

# O LHC e a descoberta do Higgs

José Guilherme Milhano

CENTRA-IST (Lisbon) & CERN PH-TH

[guilherme.milhano@ist.utl.pt](mailto:guilherme.milhano@ist.utl.pt)

<http://www.qcdlhc.ist.utl.pt>

6ª Escola de Astrofísica e Gravitação do IST, 7 de Setembro 2012



#1 LHC

# ⌚ L(arge) H(adron) C(ollider)



- **Large**

perímetro de  $\sim 27\text{km}$

:: re-utiliza o túnel do LEP

:: energia máxima depende do raio do acelerador e da magnitude do campo magnético dipolar que mantém as partículas em órbita

- **Hadron**

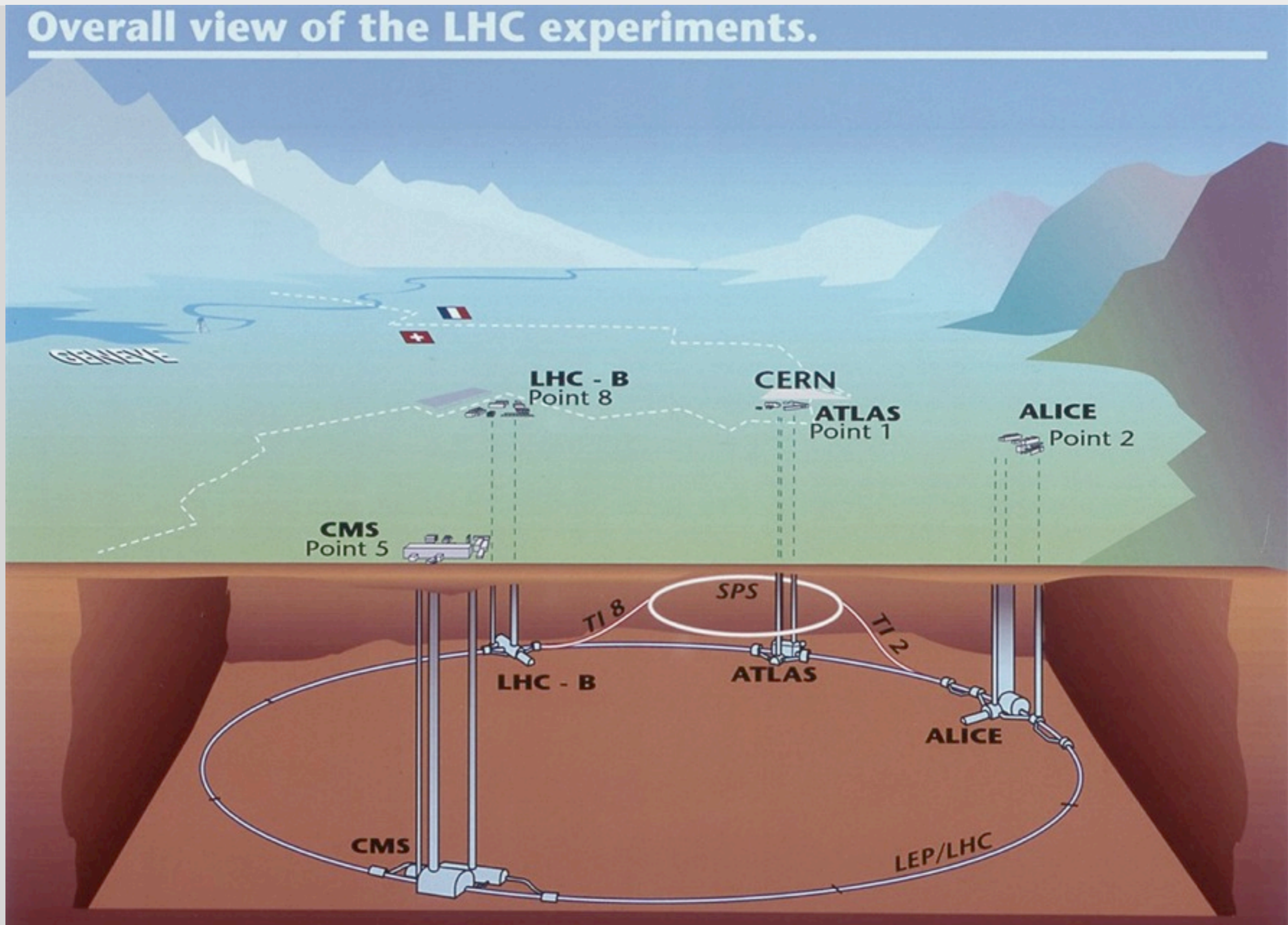
protões e iões de Pb [hadrões]

- **Collider**

energia do CM é a soma das energias de cada um dos feixes [a circular em sentidos diferentes]

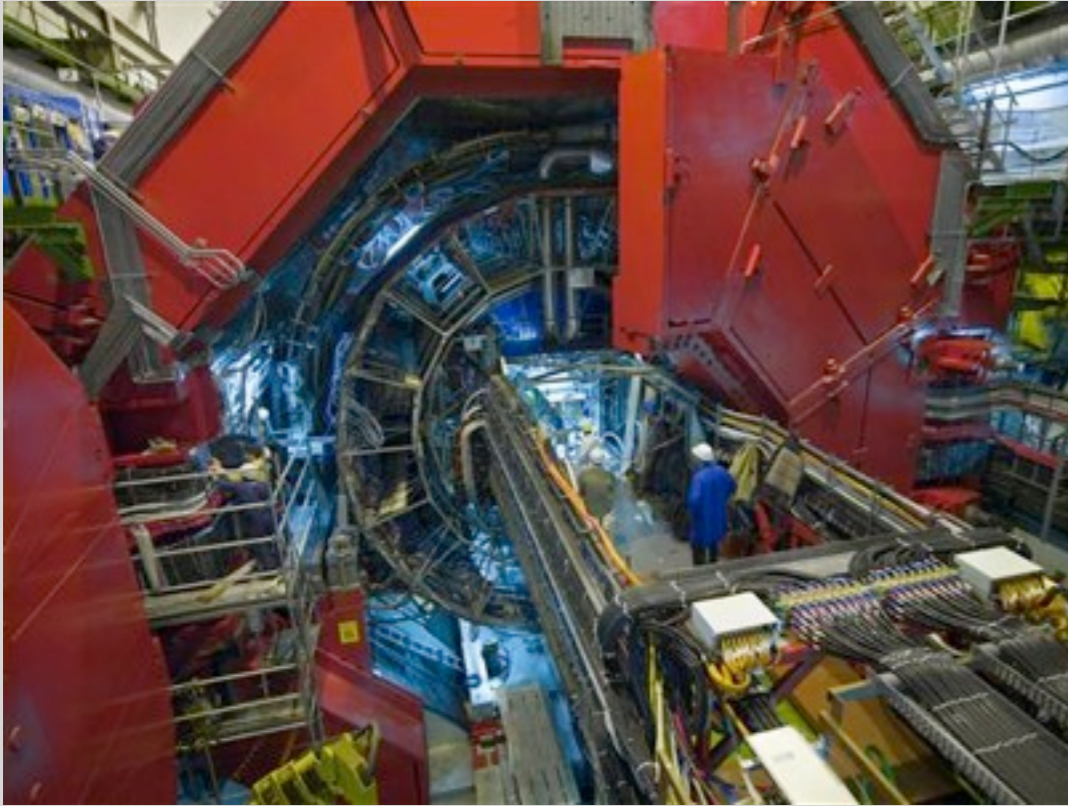
:: vantajoso relativamente a alvo fixo

# os detectores [experiências]



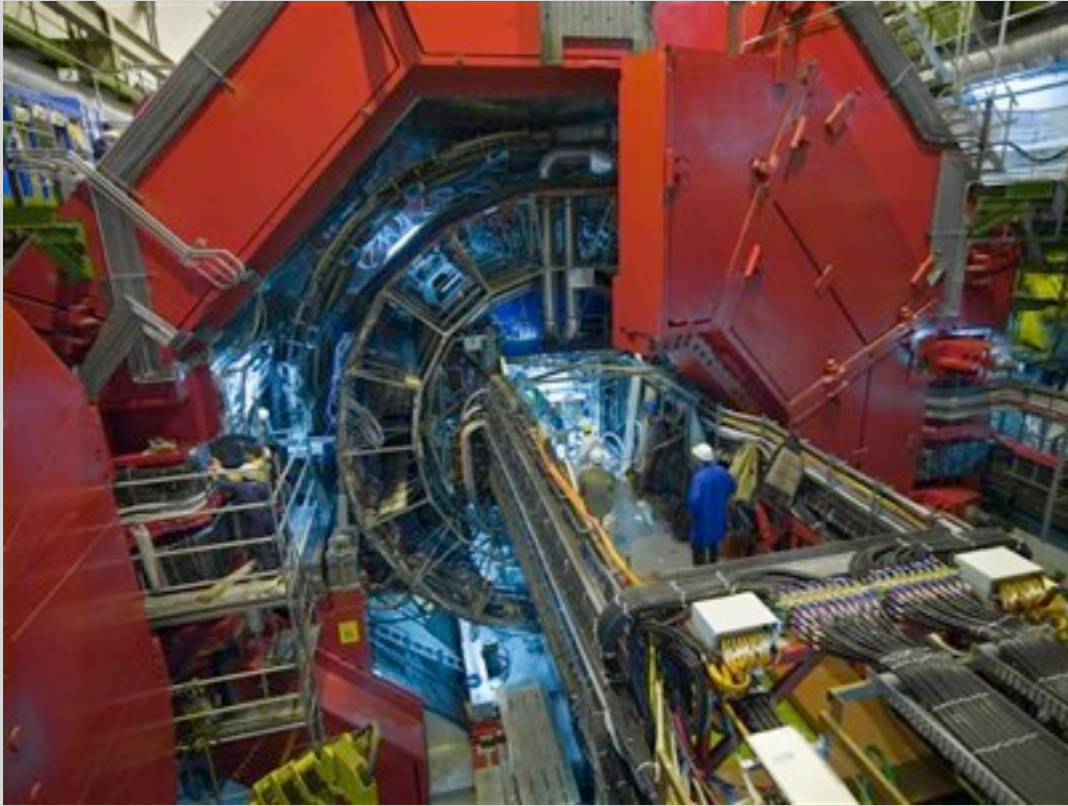
# Detectores

# 🔄 Detectores

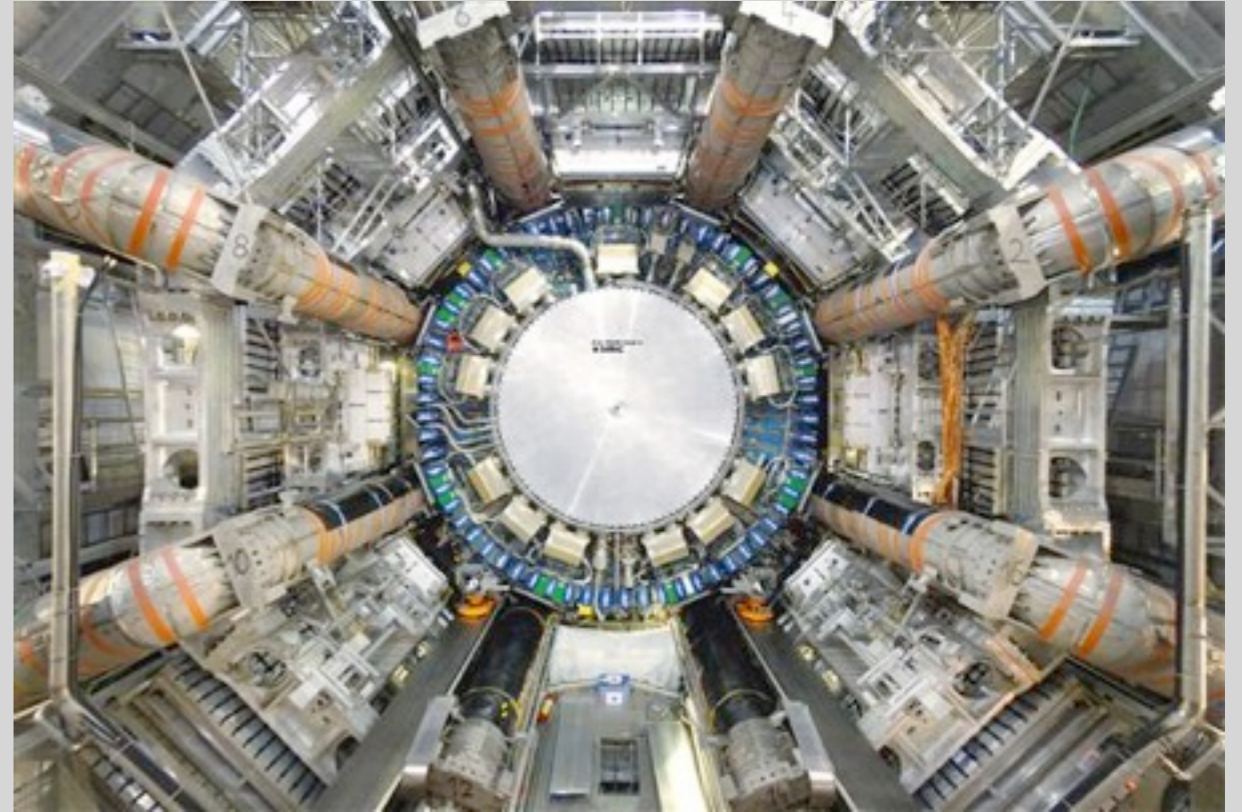


ALICE  
1269 pessoas

# 🔄 Detectores



ALICE  
1269 pessoas



ATLAS  
3216 pessoas

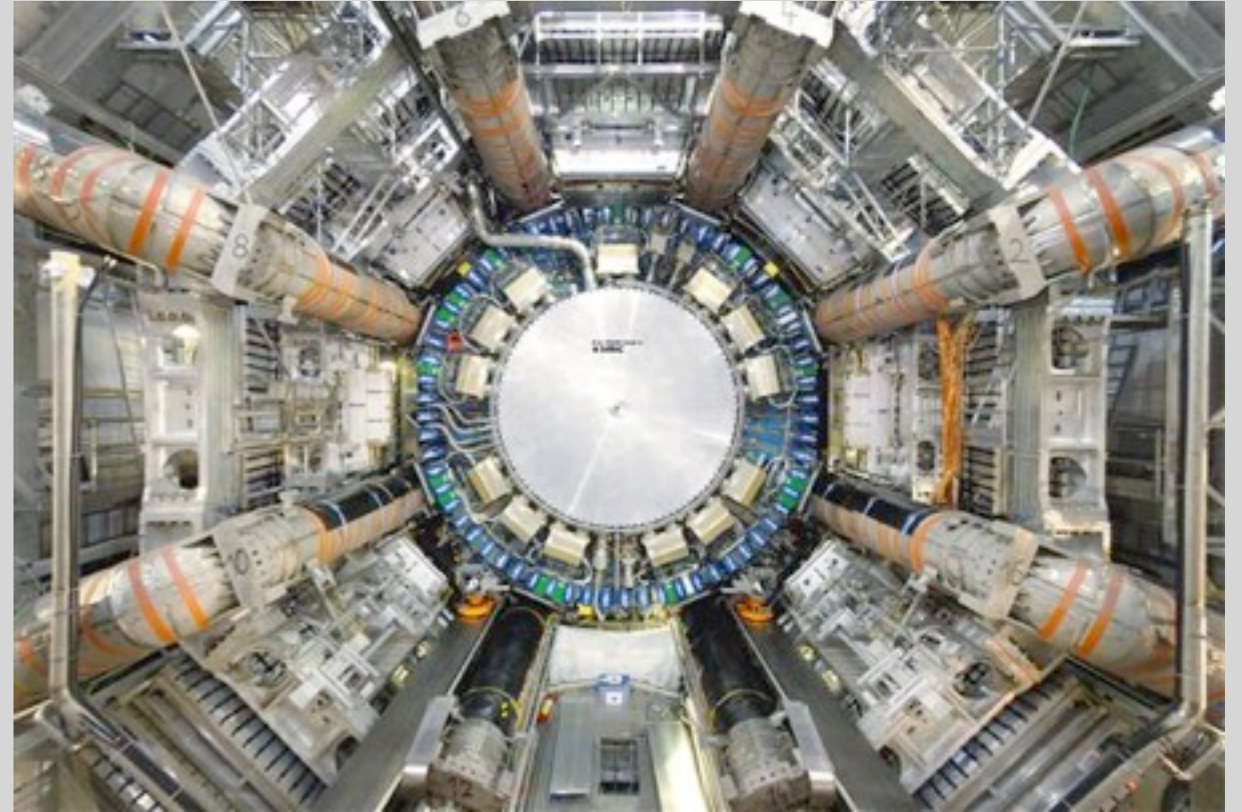
# 🔄 Detectores



ALICE  
126



CMS  
3180 pessoas



ATLAS  
3216 pessoas



# 🔄 Detectores



ALICE  
126



CMS  
3180 pessoas



ATLAS  
32



LHCb  
728 pessoas

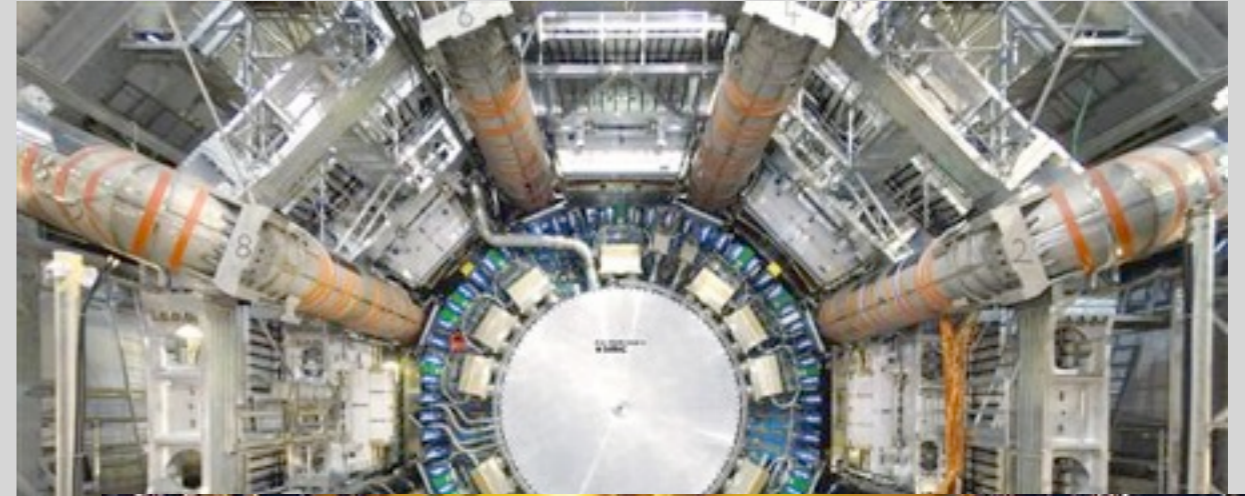
# 🔄 Detectores



ALICE  
126



CMS  
3180 pessoas



ATLAS  
32



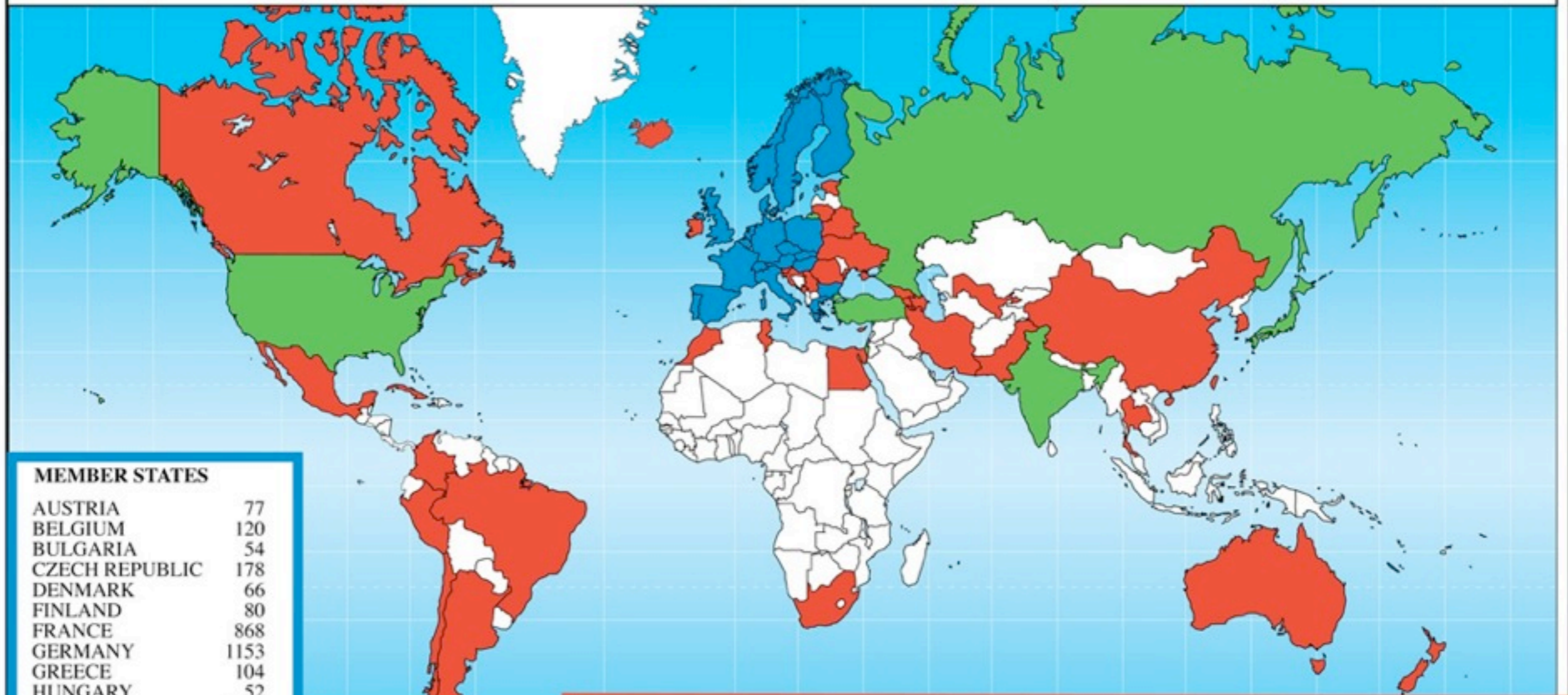
LHCb  
728 pessoas

TOTEM (59); LHCf (16); MoEDAL (4)

# 🔄 LHC em (alguns) números

|                         |   |
|-------------------------|---|
| cientistas              | ~8500   |
| países                  | 44 (5 continentes)  |
| perímetro               | 26 659 m  |
| temperatura             | 1.9 K (dipolos) :: mais frio que espaço                                   |
| vácuo                   | $10^{-13}$ atm (feixe)<br>~9000 m <sup>3</sup> (isolamento)               |
| ímãs                    | 9593<br>1232 dipolos, 392 quadrupolos                                     |
| campo magnético dipolar | 8.33 T  |
| energia [máximo]        | protão 7 TeV [CM: 14 TeV]<br>iões 2.76 TeV/u [CM: 5.5 TeV] (Pb: 1150 TeV) |
| colisões                | 600 milhões por segundo   |
| dados                   | 700MB/s (15PB/ano = 20km CDs em pilha)                                    |
| custo directo           | 1 aeroporto (4 biliões de euros)  |

## Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 20 January 2010



### MEMBER STATES

|                |      |
|----------------|------|
| AUSTRIA        | 77   |
| BELGIUM        | 120  |
| BULGARIA       | 54   |
| CZECH REPUBLIC | 178  |
| DENMARK        | 66   |
| FINLAND        | 80   |
| FRANCE         | 868  |
| GERMANY        | 1153 |
| GREECE         | 104  |
| HUNGARY        | 52   |
| ITALY          | 1463 |
| NETHERLANDS    | 170  |
| NORWAY         | 73   |
| POLAND         | 191  |
| PORTUGAL       | 122  |
| SLOVAKIA       | 55   |
| SPAIN          | 311  |
| SWEDEN         | 71   |
| SWITZERLAND    | 362  |
| UNITED KINGDOM | 732  |

**6302**

### OBSERVER STATES

|        |      |
|--------|------|
| INDIA  | 91   |
| ISRAEL | 49   |
| JAPAN  | 204  |
| RUSSIA | 901  |
| TURKEY | 60   |
| USA    | 1618 |

**2923**

### OTHERS

|                |     |           |    |              |    |            |    |
|----------------|-----|-----------|----|--------------|----|------------|----|
| ARGENTINA      | 8   | CROATIA   | 18 | MALTA        | 2  | THAILAND   | 1  |
| ARMENIA        | 16  | CUBA      | 4  | MEXICO       | 33 | TUNISIA    | 1  |
| AUSTRALIA      | 17  | CYPRUS    | 8  | MONTENEGRO   | 1  | UKRAINE    | 17 |
| AZERBAIJAN     | 1   | EGYPT     | 3  | MOROCCO      | 6  | UZBEKISTAN | 1  |
| BELARUS        | 19  | ESTONIA   | 9  | NEW ZEALAND  | 8  |            |    |
| BRAZIL         | 77  | GEORGIA   | 10 | PAKISTAN     | 15 |            |    |
| CANADA         | 141 | ICELAND   | 1  | PERU         | 1  |            |    |
| CHILE          | 2   | IRAN      | 15 | ROMANIA      | 59 |            |    |
| CHINA          | 78  | IRELAND   | 14 | SERBIA       | 20 |            |    |
| CHINA (TAIPEI) | 53  | KOREA     | 64 | SLOVENIA     | 17 |            |    |
| COLOMBIA       | 9   | LITHUANIA | 5  | SOUTH AFRICA | 8  |            |    |

**762**

*Uma longa história*

# 🔄 pré-história (i)

1984

- início dos trabalhos preparatórios para o LHC [Simpósio em Lausanne]
  - :: o LEP, que operou entre 1989 e 2000, ainda não estava construído

1989

- ‘início’ da colaboração LHC

1992

- ‘início’ das experiências LHC
  - :: [expressões de interesse]
- lançamento do plano de estudos de exequibilidade técnica
  - :: [acelerador a funcionar a  $1.9\text{K} = -271.3^\circ\text{C}$ ]

1994

- aprovação da construção do LHC pelo CERN Council

1995

- publicação do LHC technical design report
  - :: [detalhes de operação e arquitectura do futuro acelerador]

# 🔄 pré-história (ii)

1996

- CMS e ATLAS aprovadas [general discovery experiments]
  - :: origem da massa [descoberta do bóson de Higgs]
  - :: exploração de possibilidades para matéria escura [SUSY?] e energia escura

1997

- ALICE aprovada com re-utilização do ímã L3 do LEP
  - :: experiência de íons pesados para descoberta e caracterização do plasma de quarks e glúons (QGP) hipoteticamente existente nos primórdios (de  $10^{-35}$  a  $10^{-12}$  s) do universo

1998

- início dos trabalhos de engenharia civil para ATLAS
  - :: [uma das duas cavernas será a maior alguma vez escavada em molasso 35m(l)x55m(c)x40m(a)]
- LHCb aprovada
  - :: violação de CP
  - :: explicação da assimetria entre matéria e anti-matéria no Universo

# 🔄 pré-história (iii)

2000

- LEP colide electrões com positrões pela última vez [o fim de um grande programa experimental]

2002

- a última peça do LEP sobe à superfície

2003

- início da instalação do LHC [acelerador e detectores]

2008

- instalação concluída
- arrefecimento do LHC
  - :: são necessárias 3-4 semanas para atingir a temperatura de funcionamento [1.9 K]
- 10 Set :: primeira tentativa de circulação de feixe
  - :: às 10.28 [essencialmente a primeira tentativa] prótons circulam pela primeira vez no LHC
- 19 Sep :: O DIA NEGRO ...



## o incidente de 19 Set 2008

- durante testes aos ímanes dipolares uma junção [soldadura sofisticada] entre supercondutores desenvolveu uma resistência eléctrica anómala [deixou de ser supercondutora...] e conseqüentemente a temperatura local aumentou substancialmente [efeito de Joule] distorcendo os ímanes logo gerando uma rápida reconfiguração do campo magnético ['quench'] resultando num arco voltaico [mais física clássica] que perfurou as condutas de Hélio líquido e em mais perturbações mecânicas...
- algumas toneladas de Hélio líquido perdidas para o túnel e [muitos] estragos ...

## o incidente de 19 Set 2008

- durante testes aos ímanes dipolares uma junção [soldadura sofisticada] entre supercondutores desenvolveu uma resistência eléctrica anómala [deixou de ser supercondutora...] e conseqüentemente a temperatura local aumentou substancialmente [efeito de Joule] distorcendo os ímanes logo gerando uma rápida reconfiguração do campo magnético ['quençh'] resultando num arco voltaico [mais física clássica] que perfurou as condutas de Hélio líquido e em mais perturbações mecânicas...
- algumas toneladas de Hélio líquido perdidas para o túnel e [muitos] estragos ...



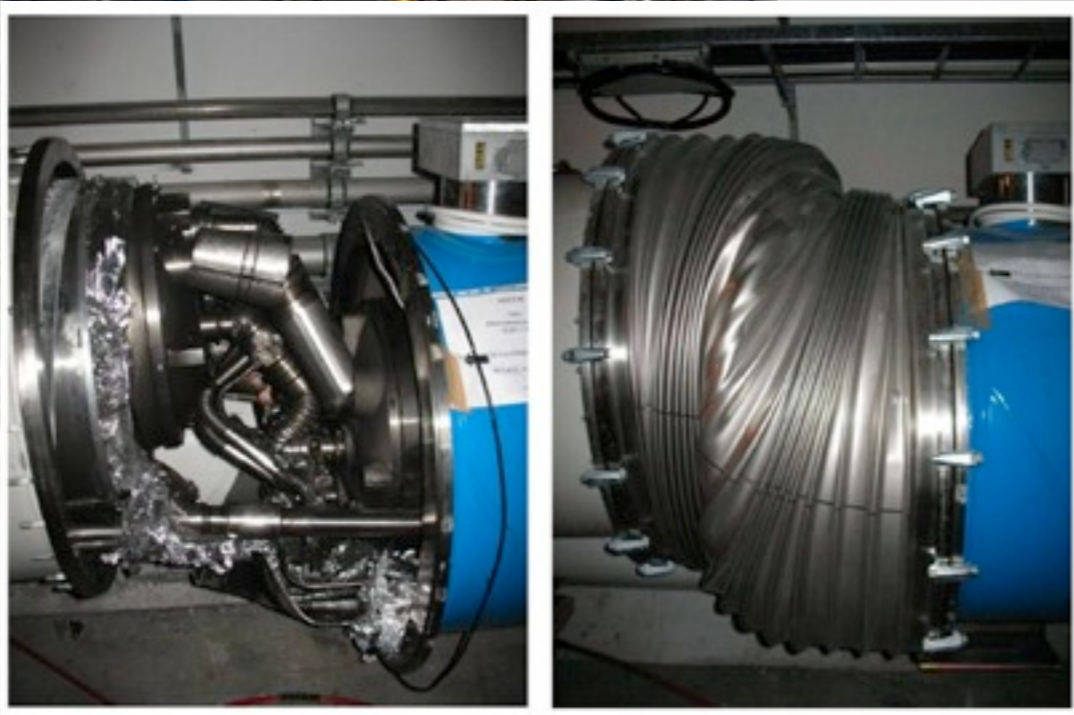
## o incidente de 19 Set 2008

- durante testes aos ímanes dipolares uma junção [soldadura sofisticada] entre supercondutores desenvolveu uma resistência eléctrica anómala [deixou de ser supercondutora...] e conseqüentemente a temperatura local aumentou substancialmente [efeito de Joule] distorcendo os ímanes logo gerando uma rápida reconfiguração do campo magnético ['quençh'] resultando num arco voltaico [mais física clássica] que perfurou as condutas de Hélio líquido e em mais distúrbios mecânicos...
- algumas toneladas de Hélio líquido perdidas para o túnel e [muitos] estragos ...



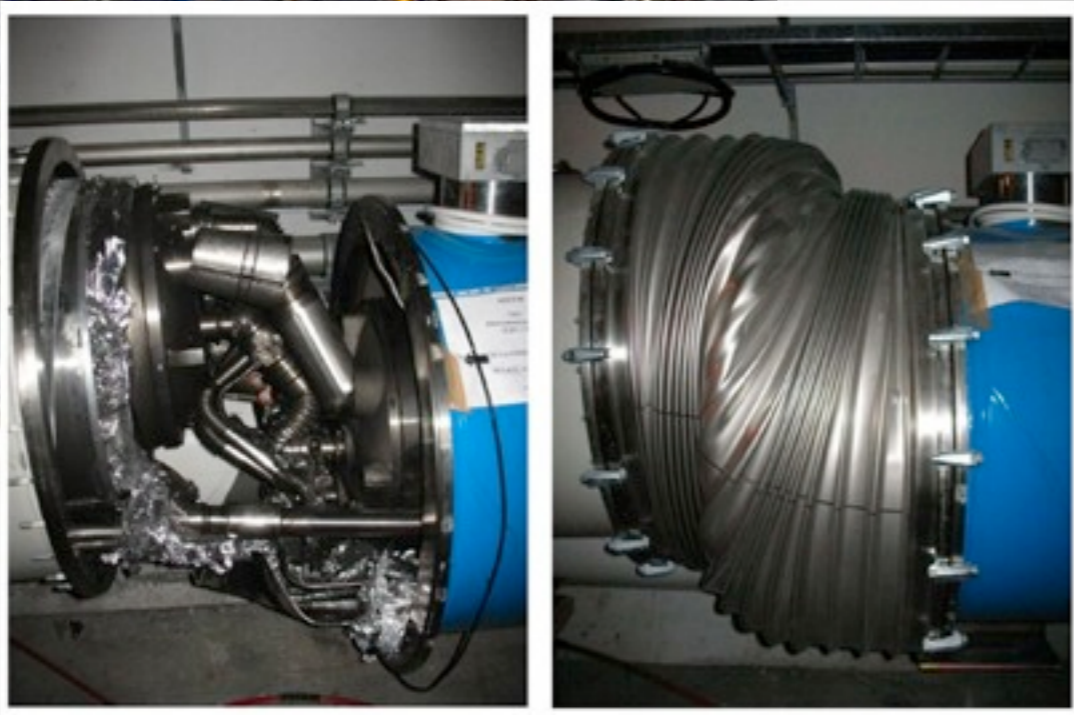
# o incidente de 19 Set 2008

- durante testes aos ímanes dipolares uma junção [soldadura sofisticada] entre supercondutores desenvolveu uma resistência eléctrica anómala [deixou de ser supercondutora...] e conseqüentemente a temperatura local aumentou substancialmente [efeito de Joule] distorcendo os ímanes logo gerando uma rápida reconfiguração do campo magnético ['quençh'] resultando num arco voltaico [mais física clássica] que perfurou as condutas de Hélio líquido e em mais distúrbios mecânicos...
- algumas toneladas de Hélio líquido perdidas para o túnel e [muitos] estragos ...



# o incidente de 19 Set 2008

- durante testes aos ímanes dipolares uma junção [soldadura sofisticada] entre supercondutores desenvolveu uma resistência eléctrica anómala [deixou de ser supercondutora...] e conseqüentemente a temperatura local aumentou substancialmente [efeito de Joule] distorcendo os ímanes logo gerando uma rápida reconfiguração do campo magnético ['quençh'] resultando num arco voltaico [mais física clássica] que perfurou as condutas de Hélio líquido e em mais distúrbios mecânicos...
- algumas toneladas de Hélio líquido perdidas para o túnel e [muitos] estragos ...



# depois da tempestade

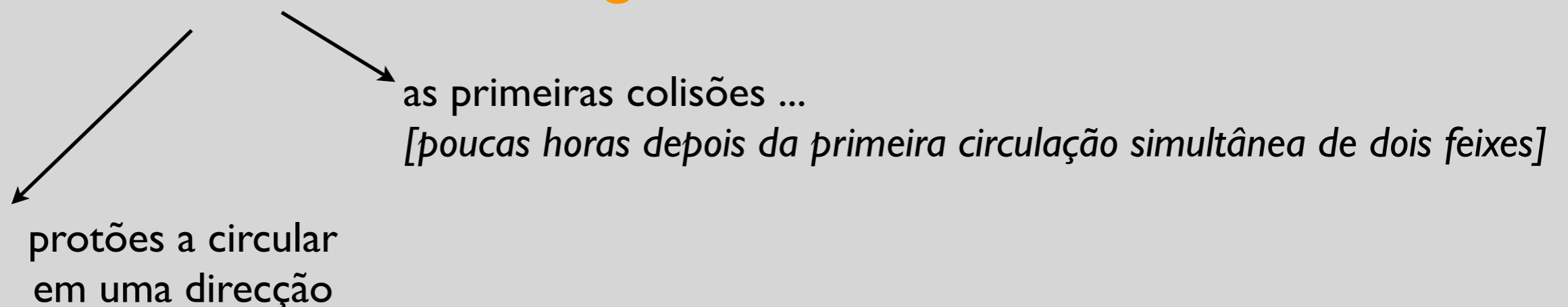
# 🔄 depois da tempestade

- re-início do LHC em 2009
  - energia máxima de 7 TeV [14 TeV para mais tarde...]
    - 900 GeV [energia de injeção] :: contacto com o passado [UA5 no SPS]
    - 2.36 TeV [só para ser mais que o Tevatron]
    - 7 TeV
  - funcionamento contínuo até final de 2011
  - 2 (1+1) meses dedicados a colisões Pb-Pb [o resto p-p]

# 🔄 depois da tempestade

- re-início do LHC em 2009
  - energia máxima de 7 TeV [14 TeV para mais tarde...]
    - 900 GeV [energia de injeção] :: contacto com o passado [UA5 no SPS]
    - 2.36 TeV [só para ser mais que o Tevatron]
    - 7 TeV
  - funcionamento contínuo até final de 2011
  - 2 (1+1) meses dedicados a colisões Pb-Pb [o resto p-p]

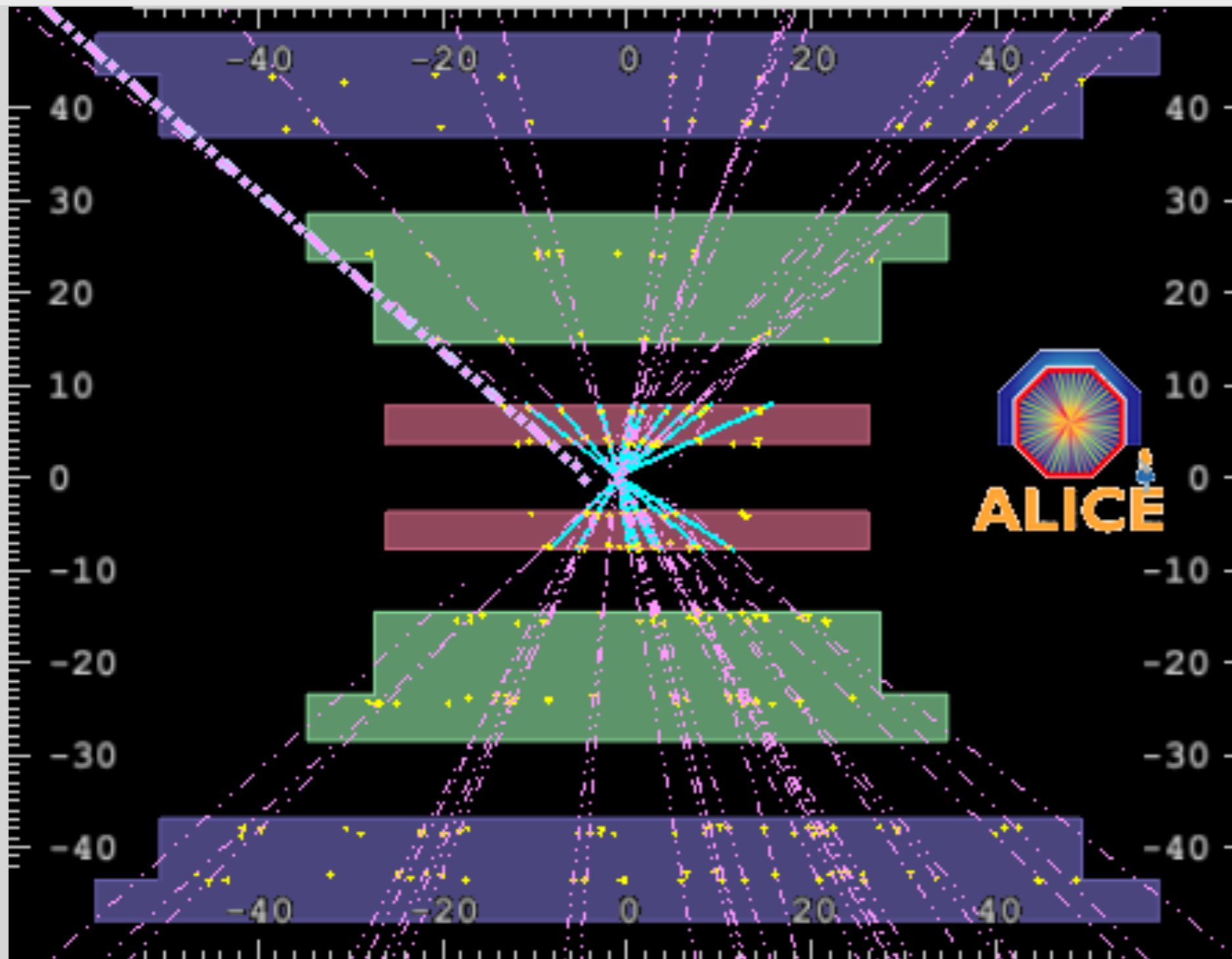
20-23 Nov :: um grande 'fim-de-semana'



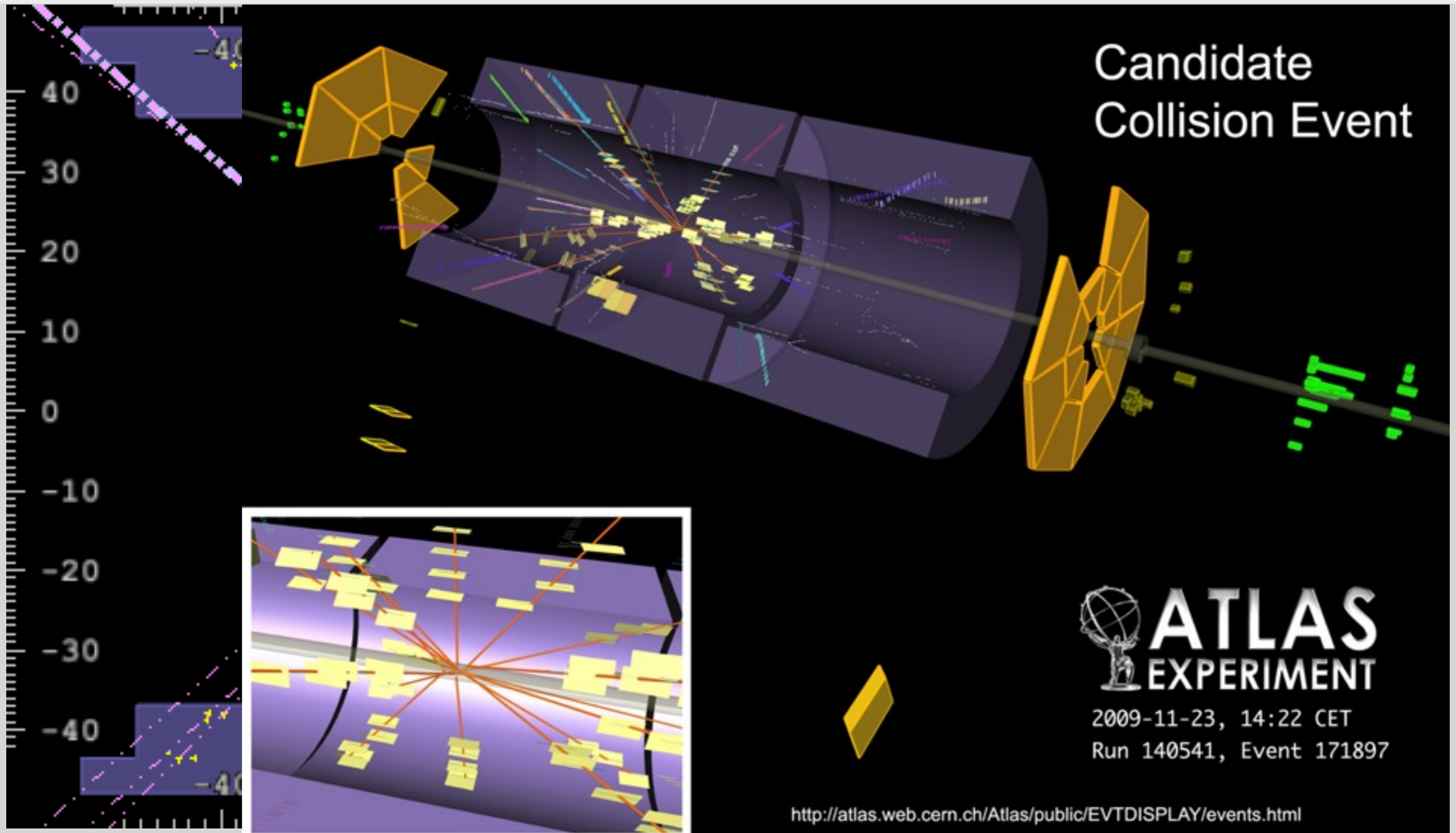


# os primeiros eventos

# ↻ os primeiros eventos



# os primeiros eventos



# os primeiros eventos

Candidate Collision Event

cmsShow: rfile:///castor/cern.ch/cms/store/temp/express/BeamCommissioning09/ExpressPhysics/FEVT/v2/000/122/314/7AAB2A4D-5ED8-DE1

File Edit View Window Help

Delay 3.0s Run 122314 Event 15145452 Mon Nov 23 19:20:55 2009 CEST Lumi block id: 25

Event Filtering is OFF

TIREWORKS

Summary View

Add Collection

- ECal
- HCal
- Jets
- Tracks

|          | pt  | eta  | phi  |
|----------|-----|------|------|
| Track 0  | 4.9 | -0.2 | 0.3  |
| Track 1  | 5.0 | -0.1 | 0.2  |
| Track 2  | 3.7 | -0.8 | 0.3  |
| Track 3  | 4.0 | -0.7 | 0.3  |
| Track 4  | 4.6 | -0.4 | 0.6  |
| Track 5  | 4.8 | -0.3 | 0.6  |
| Track 6  | 4.9 | -0.2 | 1.0  |
| Track 7  | 5.0 | -0.1 | 1.1  |
| Track 8  | 4.4 | -0.5 | 1.1  |
| Track 9  | 3.0 | -1.1 | 1.1  |
| Track 10 | 3.0 | -1.1 | 1.0  |
| Track 11 | 5.0 | -0.1 | 1.2  |
| Track 12 | 4.1 | -0.7 | 1.5  |
| Track 13 | 3.6 | -0.9 | 2.6  |
| Track 14 | 4.9 | -0.2 | -2.3 |
| Track 15 | 3.5 | 0.9  | 0.4  |
| Track 16 | 3.7 | 0.8  | 0.7  |
| Track 17 | 5.0 | 0.1  | 0.8  |
| Track 18 | 3.6 | 0.8  | 0.9  |
| Track 19 | 4.3 | 0.6  | 1.4  |
| Track 20 | 4.6 | 0.4  | 1.6  |
| Track 21 | 3.0 | 1.1  | 1.9  |
| Track 22 | 4.6 | 0.4  | 2.3  |
| Track 23 | 3.6 | 0.9  | -2.0 |
| Track 24 | 2.8 | 1.2  | -0.1 |

- Muons
- Electrons
- Vertices
- DT-segments
- CSC-segments
- Photons
- MET
- sStripClusters

Rho Phi

Rho Z

3D

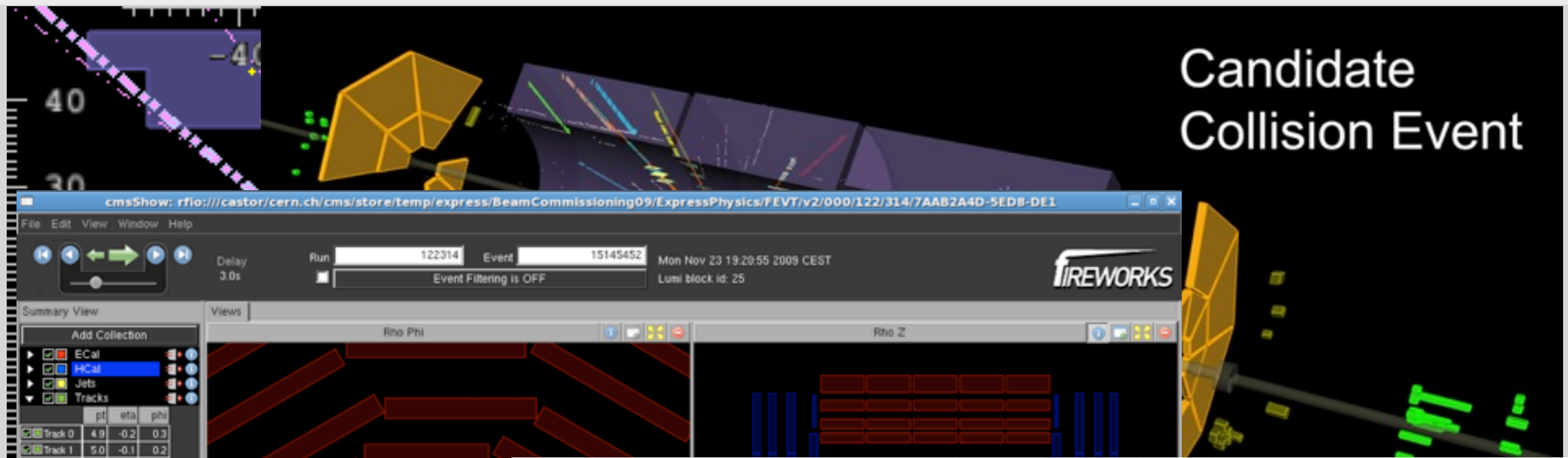
ATLAS EXPERIMENT

2009-11-23, 14:22 CET  
Run 140541, Event 171897

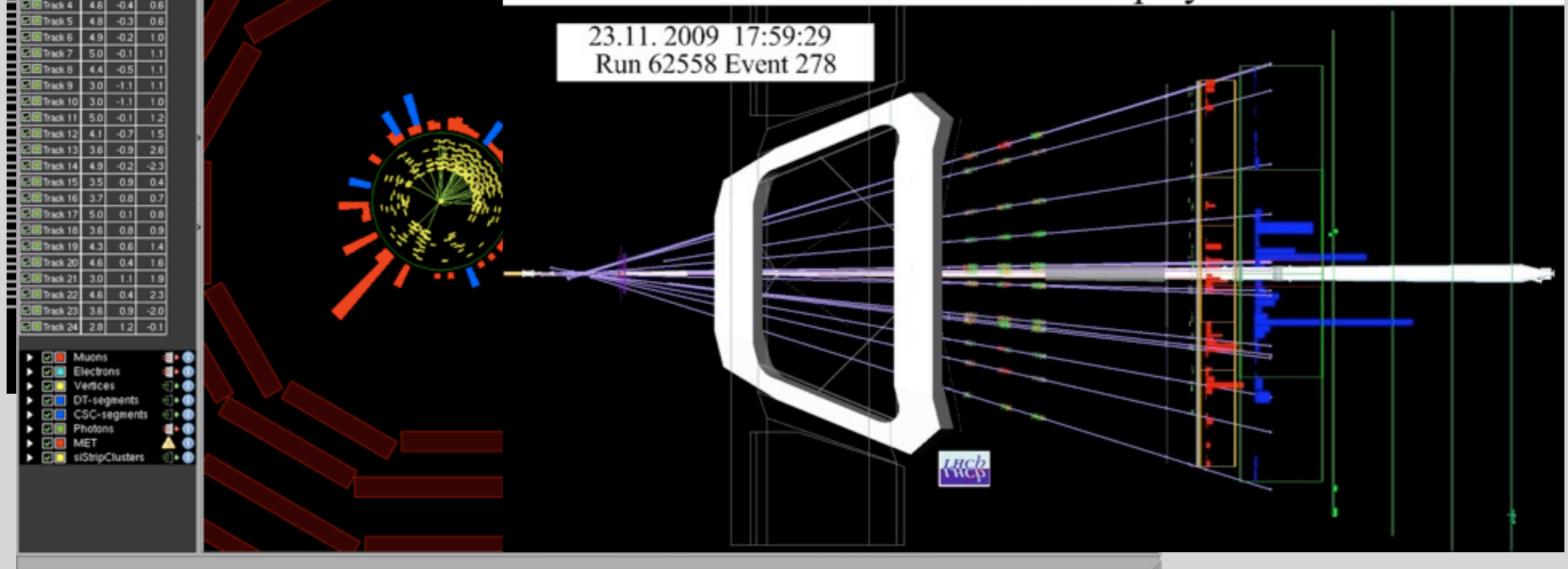
EVTDISPLAY/events.html

CMS

# os primeiros eventos



## LHCb Event Display



# First proton–proton collisions at the LHC as observed with the ALICE detector: measurement of the charged-particle pseudorapidity density at $\sqrt{s} = 900$ GeV

The ALICE Collaboration

K. Aamodt<sup>78</sup>, N. Abel<sup>43</sup>, U. Abeysekera<sup>30</sup>, A. Abrahantes Quintana<sup>42</sup>, A. Acero<sup>63</sup>, D. Adamová<sup>86</sup>, M.M. Aggarwal<sup>25</sup>,  
G. Aglieri Rinella<sup>40</sup>, A.G. Agocs<sup>18</sup>, S. Aguilar Salazar<sup>66</sup>, Z. Ahammed<sup>55</sup>, A. Ahmad<sup>2</sup>, N. Ahmad<sup>2</sup>, S.U. Ahn<sup>50,b</sup>,  
R. Akimoto<sup>100</sup>, A. Akindinov<sup>68</sup>, D. Aleksandrov<sup>70</sup>, B. Alessandro<sup>102</sup>, R. Alfaro Molina<sup>66</sup>, A. Alici<sup>13</sup>,  
E. Almaráz Aviña<sup>66</sup>, J. Alme<sup>8</sup>, T. Alt<sup>43,c</sup>, V. Altini<sup>5</sup>, S. Altinpinar<sup>32</sup>, C. Andrei<sup>17</sup>, A. Andronic<sup>32</sup>, G. Anelli<sup>40</sup>,  
V. Angelov<sup>43,c</sup>, C. Anson<sup>27</sup>, T. Antičić<sup>113</sup>, F. Antinori<sup>40,d</sup>, S. Antinori<sup>13</sup>, K. Antipin<sup>37</sup>, D. Antończyk<sup>37</sup>, P. Antonioli<sup>14</sup>,  
A. Anzo<sup>66</sup>, L. Aphecetche<sup>73</sup>, H. Appelshäuser<sup>37</sup>, S. Arcelli<sup>13</sup>, R. Arceo<sup>66</sup>, A. Arend<sup>37</sup>, N. Armesto<sup>92</sup>, R. Arnaldi<sup>102</sup>,  
T. Aronsson<sup>74</sup>, I.C. Arsene<sup>78,e</sup>, A. Asryan<sup>98</sup>, A. Augustinus<sup>40</sup>, R. Averbeck<sup>32</sup>, T.C. Awes<sup>76</sup>, J. Äystö<sup>49</sup>, M.D. Azmi<sup>2</sup>,

[...]

<sup>111</sup>Hua-Zhong Normal University, Wuhan, China

<sup>112</sup>Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia

<sup>113</sup>Rudjer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

Received: 28 November 2009 / Revised: 1 December 2009 / Published online: 11 December 2009

© CERN 2009. This article is published with open access at Springerlink.com

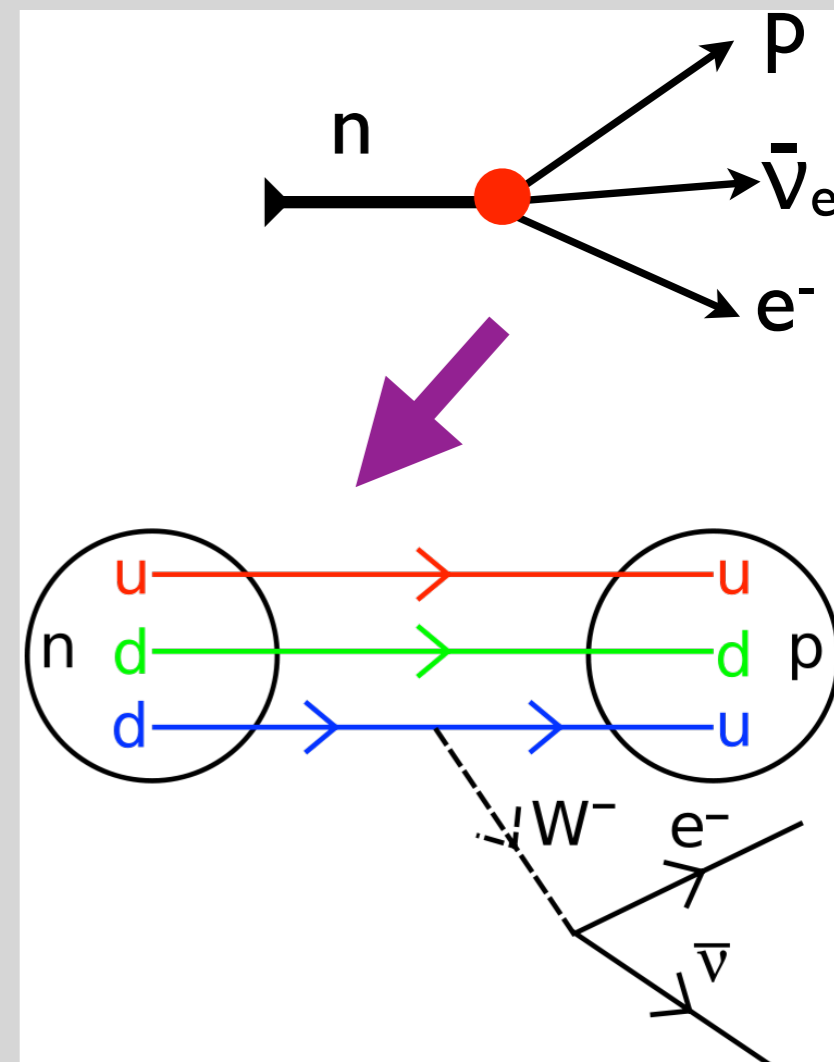
# #2 mecanismo de Higgs

# unificação das interacções fundamentais

- Electricidade e Magnetismo [Maxwell 1873]
- interacção fraca [Fermi 1934]
  - ↪ não renormalizável [divergente a altas energias]
- invariância de gauge [Yang & Mills 1954]
  - ↪ 1930-60 :: procura de teorias de gauge que unifiquem as interacções EM e fraca
    - simetria  $SU(2) \otimes U(1)$  [Glashow 1961]
    - quebra espontânea [Weinberg & Salam 1967]

○ bosões de gauge [mediadores da interacção]  
com massa nula [Goldstone] :: forças de alcance infinito

- forma [a mais simples] de atribuir massa aos bosões de gauge [1964]



**Modelo Padrão Electro-fraco [SM]**

**mecanismo de Englert–Brout–Higgs–Guralnik–Hagen–Kibble**



# 1964

---

VOLUME 13, NUMBER 9

PHYSICAL REVIEW LETTERS

31 AUGUST 1964

---

**BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS\***

**F. Englert and R. Brout**

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

---

**BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS**

**Peter W. Higgs**

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

único a mencionar que o mecanismo implica a existência de pelo menos um bóson escalar

VOLUME 13, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

16 NOVEMBER 1964

---

**GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES\***

**G. S. Guralnik,<sup>†</sup> C. R. Hagen,<sup>‡</sup> and T. W. B. Kibble**

Department of Physics, Imperial College, London, England

(Received 12 October 1964)

# quebra espontânea de simetria

—o exemplo simples com dois campos escalares  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T}[\phi_1] + \mathcal{T}[\phi_2] - \mathcal{U}[\phi_1, \phi_2]$$

$$\mathcal{U}[\phi_1, \phi_2] = -\frac{1}{2}\mu^2(\phi_1^2 + \phi_2^2) + \frac{1}{4}\lambda^2(\phi_1^2 + \phi_2^2)^2$$

—o máximo:  $\Phi_1 = \Phi_2 = 0$

—o mínimo:  $(\Phi_1^2 + \Phi_2^2) = \mu^2/\lambda^2$

↪ temos de escolher um (e.g.  $\Phi_1 = \mu/\lambda; \Phi_2=0$ )

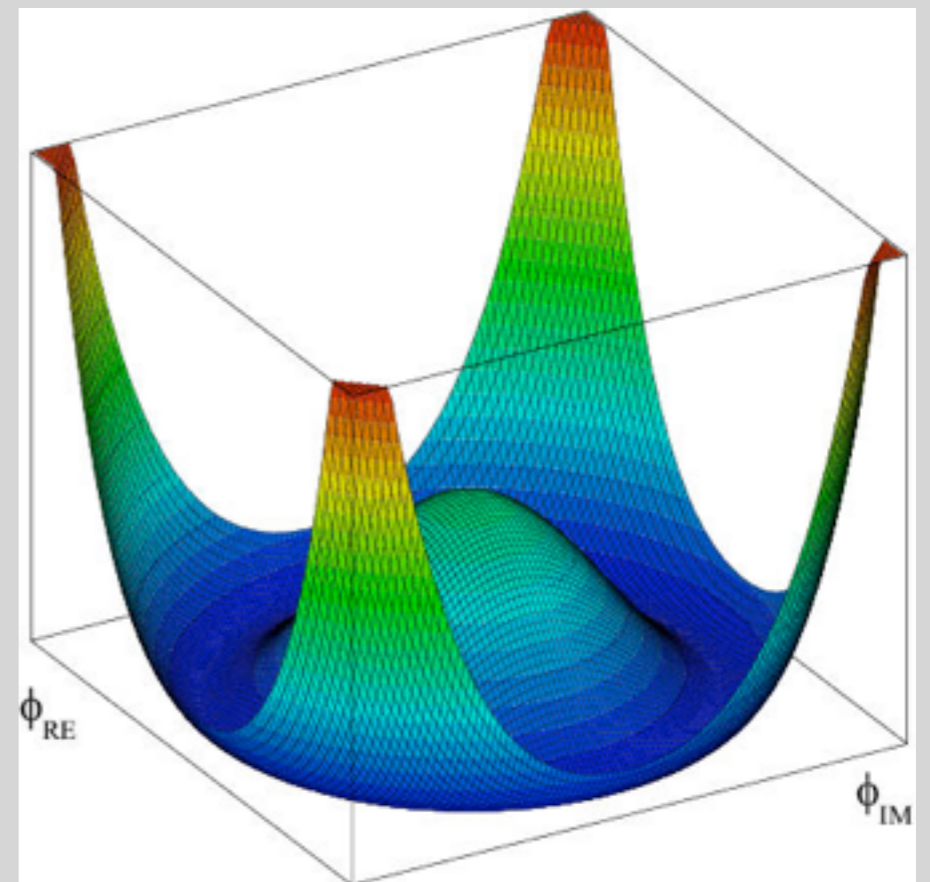
- quebra espontânea de simetria

- o vácuo não é invariante para as simetrias de L

↪ expandindo em torno do mínimo

$$\eta \equiv \phi_1 - \frac{\mu}{\lambda} \quad \xi \equiv \phi_2$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{T}[\eta] - \mu^2\eta^2 + \mathcal{T}[\xi] - 0 - \mu\lambda(\eta^3 + \eta\xi^2) - \frac{\lambda^2}{4}(\eta^4 + \xi^4 + 2\eta^2\xi^2) + \frac{\mu^4}{4\lambda^2}$$



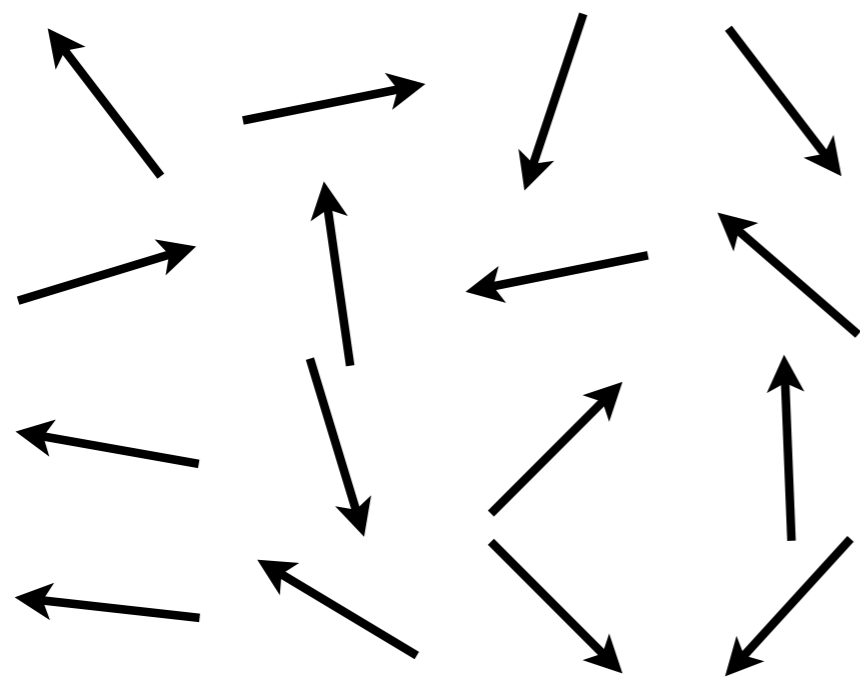
campo massivo

campo sem massa [Goldstone]

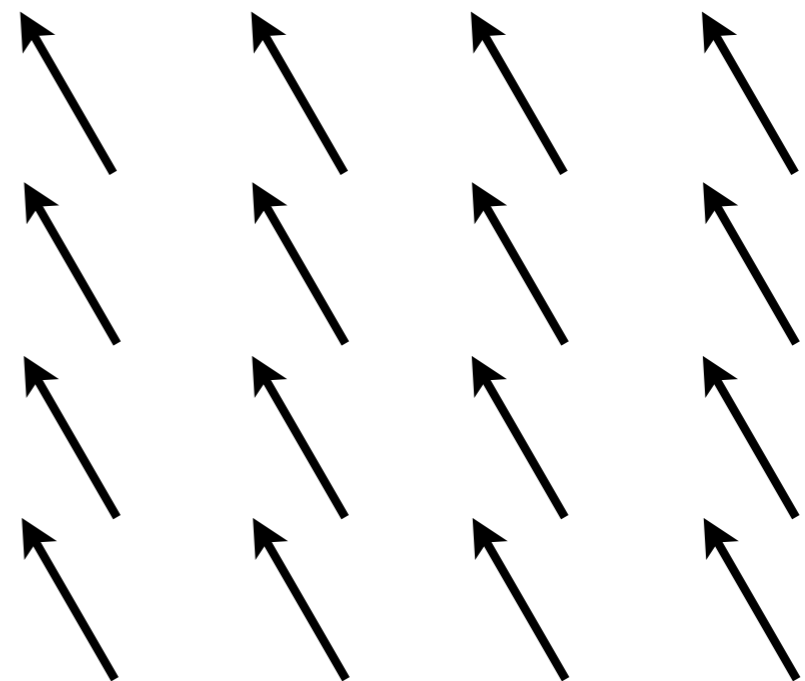
# quebra espontânea de simetria

---

- a quebra espontânea de simetria é um fenómeno *universal*
  - ↪ ocorre, por exemplo, num sistema de dipolos magnéticos



$T > T_c$



$T < T_c$

# o mecanismo de ... – Higgs – ...

---

—o teoria de gauge [ou seja com uma simetria *local*] para um campo escalar complexo

↪ campo escalar  $\Phi = \phi_1 + i\phi_2$

↪ potencial de gauge  $A_\mu$  [necessariamente com  $m=0$ , transversal]

↪ simetria de gauge  $\Phi \rightarrow e^{-i\theta(x)} \Phi$

- $A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \theta(x)$ ;  $D_\mu \rightarrow \partial_\mu + iqA_\mu$ ;  $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(D_\mu \phi)^*(D^\mu \phi) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\mu^2 \phi^* \phi - \frac{1}{4}\lambda^2 (\phi^* \phi)^2$$

- expandindo em torno do mínimo

$$\eta \equiv \phi_1 - \frac{\mu}{\lambda} \quad \xi \equiv \phi_2 \rightarrow 0 \quad (\theta = \arctan(\phi_2/\phi_1))$$

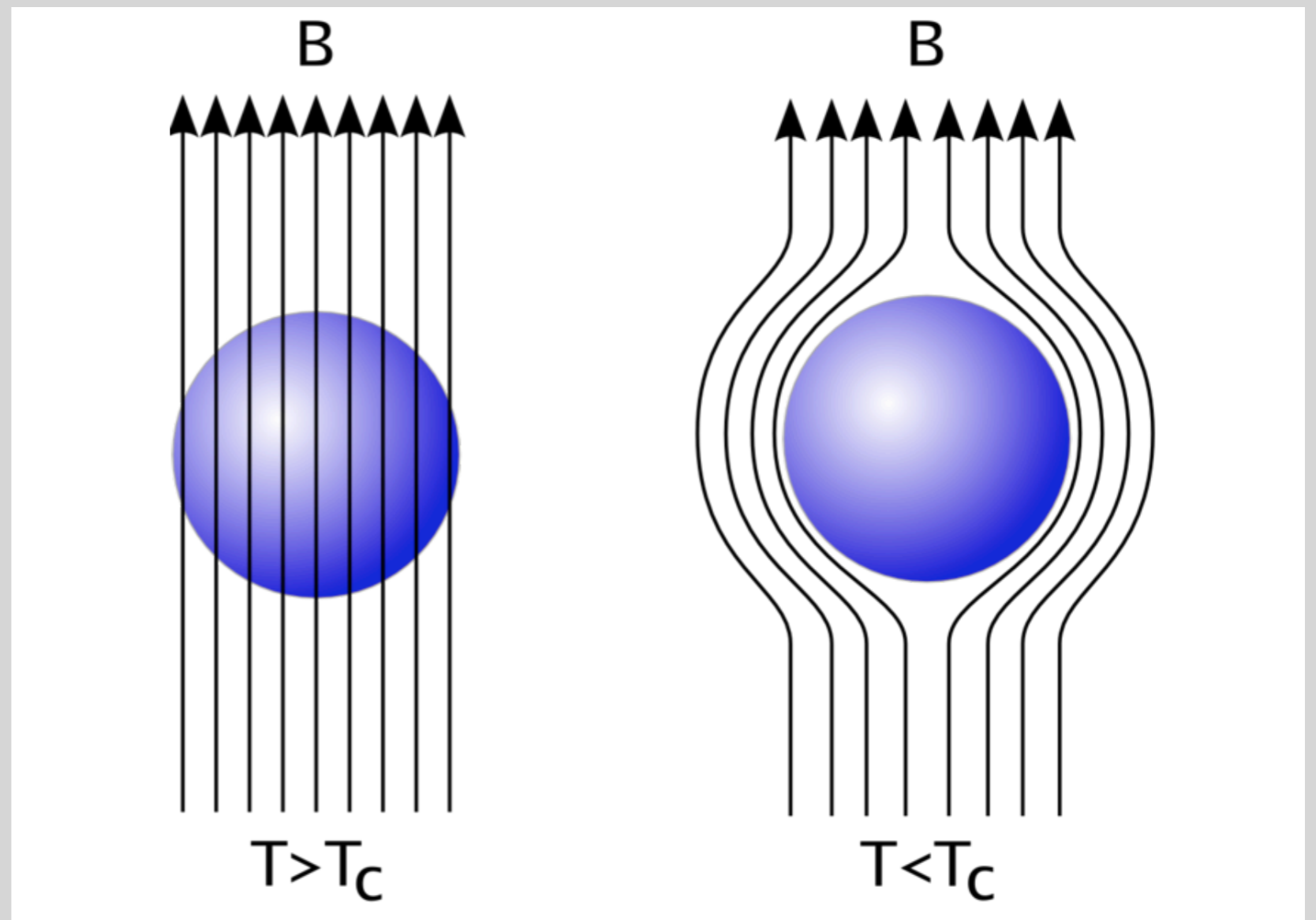
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \eta)^*(\partial^\mu \eta) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \mu^2 \eta^2 + \frac{q^2 \mu^2}{2\lambda^2} A_\mu A^\mu + \mathcal{O}(3)$$

bosão massivo [Higgs]

massa para o bosão de gauge  
[polarização longitudinal]

# [em supercondutores]

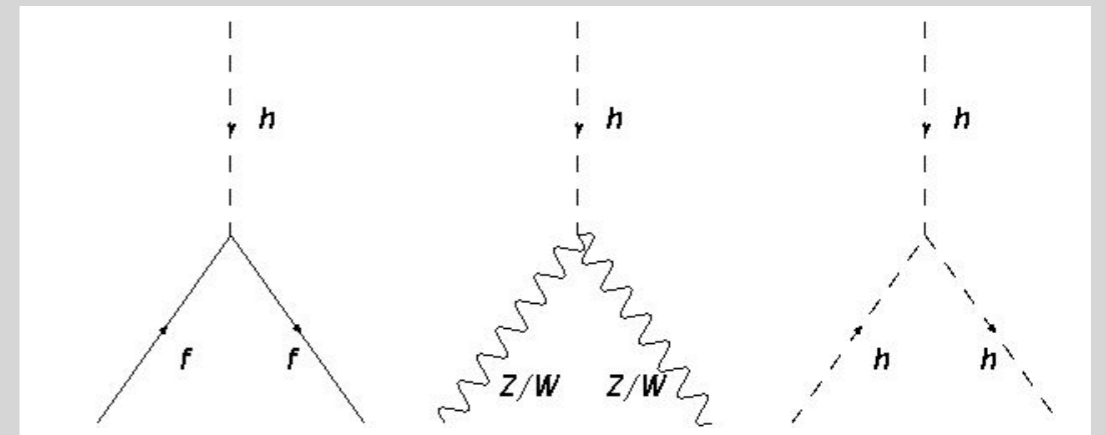
- o explicação [Ginzburg-Landau] do efeito de Meissner
  - ↪ o fóton adquire uma massa efectiva e penetração do campo no superconductor tem um alcance  $1/m$



# no modelo standard

- no Modelo Standard o mecanismo de Higgs [quebra espontânea de simetria de gauge  $SU(2) \otimes U(1) \rightarrow U(1)$ ] com um potencial quártico [renormalizável]
  - ↪ dá massa aos portadores da força fraca [ $Z^0, W^\pm$ ]
  - ↪ deixa o portador da interacção electromagnética [ $\gamma$ ] sem massa
  - ↪ acrescenta
    - uma partícula escalar massiva [bosão de Higgs]
    - dois parâmetros [ $\mu/\lambda$  : valor esperado do vácuo;  $\mu$  : massa do Higgs]
- ↪ permite escrever termos de massa [sem quebrar a invariância de gauge] para fermiões [leptões e quarks] como acoplamentos ao campo de Higgs

$$\mathcal{L}_{int} = -\alpha_f \bar{\psi}_f \psi_f \phi \implies m_f = \alpha_f (\mu/\lambda)$$



# modelo standard

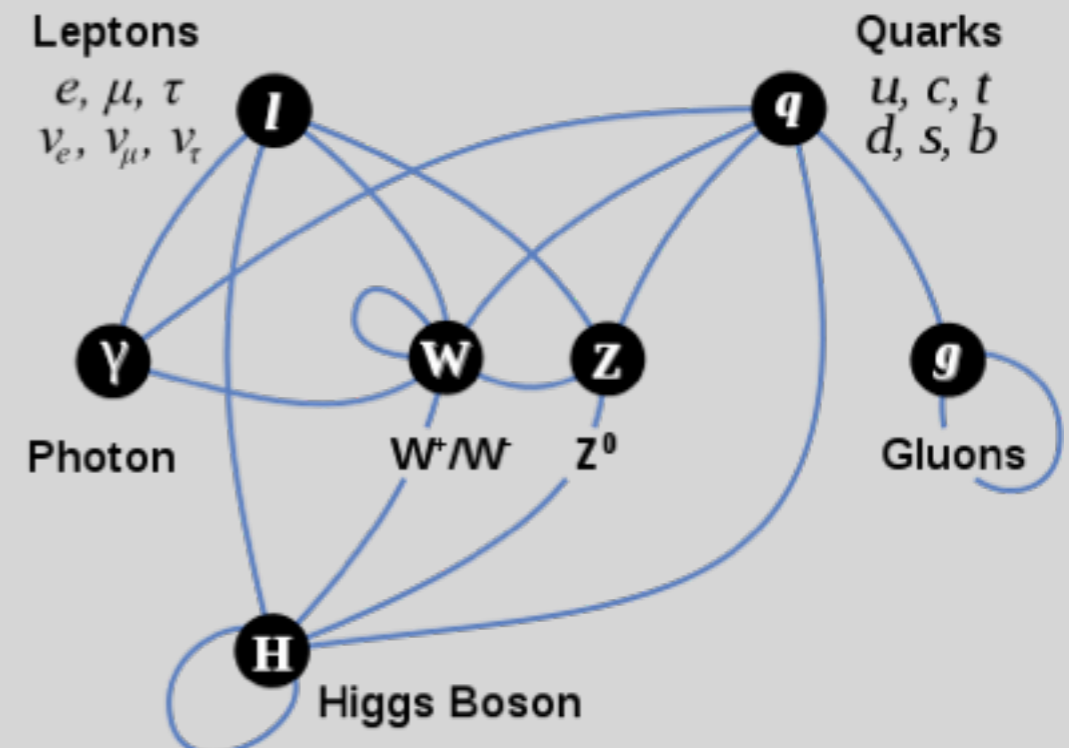
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$

| THE STANDARD MODEL |   |                                       |                                      |                       |                     |  |
|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|--|
|                    | Fermions                                  |                                       |                                      | Bosons                |                     |  |
| Quarks             | <b>u</b><br>up                            | <b>c</b><br>charm                     | <b>t</b><br>top                      | <b>Force carriers</b> | <b>γ</b><br>photon  |  |
|                    | <b>d</b><br>down                          | <b>s</b><br>strange                   | <b>b</b><br>bottom                   |                       | <b>Z</b><br>Z boson |  |
| Leptons            | <b>ν<sub>e</sub></b><br>electron neutrino | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>muon neutrino | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>tau neutrino |                       | <b>W</b><br>W boson |  |
|                    | <b>e</b><br>electron                      | <b>μ</b><br>muon                      | <b>τ</b><br>tau                      |                       | <b>g</b><br>gluon   |  |
|                    |   |                                       |                                      | <b>Higgs boson*</b>   |                     |  |

\*Yet to be confirmed

Source: AAAS

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{QCD} = & \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu (D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \\
 = & \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi_i - g G_\mu^a \bar{\psi}_i \gamma^\mu T_{ij}^a \psi_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}
 \end{aligned}$$



#3 descoberta do Higgs



# secções eficazes e luminosidade

---

- as colisões ocorrem entre feixes com um elevado número de partículas ['bunches' x 'particles per bunch']
- o número de colisões que conduzem a um determinado estado final

$$\sigma = \frac{(\text{Number of events}) \cdot \mathcal{A}}{N_A N_B}$$



*secção eficaz de scattering para um dado processo :: calculada para processos hipotéticos*

- se os feixes colidirem a uma dada frequência  $f$  (em Hz), o número de eventos [rate] de um dado tipo (por segundo)

$$R = L \cdot \sigma$$

$$L = \frac{N_A N_B f}{A}$$

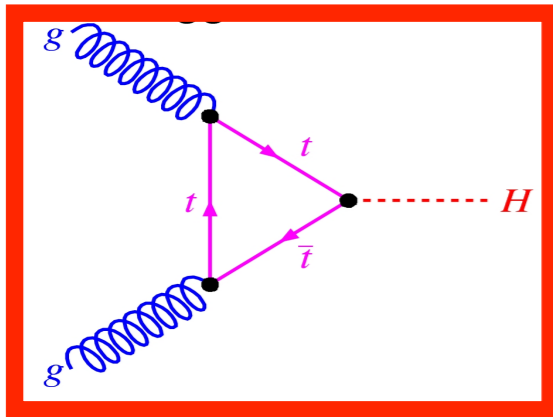


*luminosidade instantânea*

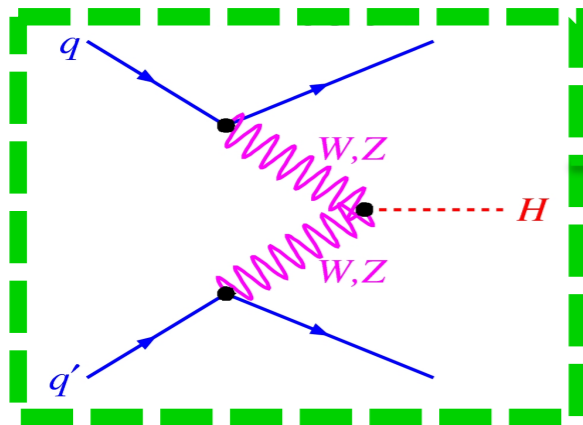
*:: o integral no tempo dá a luminosidade total, ou seja o número de eventos*

# produção do Higgs

## Gluon Fusion

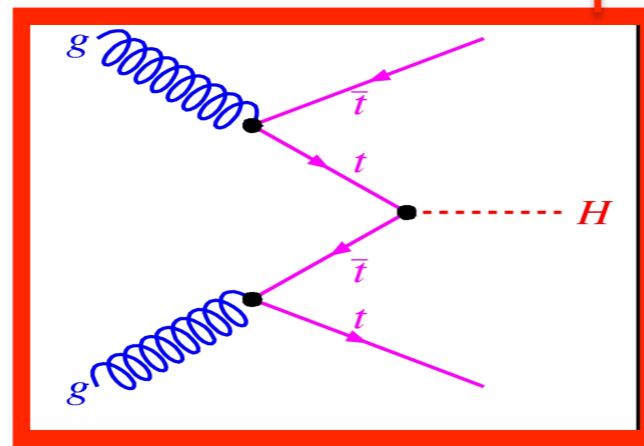
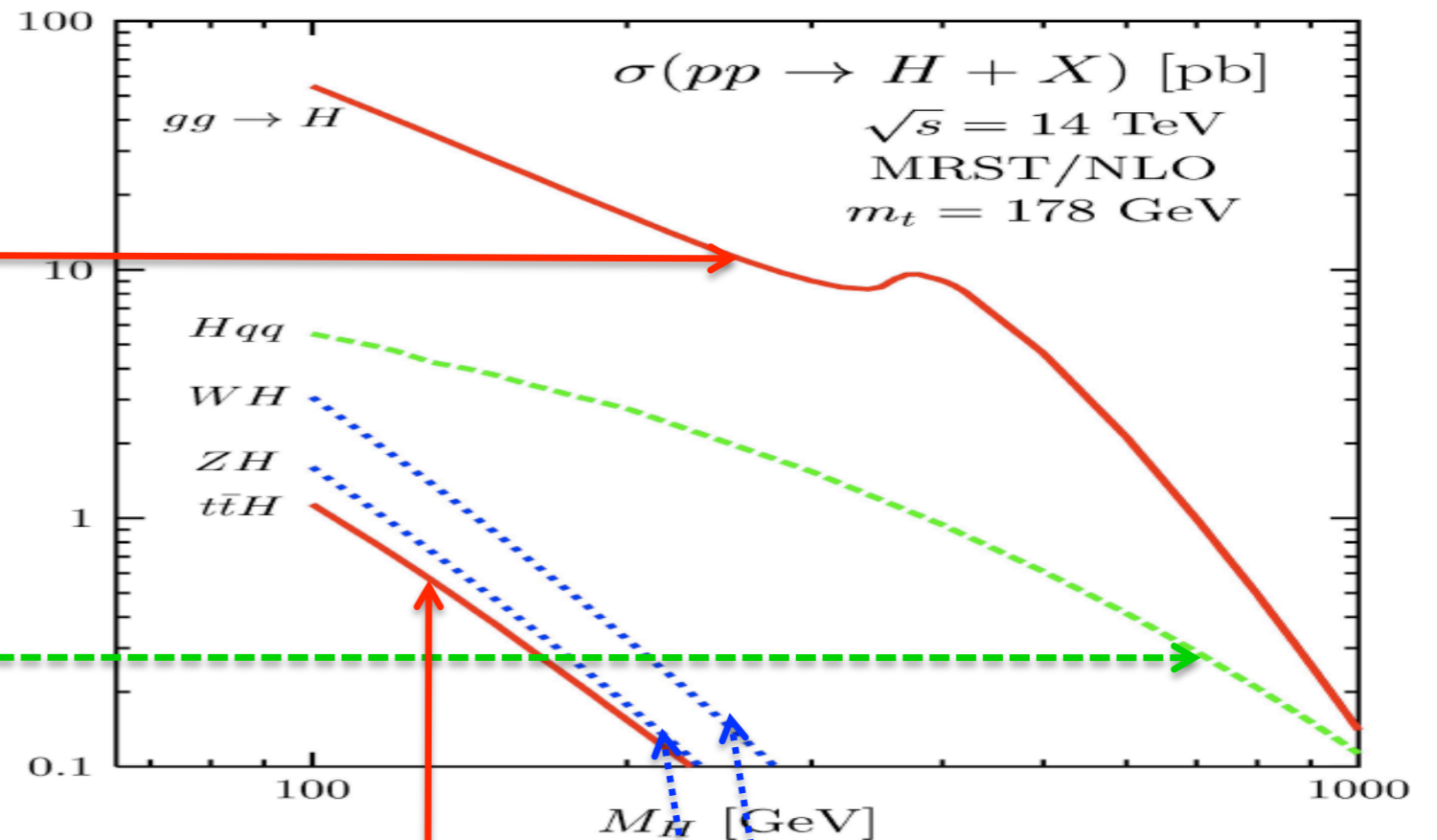


## Vector Boson Fusion

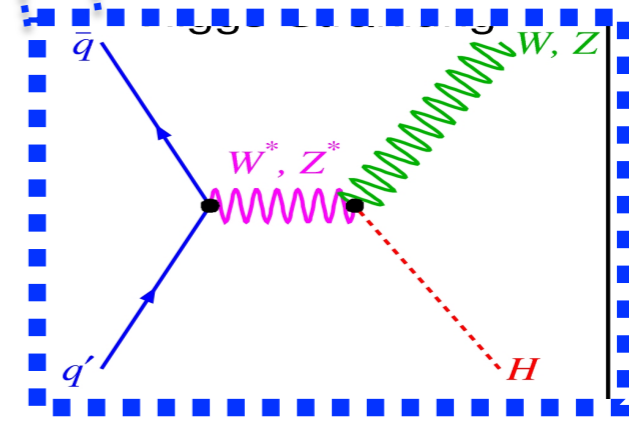


$$M_H = 120 \text{ GeV}/c^2$$

|      |             |
|------|-------------|
| gg   | ~38 pb      |
| VBF  | ~4 pb       |
| ttH  | ~0.7 pb     |
| W,ZH | ~1.6-0.9 pb |



Top Fusion



Associated to W/Z (Higgs-strahlung)

# estados finais do Higgs

o Higgs decai [quase] instantaneamente

para um Higgs leve a maior probabilidade de decaimento

- $H \rightarrow b \bar{b}$  [pertencem a jets]
- $H \rightarrow WW$
- $H \rightarrow ZZ$

outros canais importantes

- $H \rightarrow \gamma\gamma$  [excelente calorimetria]
- $H \rightarrow \tau\tau$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow WW \rightarrow e^{\mp} \nu_e \mu^{\pm} \nu_{\mu}$$

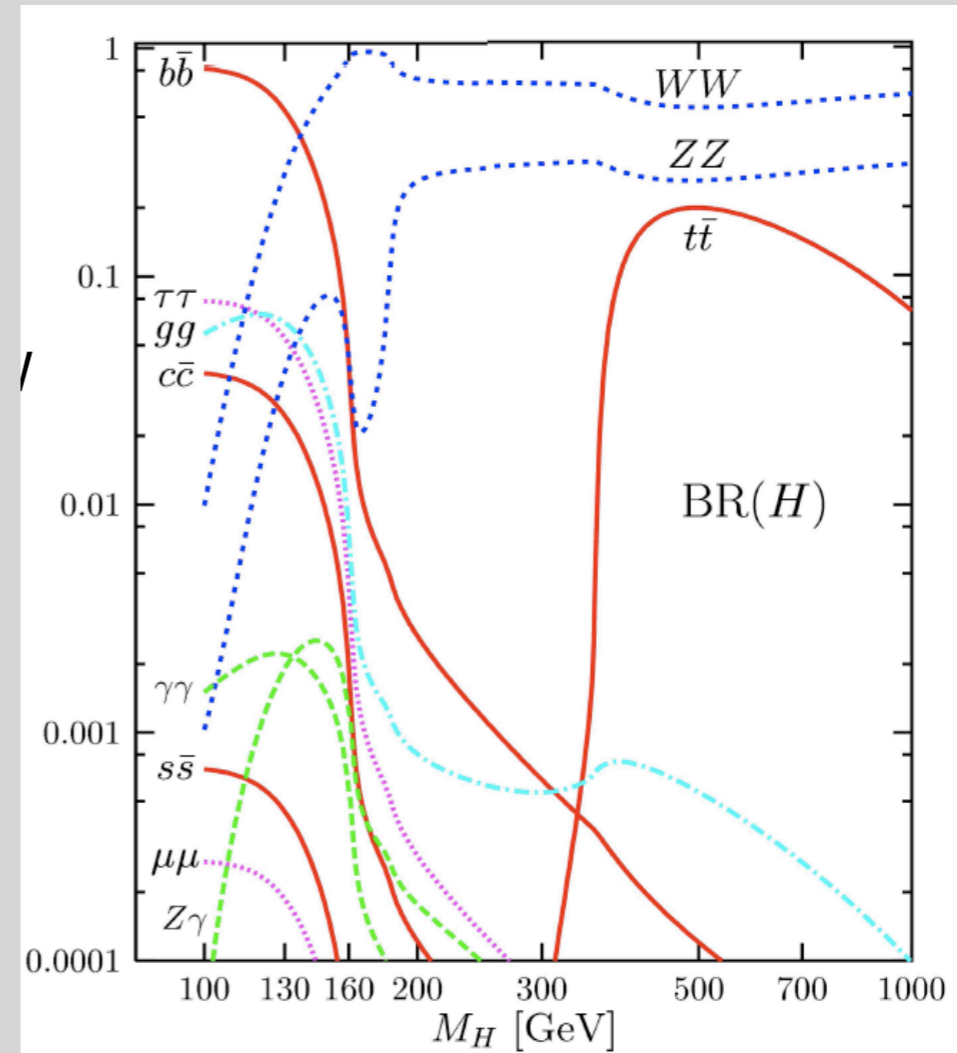
$$H \rightarrow WW \rightarrow e^{-} \bar{\nu}_e e^{+} \nu_e$$

$$H \rightarrow WW \rightarrow \mu^{-} \bar{\nu}_{\mu} \mu^{+} \nu_{\mu}$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^{+} e^{-} e^{+} e^{-}$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^{+} \mu^{-} \mu^{+} \mu^{-}$$

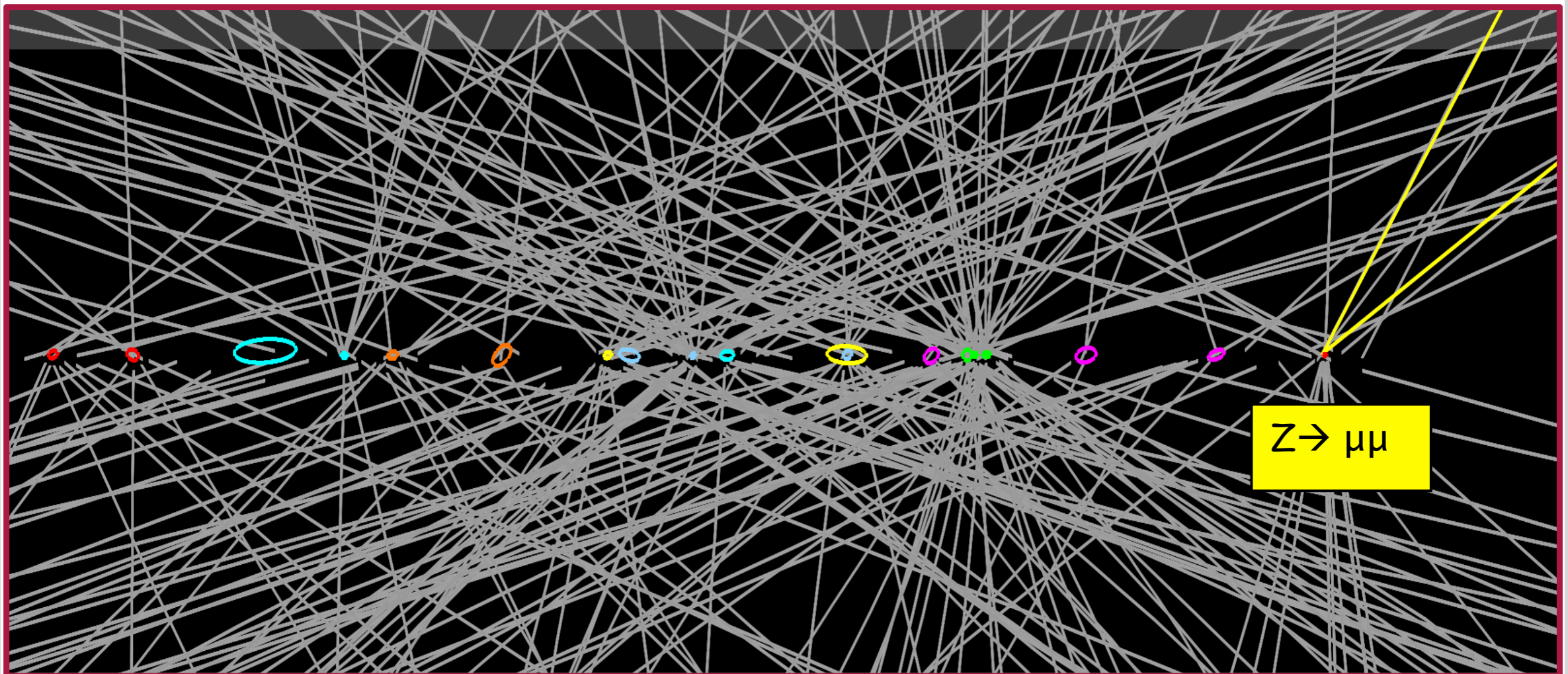
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^{+} \mu^{-} e^{+} e^{-}$$



# pile-up

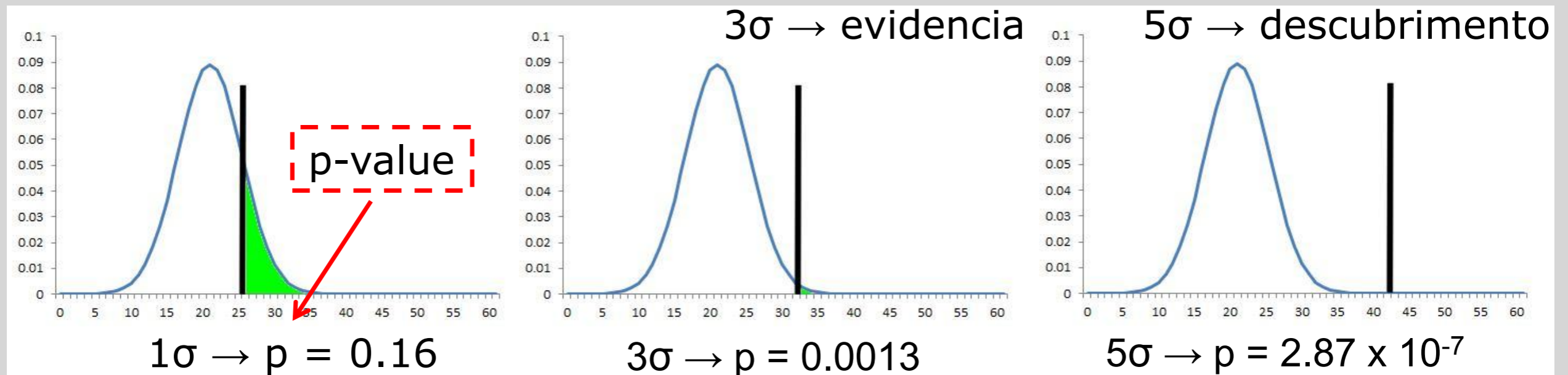
---

- um dos grandes desafios experimentais é lidar com a sobreposição de colisões
  - ↪ para aumentar a luminosidade
    - $10^{15}$  prótons a colidir a cada 50 ns
    - cada 'evento' é a sobreposição de aproximadamente 10 colisões inelásticas próton-próton



# significância estatística

- todos os estados finais do decaimento do Higgs podem ocorrer como resultado de outros processos do SM [background]
- uma descoberta não é feita com base na observação de um evento, mas sim como um desvio [excesso] em relação ao background
- flutuações estatísticas do background resultam localmente em desvios
- probabilidade de um dado desvio ser o resultado de uma flutuação [background gaussiano]



# exclusão e look-elsewhere-effect

---

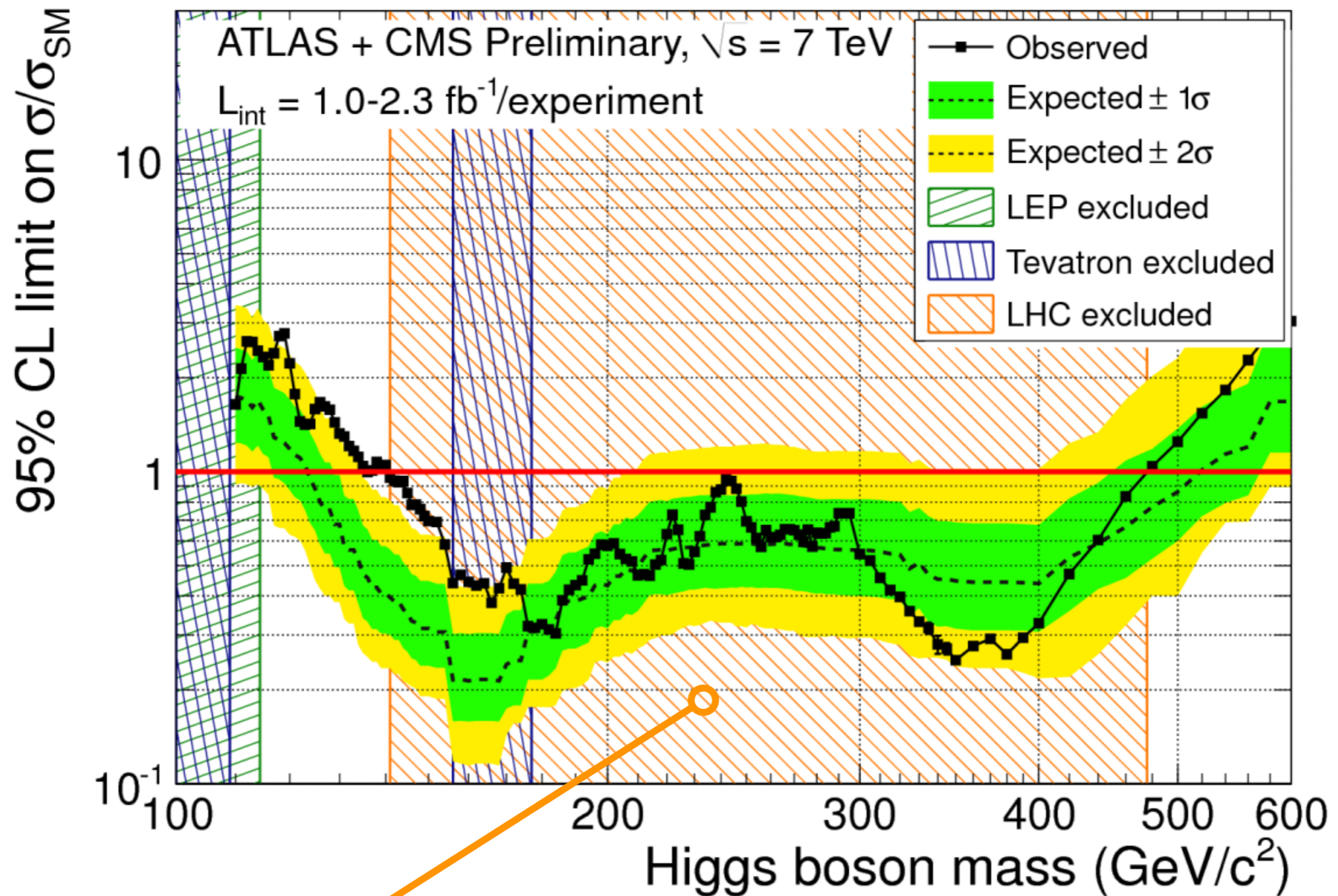
- para descobrir é necessário primeiro excluir
  - ↪ o primeiro sinal de uma possível descoberta é a impossibilidade de excluir
  - ↪ a capacidade de excluir depende da estatística [numero de eventos] disponível
- quanto maior é a região [neste caso de massas] para onde se olha, maior é a probabilidade de observar um desvio em algum sítio [look-elsewhere]
  - ↪ quem joga no totoloto durante um longo periodo de tempo, tem maiores probabilidades de ganhar um prémio qualquer pelo menos uma vez...
  - ↪ em buscas 'deslocalizadas' este efeito tem de ser tido em conta
    - reduz a significância estatística de um excesso local [magnitude do excesso/largura da região de busca]

# 13 Dezembro 2011

---



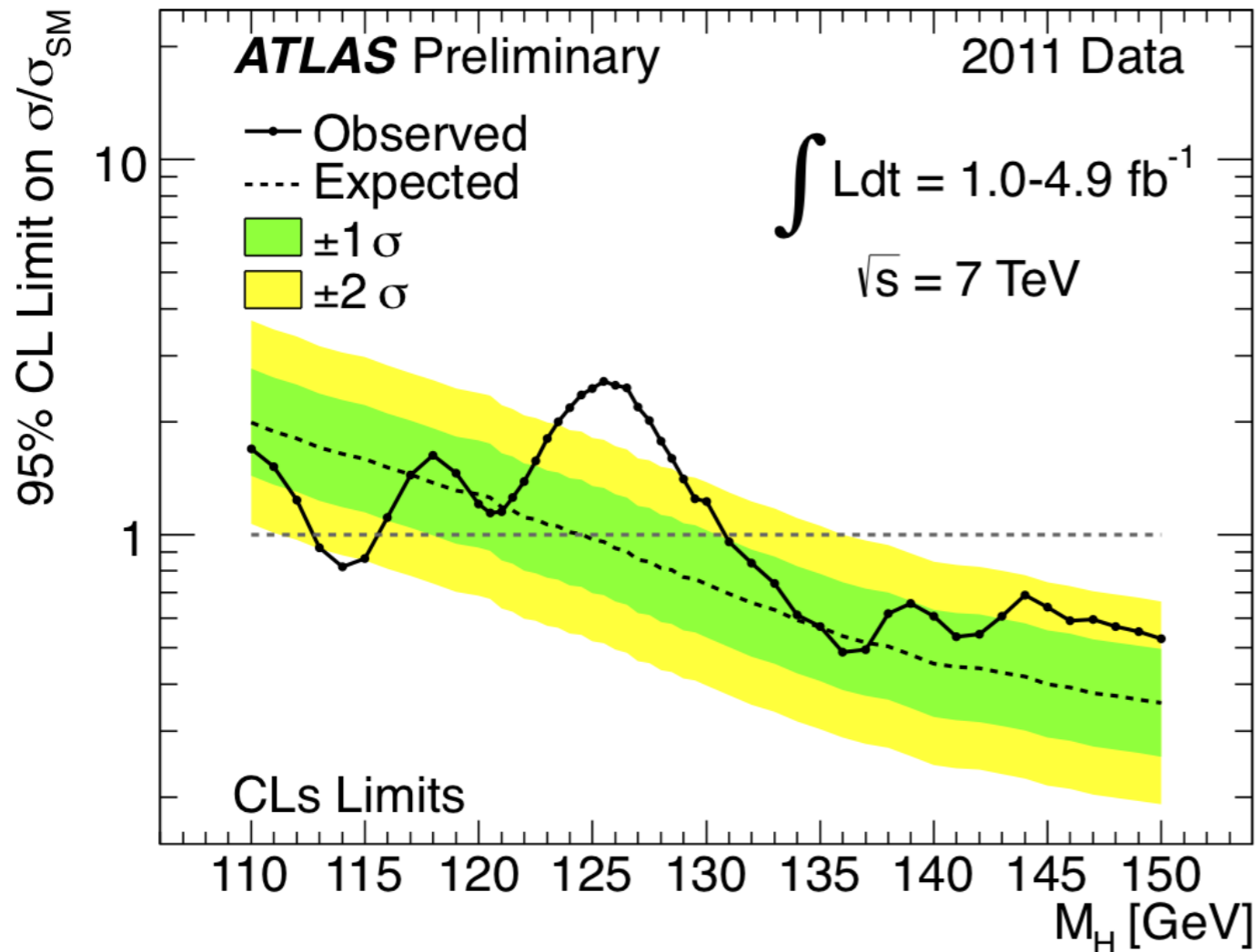
# 13 Dezembro 2011



dois anos de LHC

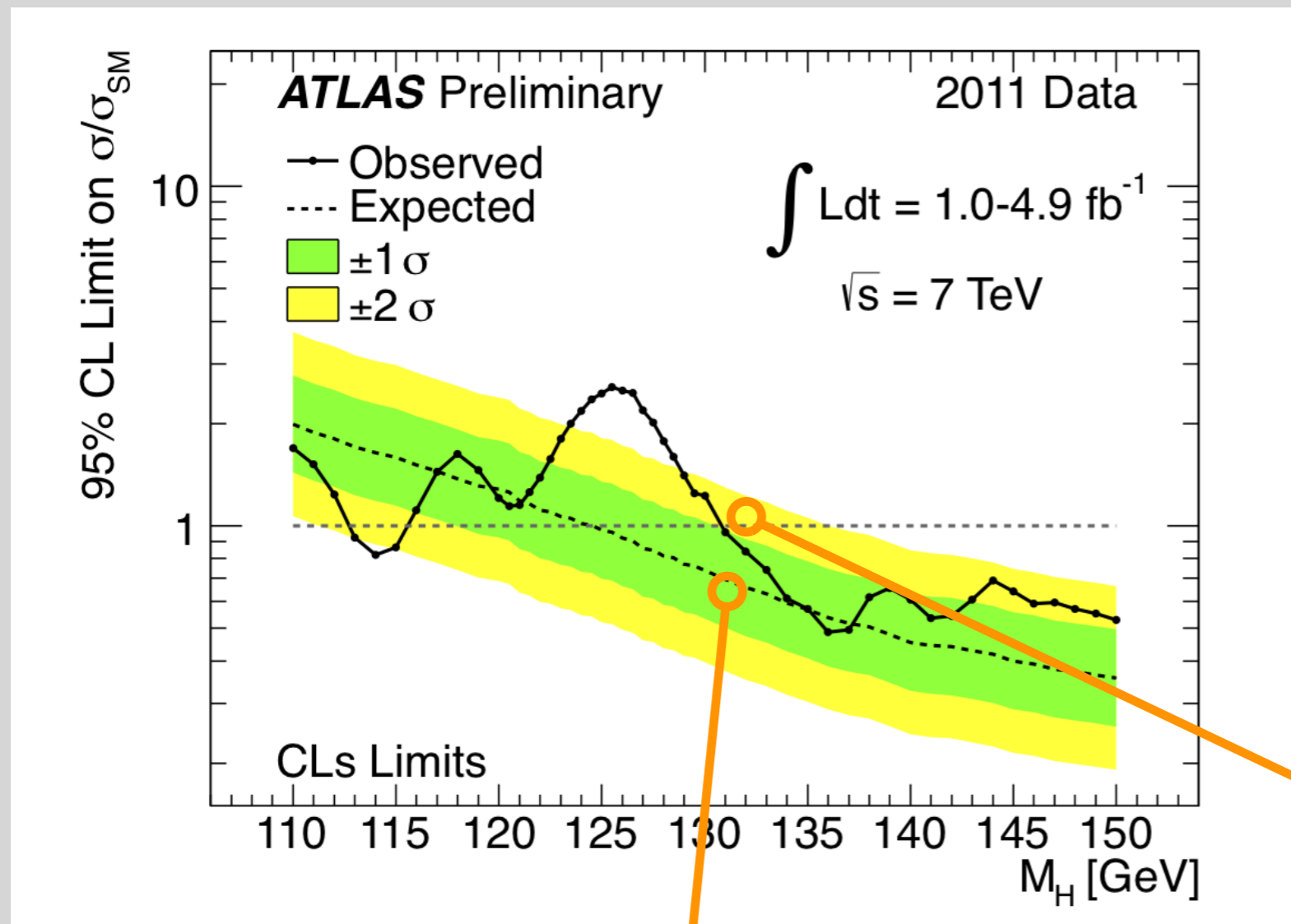


# exclusion plots



- eixo vertical : exclusão a 95% CL
- linha tracejada : sem Higgs [bandas de 68% e 95% CL]
- linha contínua : ratio entre a secção eficaz que se exclui e a secção eficaz esperada no SM para um Higgs dessa massa

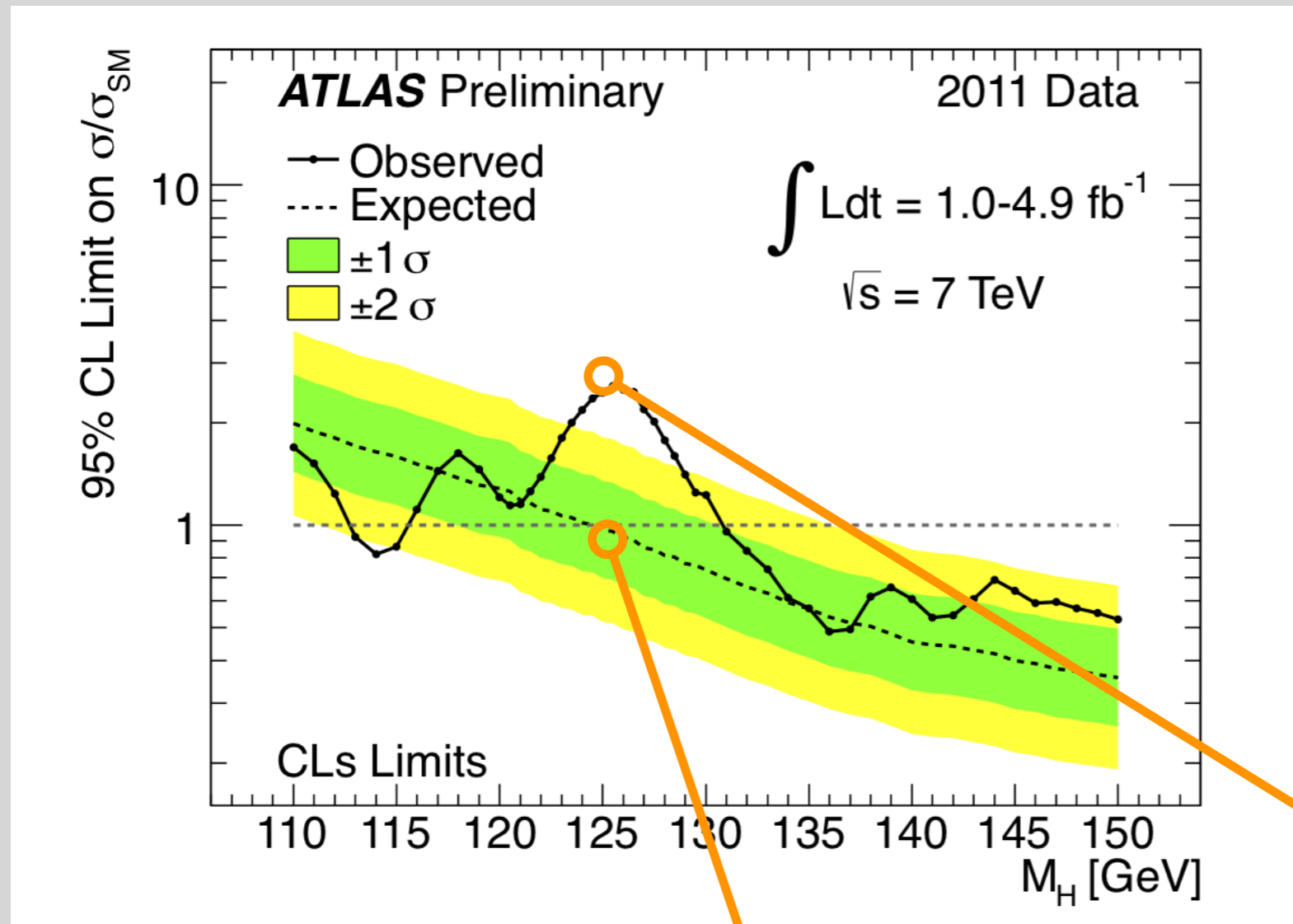
# exclusion plots



—○ para  $m_H = 130 \text{ GeV}$

↪ esperava-se excluir 0.7 da secção eficaz MAS excluiu-se apenas a secção eficaz

# exclusion plots



—○ para  $m_H = 125 \text{ GeV}$

↪ esperava-se excluir a secção eficaz MAS excluiu-se apenas o triplo

↪ a incapacidade de exclusão indica a possibilidade de um sinal físico

- significância local  $3.6\sigma$  :: [LSE]  $2.3\sigma$  :: p-value 1% [prob se ser uma flutuação]

# 2012

---

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV} \rightarrow \sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$$

:: ganho nas secções eficazes de produção

aumento da luminosidade instantânea

:: sucesso na análise de high pile-up events

como sempre as análises são 'cegas' até ao fim...

# 4 Julho 2012 [madrugada]

---



estes entraram

# 4 Julho 2012 [madrugada]

---



estes entraram

estes NÃO

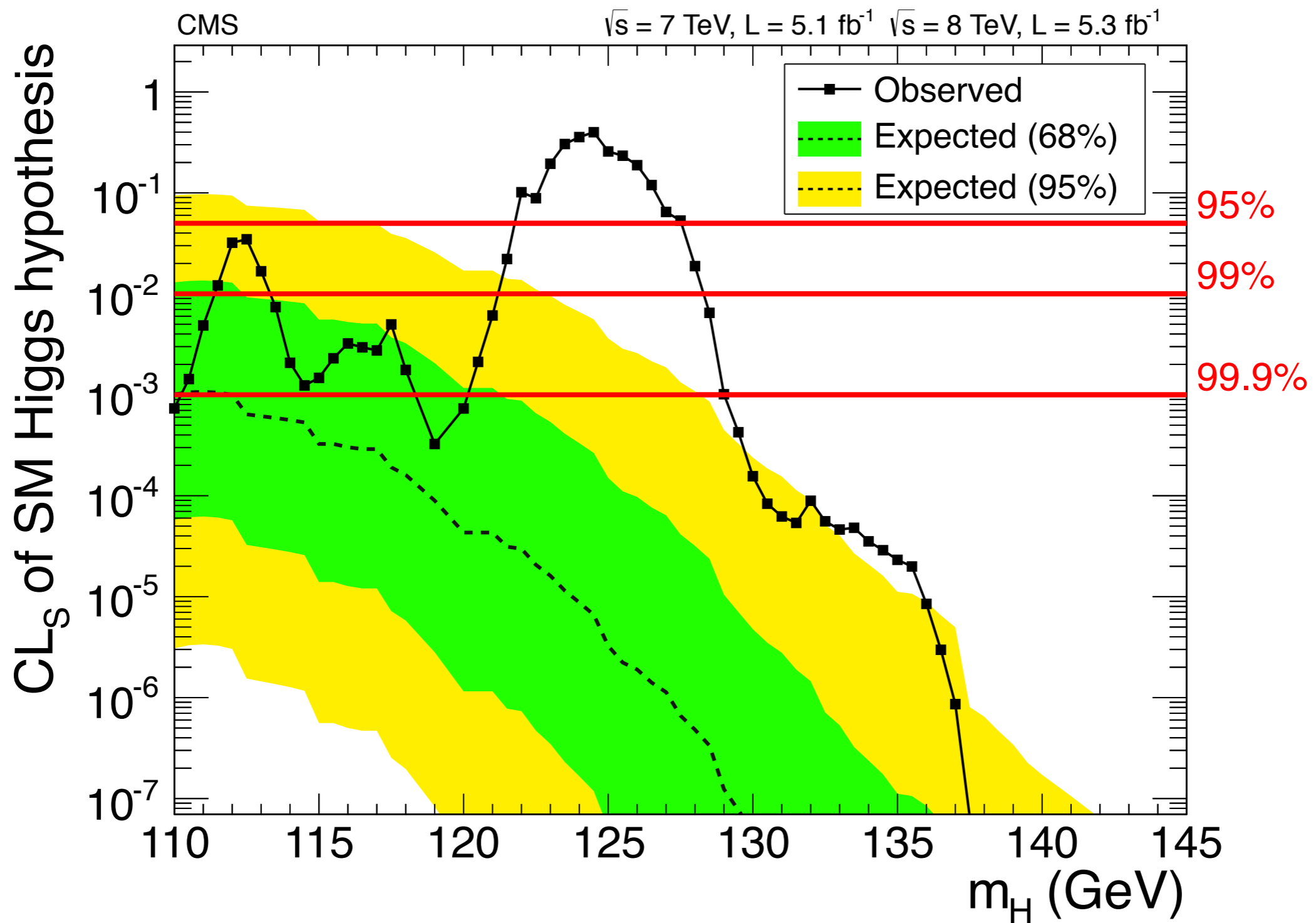


4 Julho 2012 [8h00]

---

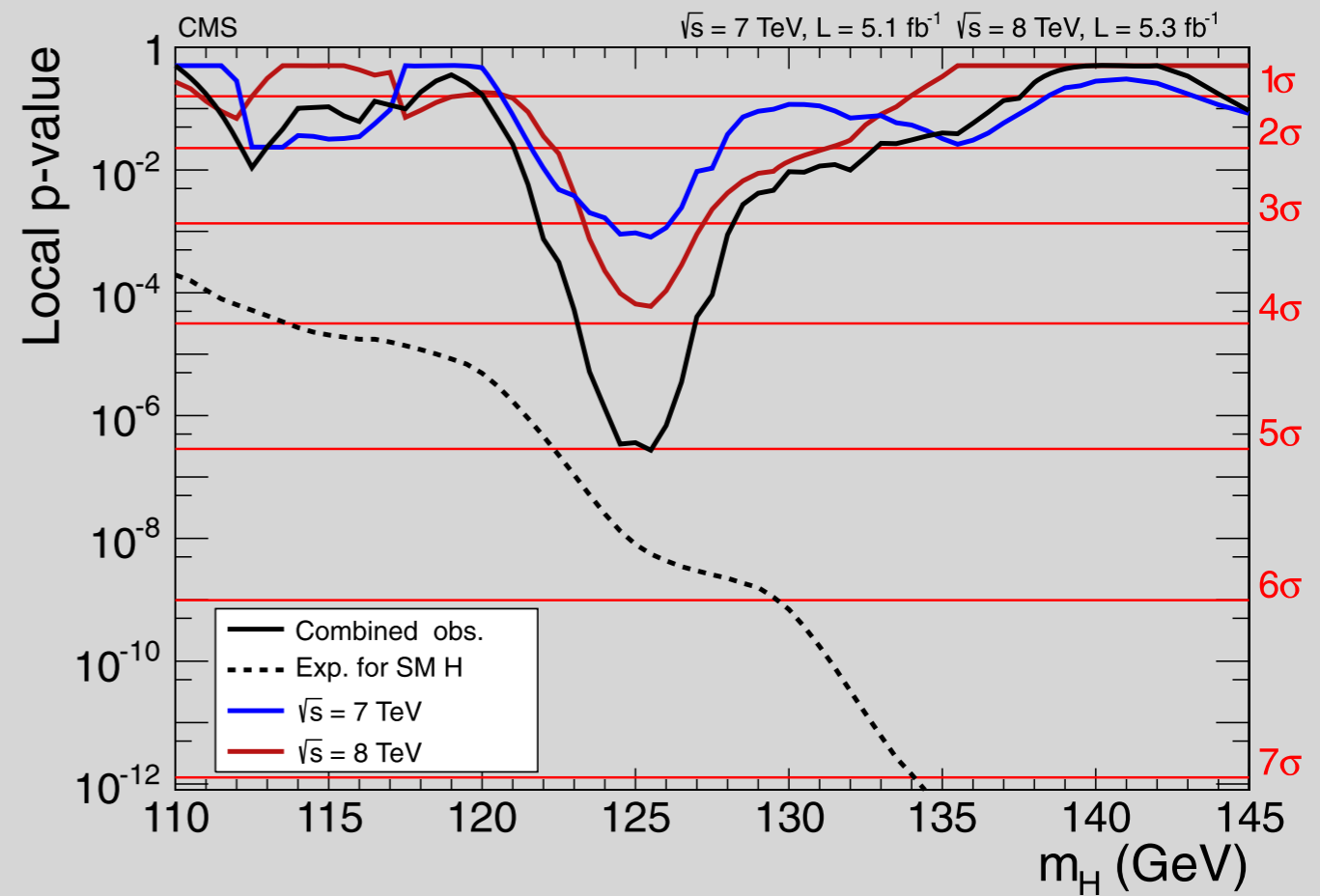
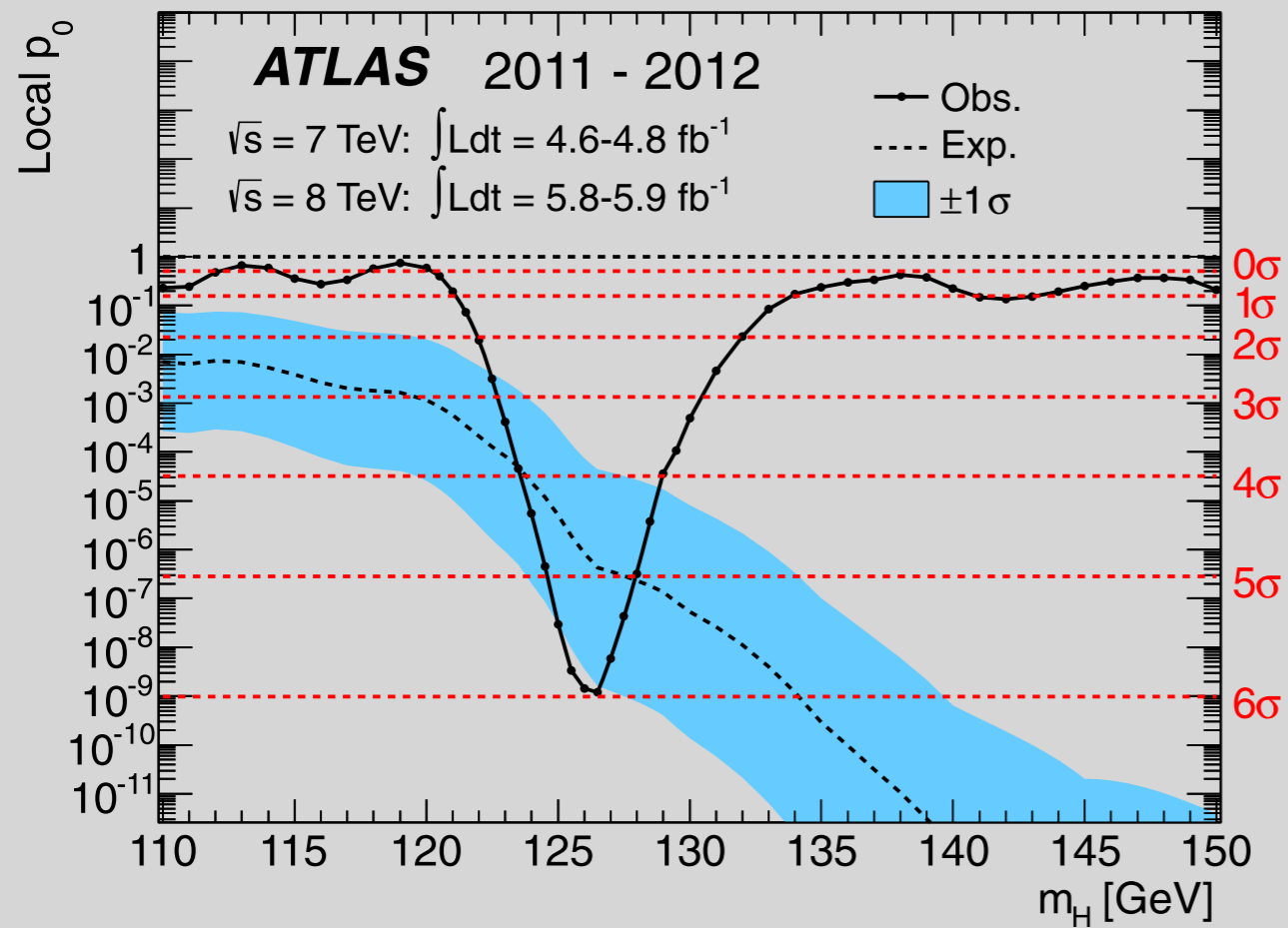


# exclusion plot





# p-values



# o que vai ficar para a História [Phys Lett B]

## Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC <sup>☆</sup>

### ATLAS Collaboration <sup>☆</sup>

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 31 July 2012  
Received in revised form 8 August 2012  
Accepted 11 August 2012  
Available online 14 August 2012  
Editor: W.-D. Schlatter

#### ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately  $4.8 \text{ fb}^{-1}$  collected at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  in 2011 and  $5.8 \text{ fb}^{-1}$  at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  in 2012. Individual searches in the channels  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$  in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for  $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ ,  $WW^{(*)}$ ,  $b\bar{b}$  and  $\tau^+\tau^-$  in the 7 TeV data and results from improved analyses of the  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of  $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)} \text{ GeV}$  is presented. This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of  $1.7 \times 10^{-9}$ , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

## Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC <sup>☆</sup>

### CMS Collaboration <sup>☆</sup>

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 31 July 2012  
Received in revised form 9 August 2012  
Accepted 11 August 2012  
Available online 18 August 2012  
Editor: W.-D. Schlatter

##### Keywords:

CMS  
Physics  
Higgs

#### ABSTRACT

Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  at 7 TeV and  $5.3 \text{ fb}^{-1}$  at 8 TeV. The search is performed in five decay modes:  $\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $W^+W^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ , and  $b\bar{b}$ . An excess of events is observed above the expected background, with a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV, signalling the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution,  $\gamma\gamma$  and  $ZZ$ ; a fit to these signals gives a mass of  $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.5 \text{ (syst.)} \text{ GeV}$ . The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

#4 futuro no LHC

# Higgs

---

- bosão sim : decai em dois fótons e dois Z
  - ↪ spin? zero ou dois? :: resposta no fim deste ano
  - ↪ paridade? + ou - ? :: vai demorar
  
- tal e qual o do SM?
  - ↪ verificação dos BR [dados actuais são consistentes com anomalias]
  - ↪ self-coupling

# mais

---

## —○ física para além do SM

↪ SUSY [exclude to find]

↪ dimensões extra

- micro blackholes

↪ matéria escura [candidatos?]

## —○ programa de iões pesados

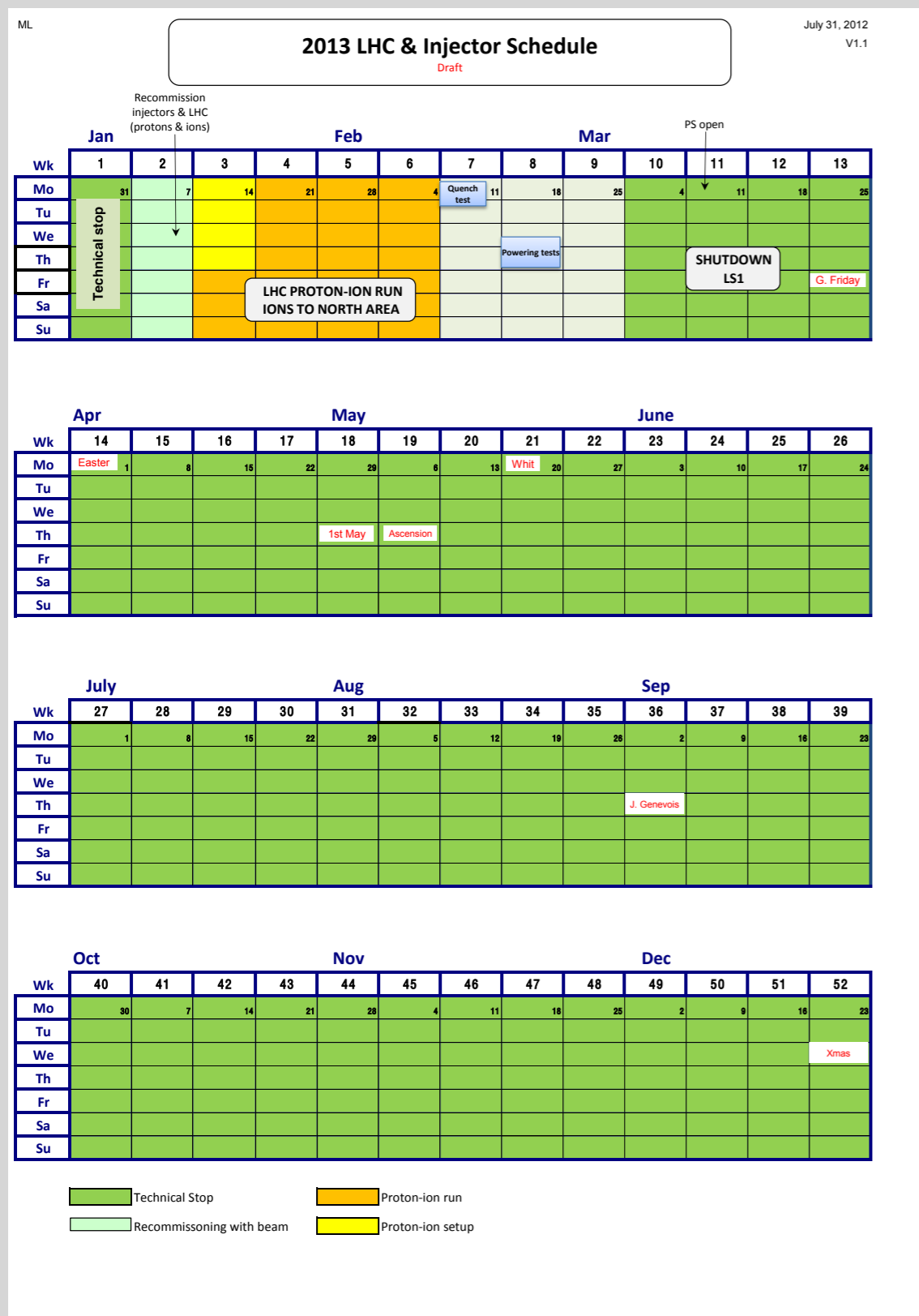
↪ o Higgs é responsável pela massa de partículas fundamentais

↪ a massa do protão resulta [maioritariamente] da interacção forte entre quarks [mediada por gluões]

↪ caracterização do QGP [estado desconfinado prevalente entre  $10^{-12}$  e  $10^{-6}$  s após o Big Bang]

↪ pA em 2013 [baseline importante]

# calendário



## —○ LS1 [2013-2014]

↪ consolidação das junções supercondutoras

↪ permite aumento de energia até pelo menos 10 TeV

## —○ LS2 [???2017-2018???

↪ upgrades nos detectores

## —○ LS3 [???2021-2023???

↪ high luminosity

↪ novos detectores [LHeC?]

ainda está quase tudo por fazer ...