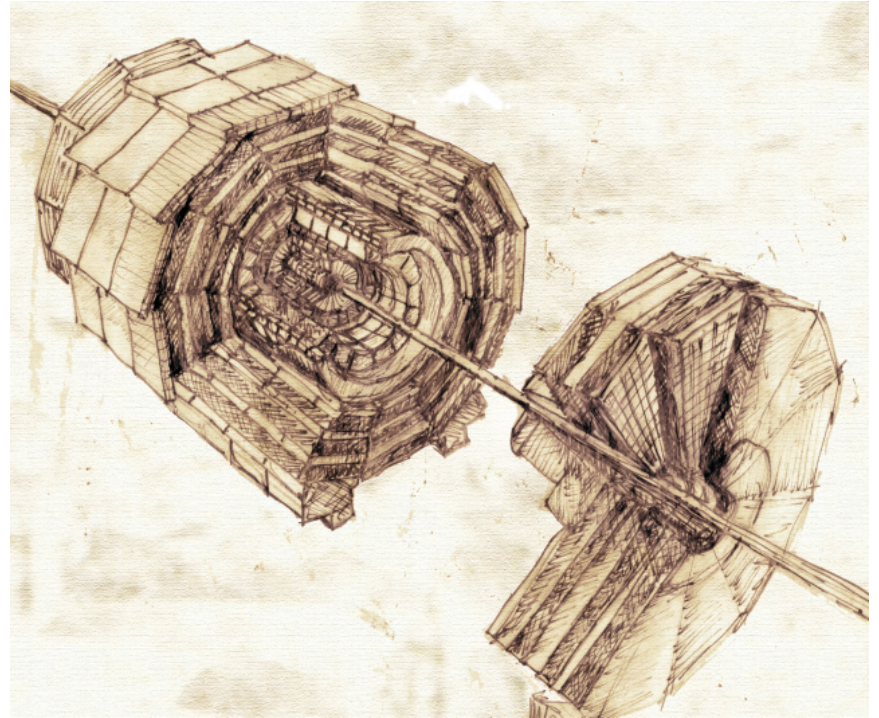


# À descoberta de com

**C**ompact **M**uon **S**olenoid



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

16ª Escola de Professores CERN em Língua Portuguesa

6 de Setembro de 2024

Motivação

Construção e operação da experiência CMS

As primeiras descobertas

E para além do Higgs?

CMS: uma experiência em mutação

Sumário

# Motivação

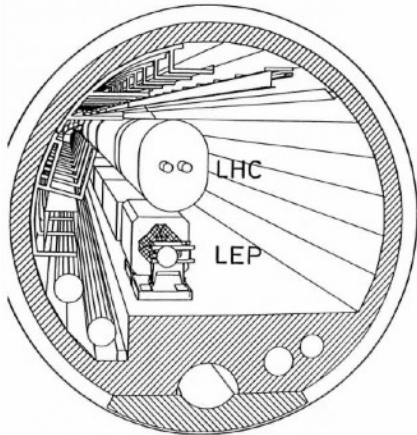
---

*Como surgiu e foi o CMS pensada?*

# Como surgiram o LHC e as suas experiências

## Lausanne (Suíça), 1984

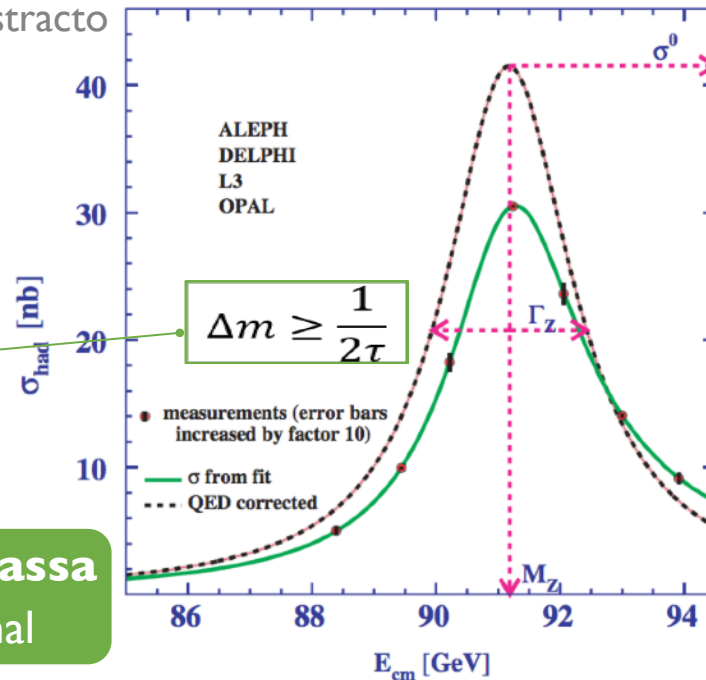
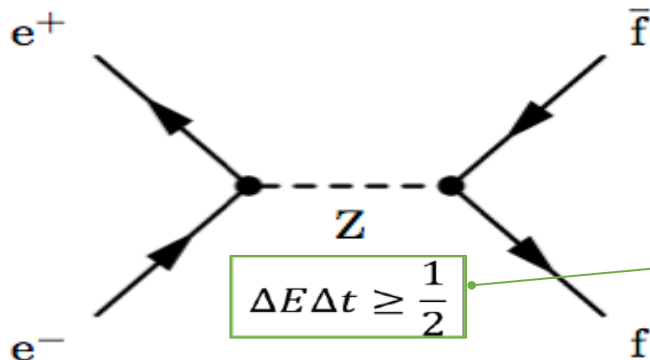
- 1 ano após a **descoberta dos bosões fracos W e Z** é proposto o LHC
- LEP (colisionador  $e^+e^-$ ) dimensionado de modo a maximizar as energias do LHC
- Fevereiro 1988: termina a escavação do túnel de 27 km ( $\pm 1$ cm)
- Julho 1989: primeiros feixes injectados no LEP



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

## No modelo padrão há um intermediário para todas as interações

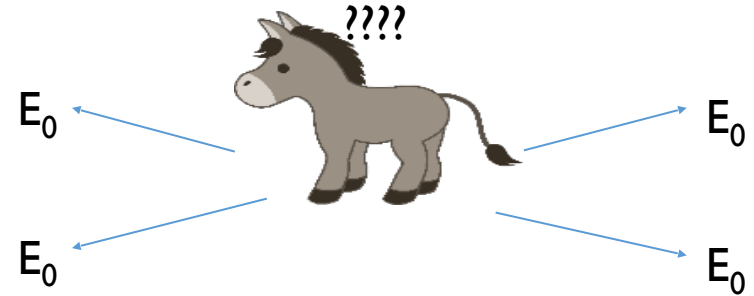
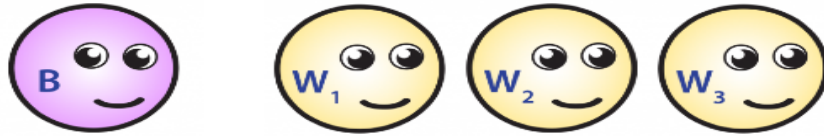
- troca de um quanta entre partículas
- sujeita a regras de conservação (energia-momento, carga, etc.)
- transformação padrão (gauge) num grupo de simetria abstracto



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

⇒ existe um mecanismo que quebra a simetria original

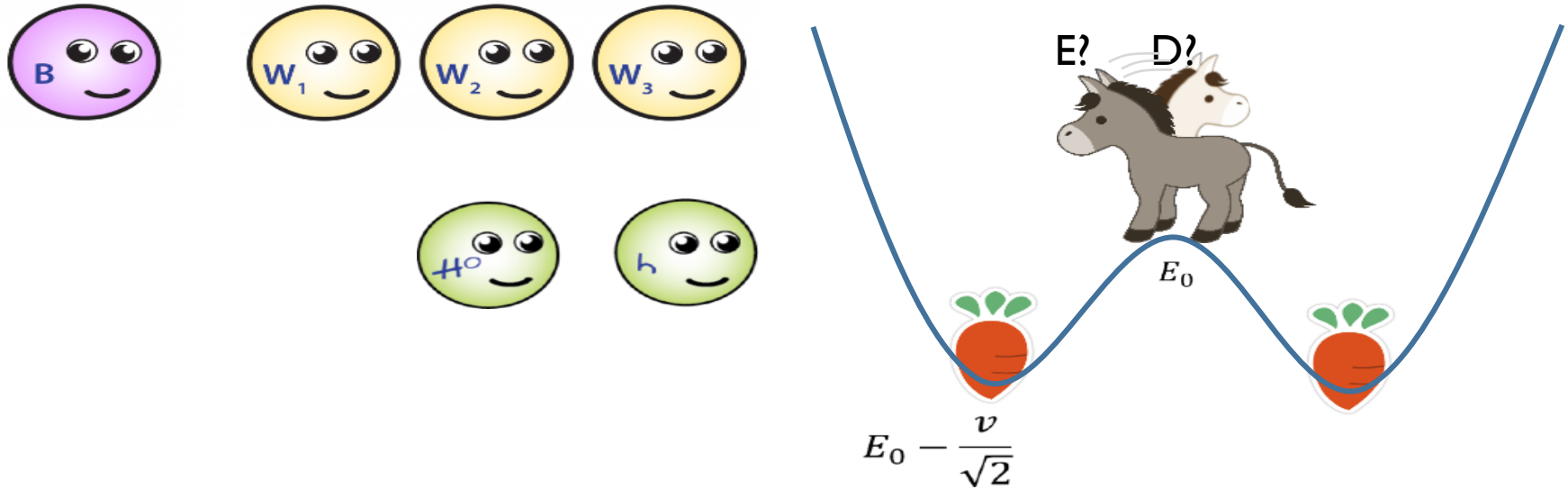
# O mecanismo de Higgs



Idealmente (= a uma escala de energia elevada  $\gg$  TeV)

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

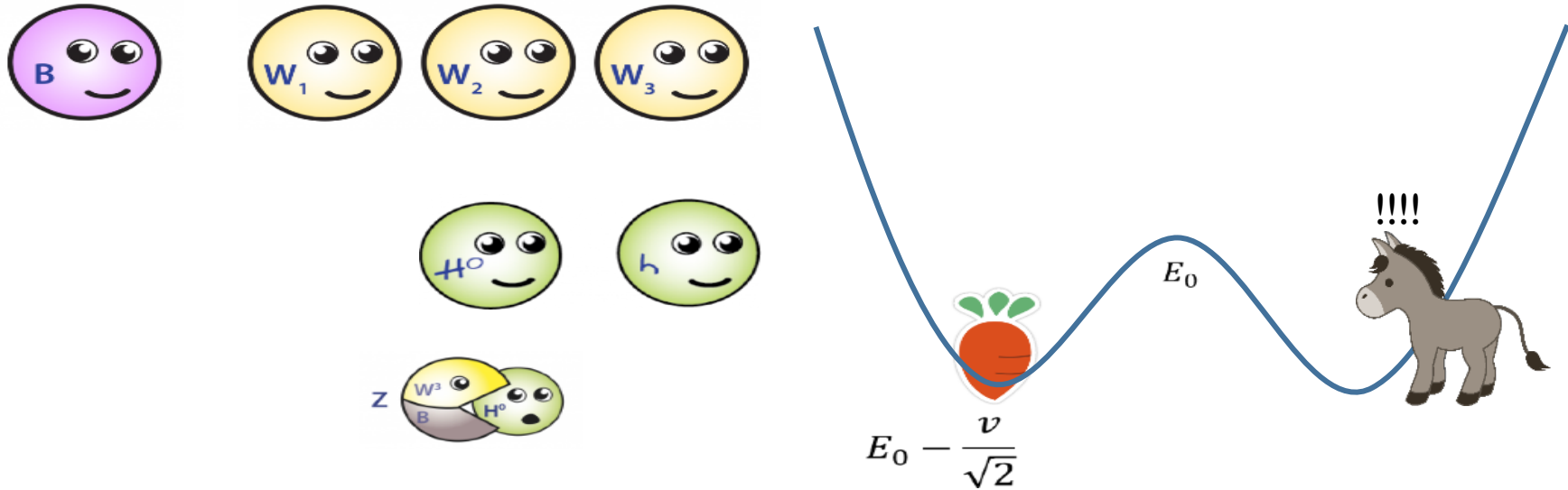
# O mecanismo de Higgs



Um dilema surge se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um novo campo

# O mecanismo de Higgs



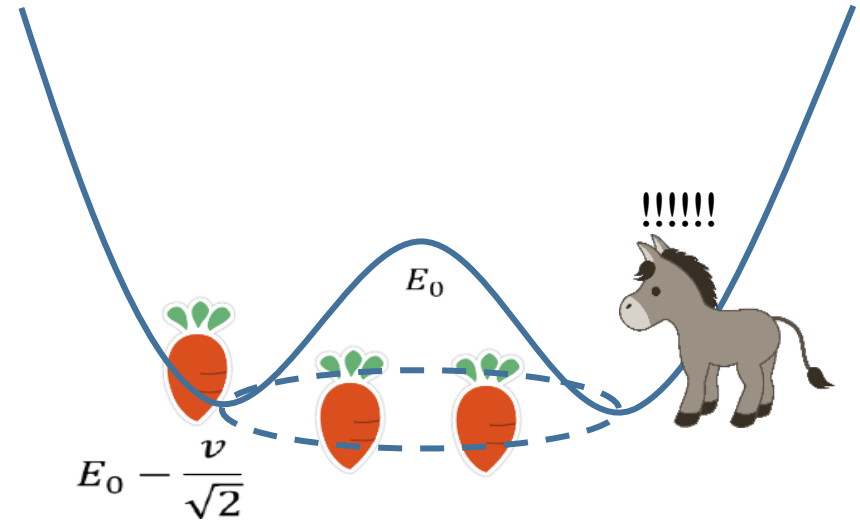
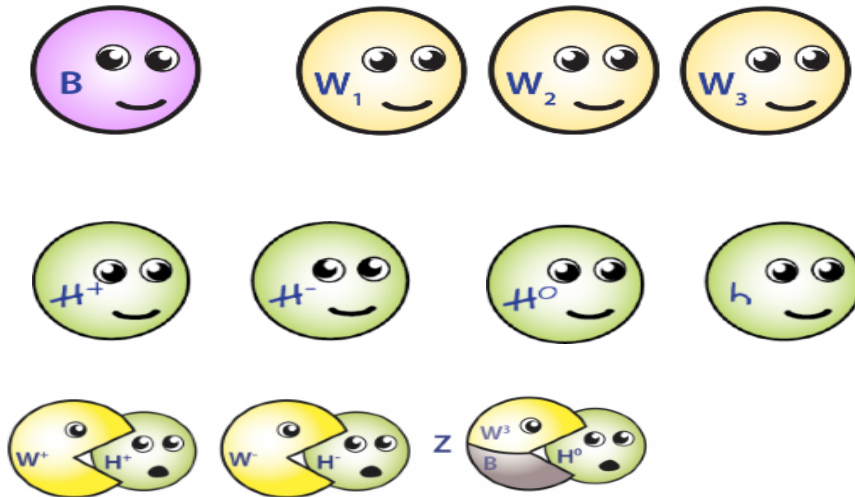
Um dilema surge se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um novo campo: o campo de Higgs

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



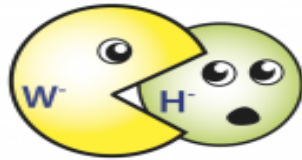
# O mecanismo de Higgs



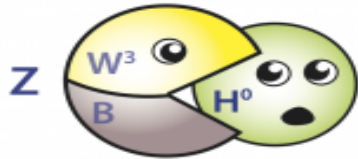
Dilema se o estado fundamental (vácuo) não é simétrico

- gerado pela interacção com um campo extra : o campo de Higgs
- com direcções privilegiadas = estados degenerados de energia

# O mecanismo de Higgs



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

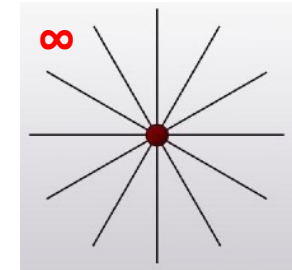
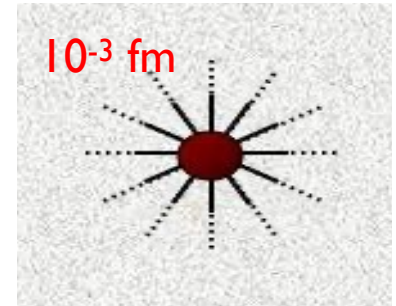


$$M_Z = \frac{v\sqrt{g^2+g'^2}}{2} = 91.2 \text{ GeV}$$



$$M_\gamma = 0$$

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



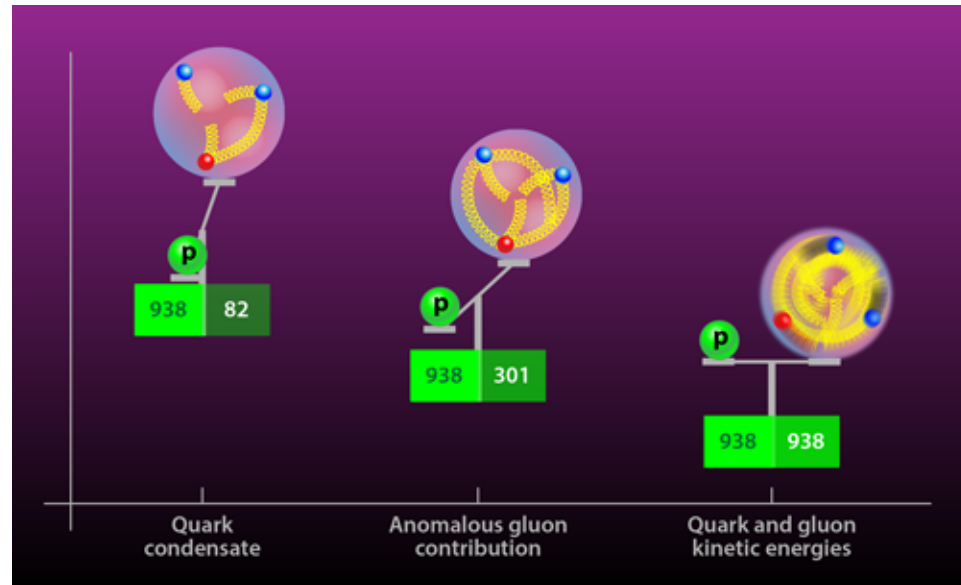
## Interacção com o campo de Higgs

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

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](#)*

A maior parte da massa da matéria deve-se às interacções fortes que mantêm o núcleo coeso... mesmo que seja este o mecanismo não passa de um detalhe!!!



# Uma descoberta fundamental a fazer

## Sem o Higgs...

...difícil conceber átomos

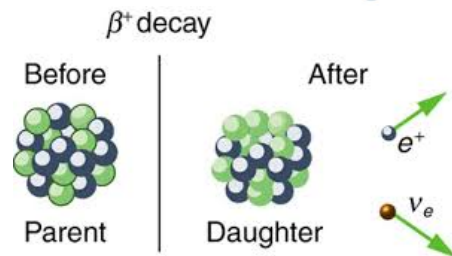
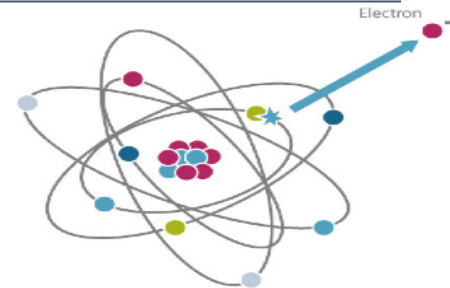
os electrões, sem massa, escapam à velocidade da luz

...mais difícil ainda formar núcleos estáveis

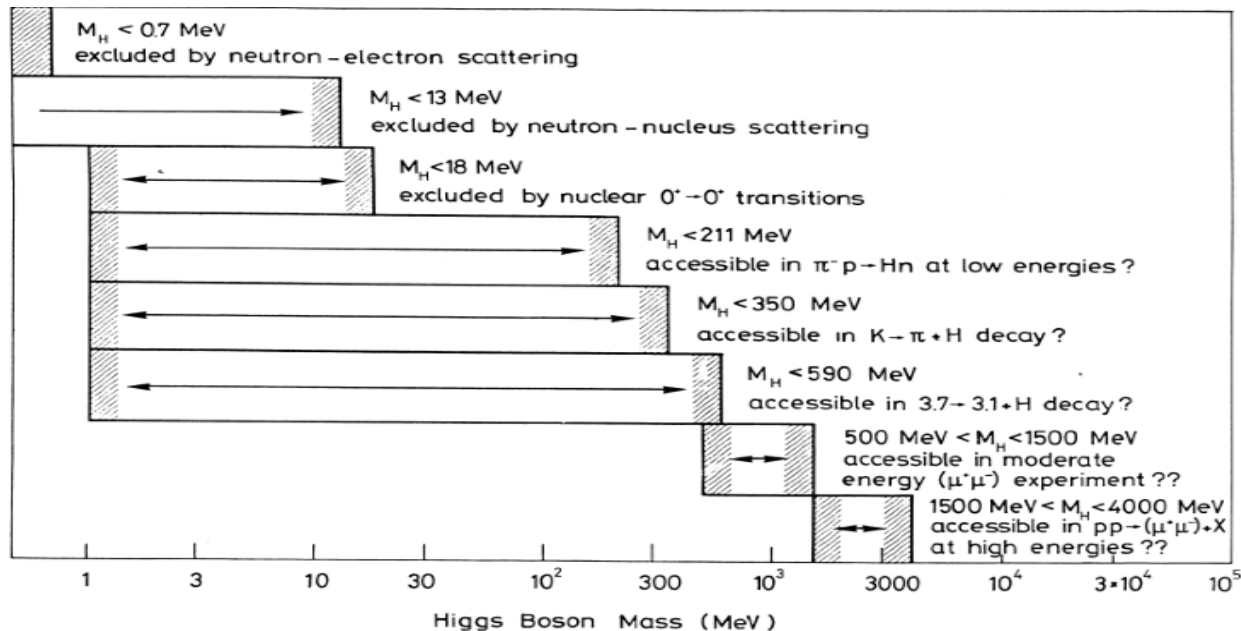
as interacções fracas não teriam nada de fraco

...tudo seria radioactivo

⇒ impossível estarmos aqui, agora



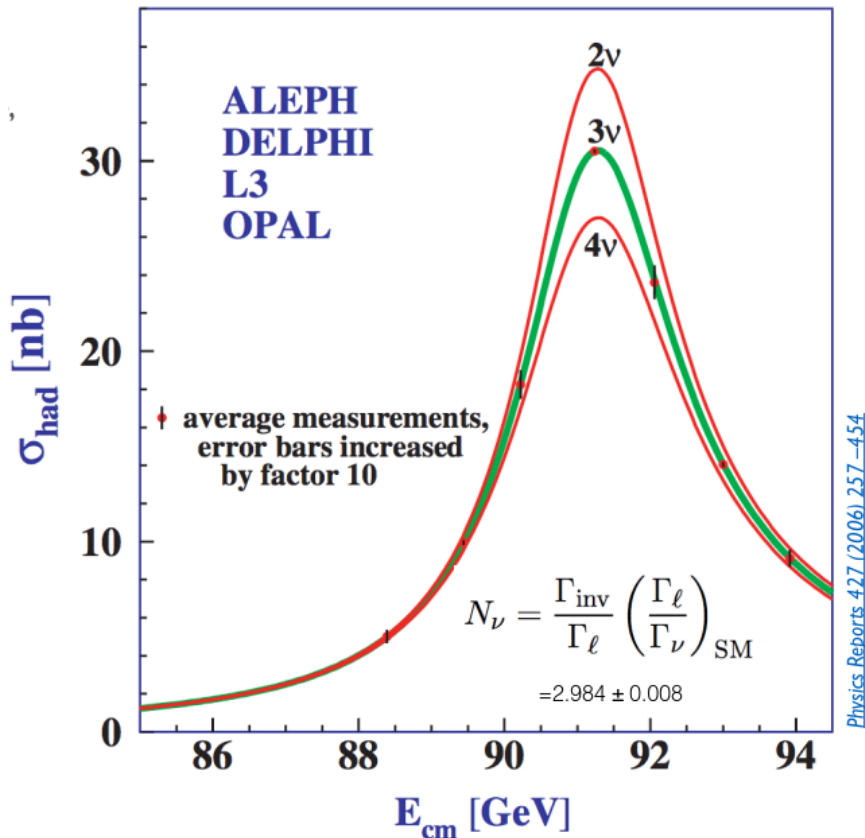
# Mas... onde procurar o Higgs?



Pedimos desculpa aos experimentalistas pois não temos nenhuma ideia de qual é a massa do bóson de Higgs (...) nem sabermos prever os seus acoplamentos. Desencorajamos assim a sua pesquisa em grandes experiências...

Terminados os programas de física do LEP (e SLC) as medidas de precisão eram, em geral, compatíveis com o modelo padrão (SM)

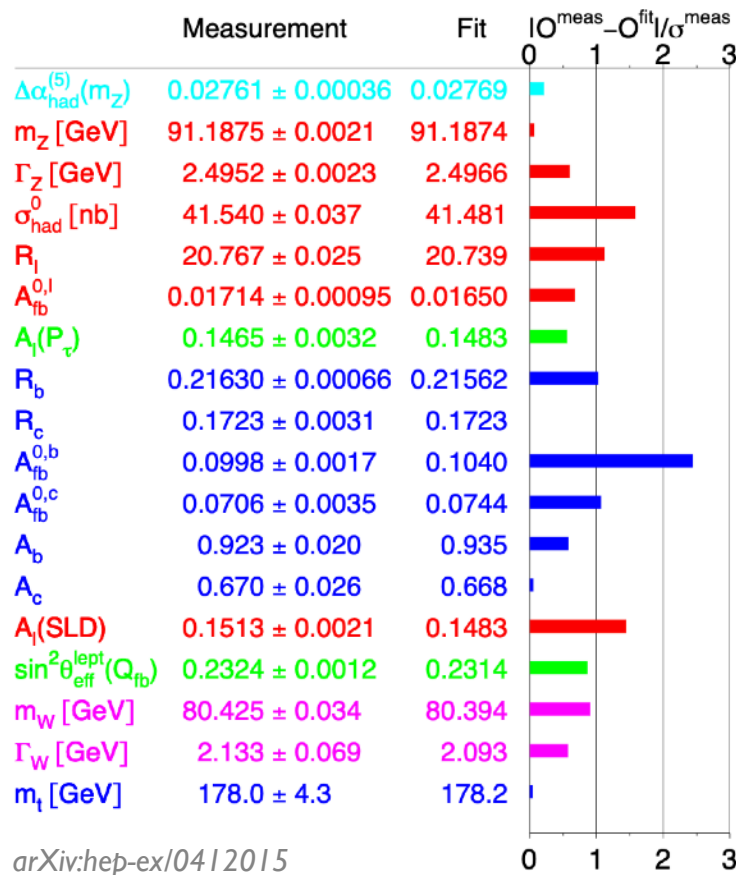
*largura de decaimento do Z compatível com 3 famílias activas de neutrinos*



# Panorama da física na alvorada do LHC II

Terminados os programas de física do LEP (e SLC) as medidas de precisão eram, em geral, compatíveis com o modelo padrão (SM)

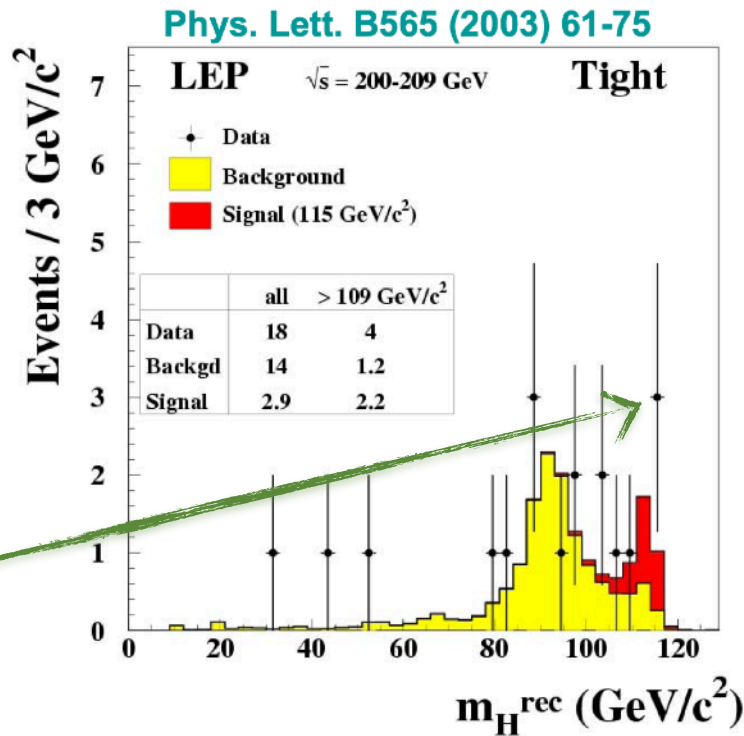
*(quase) nenhum desvio significativo entre dados e expectativas baseadas no modelo padrão*





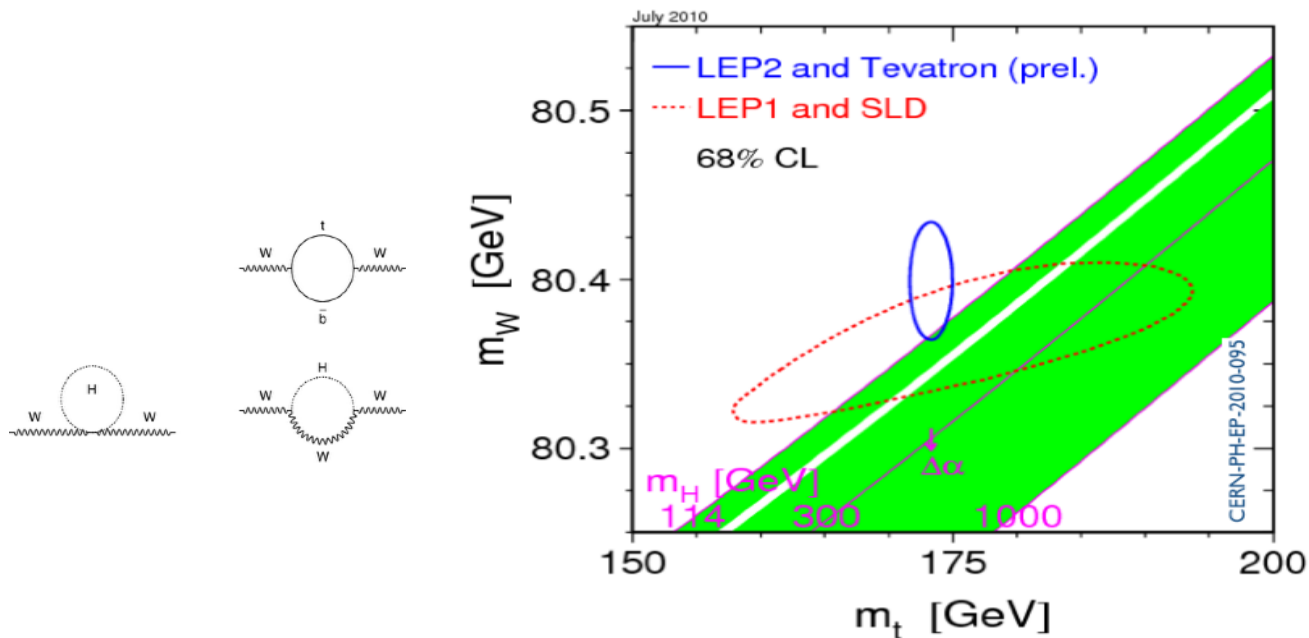
Terminados os programas de física do LEP (e SLC) as medidas de precisão eram, em geral, compatíveis com o modelo padrão (SM)

pesquisas directas  
excluem  $m_H < 114 \text{ GeV}$



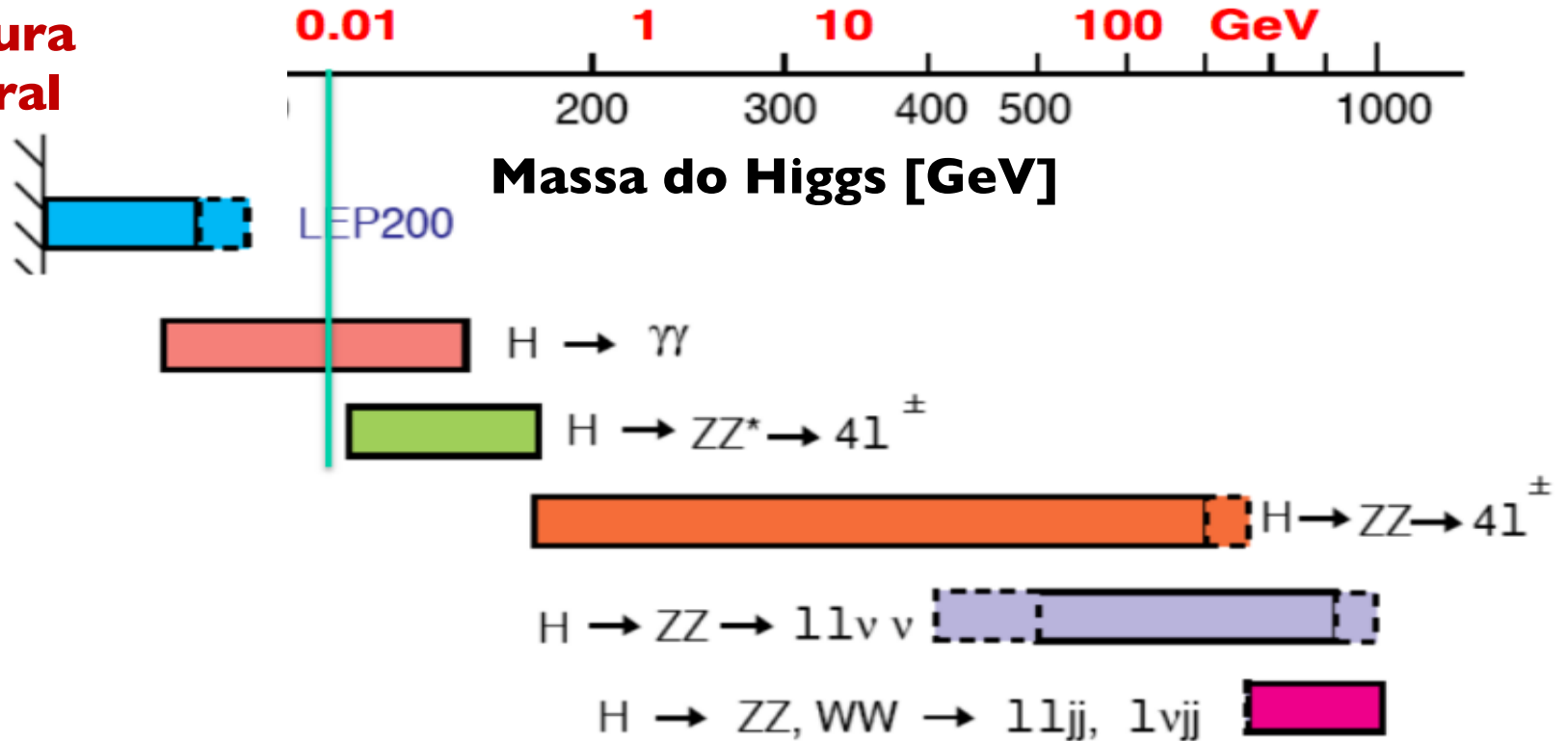
## As experiências do Tevatrão (Fermilab)

- 1995: descobrem o quark top completando 3 gerações de quarks
- expandem apenas ligeiramente a janela de exclusão do Higgs

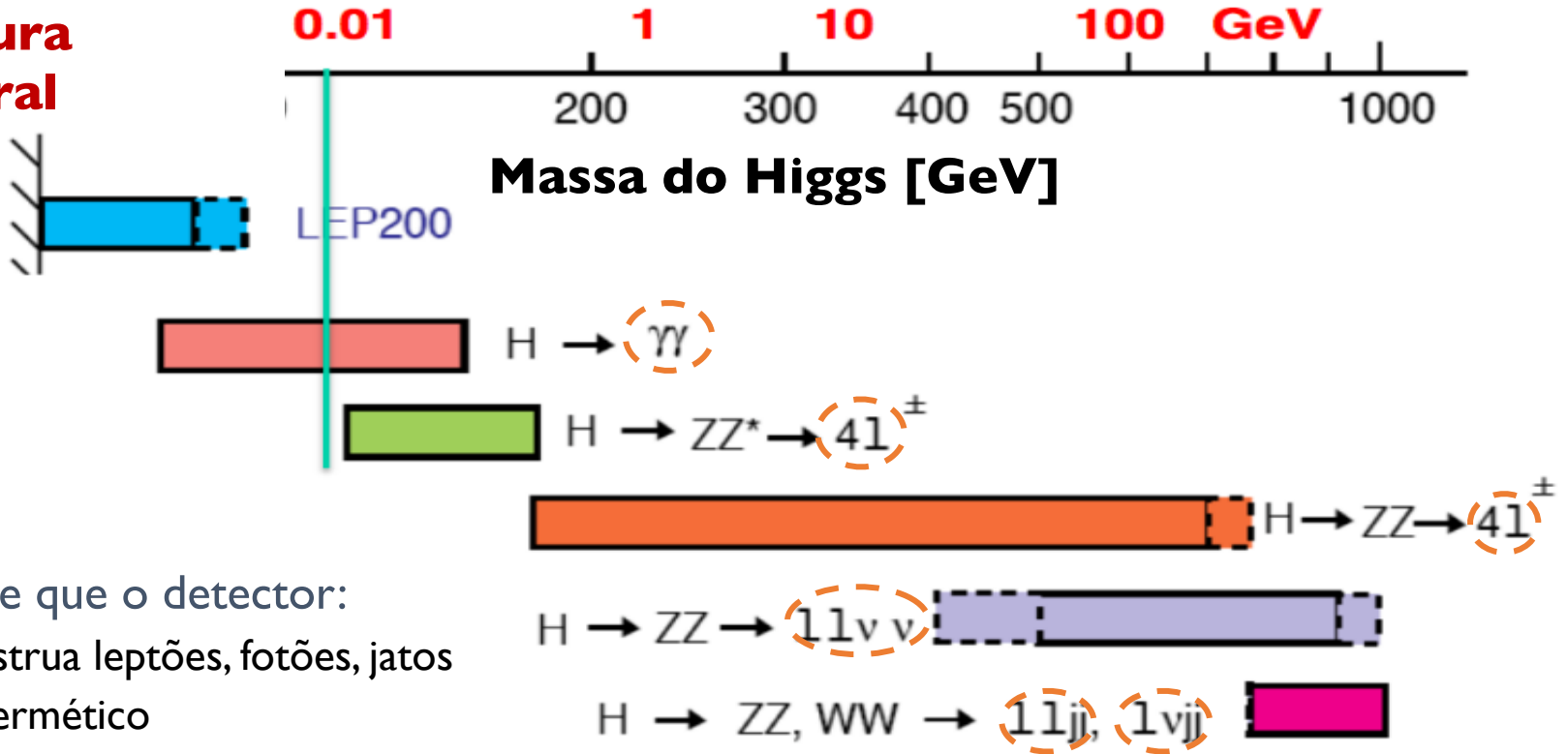


# Se a massa do Higgs é desconhecida...

**Largura natural**



**Largura natural**



Requere-se que o detector:

- reconstrua leptões, fótons, jatos
- seja hermético
- cubra  $4\pi$  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 optimizado para *pesquisar o bosão de Higgs* (como previsto pelo modelo padrão) numa região de massa entre os *90 e os 1000 GeV*; permitirá igualmente detectar uma extensa gama de estados finais produzidos em *modelos alternativos de quebra de simetria electro-frac*.

# Colaboração global

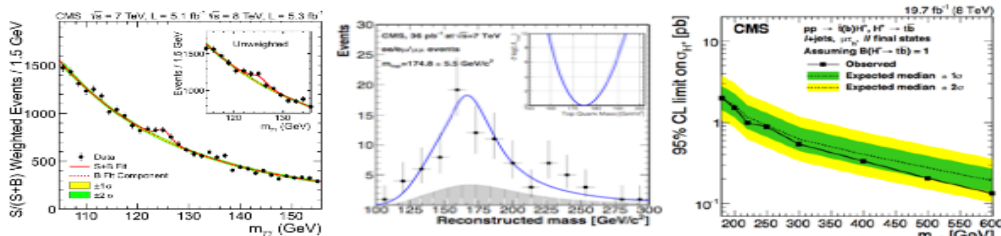
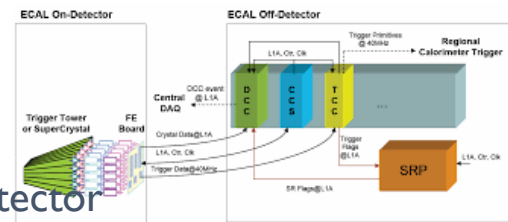
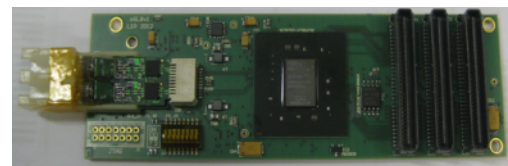
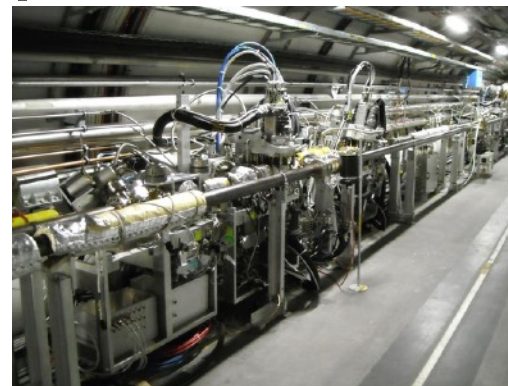
Empreendimento global de 180 institutos de 40 nações!



# 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



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

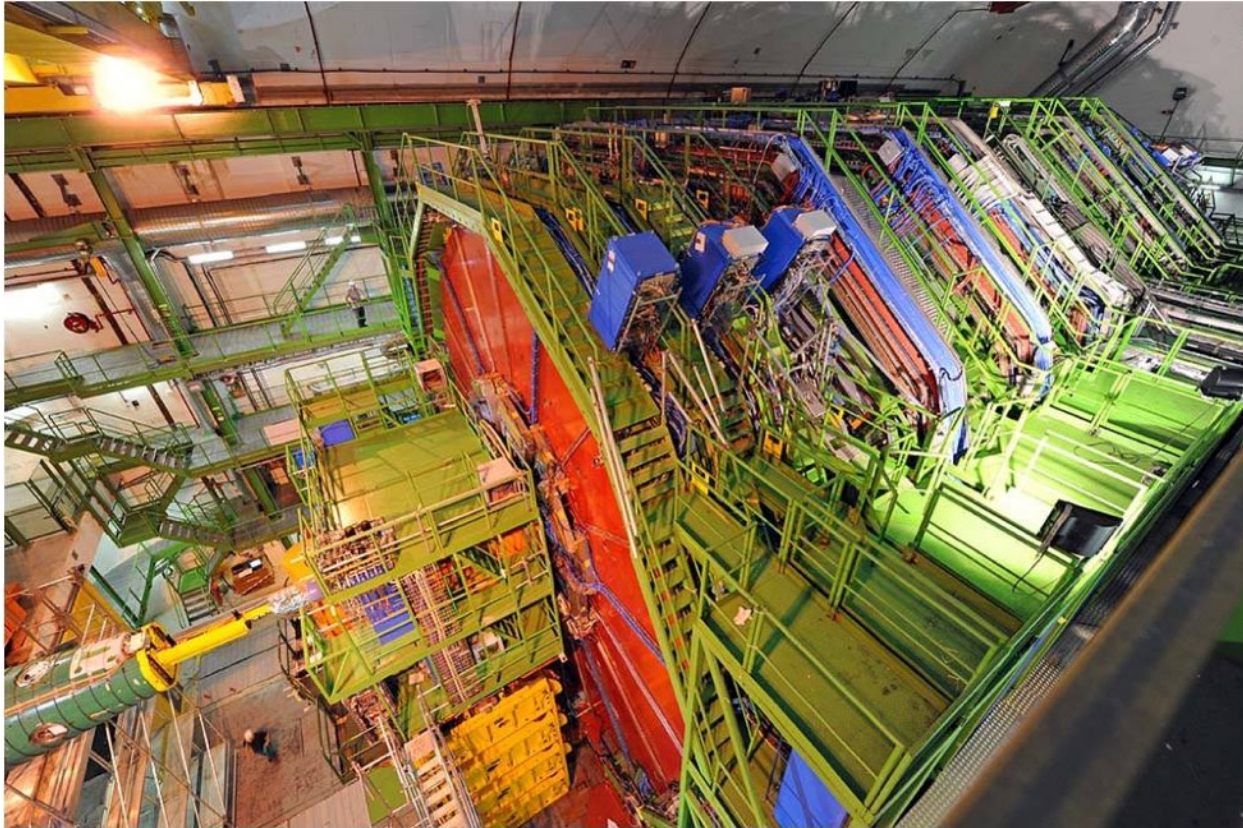
# 1993-2008: I&D e construção do detector



Construção e operação da experiência CMS

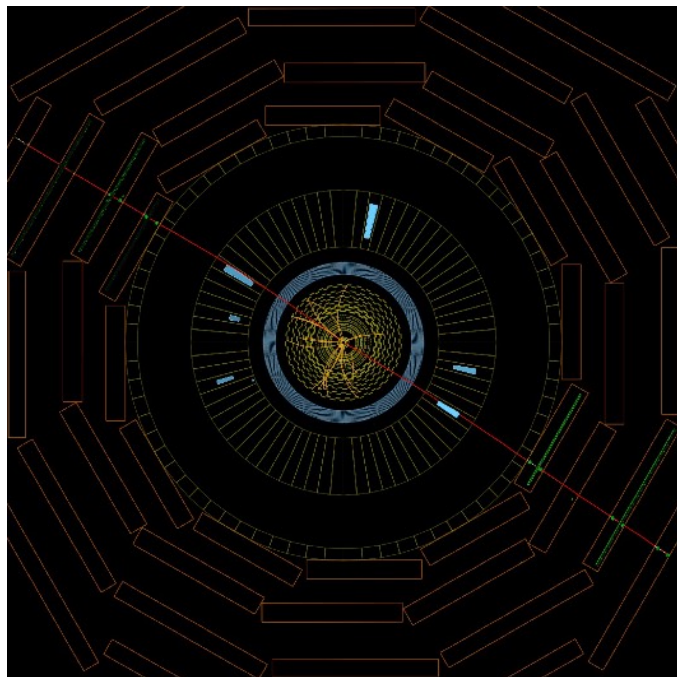
## Setembro de 2008: CMS está pronta para registrar dados

27

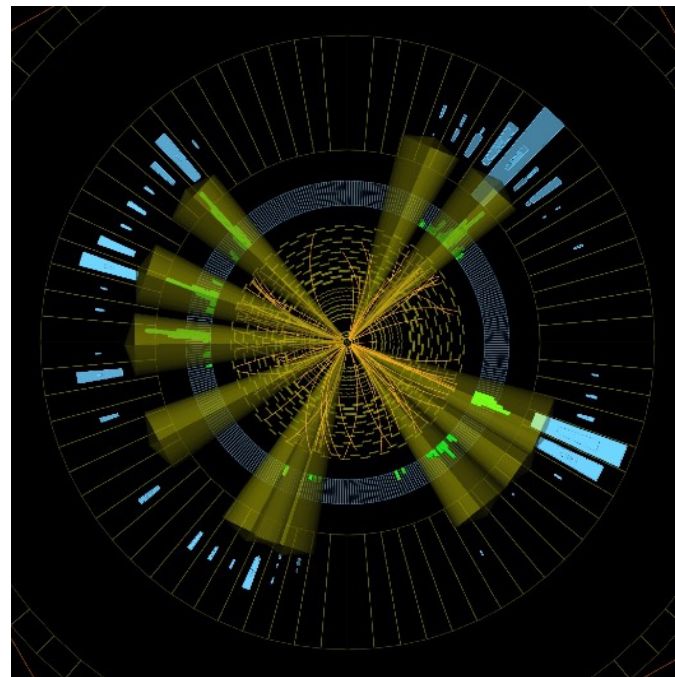


# Eventos reais

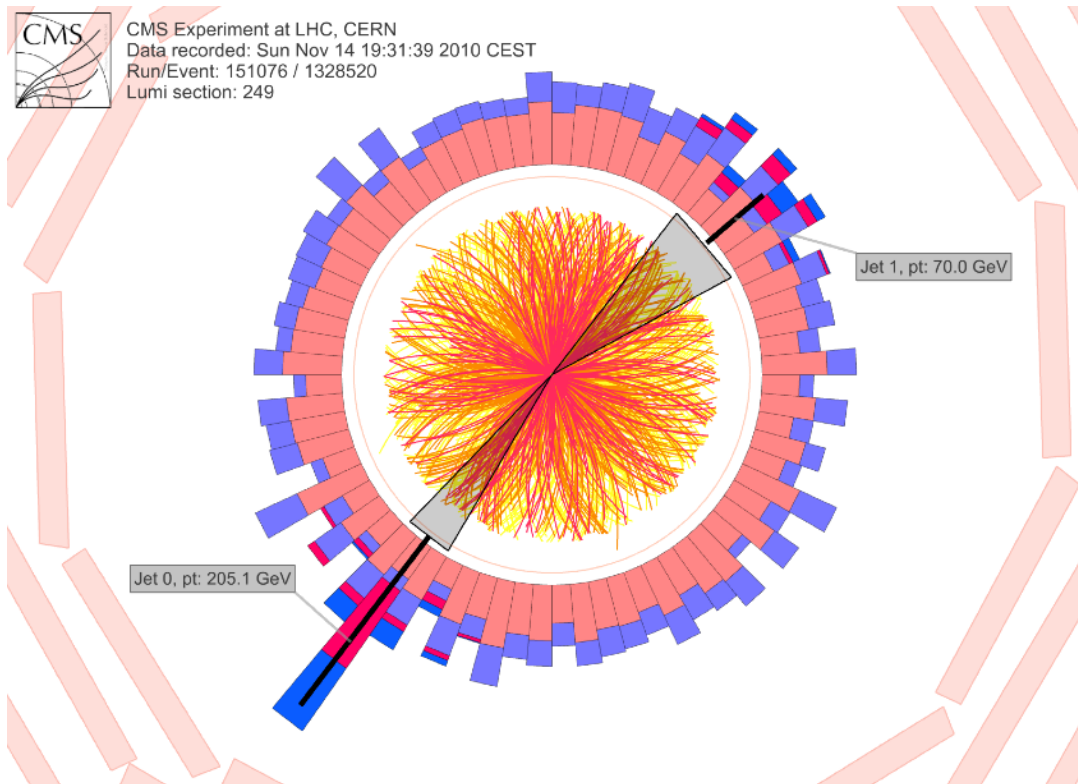
$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



## Múltiplos jatos



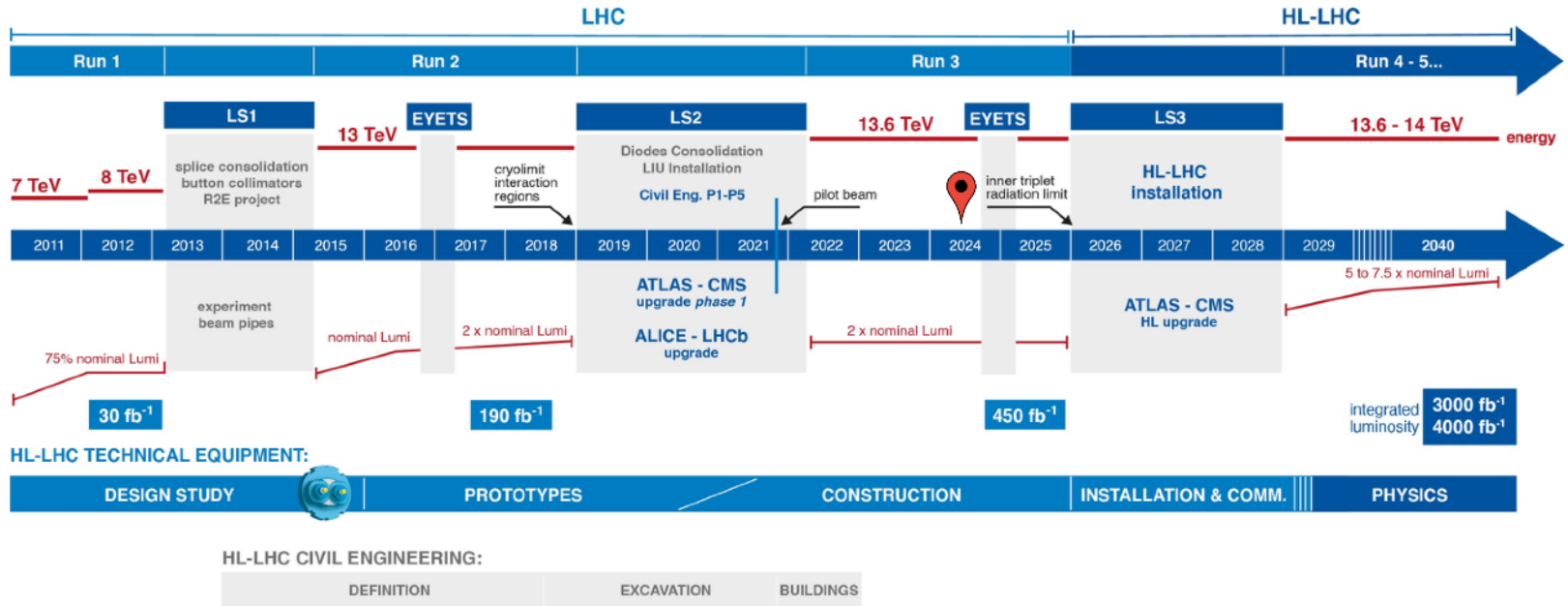
## Dois jatos após uma colisão PbPb



# O plano geral do LHC

30

Ainda temos 16 anos pela frente: o que nos espera?



*Para beneficiar do aumento de luminosidade do LHC os detectores devem ser actualizados*

# CMS: uma experiência em mutação

31

## [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)



# As primeiras descobertas

---

*Um século de Física em menos de um segundo no LHC*

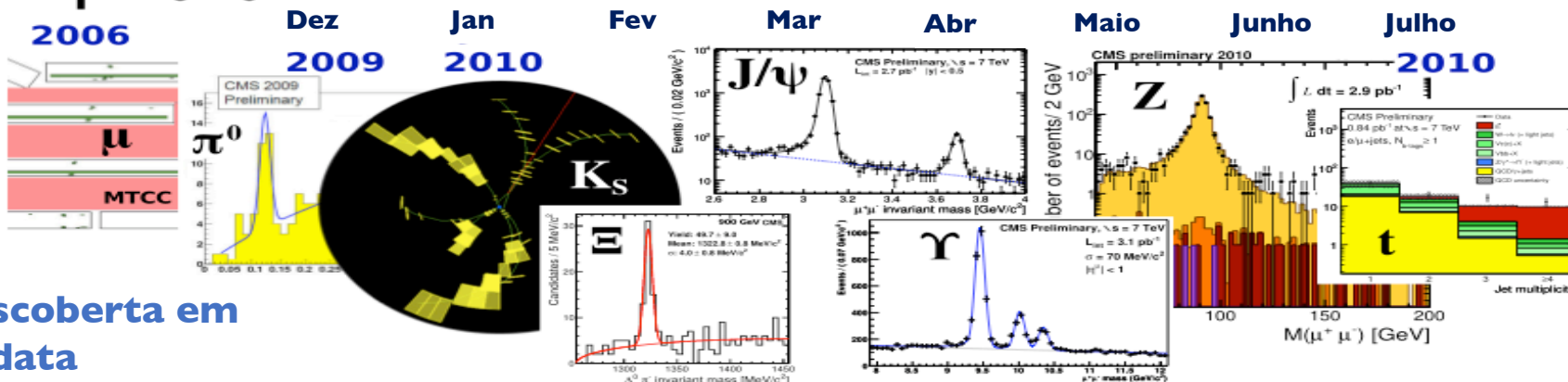
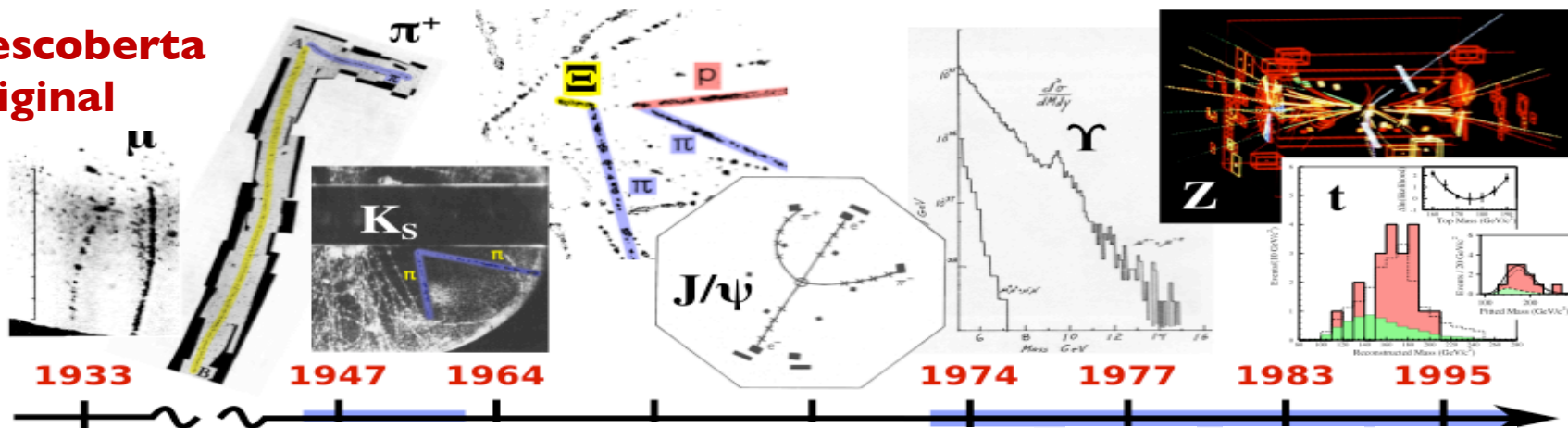
*O bóson Higgs*

*Outras surpresas*



# As primeiras descobertas

Descoberta original



Re-descoberta em CMS (data aproximada)

# A luminosidade é o ingrediente principal

A taxa de eventos é dada por:

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

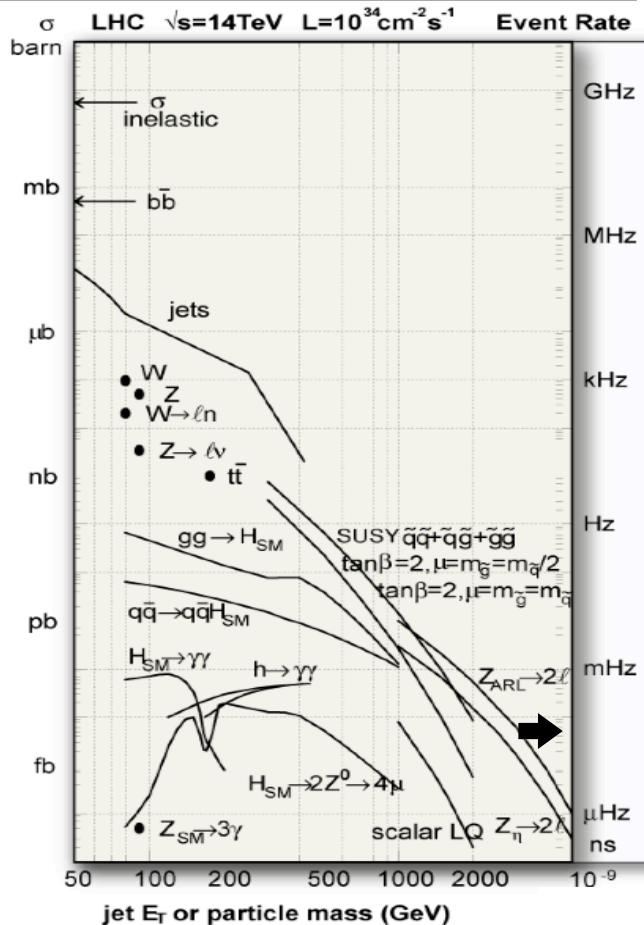
**Luminosidade [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]**

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

**Secção eficaz [ $\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$ ]**

depende da energia transferida, dos constituintes do próton, da intensidade da interacção fundamental...

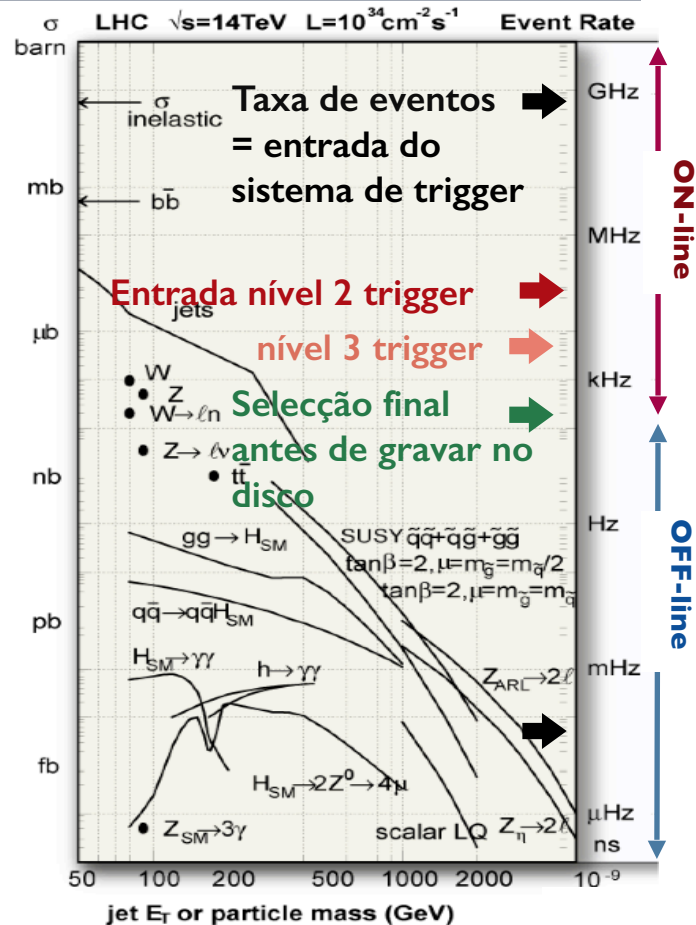
Potencial para descobrir todas as partículas descobertas do séc. XX em approx. **200 ms**



# A luminosidade é o ingrediente principal

A taxa de eventos é dada por:

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



## Em busca do Higgs (pequeno formulário)

- De acordo com a teoria da relatividade (Einstein)

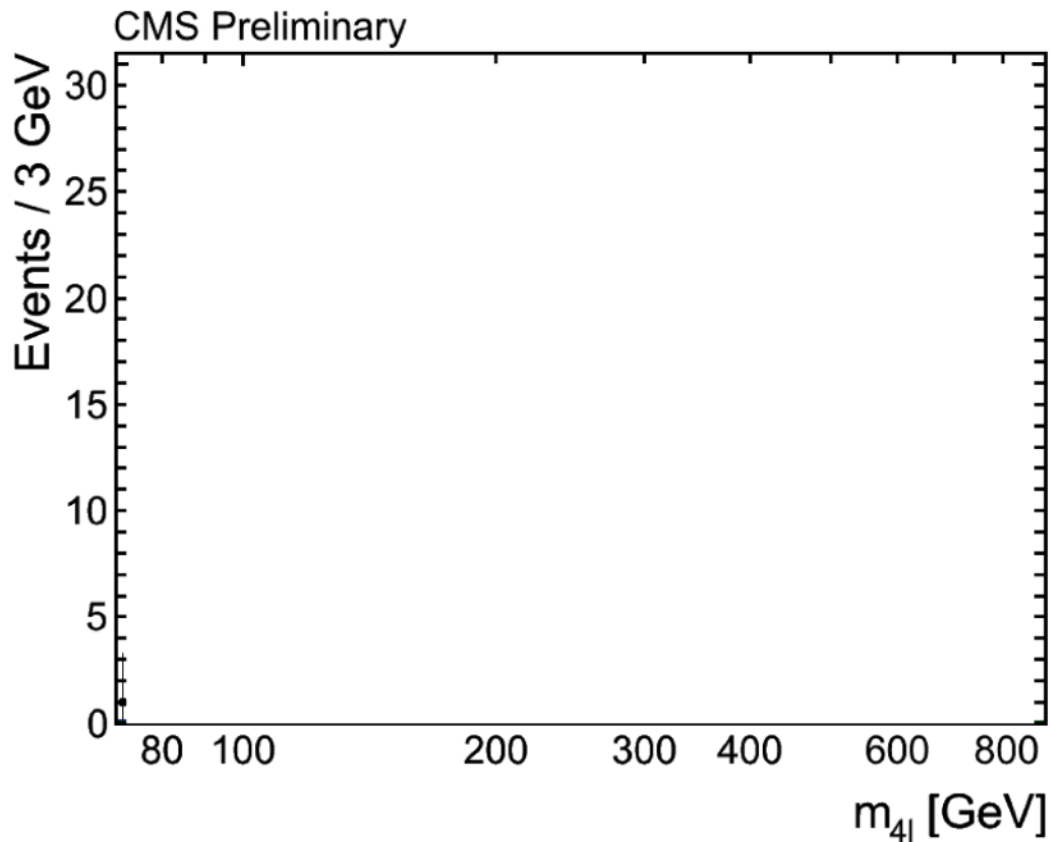
$$E^2 = p^2 + M^2 \Leftrightarrow M^2 = E^2 - p^2$$

- O bóson de Higgs é instável: decai em pares de partículas
- Se duas partículas observadas resultam de um decaimento

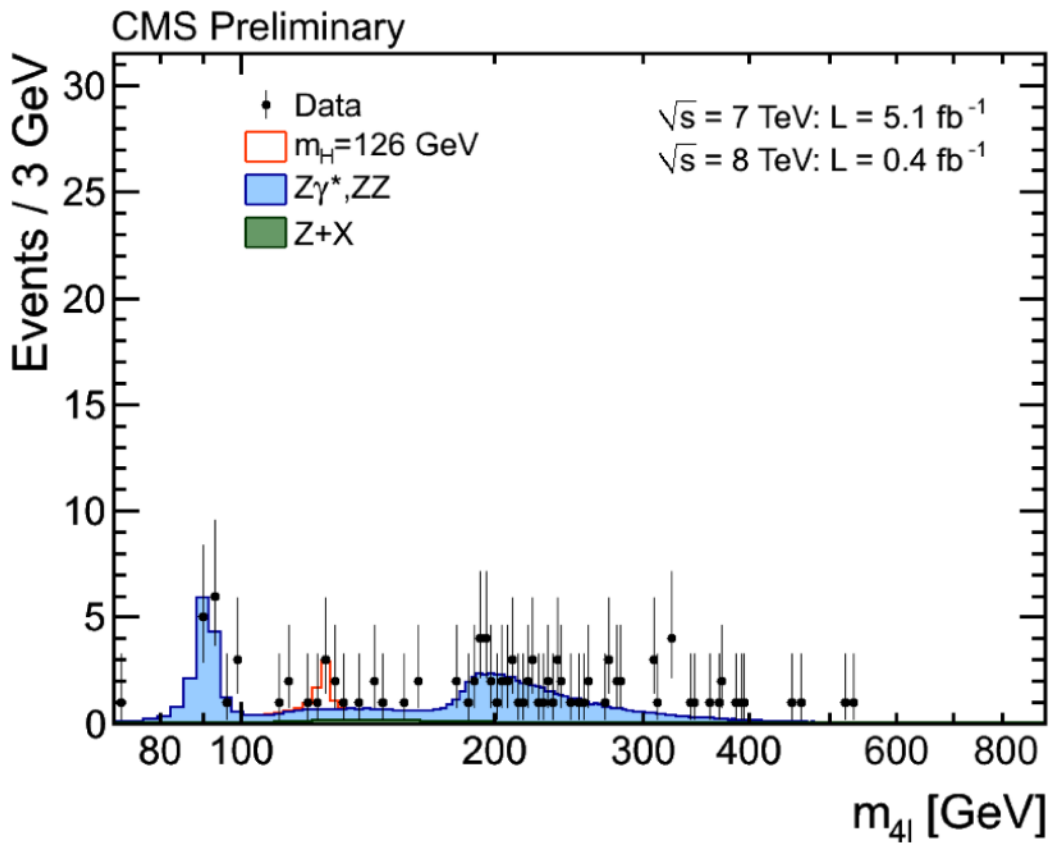
$$M^2 = (E_A + E_B)^2 - \|\vec{p}_A + \vec{p}_B\|^2 = 2E_A E_B (1 - \cos \theta_{A,B})$$

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

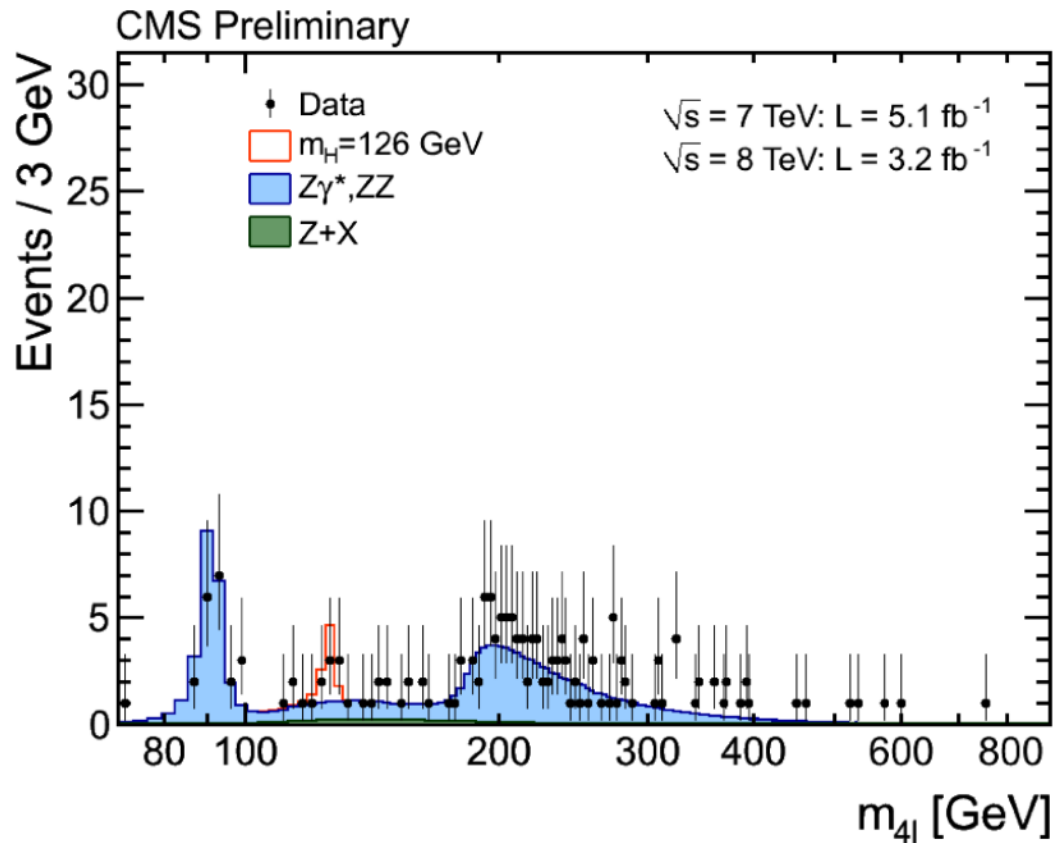
# Em busca do Higgs com pares ZZ



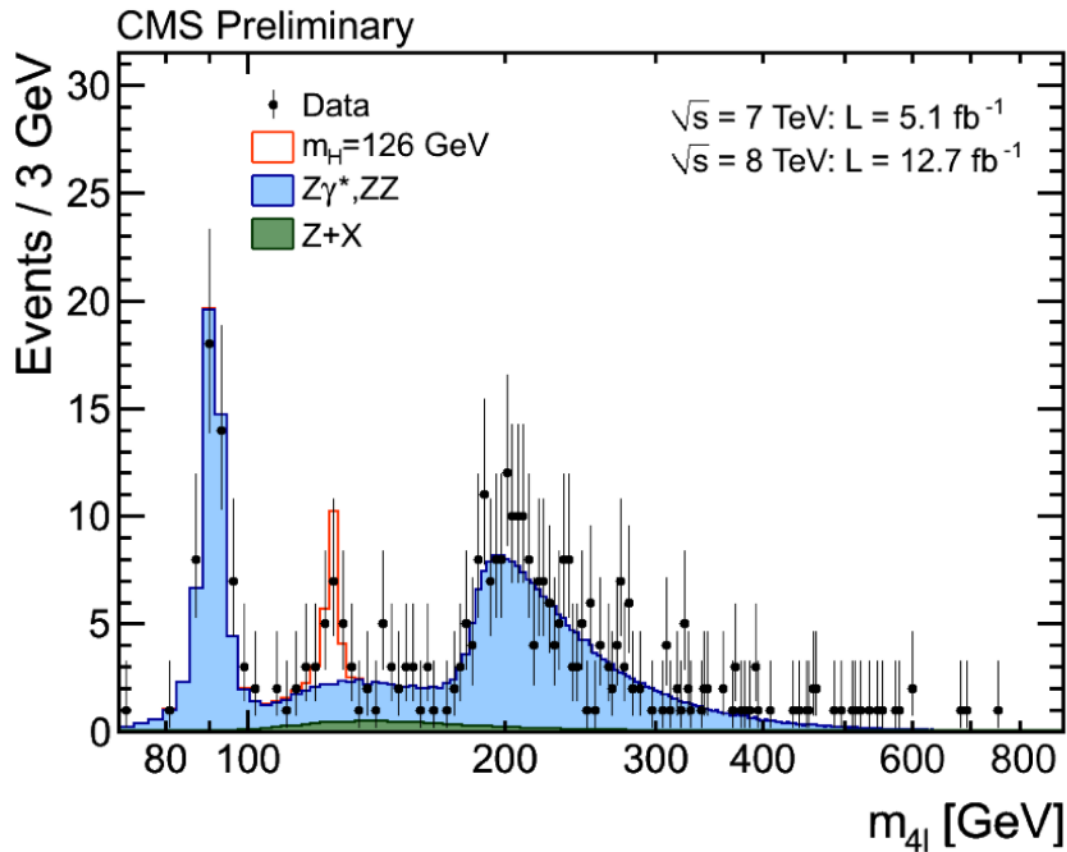
# Em busca do Higgs com pares ZZ



# Em busca do Higgs com pares ZZ

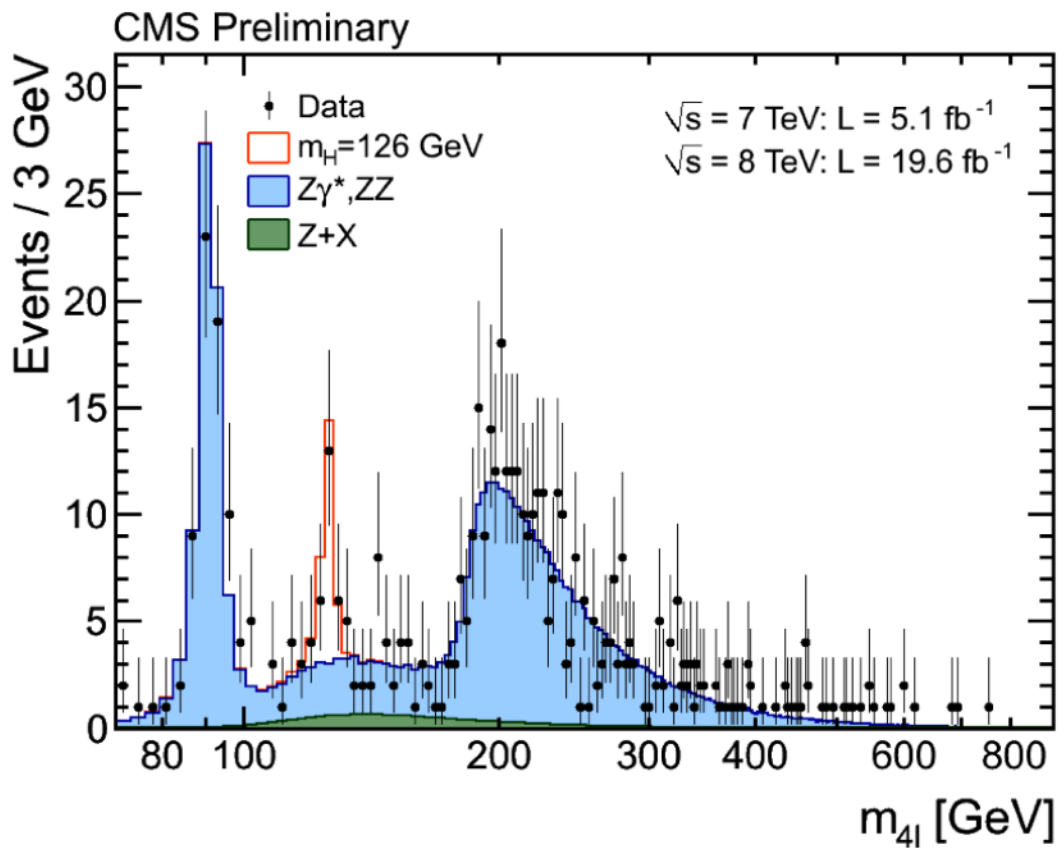


# Em busca do Higgs com pares ZZ





# Em busca do Higgs com pares ZZ

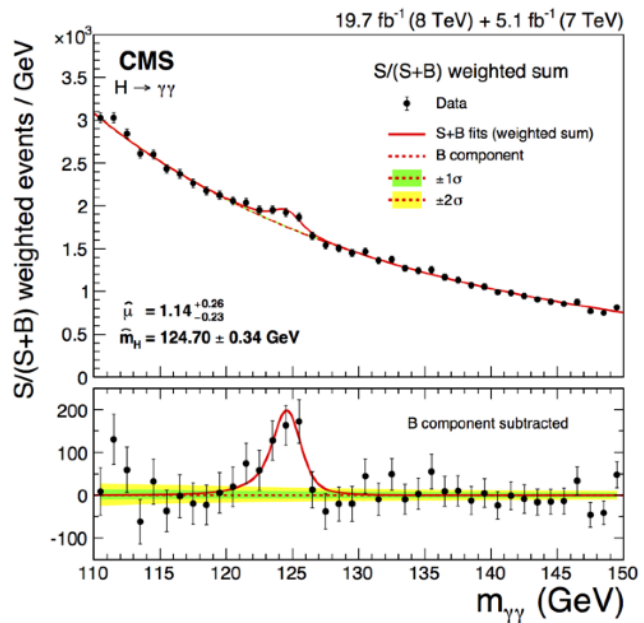
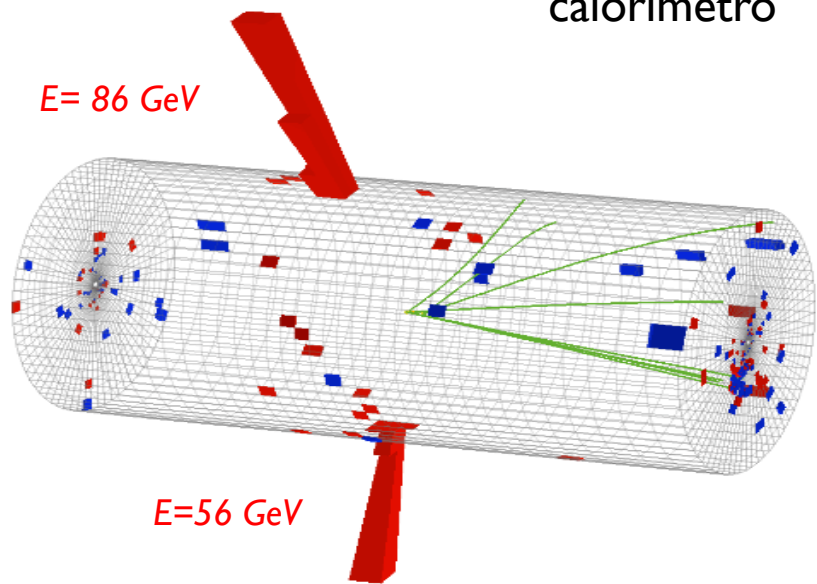


# Em busca do Higgs com pares $\gamma\gamma$

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

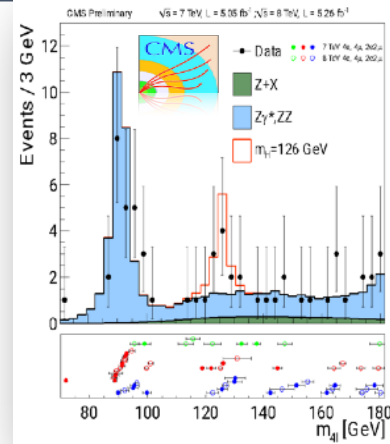
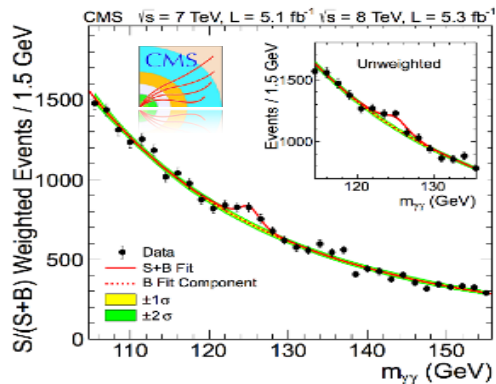
Resolução do calorímetro

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



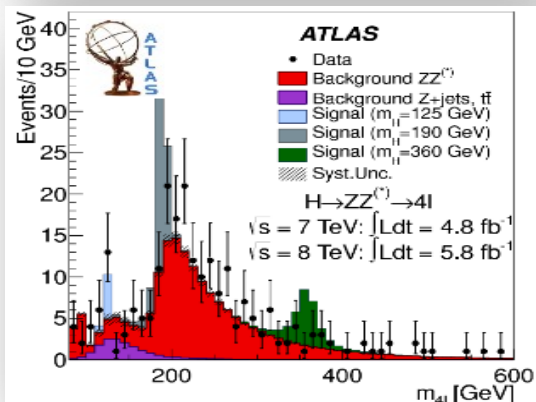
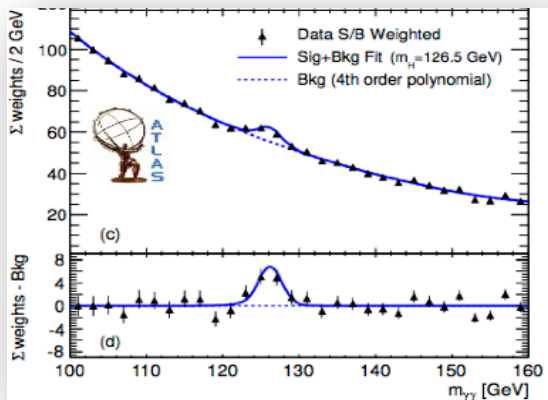
As primeiras descobertas

# 4 de Julho de 2012: Higgs encontrado em CMS!



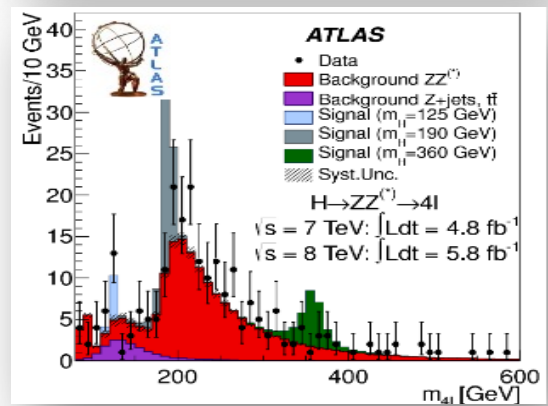
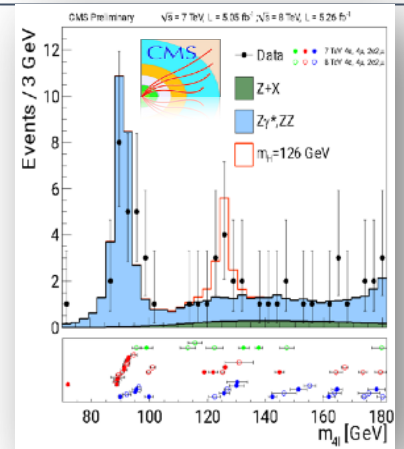
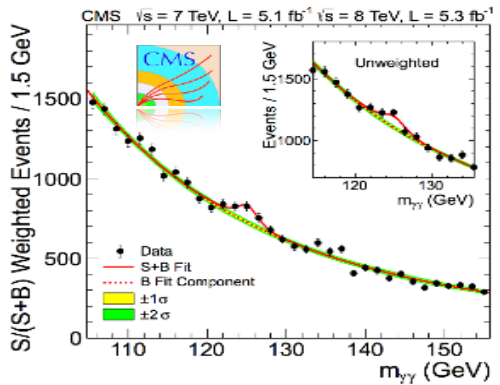
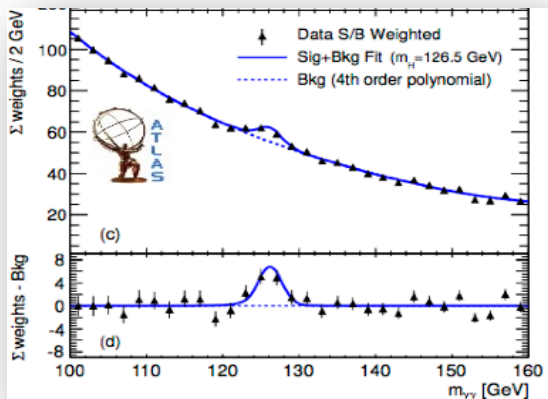
As primeiras descobertas

# 4 de Julho de 2012: Higgs encontrado em ATLAS!



As primeiras descobertas

# 4 de Julho de 2012: Higgs encontrado no CERN!



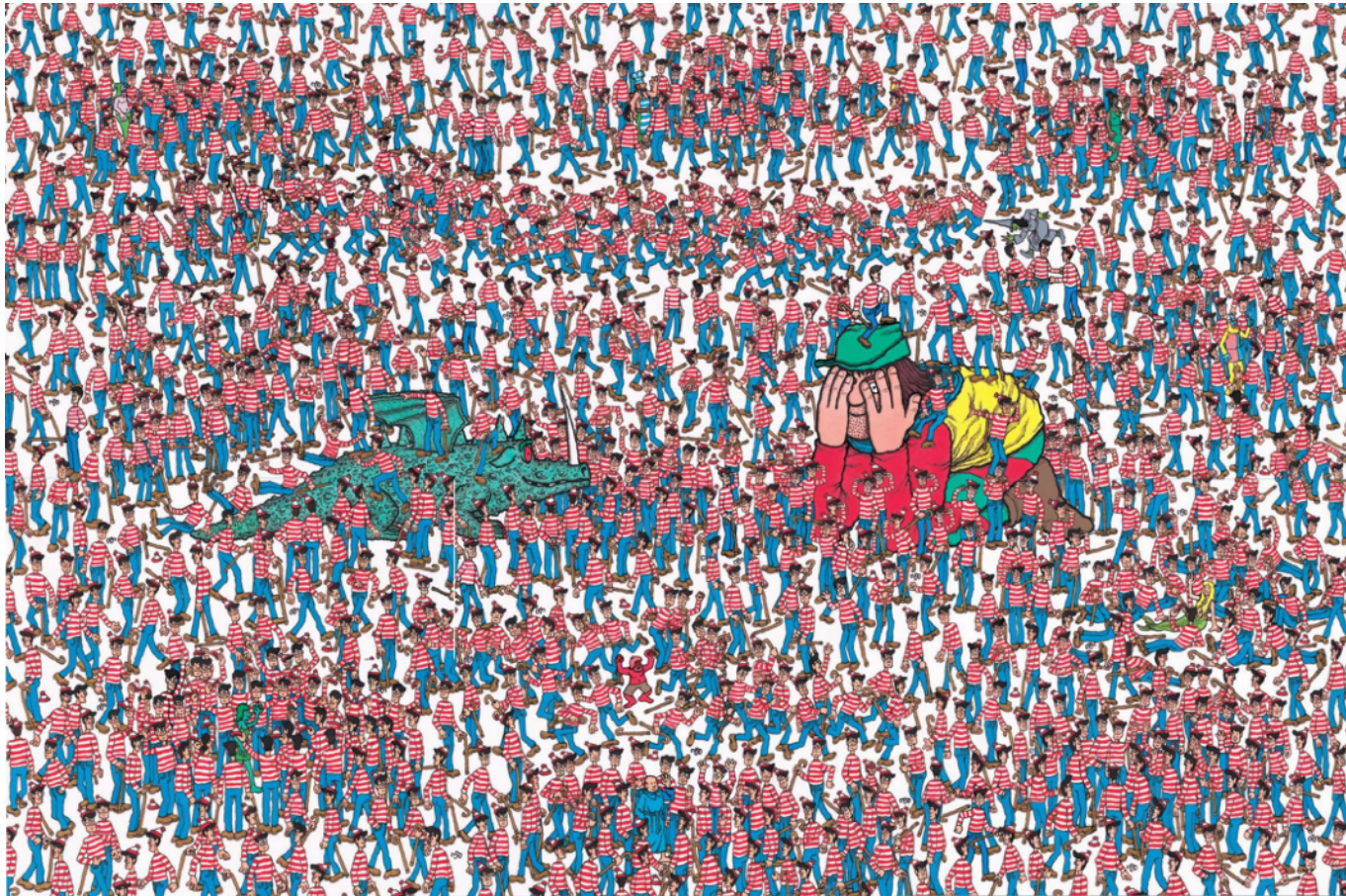
As primeiras descobertas

## 4 de Julho de 2012: no restaurante do CERN

---



# Mas... que Higgs foi encontrado?



# Será o Higgs do model padrão? \*

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma \rightarrow \text{Secção eficaz [barn=10}^{-24}\text{cm}^2\text{]} \text{ aqui entra a teoria}$$



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

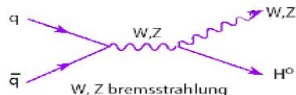
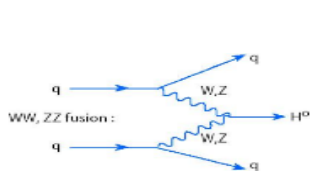


# Será o Higgs do model padrão?

- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

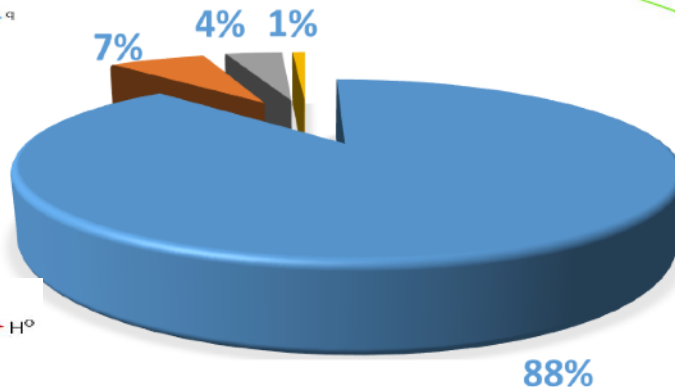
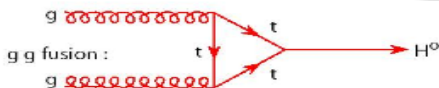
$$\dot{N} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

**Secção eficaz [barn=10<sup>-24</sup>cm<sup>2</sup>]** aqui entra a teoria com que probabilidade o Higgs **é produzido?**



$$\sigma = 55.1 \text{ pb}$$

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

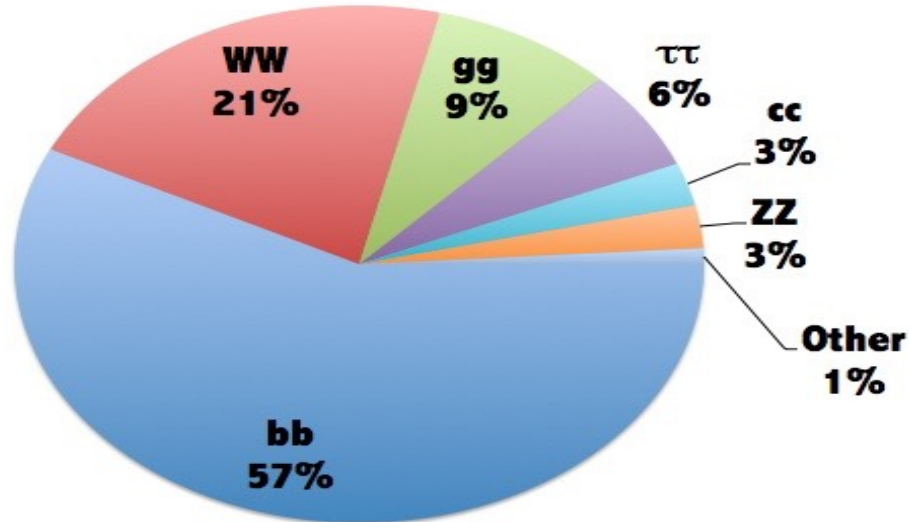


# Será o Higgs do model padrão?

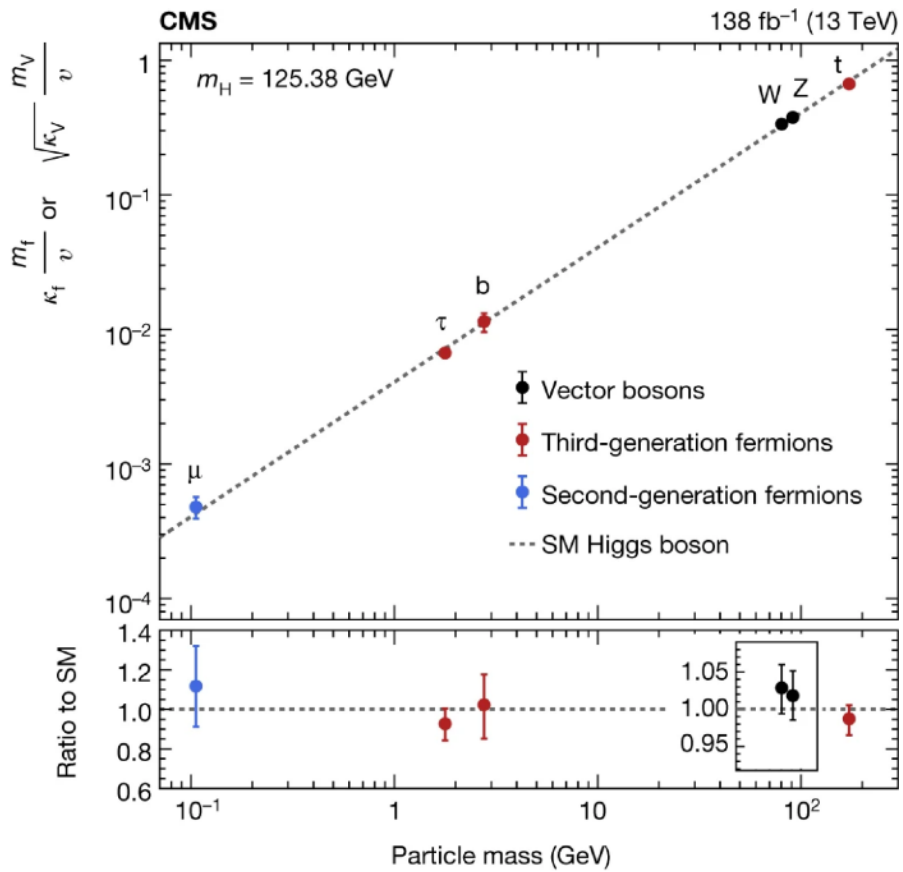
- Para responder comparamos as taxas medidas com as esperadas

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

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



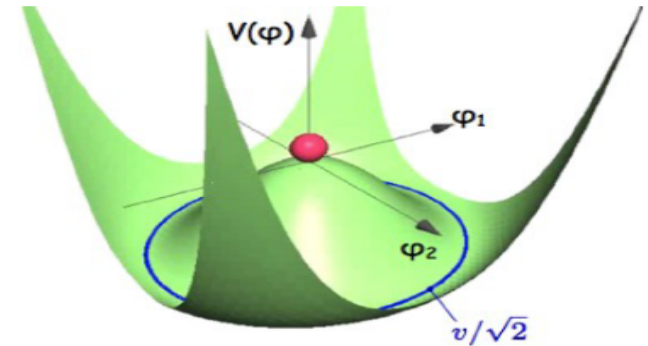
# Expectativas versus realidade: como acopla o novo bosão?



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

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?

# **E para além do Higgs?**

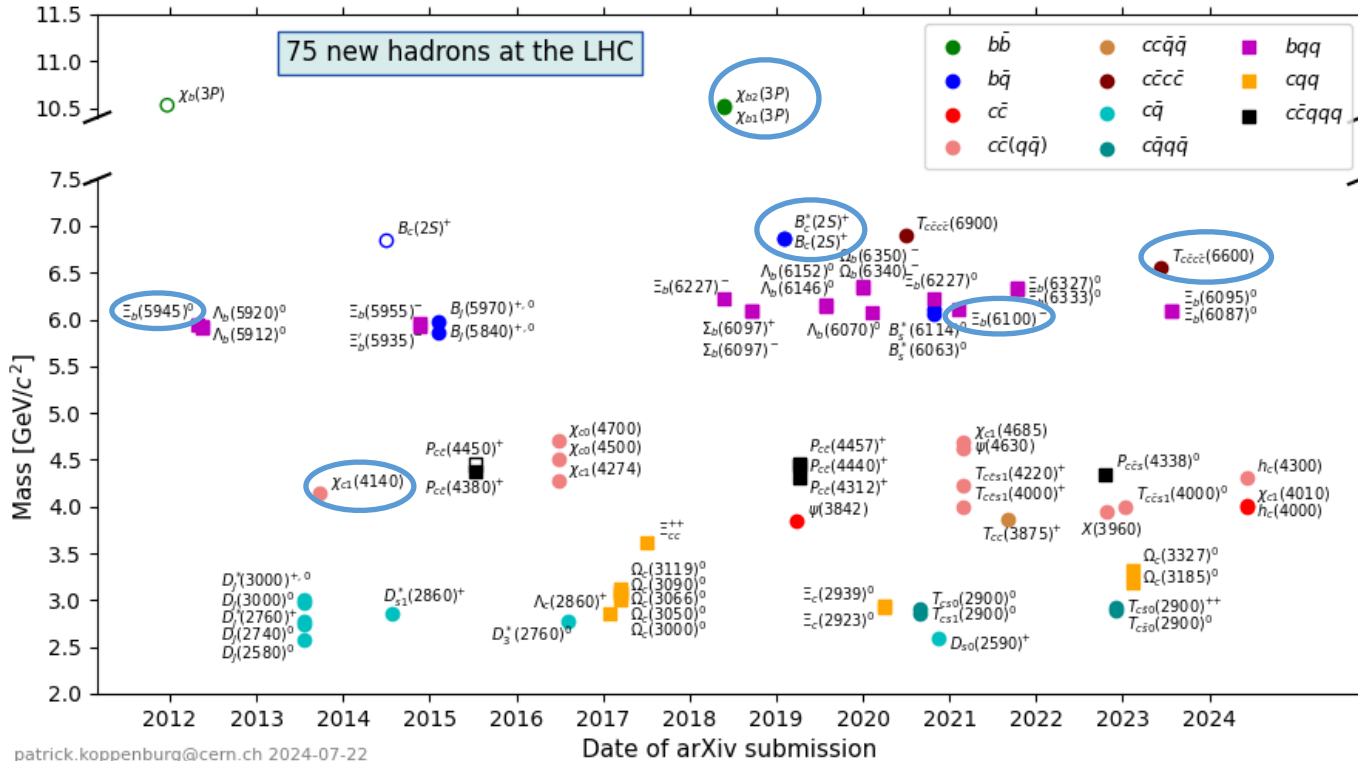
---

## Excluindo o Higgs: quantas partículas se descobriram no LHC?

---

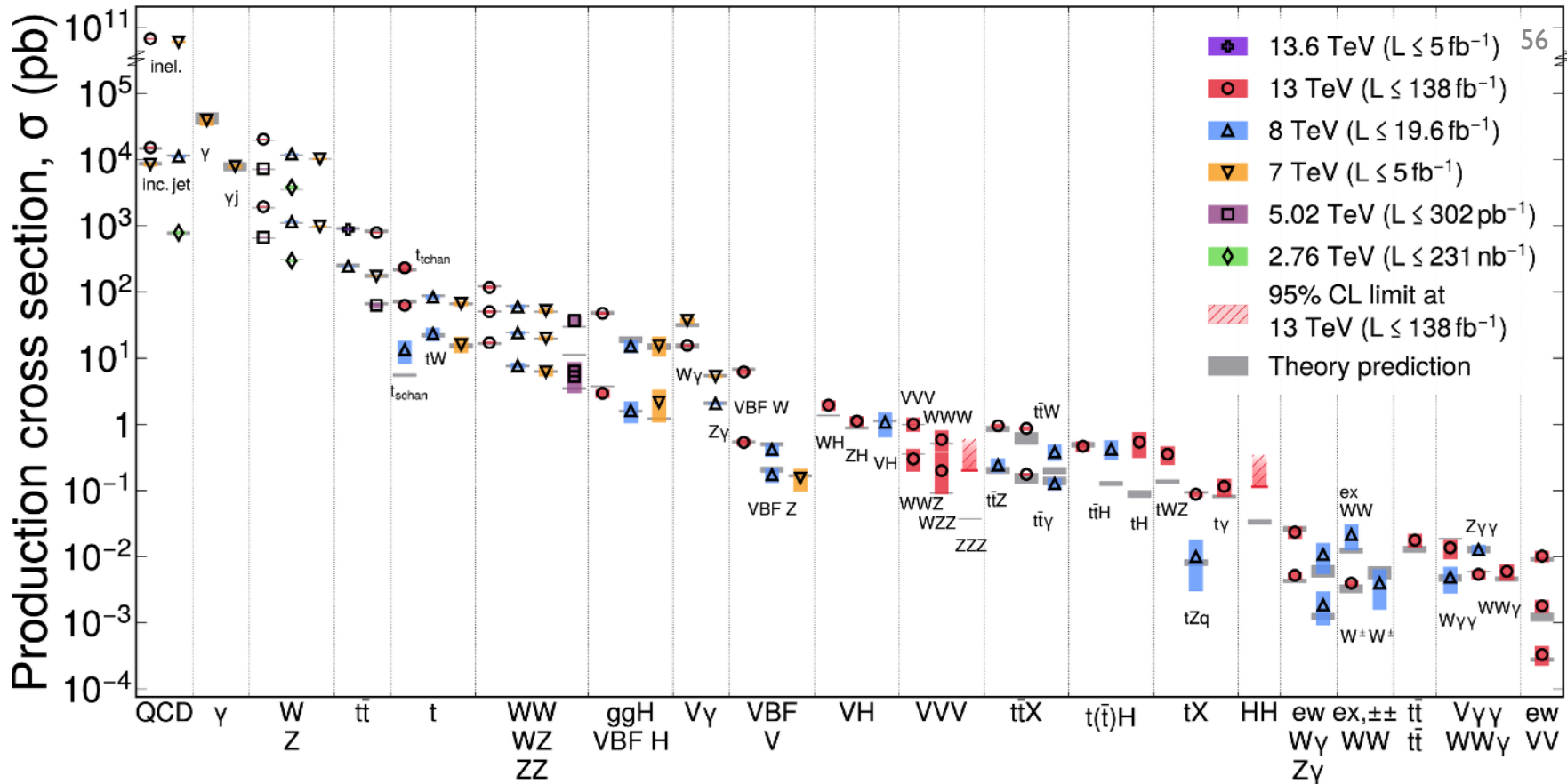
- 1) **Nenhuma**, era a que faltava para completar o modelo padrão
- 2) **Todos os anos** se descobrem novas partículas
- 3) **Algumas** (cerca de 10)
- 4) **Buracos negros** (mas a descoberta está embargada desde 2008)

# Excluindo o Higgs: quantas partículas se descobriram no LHC?



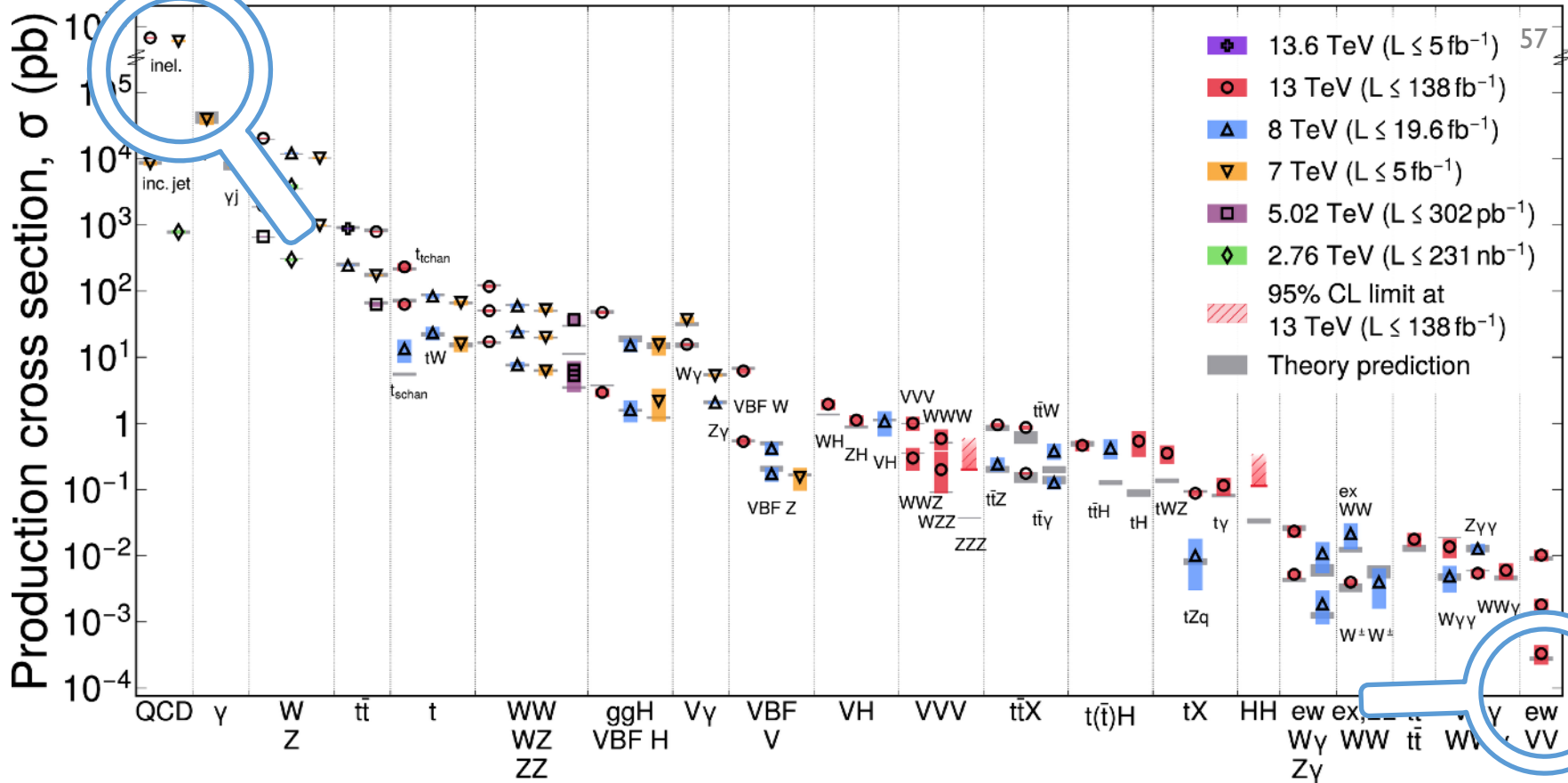
# 75 !

## 8 POR CMS



*O model padrão resiste em CMS... mas sabemos que descreve apenas 4% do nosso universo...*



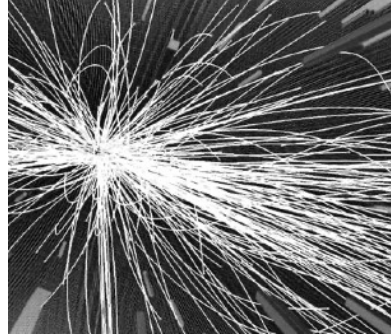


*O model padrão resiste em CMS... mas sabemos que descreve apenas 4% do nosso universo...*

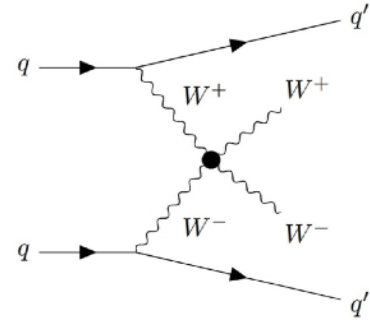
CMS  
176 m<sup>2</sup>



Colisão inelástica  
de dois prótons  
 $7 \times 10^{-30} \text{ m}^2$



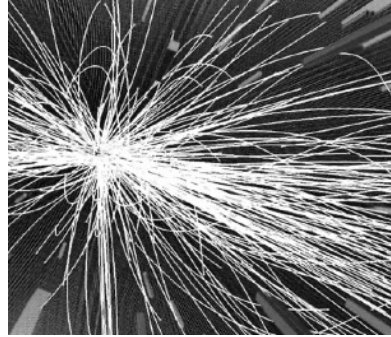
Processo de fusão  
de dois bosões W  
 $1 \times 10^{-43} \text{ m}^2$



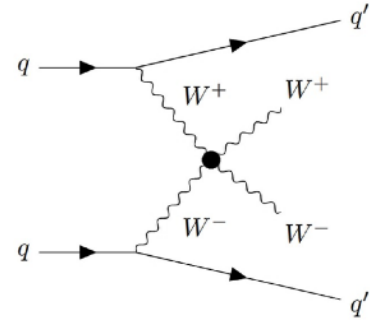
CMS  
176 m<sup>2</sup>



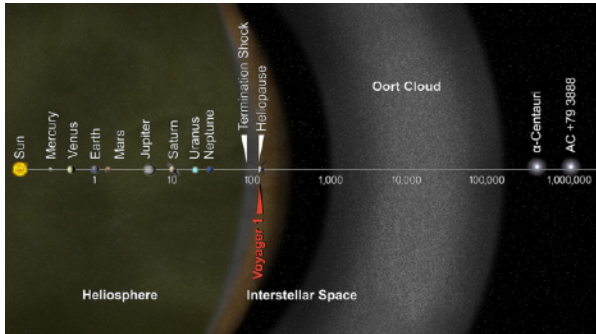
Colisão inelástica  
de dois prótons  
 $7 \times 10^{-30}$  m<sup>2</sup>



Processo de fusão  
de dois bosões W  
 $1 \times 10^{-43}$  m<sup>2</sup>



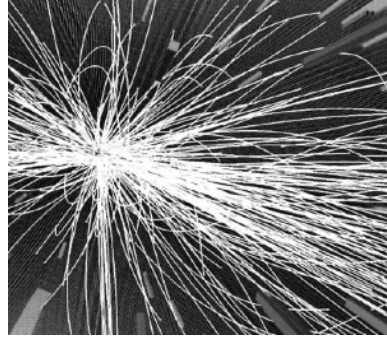
"Área coberta" pela distância  
actual da sonda Voyager  
 $126 \times 10^{19}$  m<sup>2</sup>



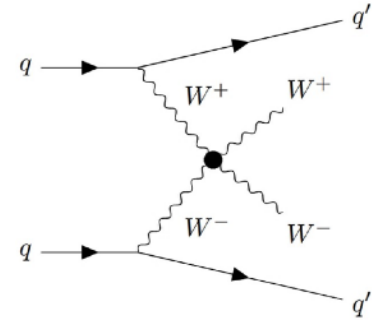
CMS  
176 m<sup>2</sup>



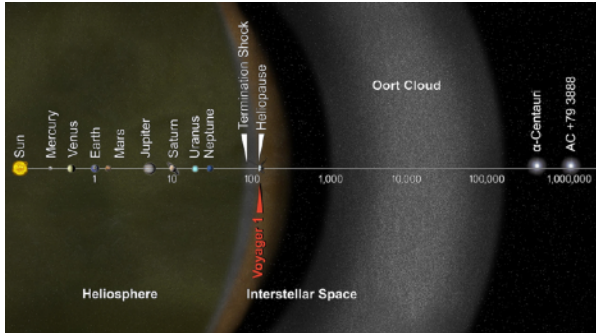
Colisão inelástica  
de dois prótons  
 $7 \times 10^{-30} \text{ m}^2$



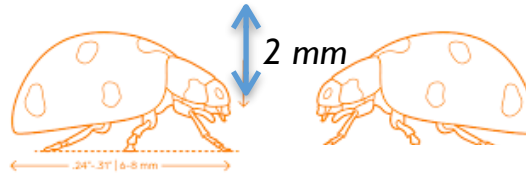
Processo de fusão  
de dois bosões W  
 $1 \times 10^{-43} \text{ m}^2$



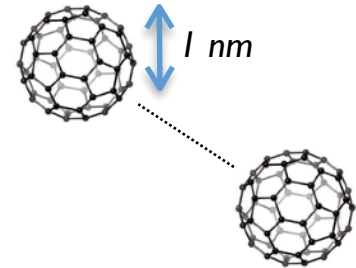
"Área coberta" pela distância  
actual da sonda Voyager  
 $126 \times 10^{19} \text{ m}^2$



Combates de  
joaninhas  
 $6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

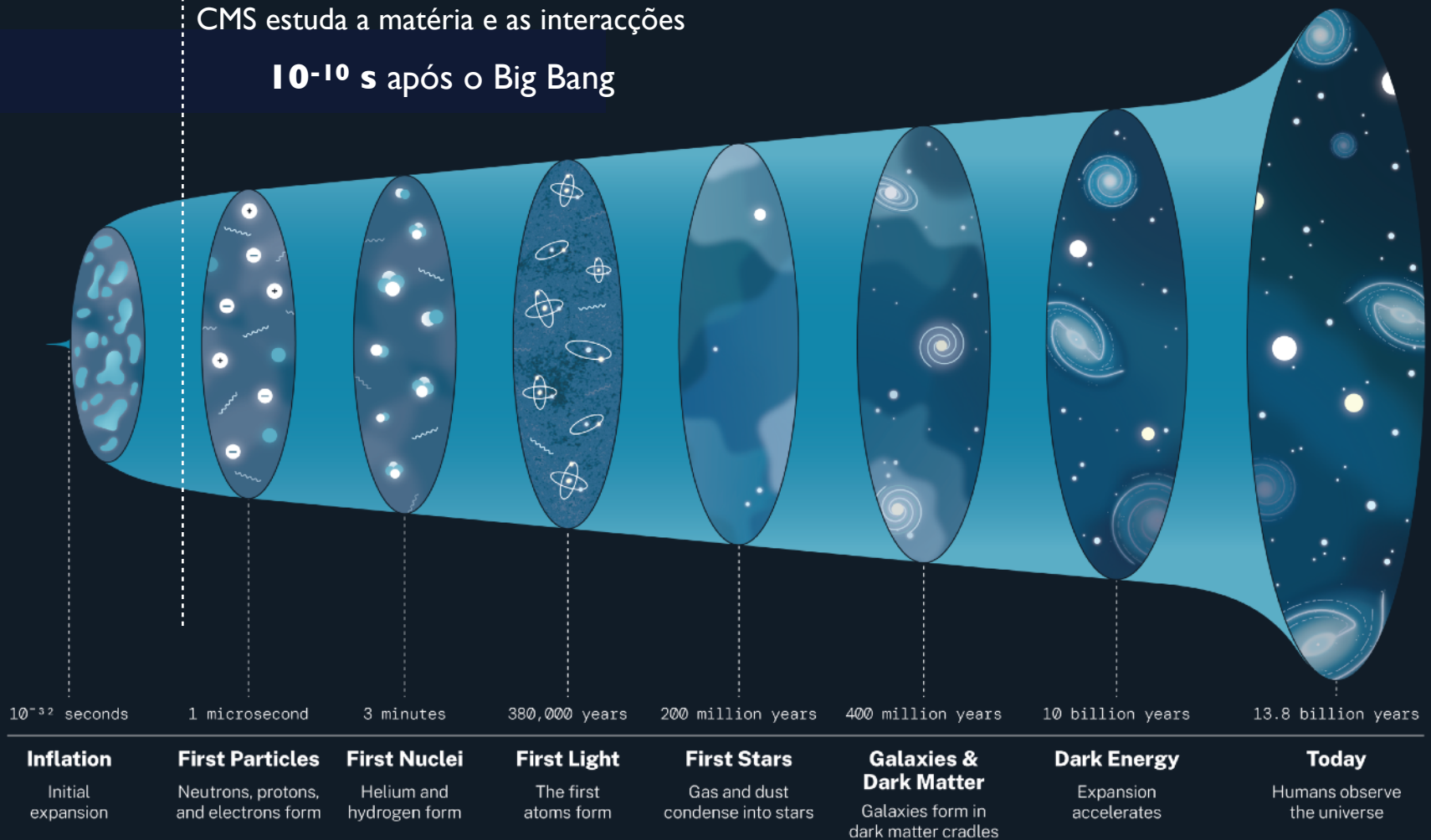


Jogos de snooker com  
moléculas de fulereno  
 $8 \times 10^{-18} \text{ m}^2$



CMS estuda a matéria e as interações

**$10^{-10}$  s** após o Big Bang



# Equilíbrio na natureza

- A massa do Higgs é “pequena”...

- $\frac{\text{Escala da gravidade}}{\text{Escala do Higgs}} \approx 10^{17}$
- $m_{\text{top}}$  “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

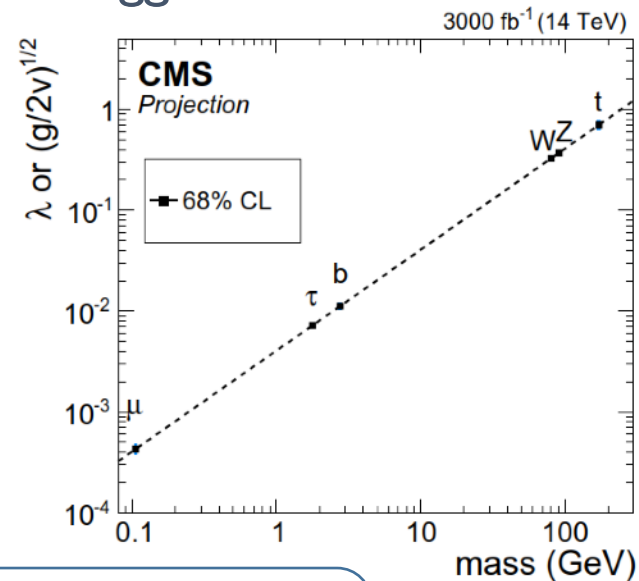
$$m_H^2 \approx (125 \text{ GeV})^2 =$$
$$m_{H0}^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda_H^2 \Lambda^2 - \frac{3}{8\pi^2} \lambda_t^2 \Lambda^2 + \frac{9}{64\pi^2} g^2 \Lambda^2$$



# Que mistérios esconde o Higgs?

## Medir mais precisamente os acoplamentos do Higgs

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



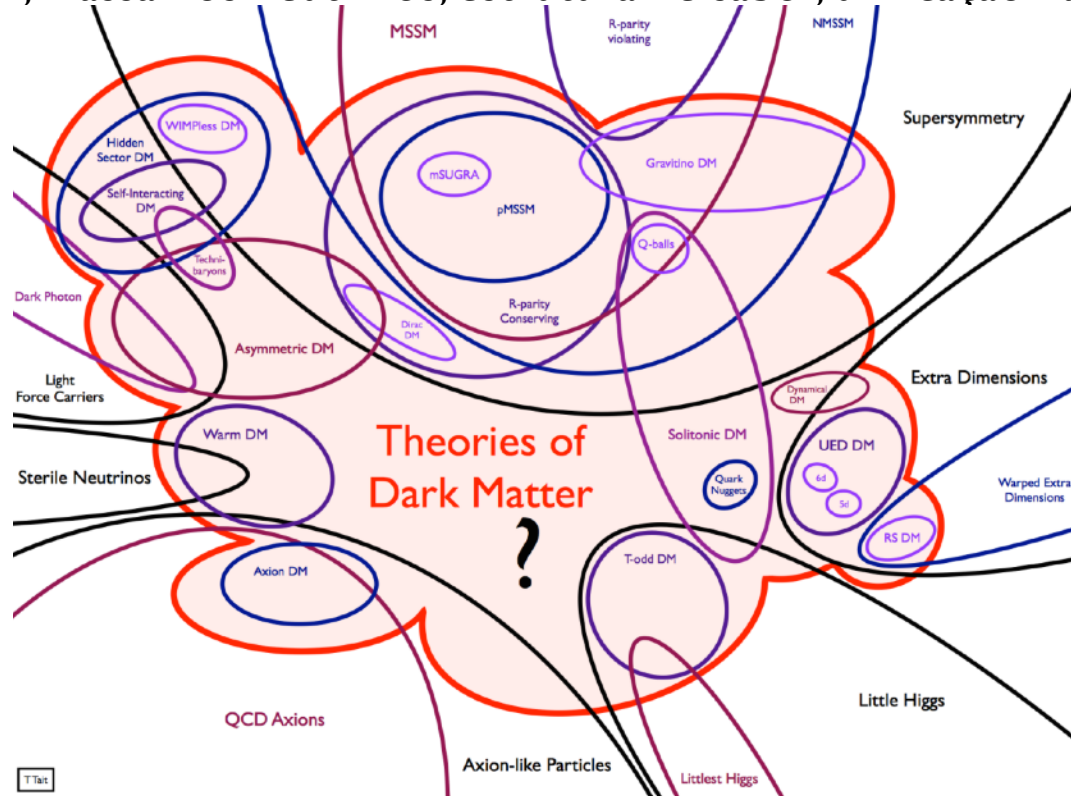
Processos raros, acoplamentos fracos  
⇒ programa requer x20 mais luminosidade

# 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,

...

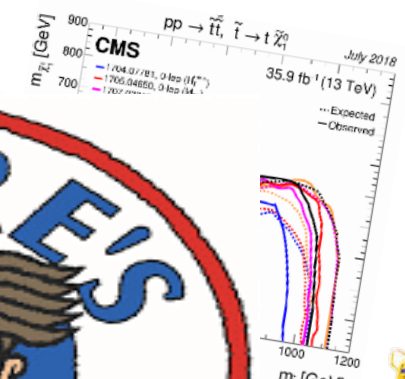
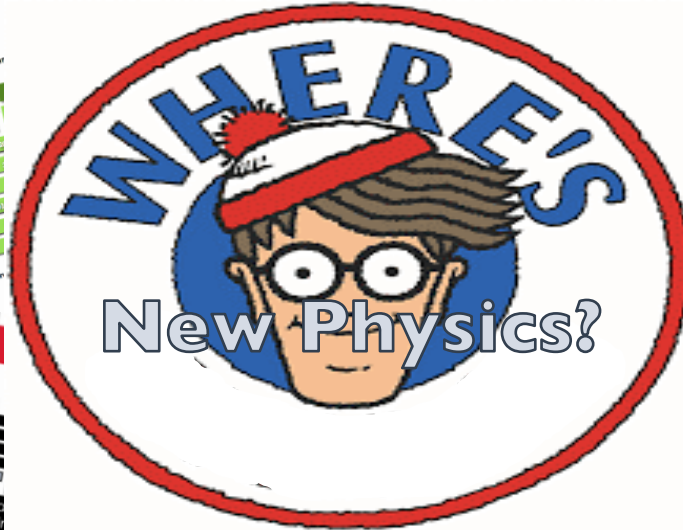
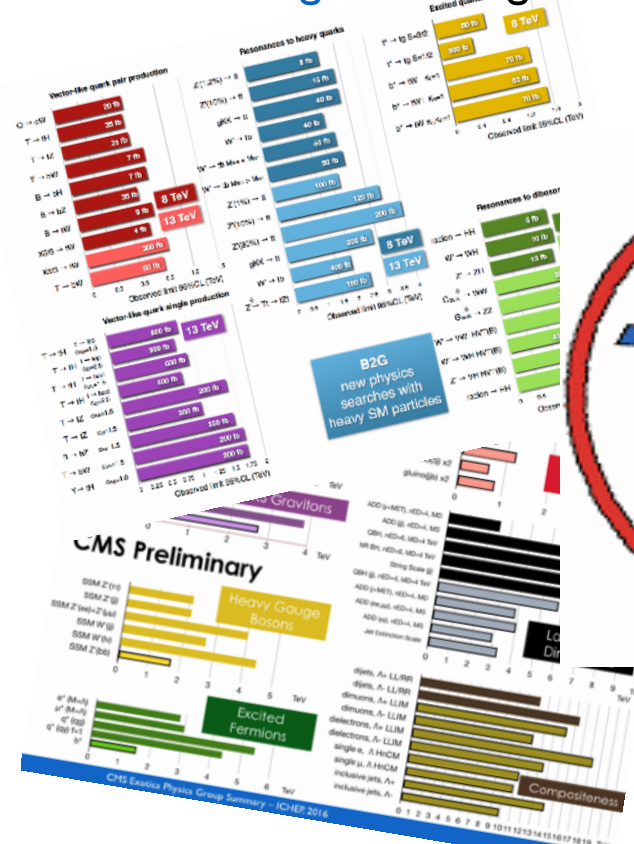




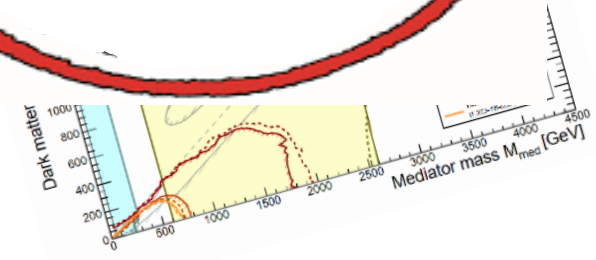
E para além do Higgs?

# O que está ainda por desvendar II

Mas [>1300 artigos](#) restringem o espaço de fase de nova física...



**Dados do LHC**



# Sumário

---

Com o Higgs o modelo padrão **está completo**  
**continua incompleto**

Para já não há sinais directos de nova física nos dados de CMS

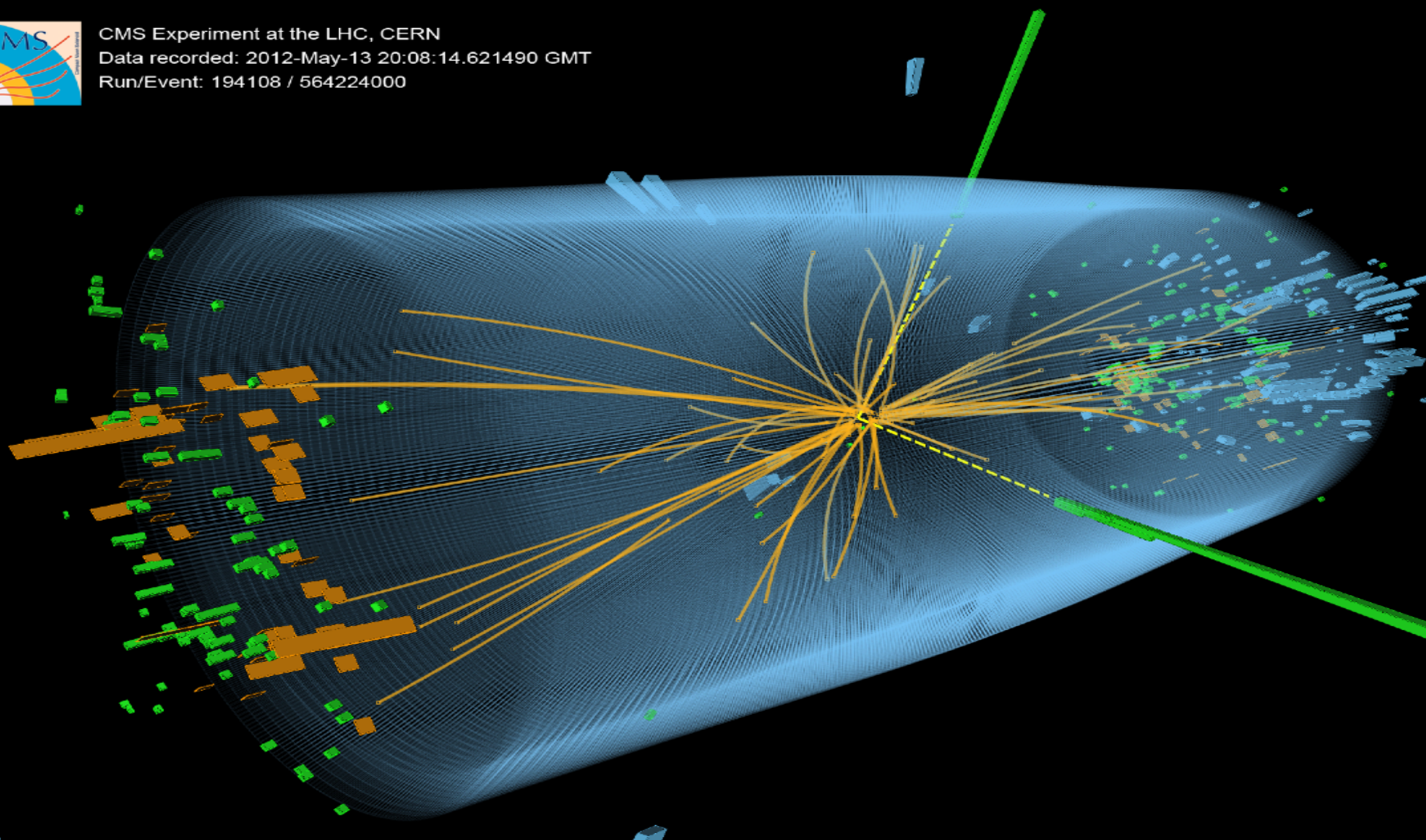
- será uma questão de estatística ou de escala de energia?
- **LHC: o único colisionador activo a explorar a fronteira de energia**

Oportunidade única: físicos, engenheiros, técnicos, estudantes

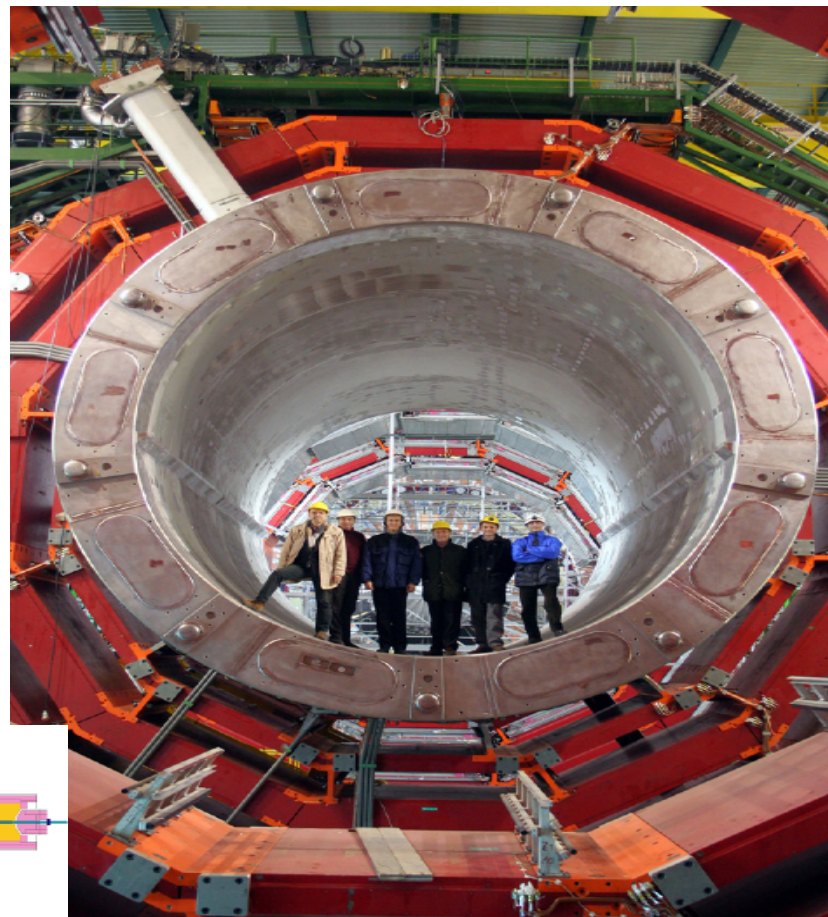
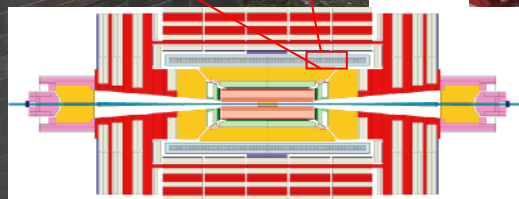
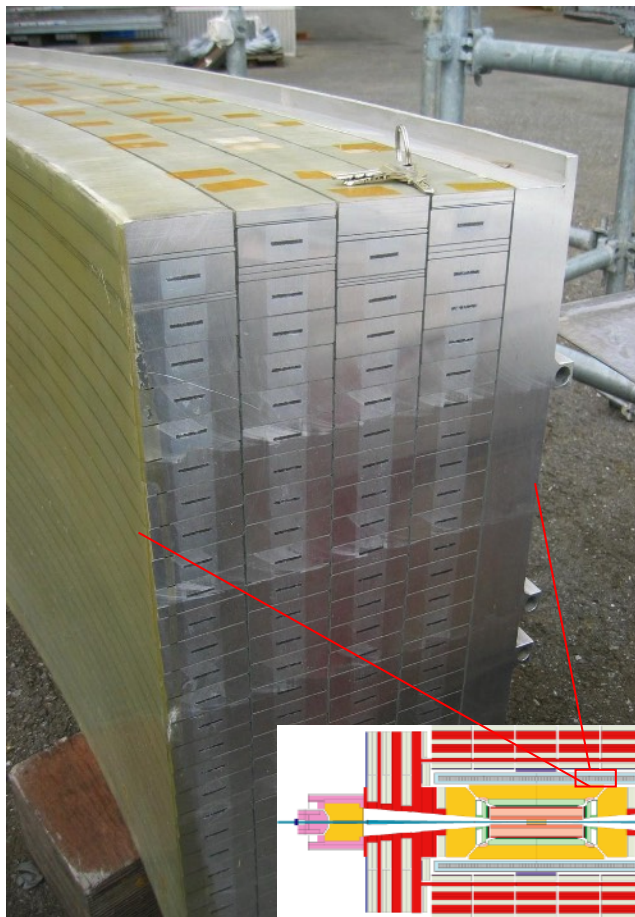
- testando os fundamentos da física com dados reais
- desenvolvendo tecnologia em parceria com a indústria
- colaboração à escala mundial em que países de língua portuguesa têm impacto



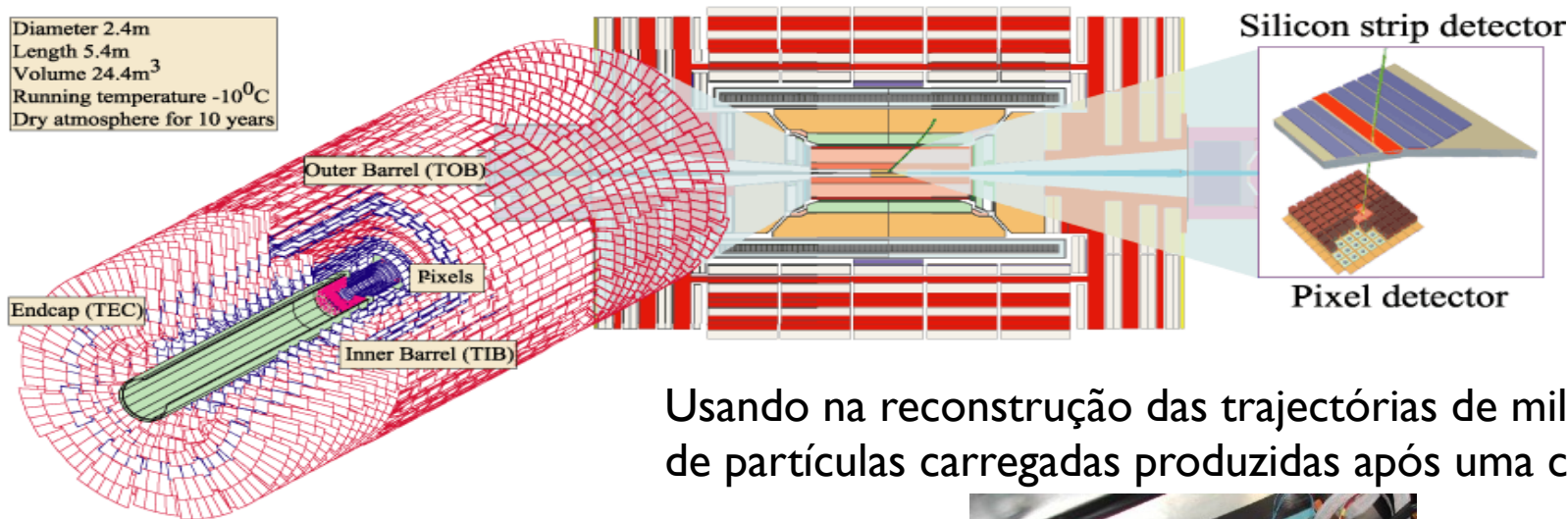
CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000



# Solenóide super-condutor de 3.8 T

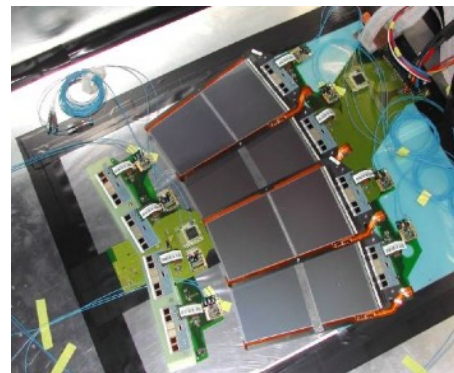


# Tracejador de Silício



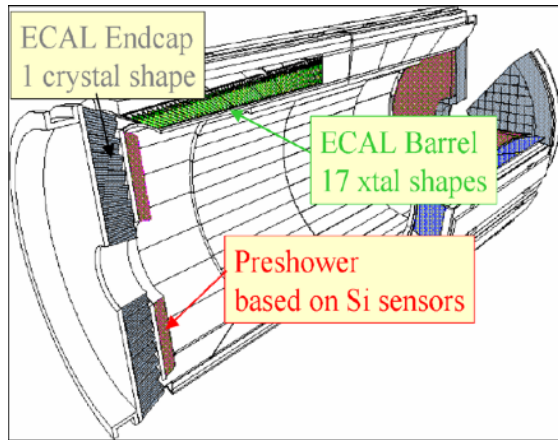
Usando na reconstrução das trajetórias de milhares de partículas carregadas produzidas após uma colisão

214m<sup>2</sup> sensores Si  
11.4 milhões de tiras de Si  
65.9 milhões de pixels de Si

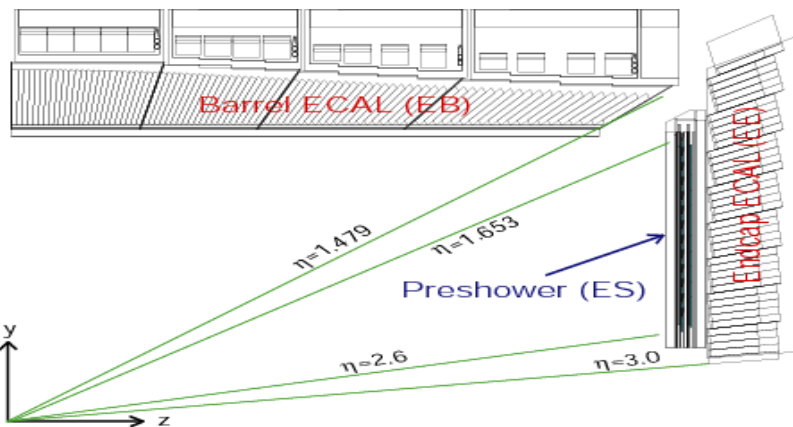




# Calorímetro electromagnético



Detecção de fótons e electrões  
 Cristais cintiladores de  $\text{PbWO}_4$   
 Lidos por fotodíodos de avalanche



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

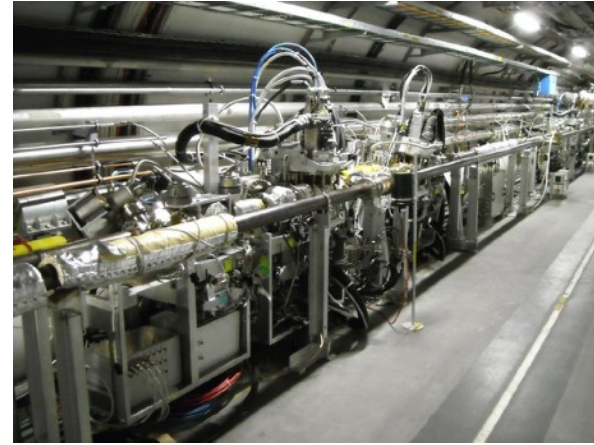
	Barril (EB)	Tampas (EE)
# cristais	61200	14648
Volume [m <sup>3</sup> ]	8.14	2.7
Massa total [t]	67.4	22.0



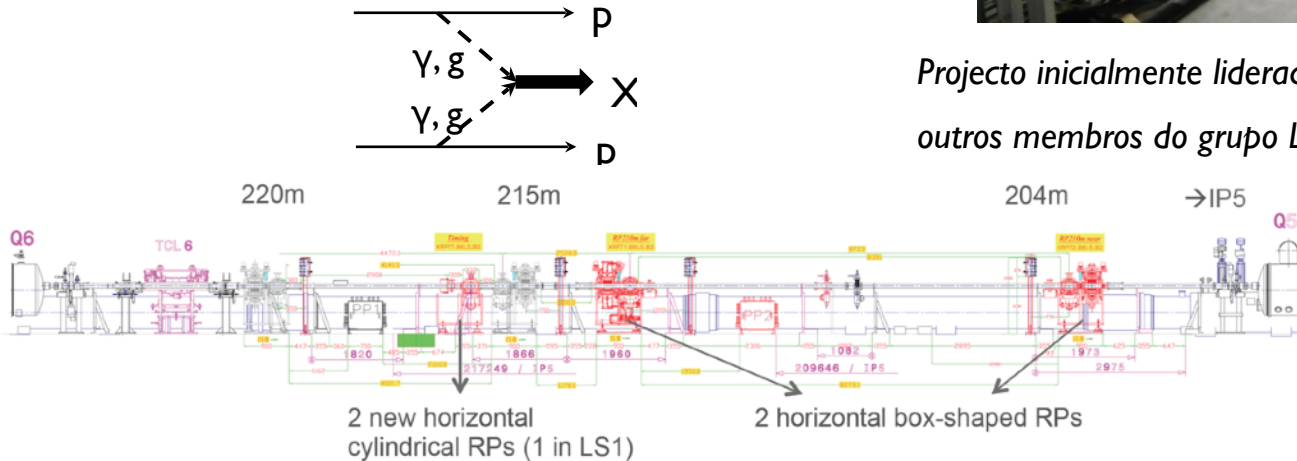
# CT-PPS espectómetro de protões

Dedicado a identificar colisões elásticas

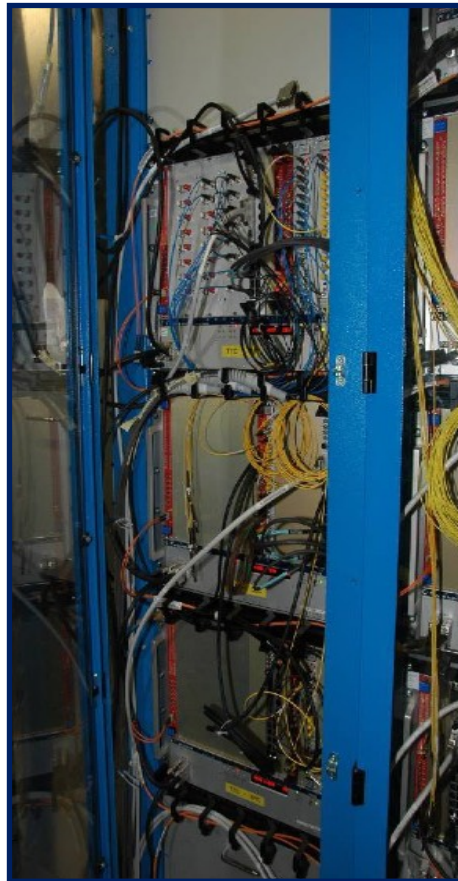
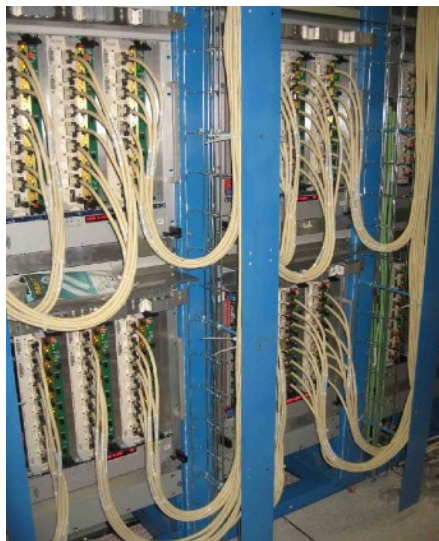
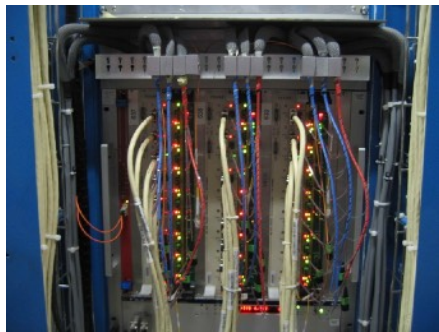
- Protões sobrevivem à interacção
- são detectados a distâncias  $>200\text{m}$  (desviam-se da trajectória do feixe)
- Interação pura de mediadores fracos/fortes
- Processos raros: potencial para nova física



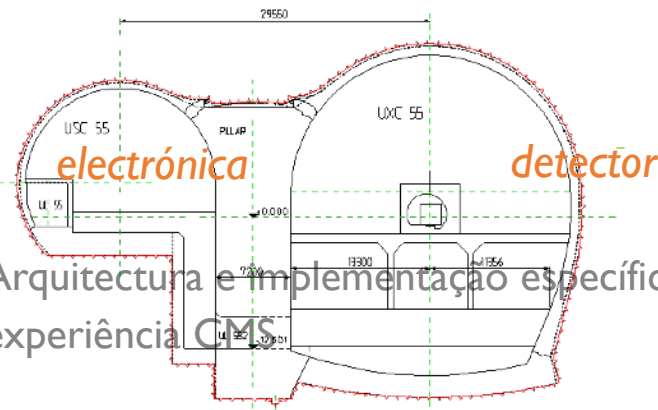
*Projecto inicialmente liderado pelo Prof. João Varela e outros membros do grupo LIP-CMS, UERJ*





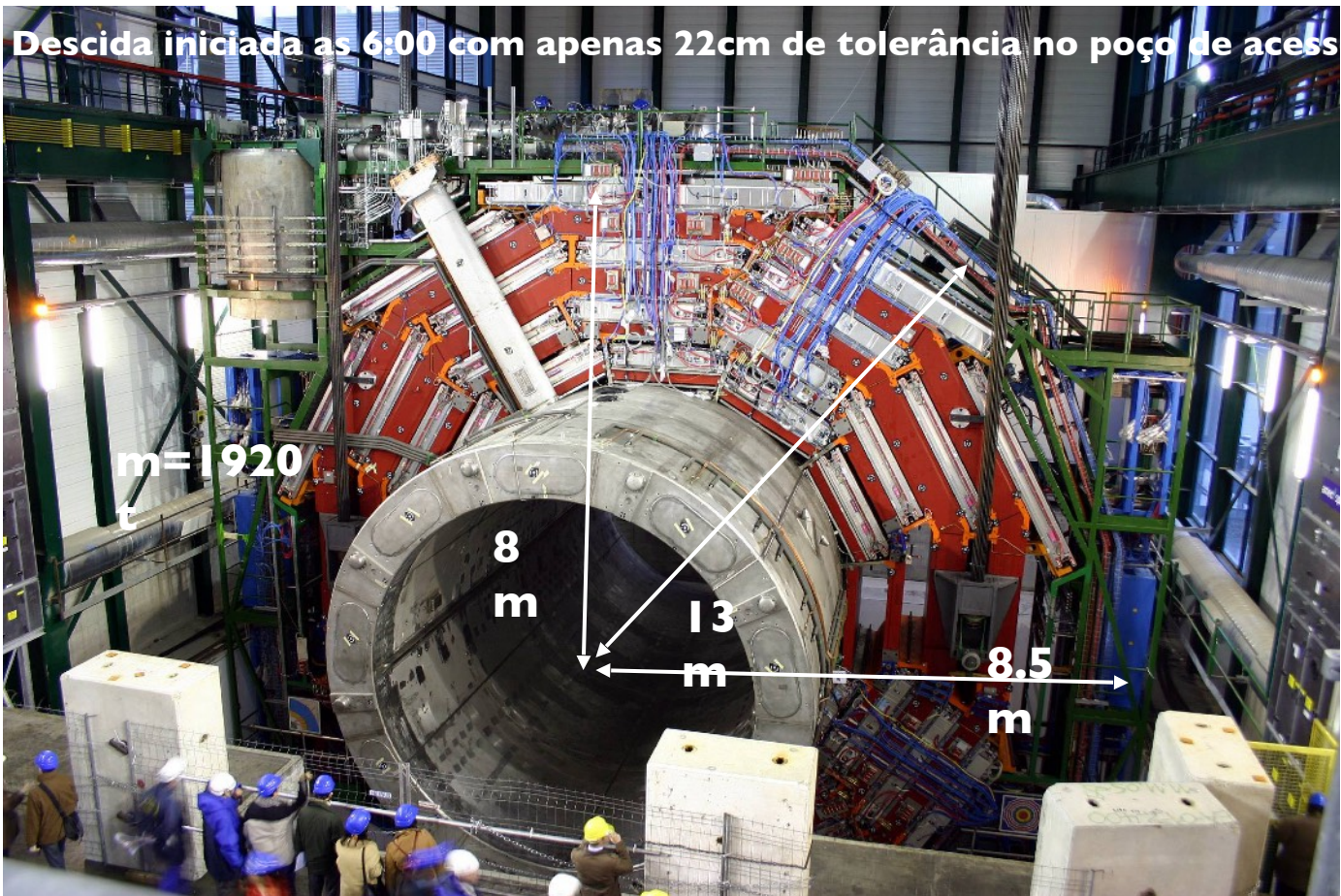


O sistema de electrónica encontra-se numa caverna de serviço, protegida da radiação: 2 andares com  $\approx 150$  prateleiras



Arquitectura e implementação específicas à experiência CMS

# 2007: o magnete desce à caverna



# 2007: o magnete desce à caverna

