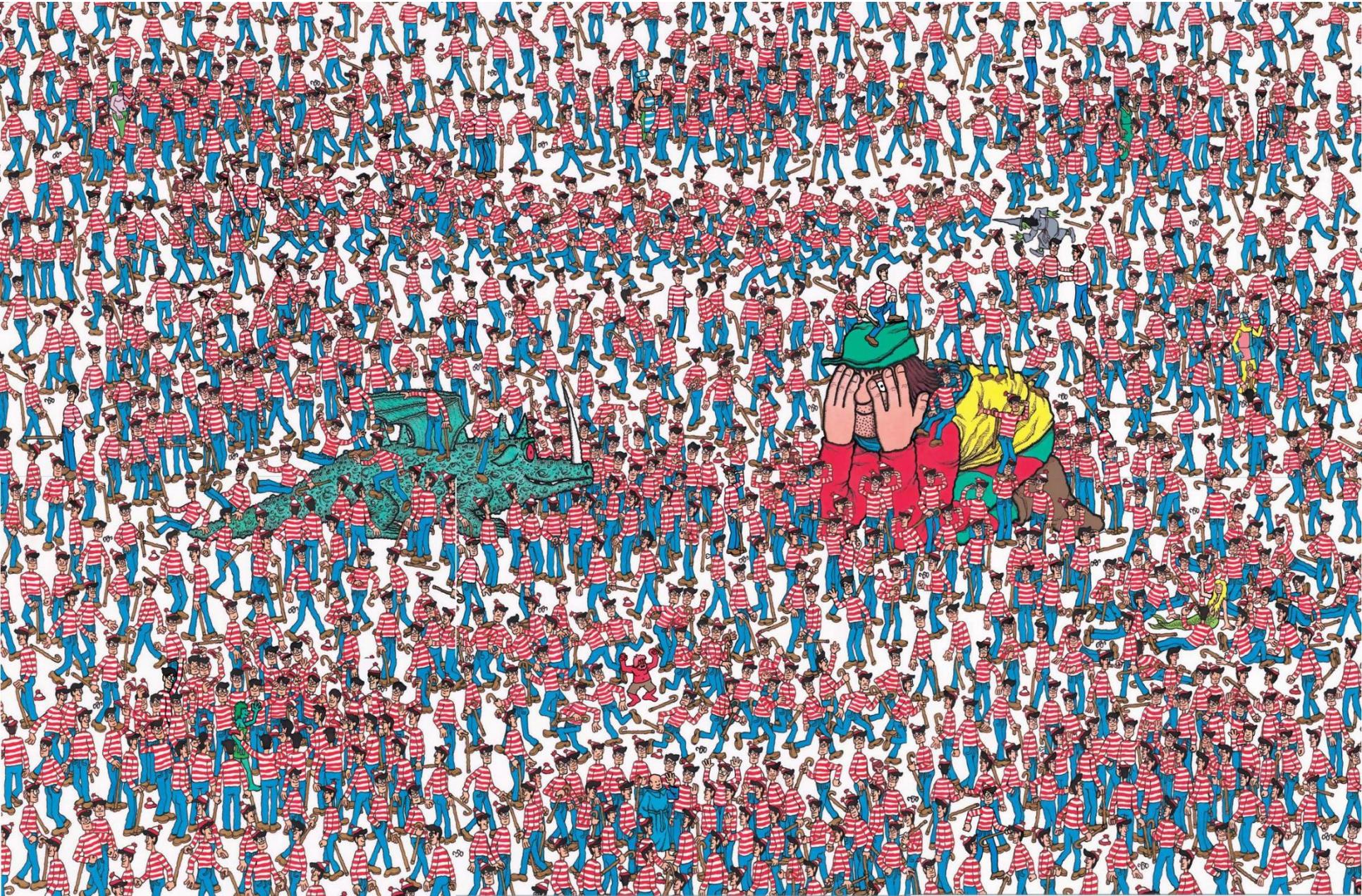
4 de Julho de 2012: no restaurante do CERN



*O bosão de Higgs pode ter sido encontrado

** Amador...

Mas... que Higgs foi encontrado?



Será o Higgs do model padrão? *

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Secção eficaz [barn= 10^{-24}cm^2] aqui entra a teoria



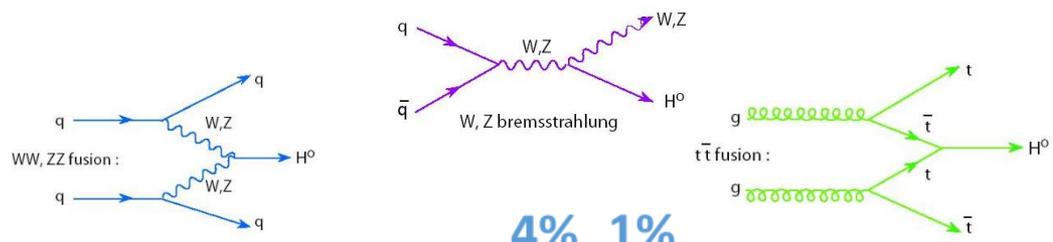
*NB a pergunta deverá antes ser formulada como: “conseguimos excluir o Higgs do modelo padrão?”

Será o Higgs do model padrão?

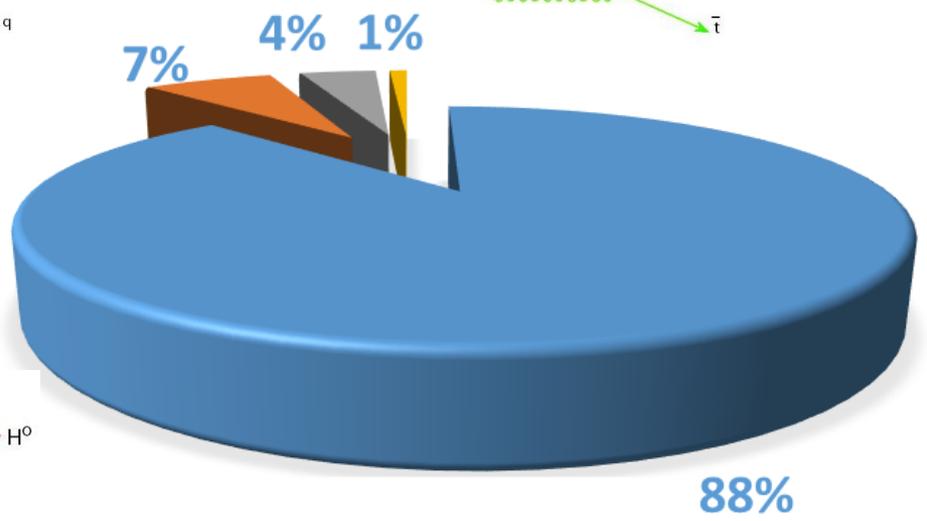
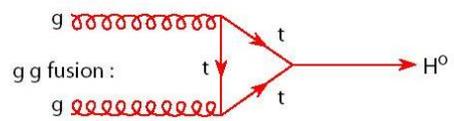
- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Secção eficaz [barn= 10^{-24}cm^2] aqui entra a teoria com que probabilidade o Higgs **é produzido?**



$\sigma = 55.1 \text{ pb}$
 $= 55.1 \times 10^{-36} \text{ cm}^{-2}$

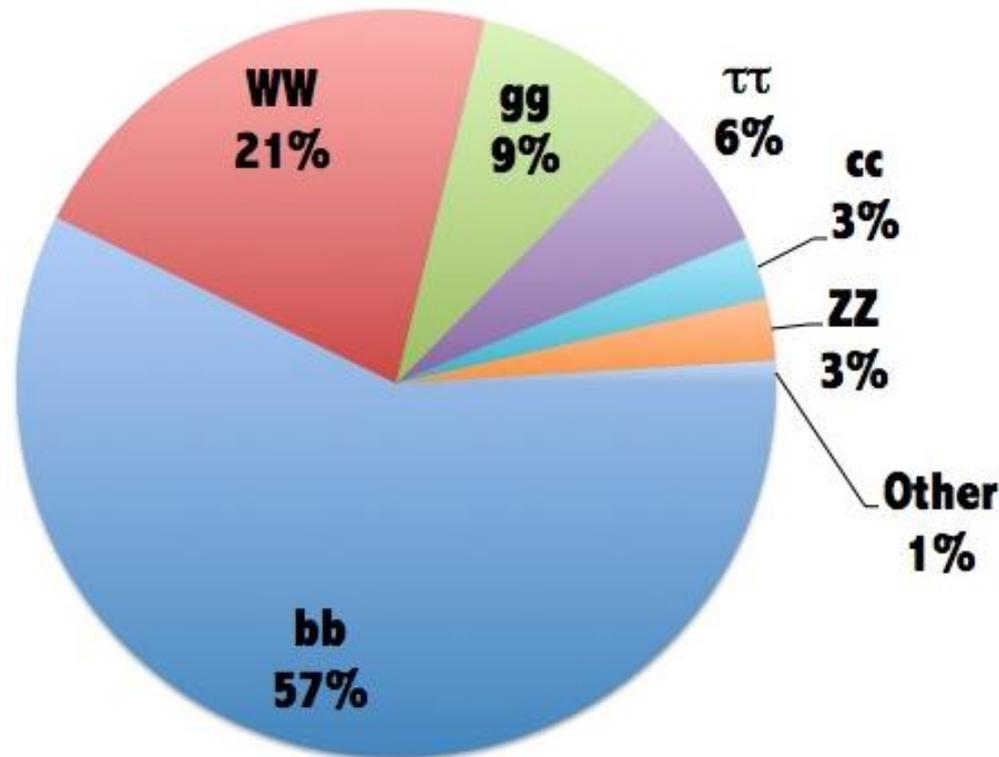


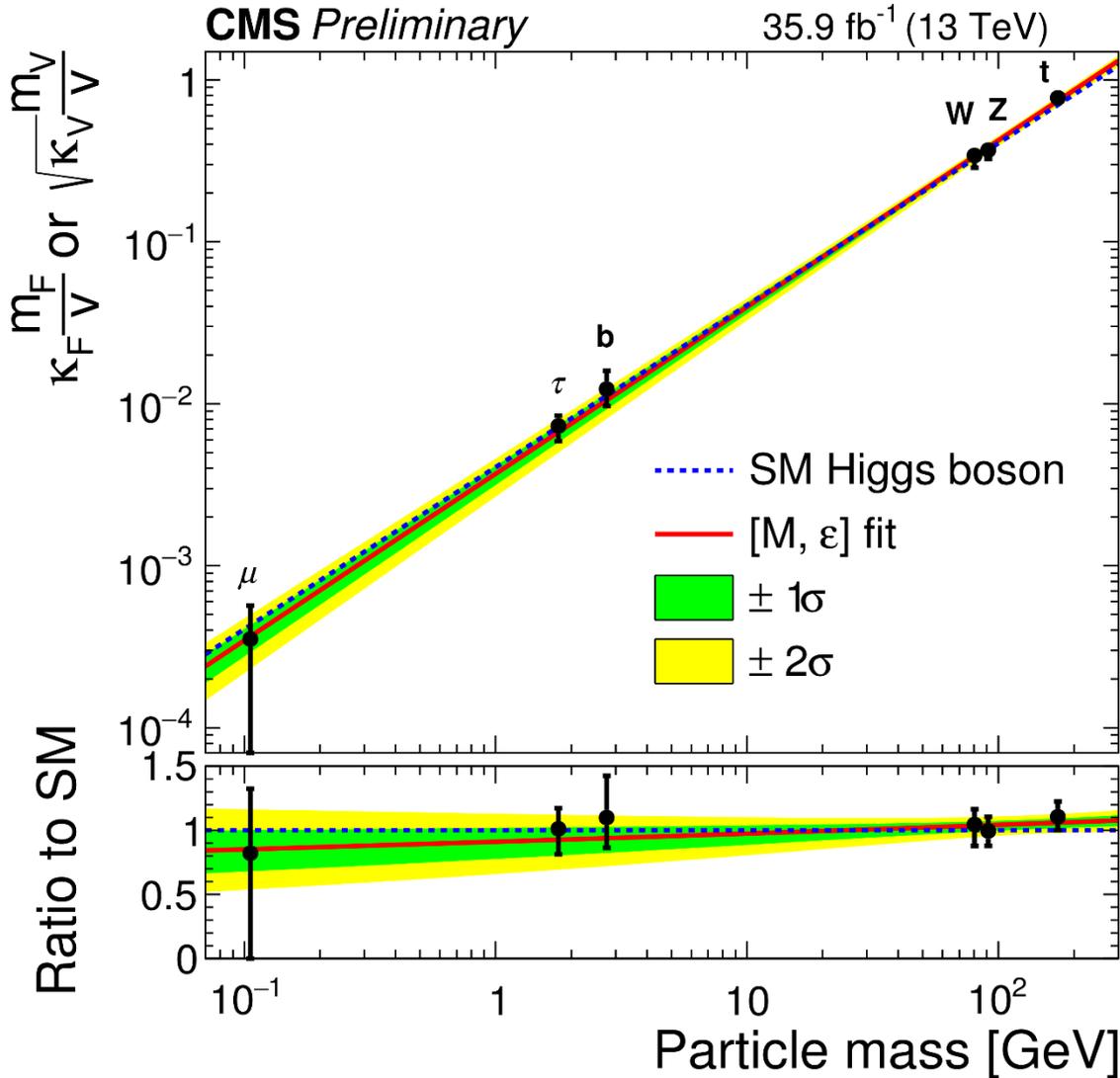
Será o Higgs do model padrão?

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Secção eficaz [$\text{barn} = 10^{-24} \text{cm}^2$] aqui entra a teoria com que probabilidade o Higgs é produzido? **se fragmenta?**



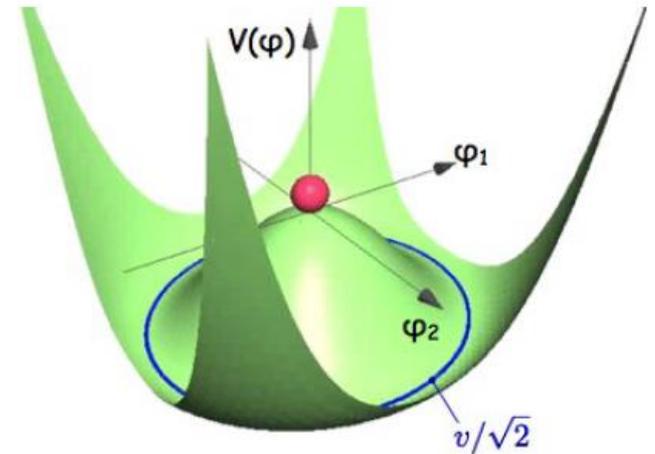


Até hoje : tudo indica que interage tal como se espera no Higgs do modelo padrão

Uma descoberta fundamental foi feita!

- A nova partícula é um bóson de Higgs

- não é apenas mais uma partícula
- o campo de Higgs permeia o Universo
- será este o único do seu género?



- Uma nova peça nos modelos cosmológicos

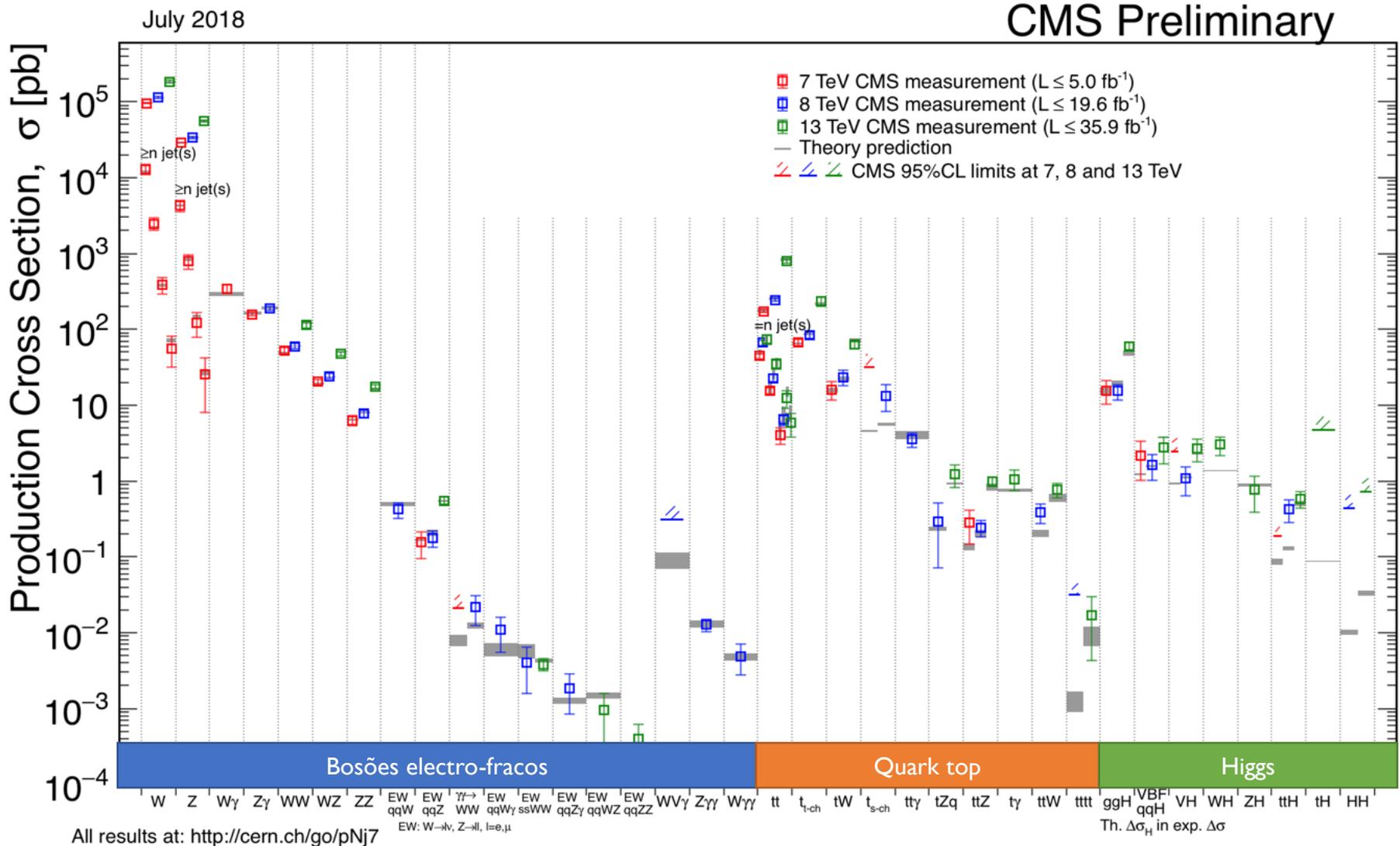
- qual a sua contribuição na inflação após o big-bang?
- será a energia do campo de Higgs a fonte de matéria do Universo?

GPS para a física do LHC na era (pós-)Higgs

Física das altas energias no LHC, Quo vadis?

Algumas expectativas para a fronteira da intensidade

○ triunfo do modelo padrão



...mas sabemos que descreve apenas 4% do nosso universo...

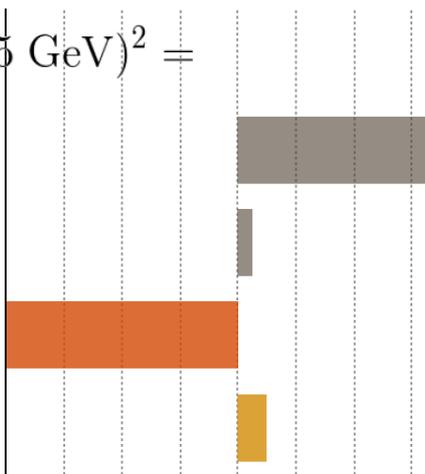
Equilibrismo na natureza

• A massa do Higgs é “pequena”...

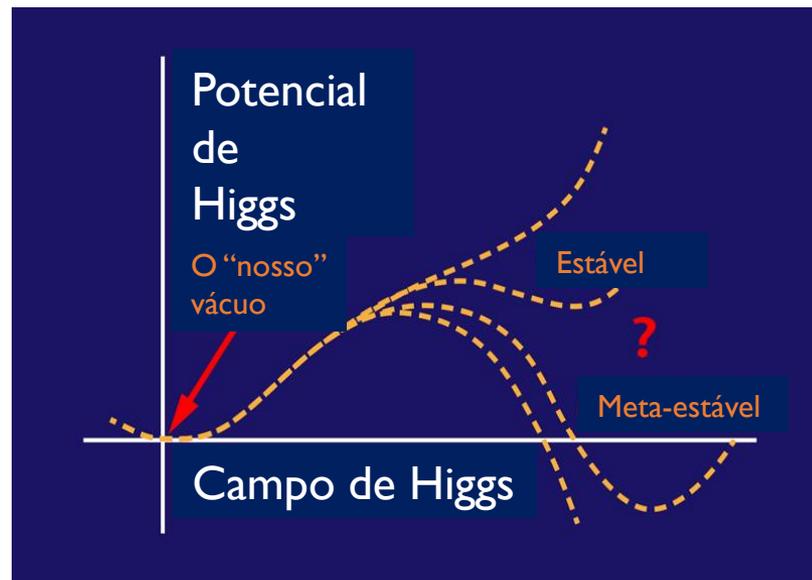
- $\frac{\text{Escala da gravidade}}{\text{Escala do Higgs}} \approx 10^{17}$
- m_{top} “equilibra” m_H em cerca de 10^{16}
- para as massas que medimos o potencial de Higgs pode não ser estável...

Motivo para programa de medidas de precisão e pesquisa de nova física

$m_H^2 \approx (125 \text{ GeV})^2 =$



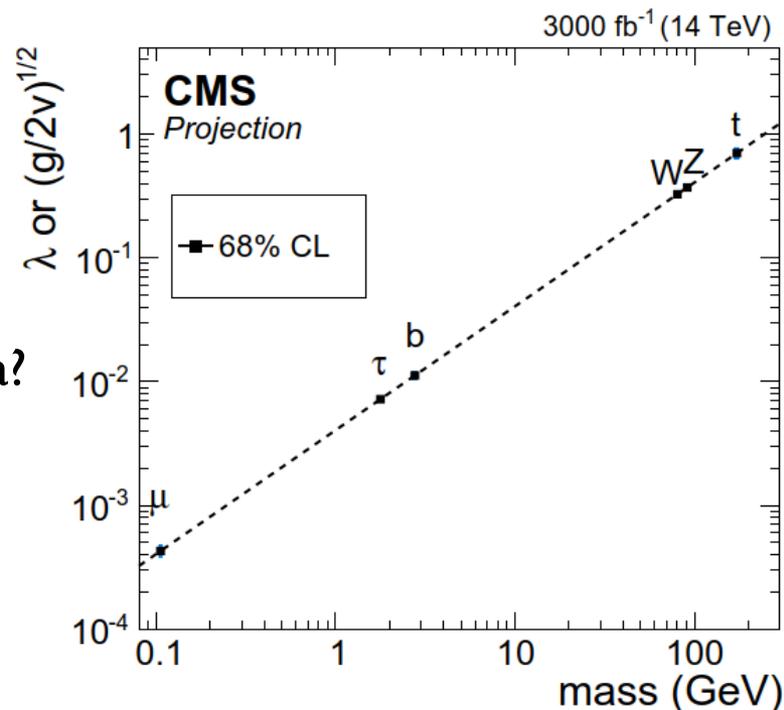
$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{16\pi^2} \lambda_H^2 \Lambda^2 \\
 & - \frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2 \\
 & + \frac{9}{64\pi^2} g^2 \Lambda^2
 \end{aligned}$$



Que mistérios esconde o Higgs?

- Medir mais precisamente os acoplamentos do Higgs

- com uma precisão entre os **2%-10%**
- acopla também ao charme e muão?
- diferentes espaços de fase?
- portal para produção de matéria escura?
- outros Higgs a contribuir na quebra de simetria electrofraca?
- ...



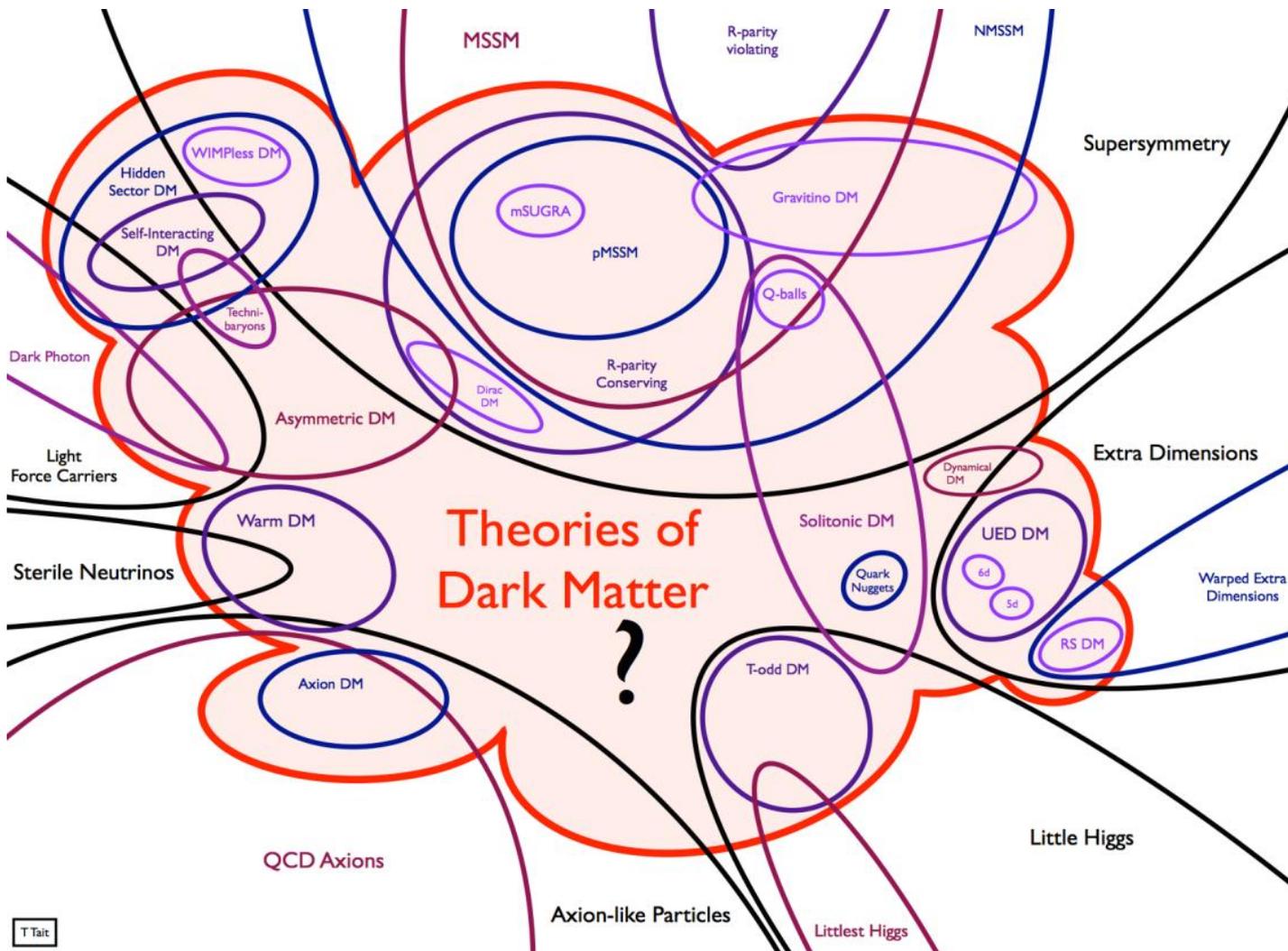
Processos raros, acoplamentos fracos

⇒ programa requer x20 mais luminosidade

O que está ainda por desvendar I

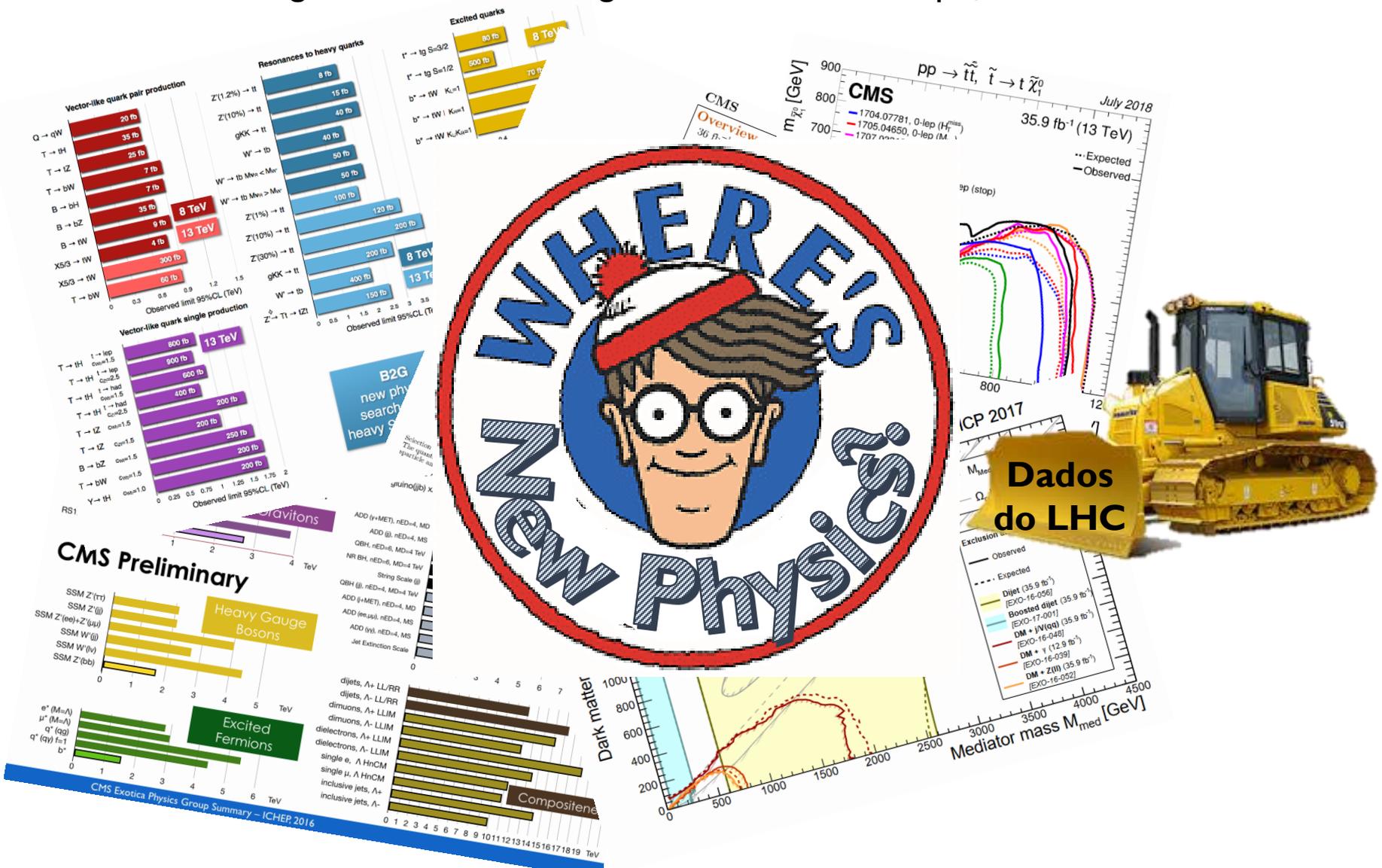
Os puzzles teóricos que motivaram o LHC continuam presentes:

matéria escura, massa dos neutrinos, estrutura de sabor, unificação das interações, ...



O que está ainda por desvendar II

Mas >400 artigos até a data restringem directamente o espaço de fase de nova física...



O plano geral do LHC

Muitas descobertas em 7 anos de dados, o que nos reservam os 20 pela frente?



Para beneficiar do aumento de luminosidade do LHC os detectors devem ser actualizados

CMS: uma experiência em mutação

[Câmaras de muões]

Nova electrónica e detectores na região $1.5 < |\eta| < 2.4$
Identificação até $|\eta| = 3.0$

[Calorímetro central]

Nova electrónica; operado a frio (ECAL), renovação dos cintiladores (HCAL)

[“Cronómetros”]

Novos detectores (LYSO+SiPM e LGAD) para medir o instante de passagem das partículas ($\delta t \sim 30\text{ps}$)

[Calorímetro tampa]

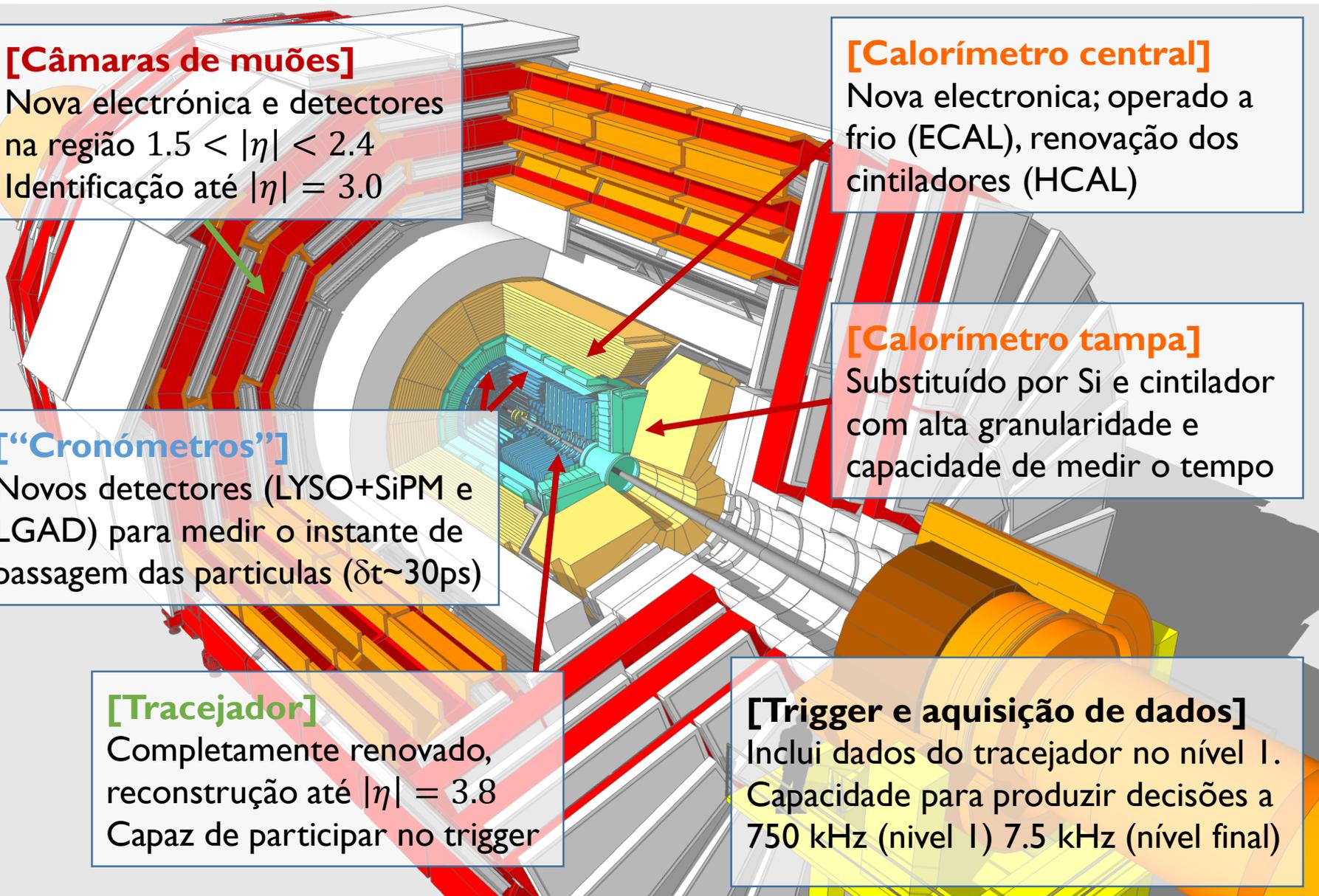
Substituído por Si e cintilador com alta granularidade e capacidade de medir o tempo

[Tracejador]

Completamente renovado, reconstrução até $|\eta| = 3.8$
Capaz de participar no trigger

[Trigger e aquisição de dados]

Inclui dados do tracejador no nível I.
Capacidade para produzir decisões a 750 kHz (nível I) 7.5 kHz (nível final)



Sumário

- Com o Higgs o modelo padrão **está completo**
continua incompleto
- Para já não há sinais directos de nova física nos dados de CMS
 - será uma questão de estatística ou de escala de energia?
 - **LHC: o único colisionador activo a explorar a fronteira de energia**
- Oportunidade única: físicos, engenheiros, técnicos, estudantes
 - testando os fundamentos da física com dados reais
 - desenvolvendo tecnologia em parceria com a indústria
 - colaboração à escala mundial em que Portugal e Brasil têm impacto



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

