

○ Bóson de Brout-Englert-Higgs

Leandro de Paula
leandro@if.ufrj.br

Mestrado Profissional de Ensino de Física



15 de abril de 2014

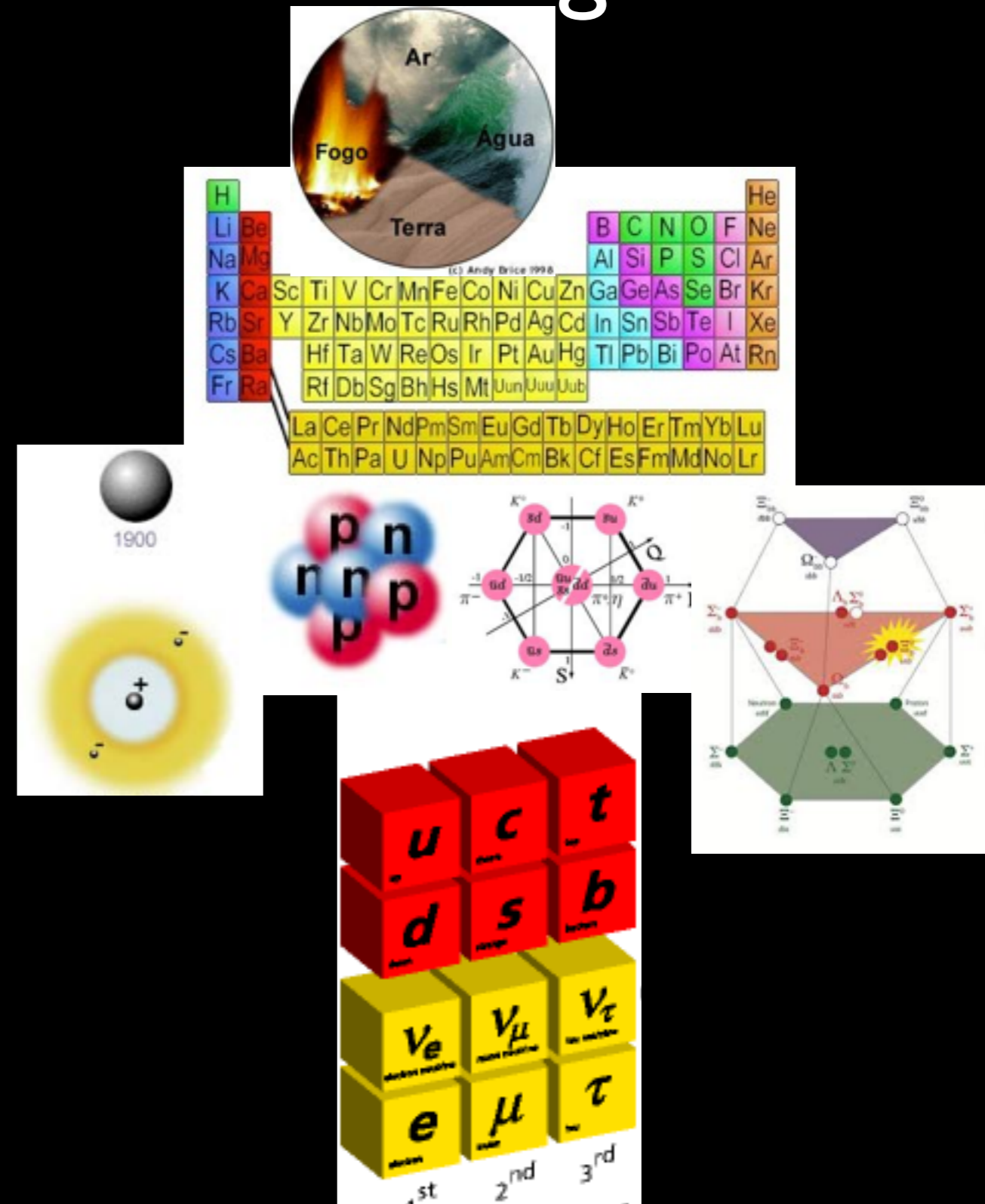
Plano das Apresentação

- Introdução
 - Simetrias e leis de conservação
- O Modelo Padrão
 - Mecanismo de Higgs
- O LHC

Introdução

Quais são os constituintes fundamentais da matéria e como eles interagem?

- Água, ar, terra e fogo
- Átomos
- Núcleo e elétron
- Próton, neutron e elétron
- Bárions, mésons e léptons
- Quarks e léptons



○ Modelo Padrão

O elétron

- Objeto quântico → Equação de Schrödinger

$$H \psi = E \psi$$

$$(T + V) \psi = E \psi$$

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \quad \text{com} \quad \vec{p} = i\hbar \vec{\nabla}$$

$$\frac{p^2}{2m}$$

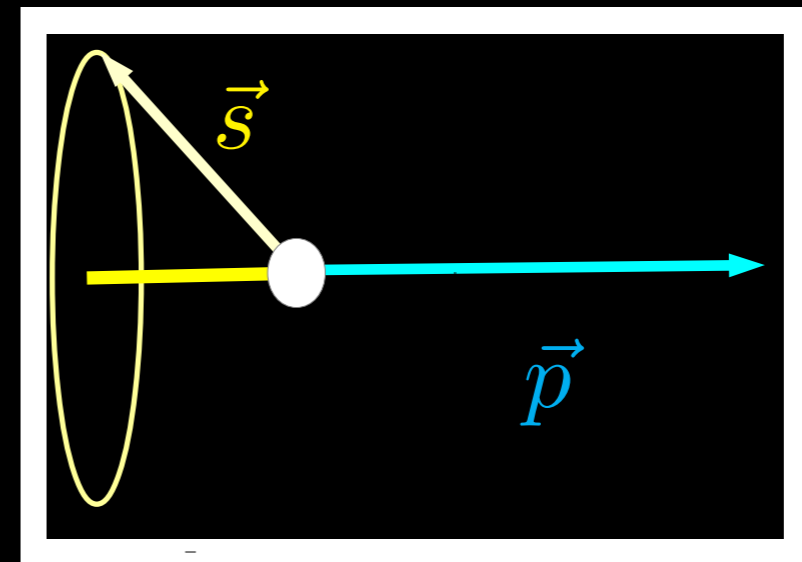
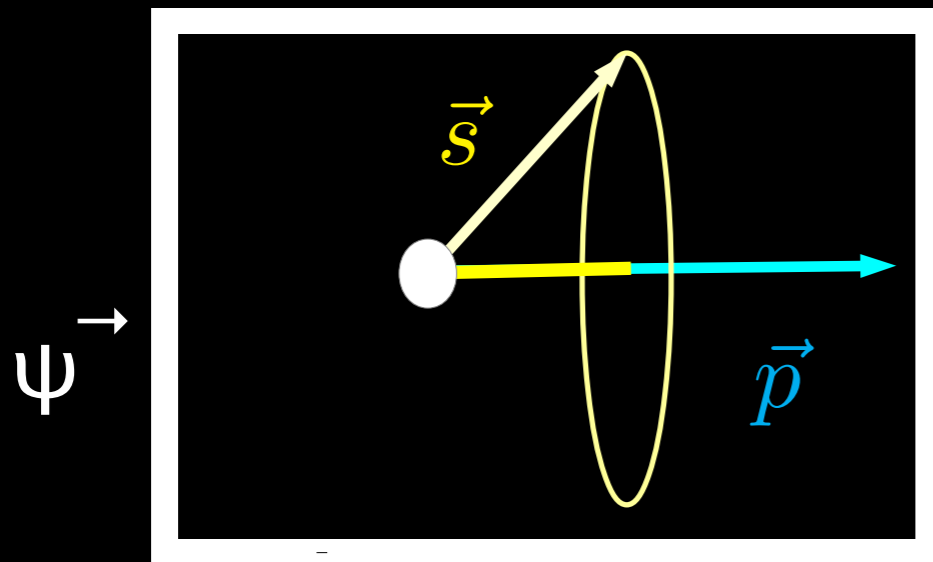
$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

○ elétron

Spin 1/2

direito, helicidade +1

esquerdo, helicidade -1



ψ^{\rightarrow}

ψ^{\leftarrow}

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\psi = \alpha \psi^{\rightarrow} + \beta \psi^{\leftarrow}$$

O elétron

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \begin{pmatrix} \psi^{\rightarrow} \\ \psi^{\leftarrow} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{\rightarrow\rightarrow} & V_{\rightarrow\leftarrow} \\ V_{\leftarrow\rightarrow} & V_{\leftarrow\leftarrow} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi^{\rightarrow} \\ \psi^{\leftarrow} \end{pmatrix} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi^{\rightarrow} \\ \psi^{\leftarrow} \end{pmatrix}$$

Magnetismo pode provocar uma mudança da helicidade → Termos do potencial fora da diagonal

Conservação da helicidade ↔ Simetria

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi^{\rightarrow} \\ \psi^{\leftarrow} \end{pmatrix}$$

O elétron

- O limite clássico frequentemente não é adequado

$$E = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

- Eq. Klein-Gordon

$$-\hbar^2 c^2 \nabla^2 \psi + m^2 c^4 \psi = -\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

- Eq. de Dirac

$$(c\boldsymbol{\alpha} \cdot \vec{p} + \beta mc^2)\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

α e β são matrizes 4x4 e os autovalores de E são $\pm E_0$

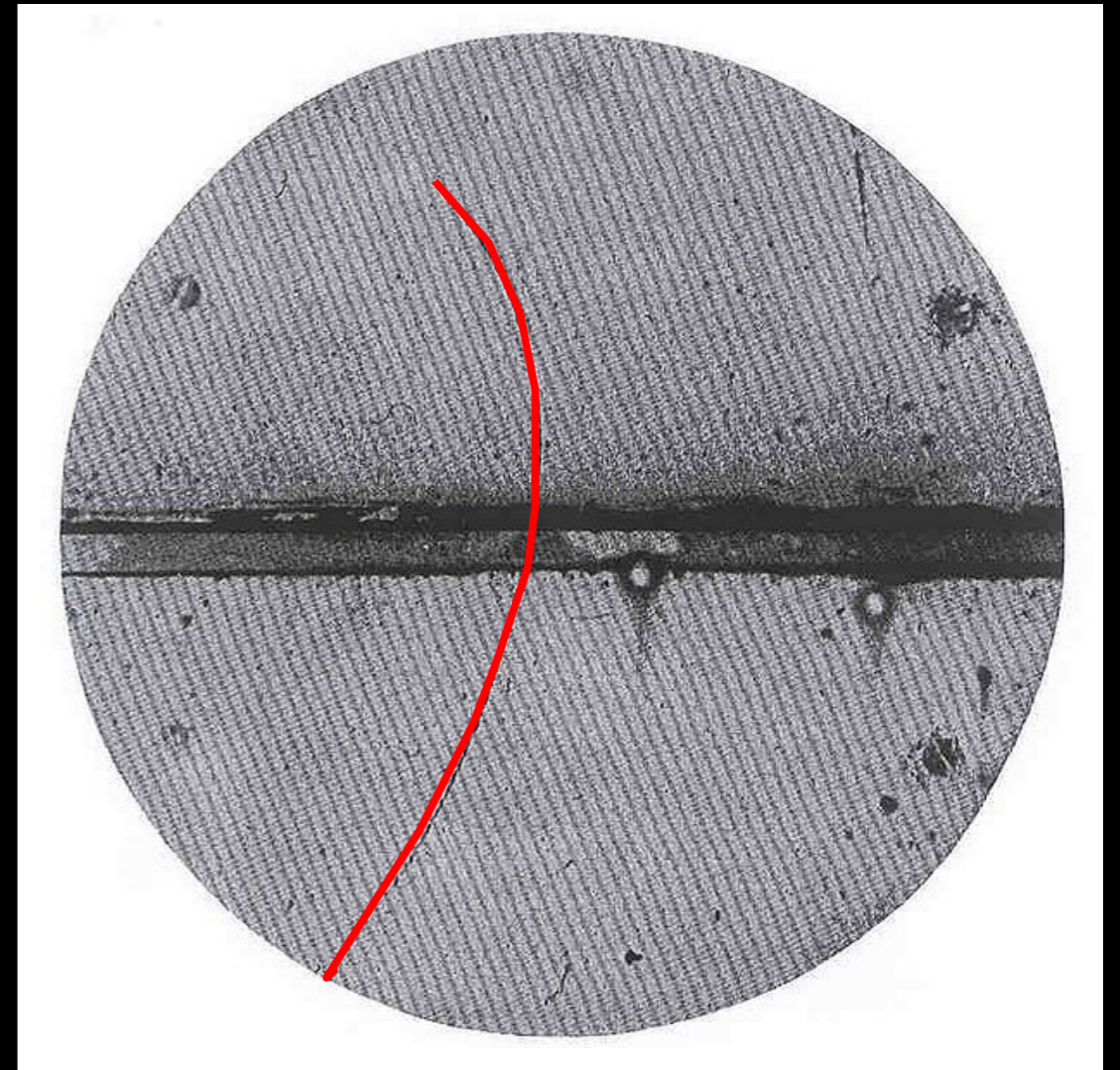
O elétron

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_p \\ \Psi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_p^{\rightarrow} \\ \Psi_p^{\leftarrow} \\ \Psi_n^{\rightarrow} \\ \Psi_n^{\leftarrow} \end{pmatrix}$$

Ψ_p e Ψ_n são equivalentemente às soluções da eq. de Schödinger mas com autovalores $\pm E_0$

Partícula e anti-partícula
 α e β são matrizes 4x4 e os autovalores de E são $\pm E_0$

- Previsto por Paul Dirac em 1928-29
- Várias evidências
- Observado por Carl Anderson em 1932 usando raios cósmicos



Uma partícula por minuto por cm^2

Léptons

- Neutrino
 - Proposto por Wolfgang Pauli em 1930
 - Descoberto por Frederick Reines et al em 1956 (PN 1995)
- Léptons: elétron (pósitron) e neutrino (anti-neutrino)
- O número de léptons se conserva
- $e^- + e^+$ ou $\nu + e^+$ ou $e^- + \bar{\nu}$ ou $\nu + \bar{\nu}$

Léptons

$$\Psi_{\text{lepton}} = \begin{pmatrix} \Psi_{\ell} \\ \Psi_{\bar{\ell}} \end{pmatrix}$$

$$\Psi_{\ell} = \begin{pmatrix} \Psi_{\nu} \\ \Psi_e \end{pmatrix}$$

$$\Psi_e = \begin{pmatrix} \Psi_e^{\rightarrow} \\ \Psi_e^{\leftarrow} \end{pmatrix}$$

Léptons

- Em 1936 Carl Anderson e Seth Neddermeyer descobriram um “elétron pesado e instável”, múon
- Em 1962 Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger descobriram o neutrino do múon
- Em 1975 Martin Perl descobriu o tau
- Em 2000 a colaboração DONUT (Fermilab) descobriu o neutrino do tau

Léptons

- Sentem a interação eletromagnética (carga elétrica e helicidade)
- Sentem a interação fraca (decaimento β)
 - ➔ Tem uma estrutura dupla de dubleto

$$\begin{pmatrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{pmatrix}$$

spin

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}$$

isospin

Léptons

- primeiro tipo de partículas elementares
3 famílias

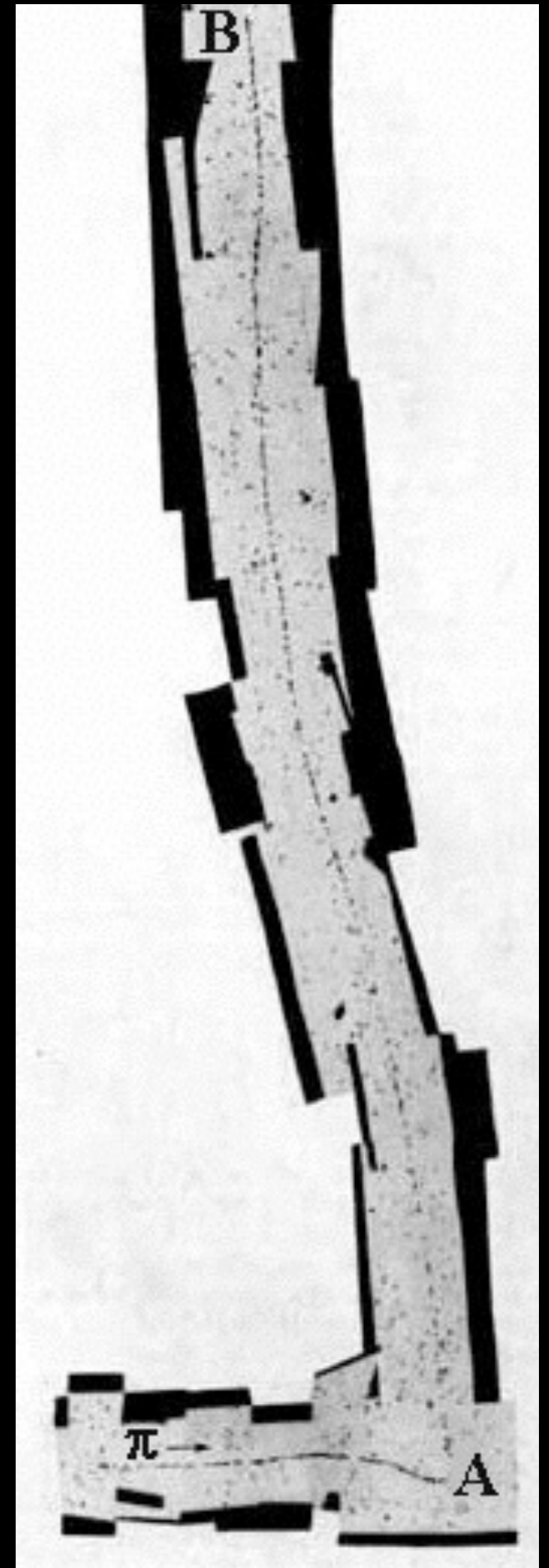
| | | | |
|---------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino |
| | e electron | μ muon | τ tau |

Descoberta do π

- Em 1947 por César Lattes, Giuseppe Occhialini e Cecil Powell

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} \bar{\nu}_{\mu}$$

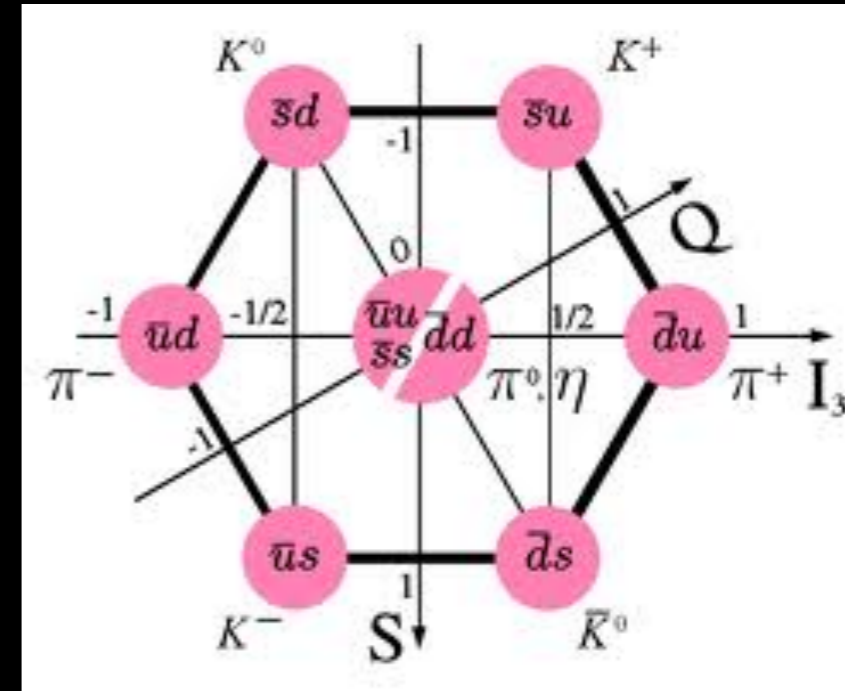
$$\begin{pmatrix} \pi^{+} \\ \pi^{0} \\ \pi^{-} \end{pmatrix}$$



Hadrons

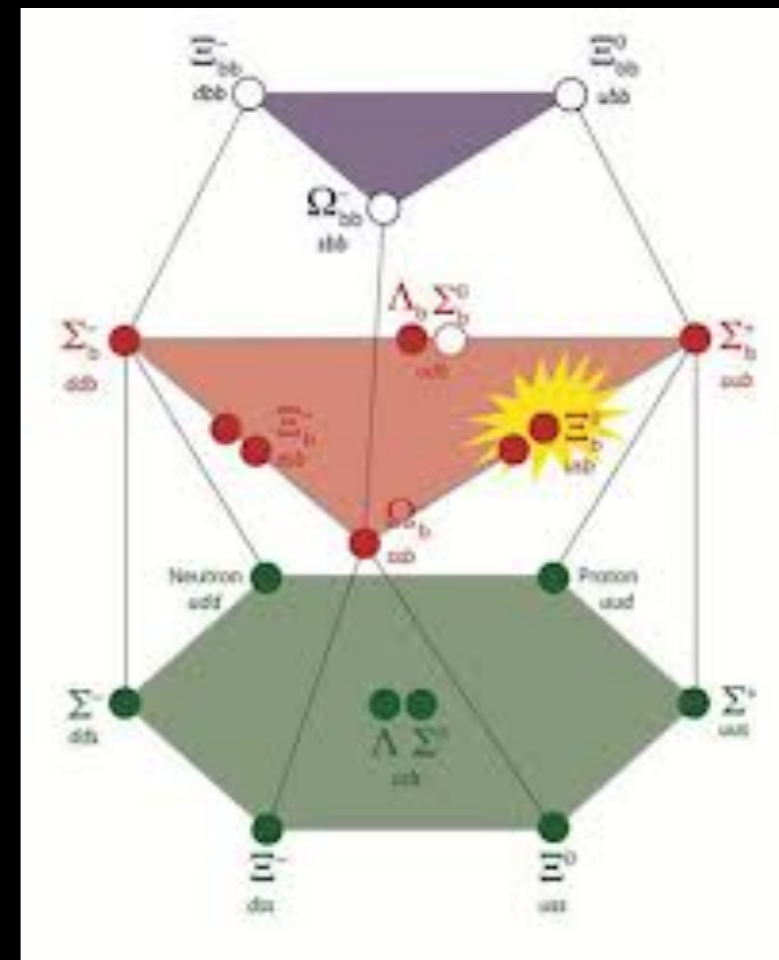
Mésos

- Pion: π^+ , π^0 , π^-
- Eta: η
- Kaons: K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^-
-



Bárions

- Nucleon: p, n
- Σ^+ , Σ^0 , Σ^-
- Ω , Ξ , Λ
-



Quarks

- Hádrons não são partículas fundamentais, tem estrutura interna
- Proposta teórica: Murray Gell-Mann e George Zweig em 1964
- Observação de estrutura do próton no SLAC em 1968
- A simetria indica a existência de um tripleto
- A carga da interação forte não é observada. É como se os valores fossem as cores primárias

$$\begin{pmatrix} q_{\text{vermelho}} \\ q_{\text{verde}} \\ q_{\text{azul}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{bárion} &= qqq \\ p &= uud \\ n &= udd \end{aligned}$$

$$\text{méson} = q\bar{q}$$

Quarks

- Além da interação forte, os quarks sentem a interação fraca (decaimento β) e tem spin
- Tem uma estrutura tripla, um tripleto (de cor) e dois singletos (isospin e spin)

$$\begin{pmatrix} q_{\text{vermelho}} \\ q_{\text{verde}} \\ q_{\text{azul}} \end{pmatrix}$$

cor

$$\begin{pmatrix} U^{\frac{2}{3}} \\ D^{-\frac{1}{3}} \end{pmatrix}$$

isospin

$$\begin{pmatrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{pmatrix}$$

spin

Férmions

- Foram descobertas 3 famílias (spin $\frac{1}{2}$)
 - léptons: e , μ , τ (e seus neutrinos)
 - quarks
 - U = up, charm, top
 - D = down, strange, bottom

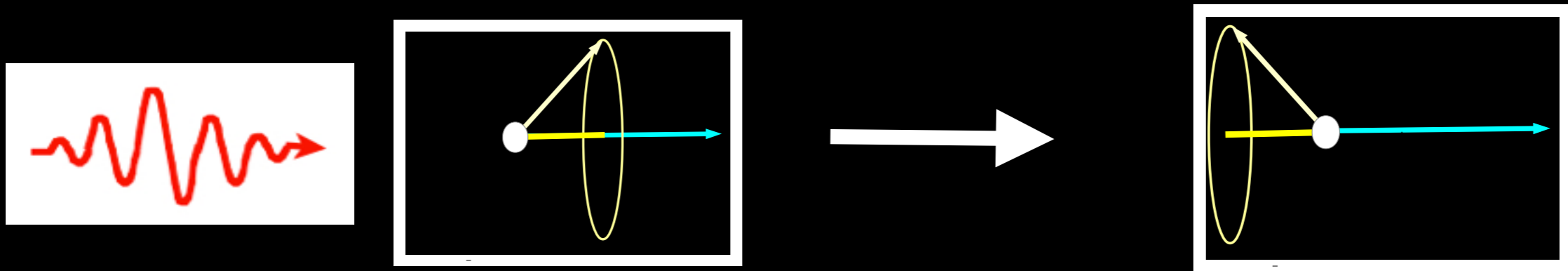
| Leptons | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino |
|---------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | e electron | μ muon | τ tau |

| Quarks | u up | c charm | t top |
|--------|-------------|----------------|---------------|
| | d down | s strange | b bottom |

Toda a matéria hadrônica conhecida é composta por 3
férmions

Interações

- Eletromagnética (helicidade)



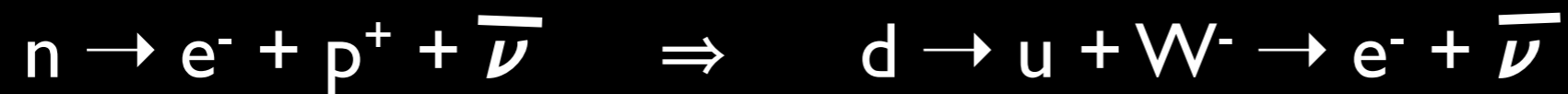
$$\gamma + \begin{pmatrix} \rightarrow \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \leftarrow \end{pmatrix}$$

Um quantum do campo eletromagnético (fóton)
altera o estado de uma partícula

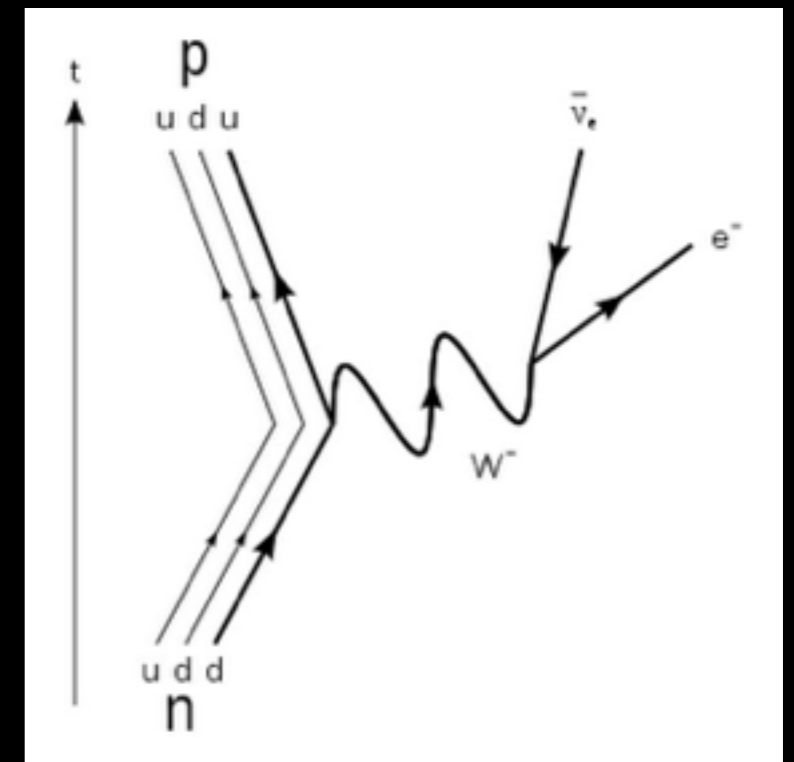
O fóton tem spin 1 (bóson)

Interação Fraca

- Decaimento β



- Produção (aniquilação) de pares



Interação Fraca

- A existência dos bósons Z e W foi proposta por Glashow, Weinberg e Salam em 1968
- Descobertos pelas colaborações UA1 e UA2 em 1983
- $m(W) = (80,383 \pm 0,015) \text{ GeV}/c^2$
- $m(Z) = (91,1876 \pm 0,0021) \text{ GeV}/c^2$

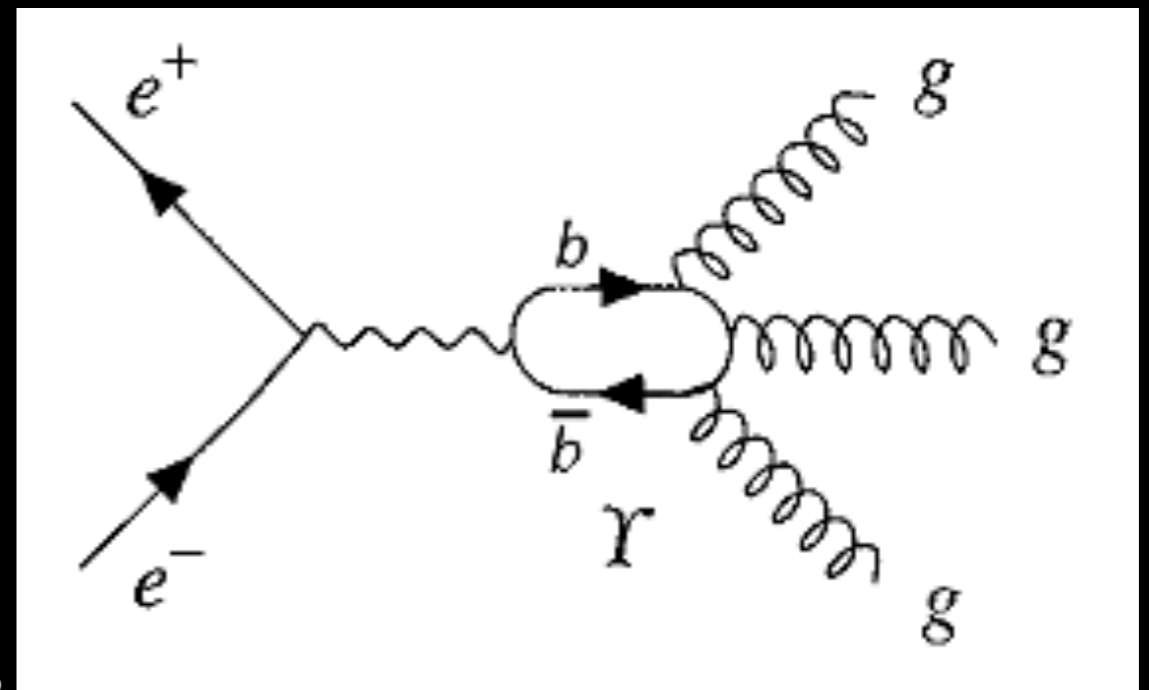
$$W^+ + \begin{pmatrix} 0 \\ e^- \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \nu_e \\ 0 \end{pmatrix}$$

Interação Forte

- A interação forte altera o estado de carga de cor de um quark. O mediador (gluon) tem carga de cor.
- Um gluon tem uma cor e uma anti-cor
 $q(\text{verde}) \rightarrow q(\text{azul}) + g(\text{verde,anti-azul})$
- Gluons interagem entre si
 $g(\text{verde,anti-azul}) \rightarrow g(\text{verde,anti-vermelho}) + g(\text{vermelho,anti-azul})$

Interação Forte: Gluons

- Propostos por Murray Gell-Mann em 1962
- Massa nula e spin = 1
- Devido ao fato da interação forte ser dominante, as cores são confinadas, ou seja, só observamos objetos brancos.
- Descobertos pela colaboração PLUTO



O Modelo Padrão

Partículas Elementares já observadas (2012)

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| u up | c charm | t top | γ photon |
| d down | s strange | b bottom | Z Z boson |
| ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson |
| e electron | μ muon | τ tau | g gluon |

○ Modelo Padrão

- Descrição das interações eletrofraca e forte
- Férmions: quarks e léptons
- Bósons: fóton, gluons, W e Z
- 32 outorgas do Premio Nobel

○ Bóson de Higgs

- A Lagrangeana do Modelo Padrão não tem termo de massa! Ele não seria invariante.
- Todas as partículas (bósons e férmions) devem ter massa nula!
- ... mas isto não corresponde à realidade
- O Modelo de Higgs tenta resolver este problema

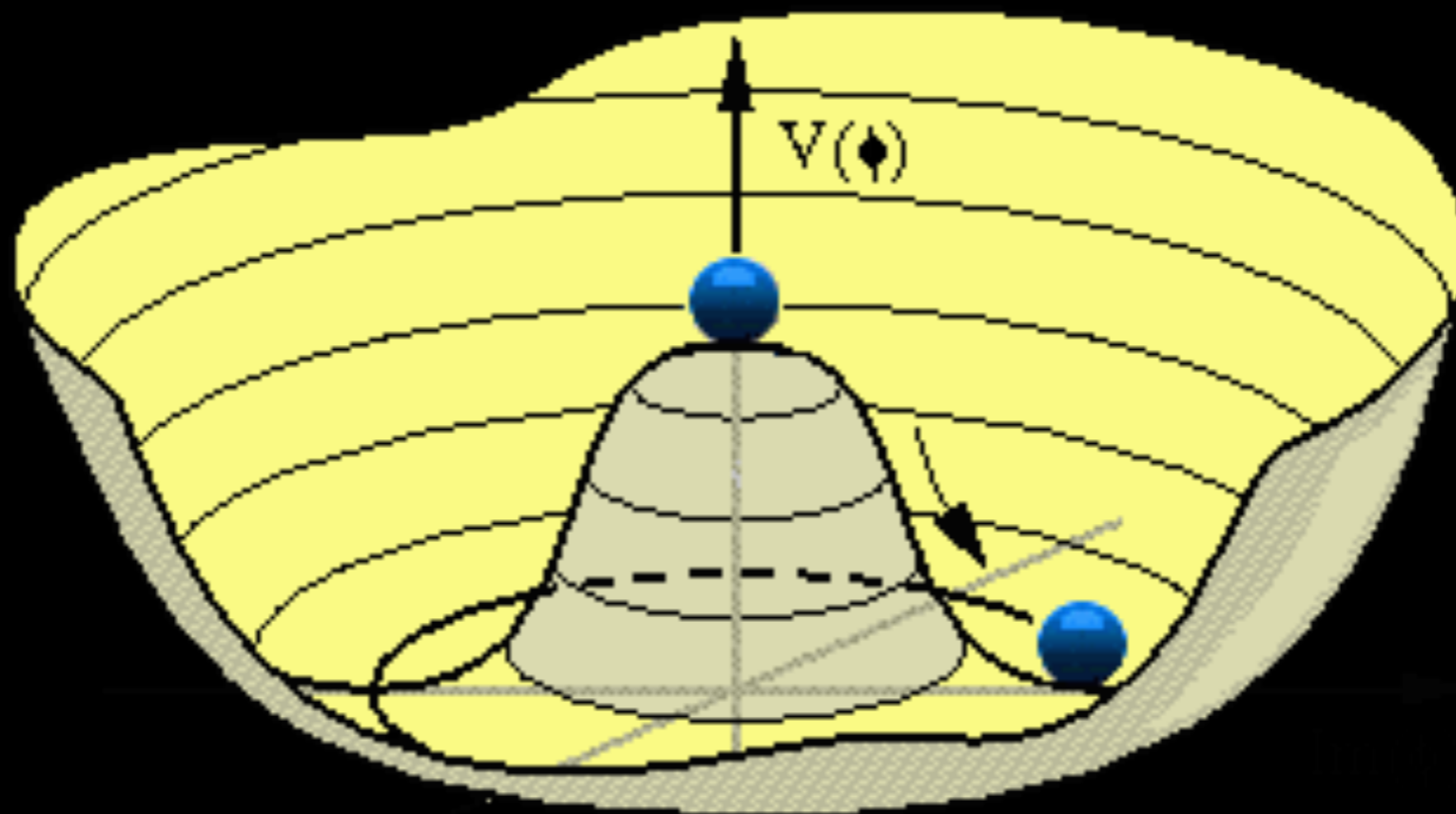
Qual corpo tem maior velocidade?



Por que?

Potencial de Higgs

- Quebra espontânea de simetria



Mecanismo de Higgs

- É possível existir uma interação que de origem a um termo na Lagrangeana que seja equivalente ao termo de massa
- A simetria exigida pelo Modelo Padrão pode ter sido espontaneamente quebrada

Bóson de Higgs

- Modelo desenvolvido em 1964-66 em uma série de artigos: F. Englert e R. Brout, P. Higgs e G. Guralnik, C.R. Hagen e T. Kibble
- O bóson de Higgs é o quantum deste potencial e tem spin nulo

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| u up | c charm | t top | γ photon |
| d down | s strange | b bottom | Z Z boson |
| ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson |
| e electron | μ muon | τ tau | g gluon |
| <h1>Modelo Padrão</h1> | | | Higgs boson |

Prêmio J.J.Sakurai para Física de Partículas Teórica de 2010 (APS)

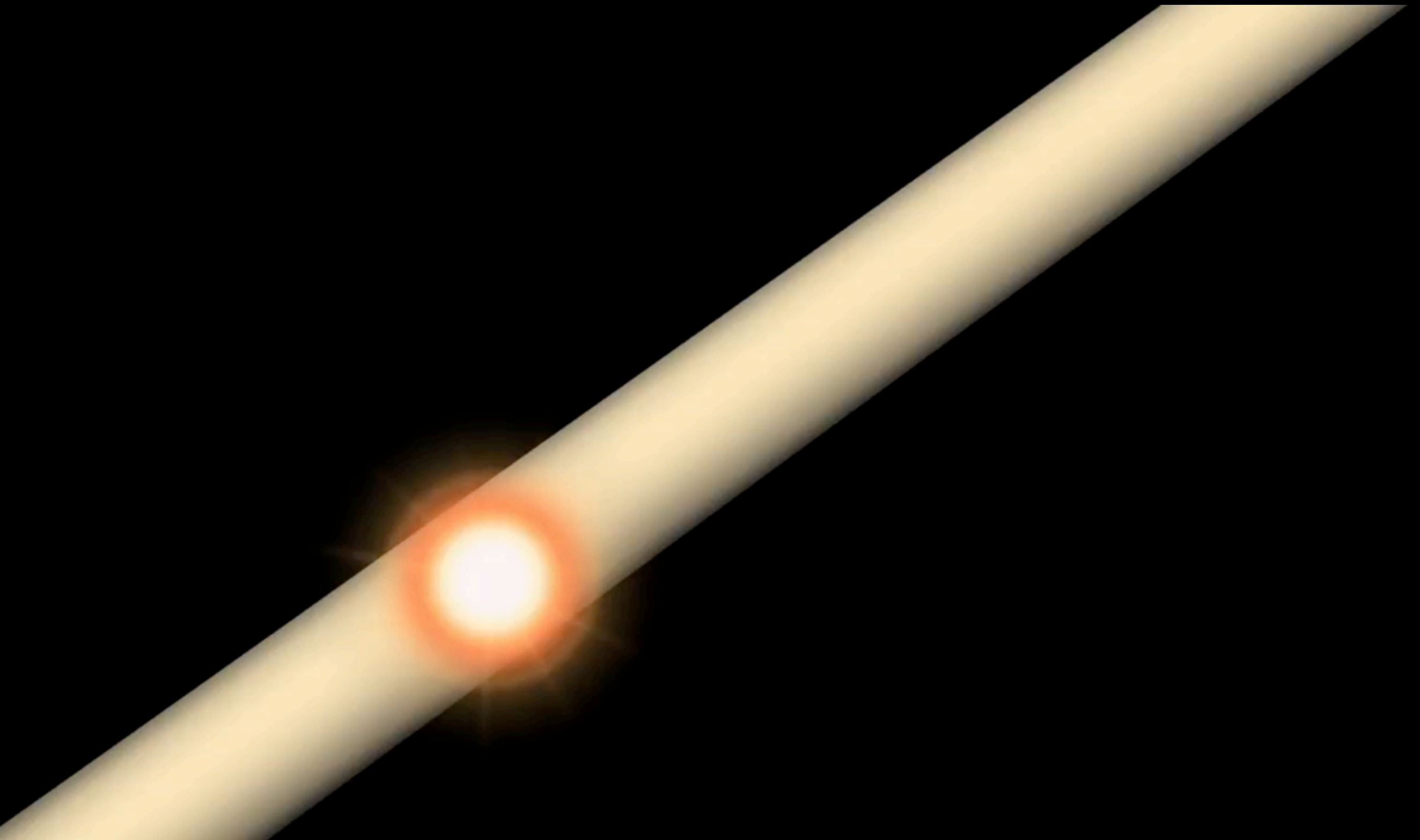


Large Hadron Collider

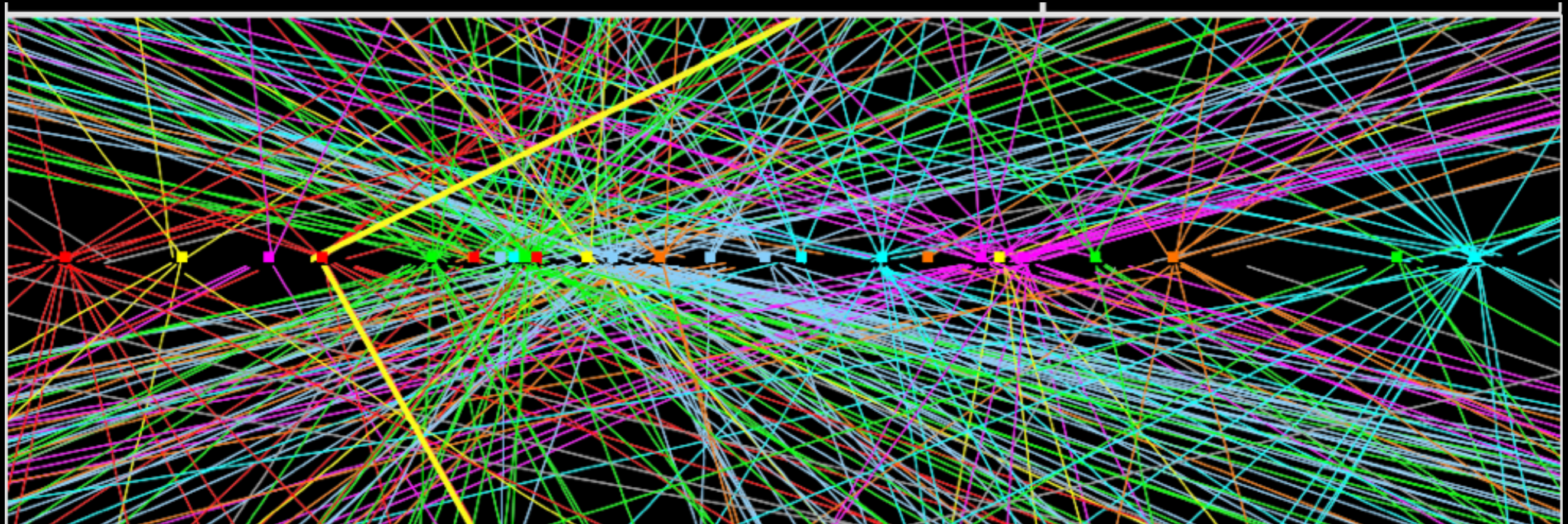
An aerial photograph of the CERN facility in Geneva, Switzerland. The image shows a large, circular red outline representing the LHC tunnel. The landscape is a mix of green fields and urban areas, with the Alps in the background. The word "CERN" is written in large, red, sans-serif capital letters on the right side of the image.

CERN

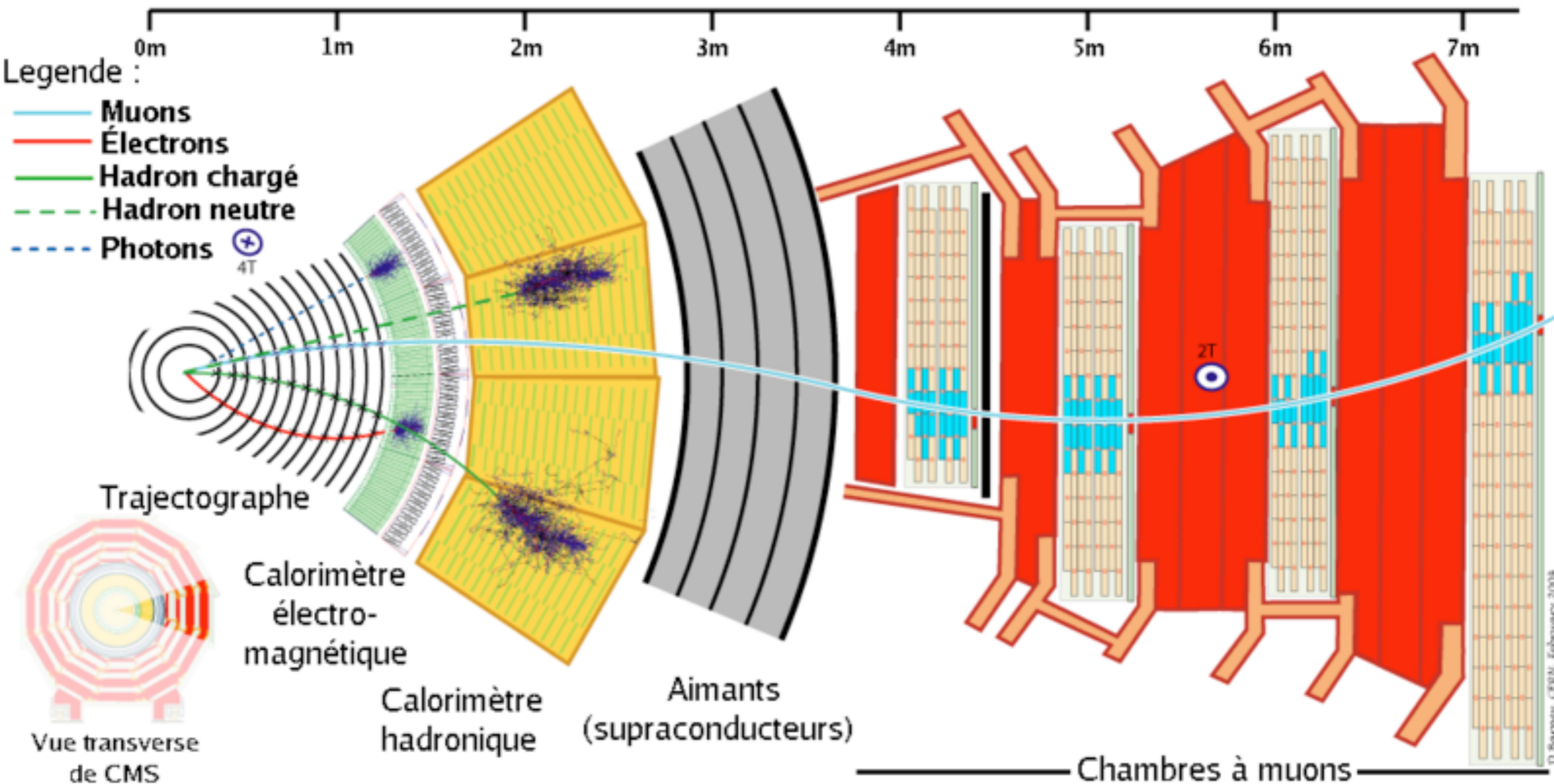
Colisões de prótons no LHC



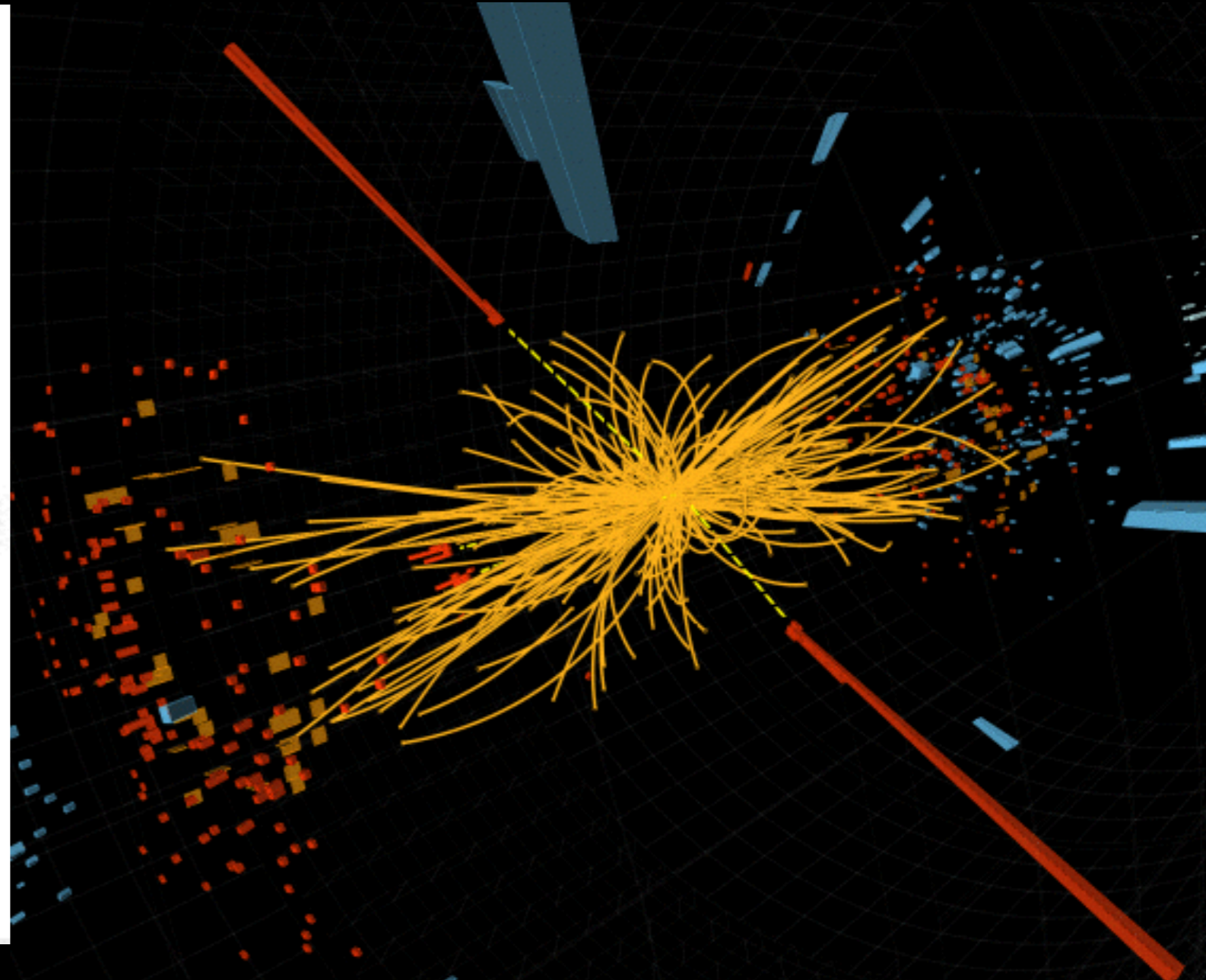
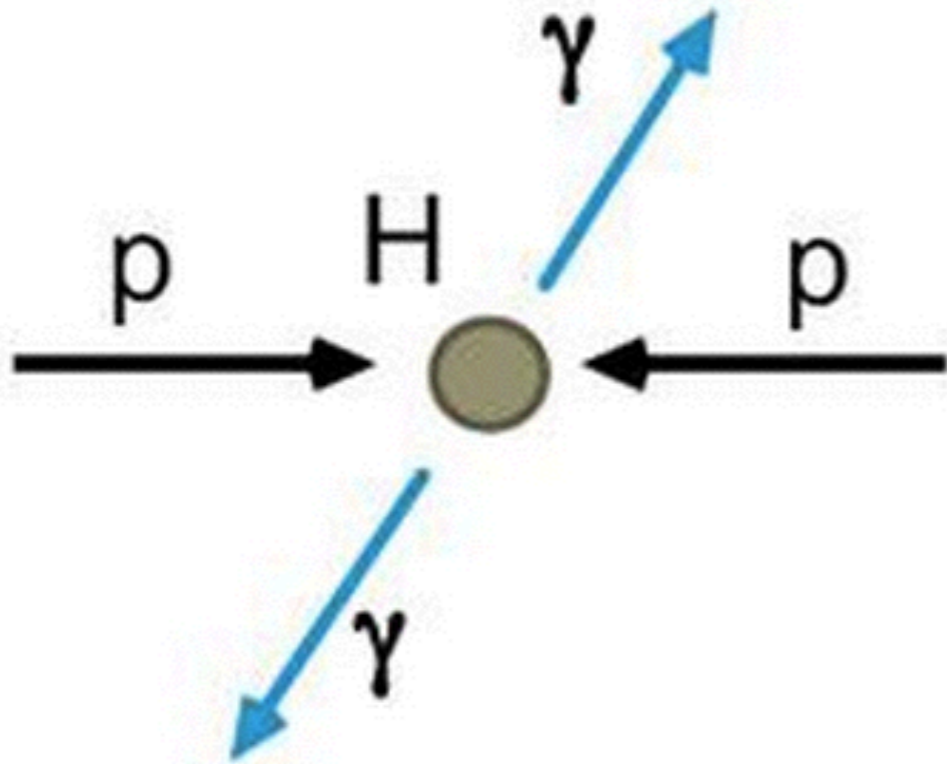
Como se observa uma partícula?



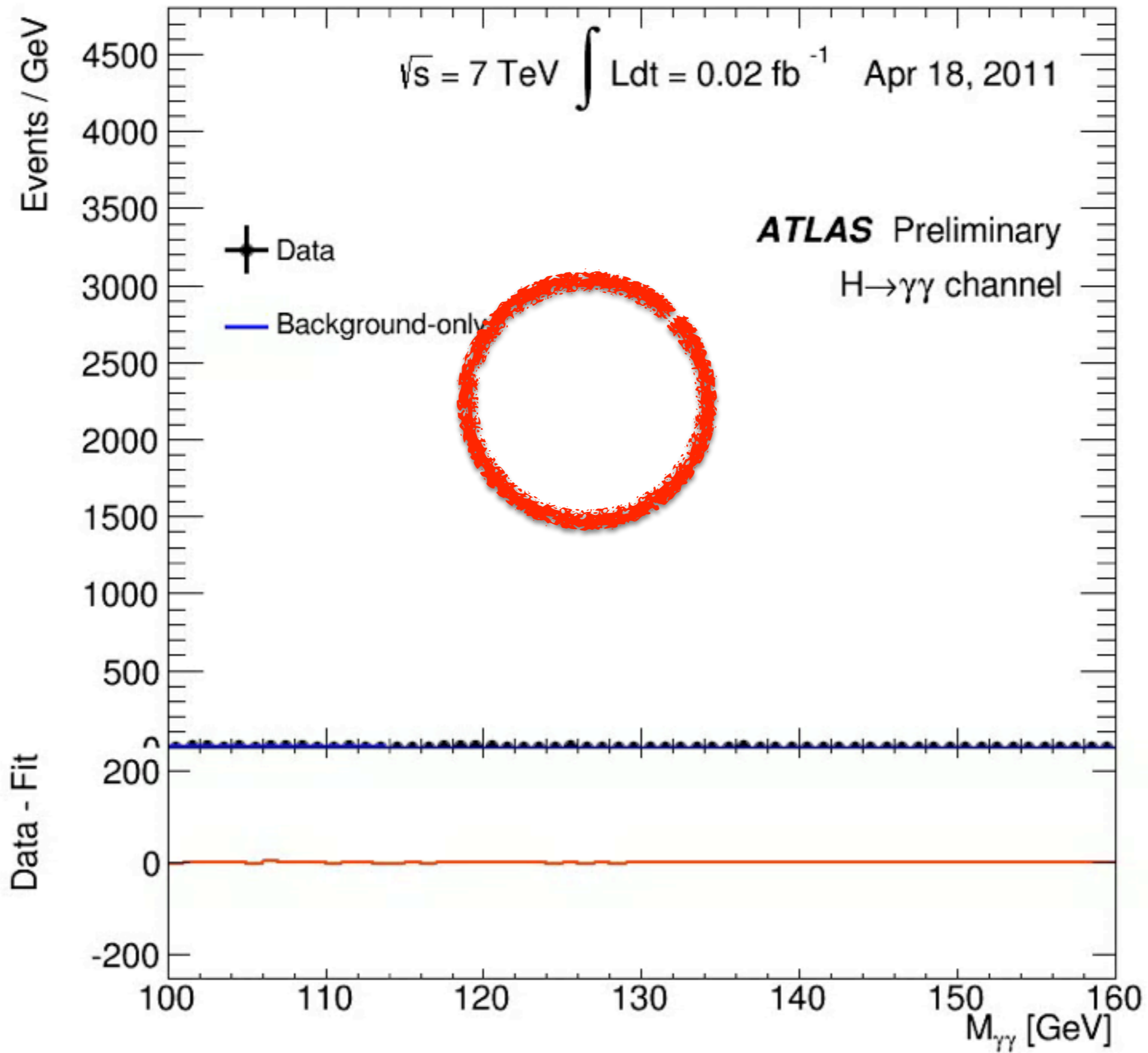
Como se observa uma partícula? elétron, fóton, próton, pion, kaon, neutron e múon



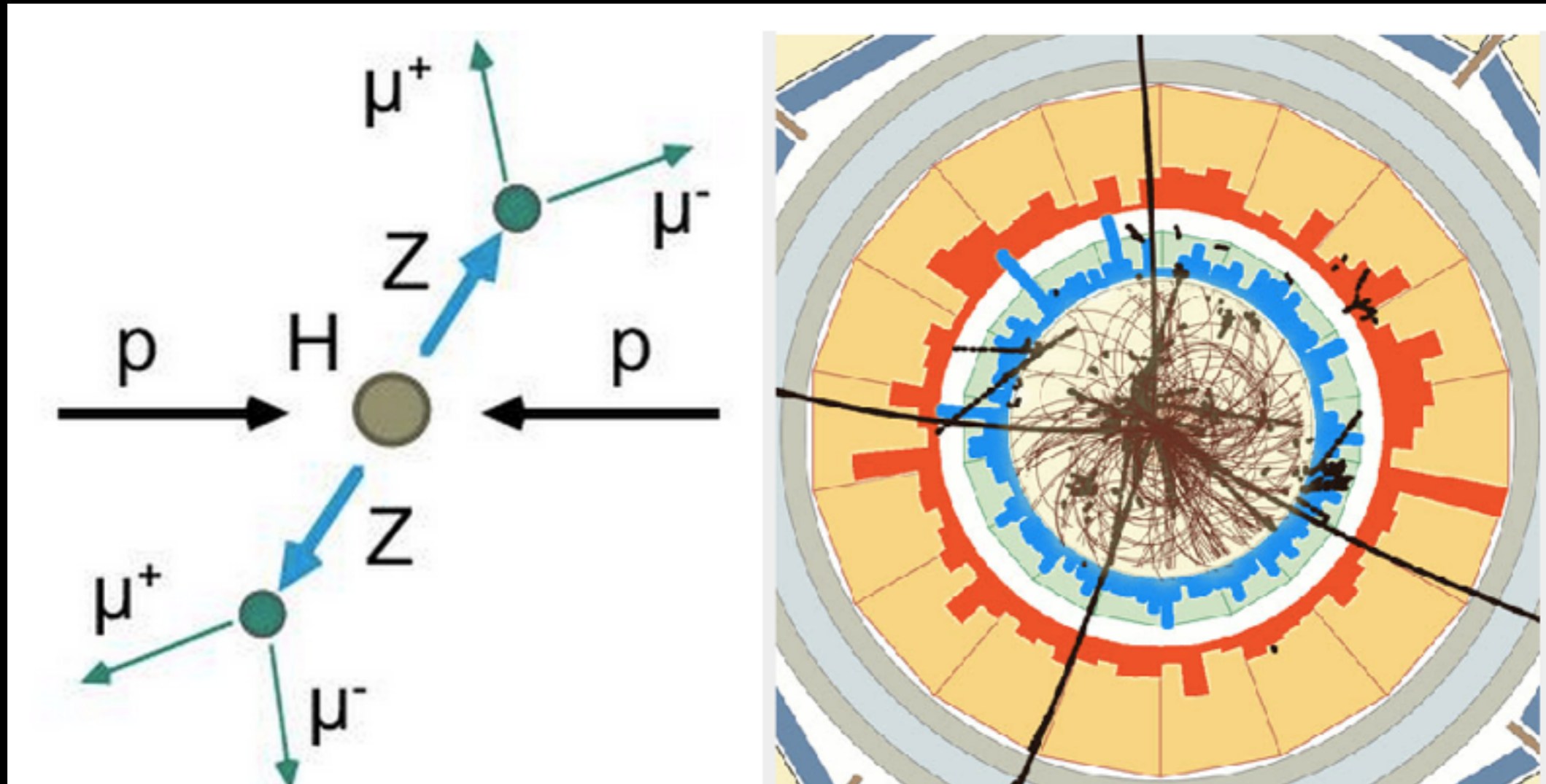
Como observar o bóson de Higgs



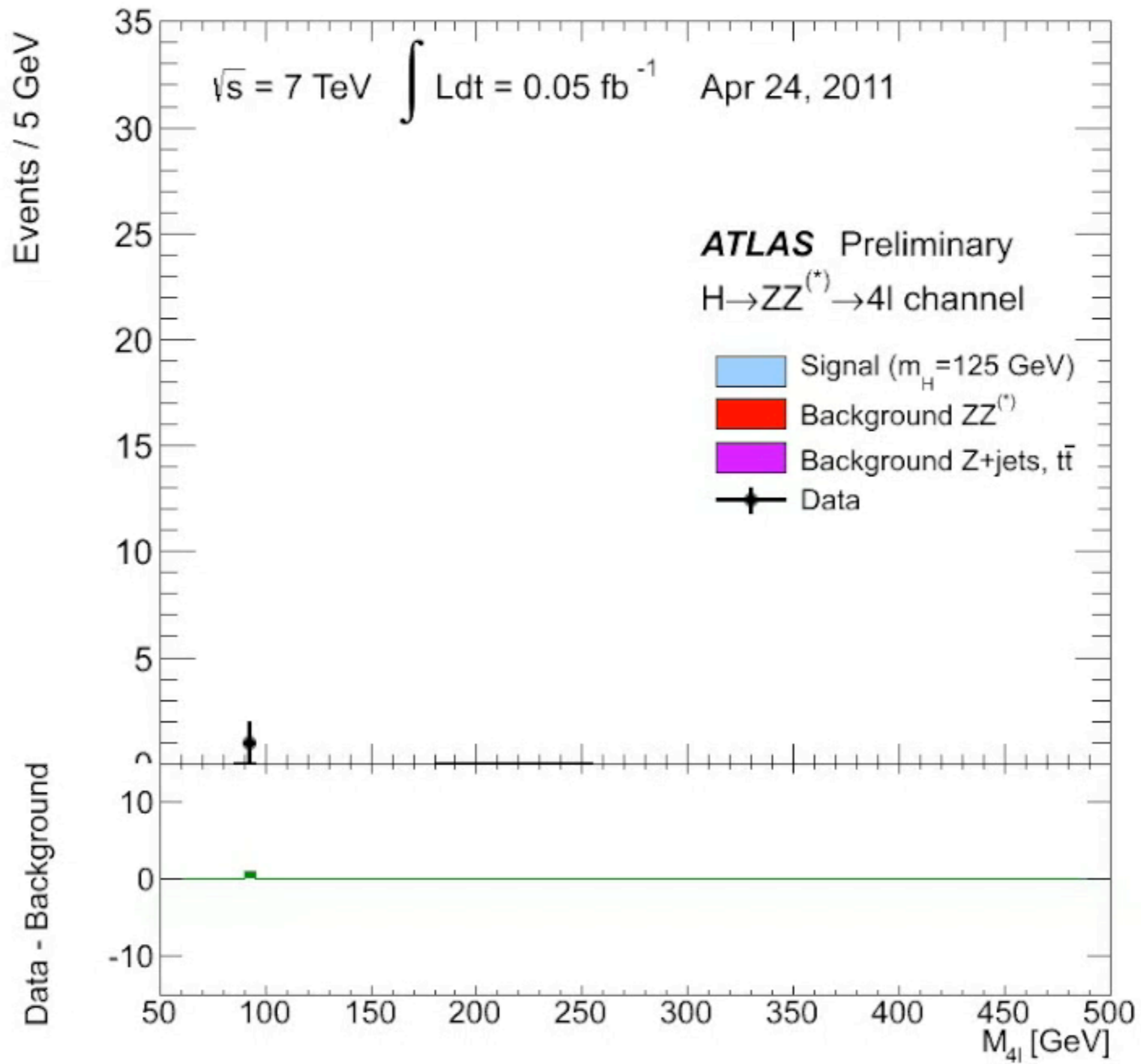
$$M_H = \sqrt{E_H^2 - m^2 c^4} \approx \frac{E_H}{c^2} \sqrt{(\sum E_\gamma)^2 - (\sum \vec{p}_\gamma)^2}$$



Outro Decaimento



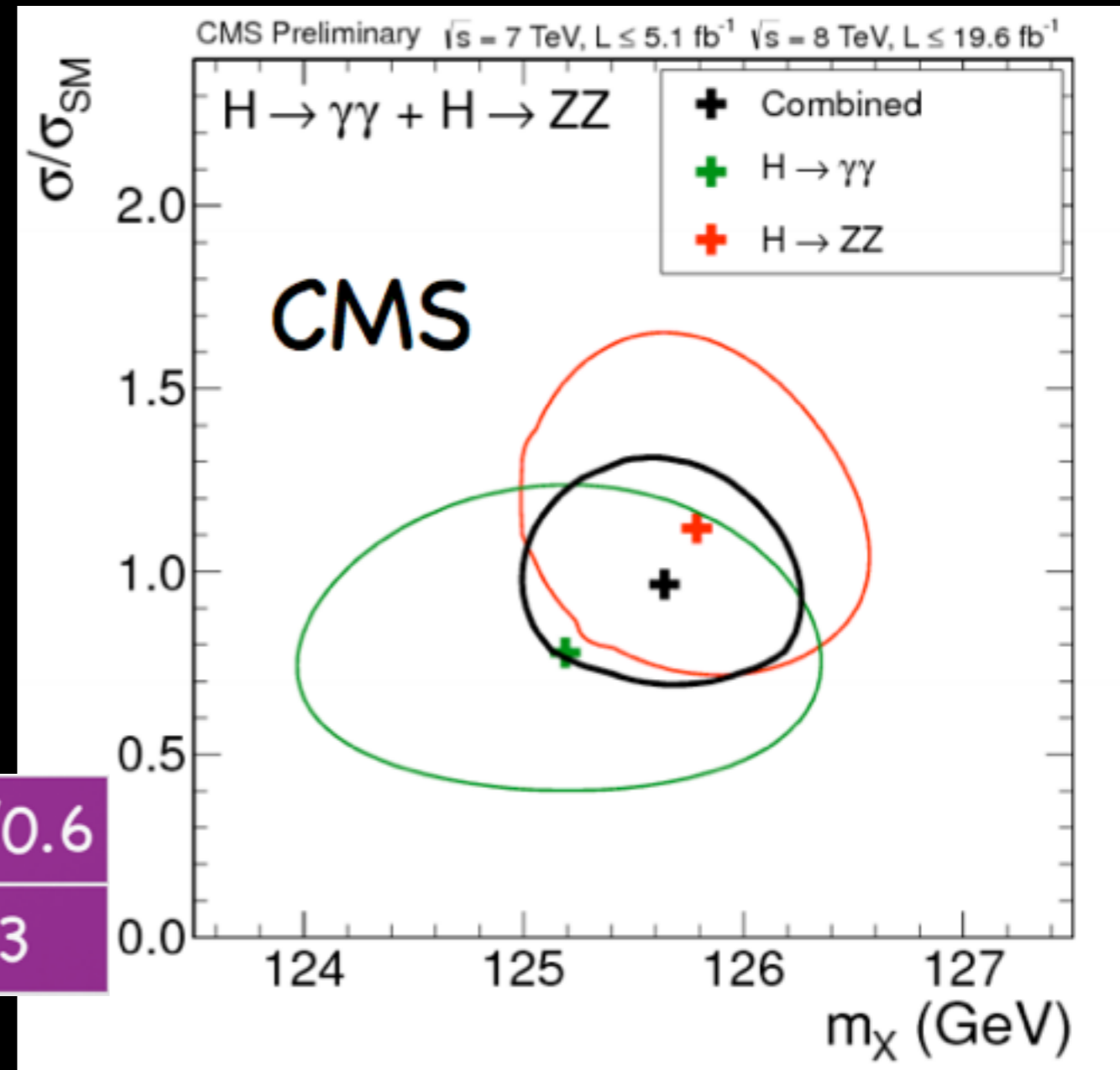
$$M_H = \sqrt{E_H^2 - p_H^2} = \sqrt{(\sum E_Z)^2 - (\sum \vec{p}_Z)^2} = \sqrt{(\sum E_\mu)^2 - (\sum \vec{p}_\mu)^2}$$



Medida da Massa

- Acordo entre medidas de diferentes decaimentos e entre ATLAS e CMS
- Valor compatível com o Modelo Padrão

| | | | | |
|-------|------|-------|-----|---------|
| ATLAS | Comb | 125.5 | 0.2 | 0.5/0.6 |
| CMS | Comb | 125.7 | 0.3 | 0.3 |



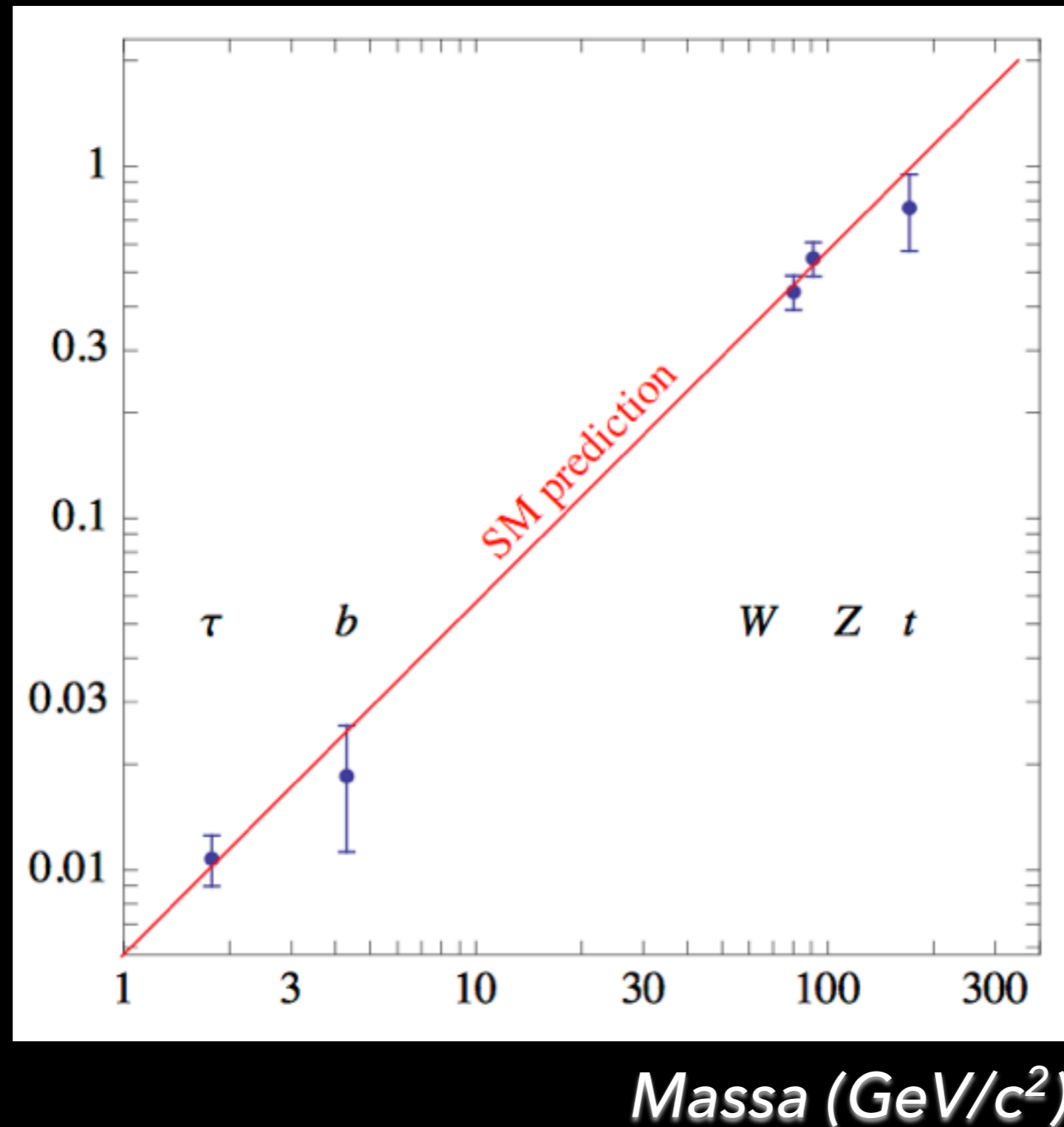
Combinação de todas as medidas

$$M_H = 125.66 \pm 0.34 \text{ GeV}/c^2$$

Calculado supondo MP

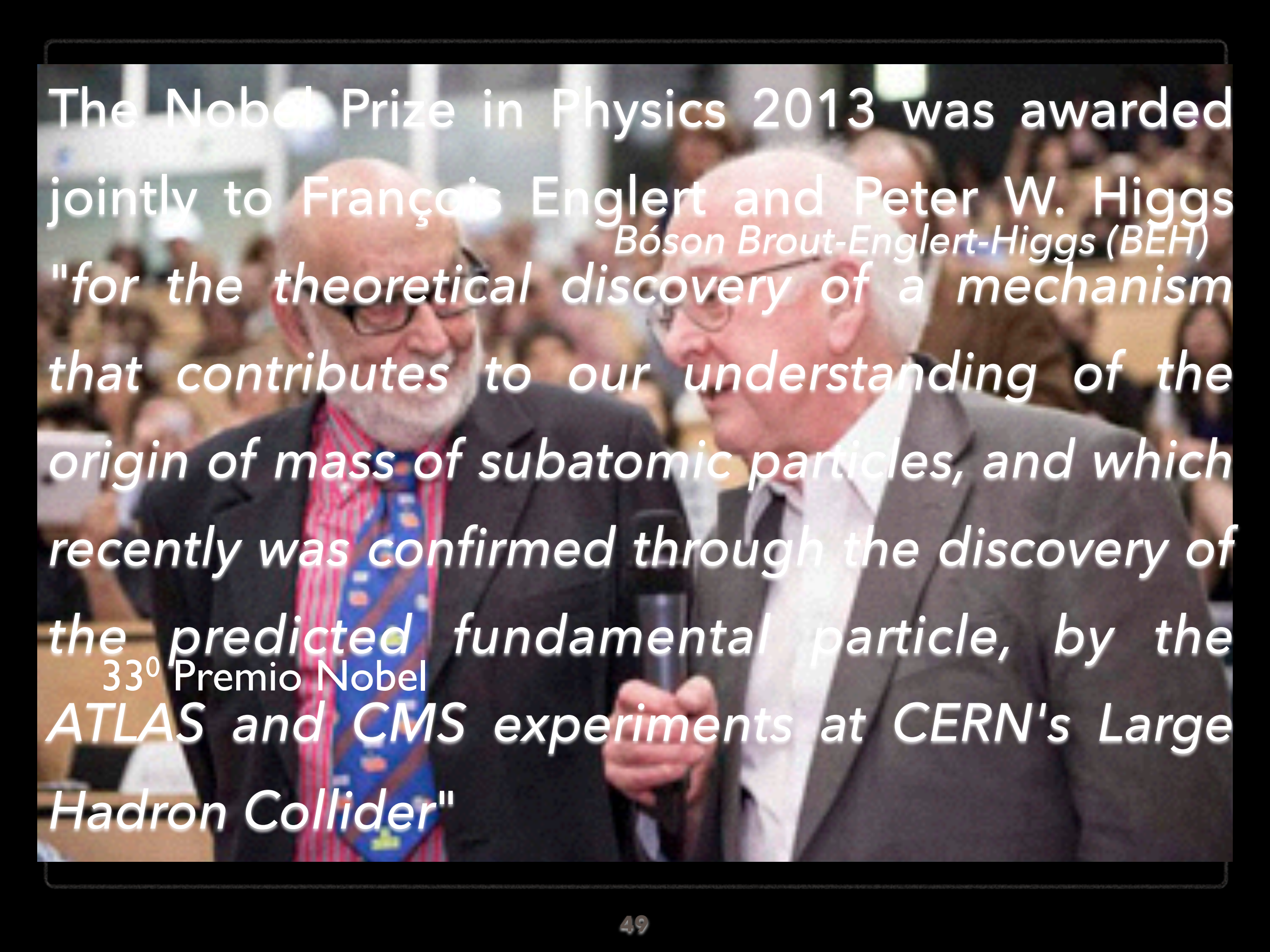
$$M_H = 124.5 \pm 1.7 \text{ GeV}/c^2$$

Propriedades do bóson



Características medidas do bóson

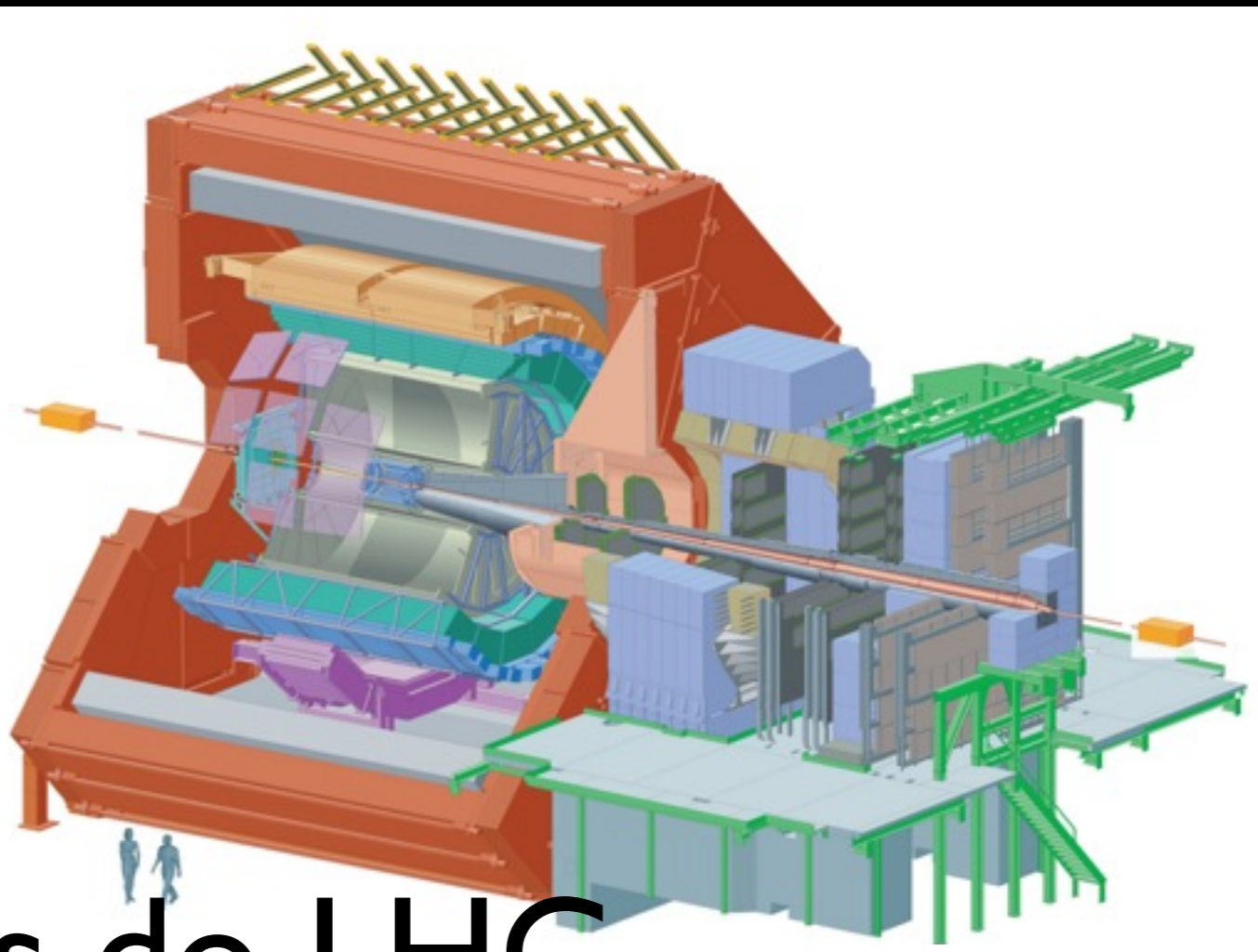
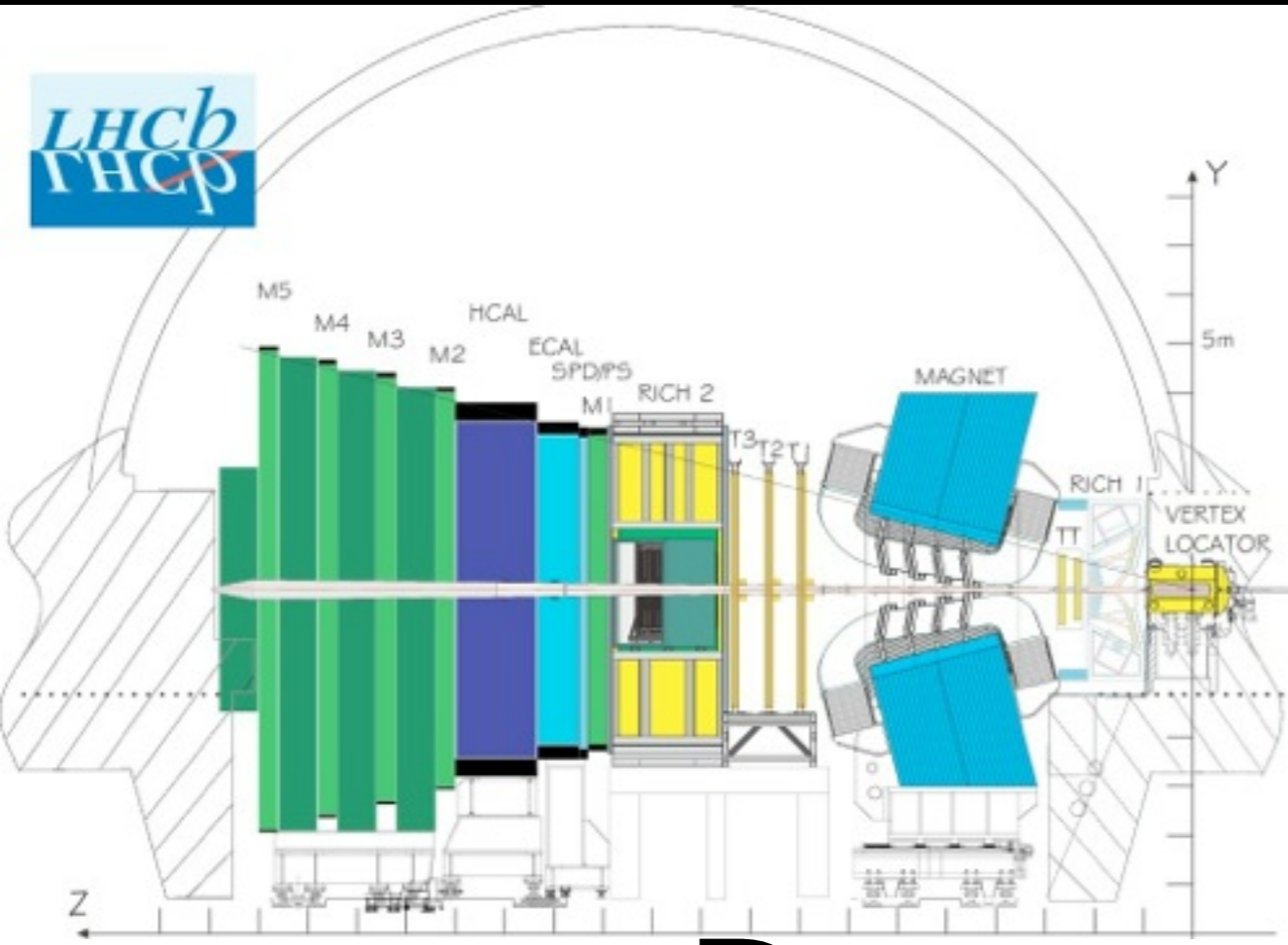
- $M_H = 125,66 \pm 0,34 \text{ GeV}/c^2$
- $S^P_H = 0^+$
- $\mu_{HM} \propto M$
- O H_{MP} ser um singleto fundamental era considerada uma hipótese simplista, mas todas as evidências experimentais indicam que ela deve estar correta

A photograph of two men at a Nobel Prize ceremony. The man on the left is older, with a white beard and glasses, wearing a dark suit and a colorful patterned tie. The man on the right is younger, balding with glasses, wearing a dark suit and a light-colored tie, and is holding a microphone. They are both looking towards the right. The background is a blurred crowd of people.

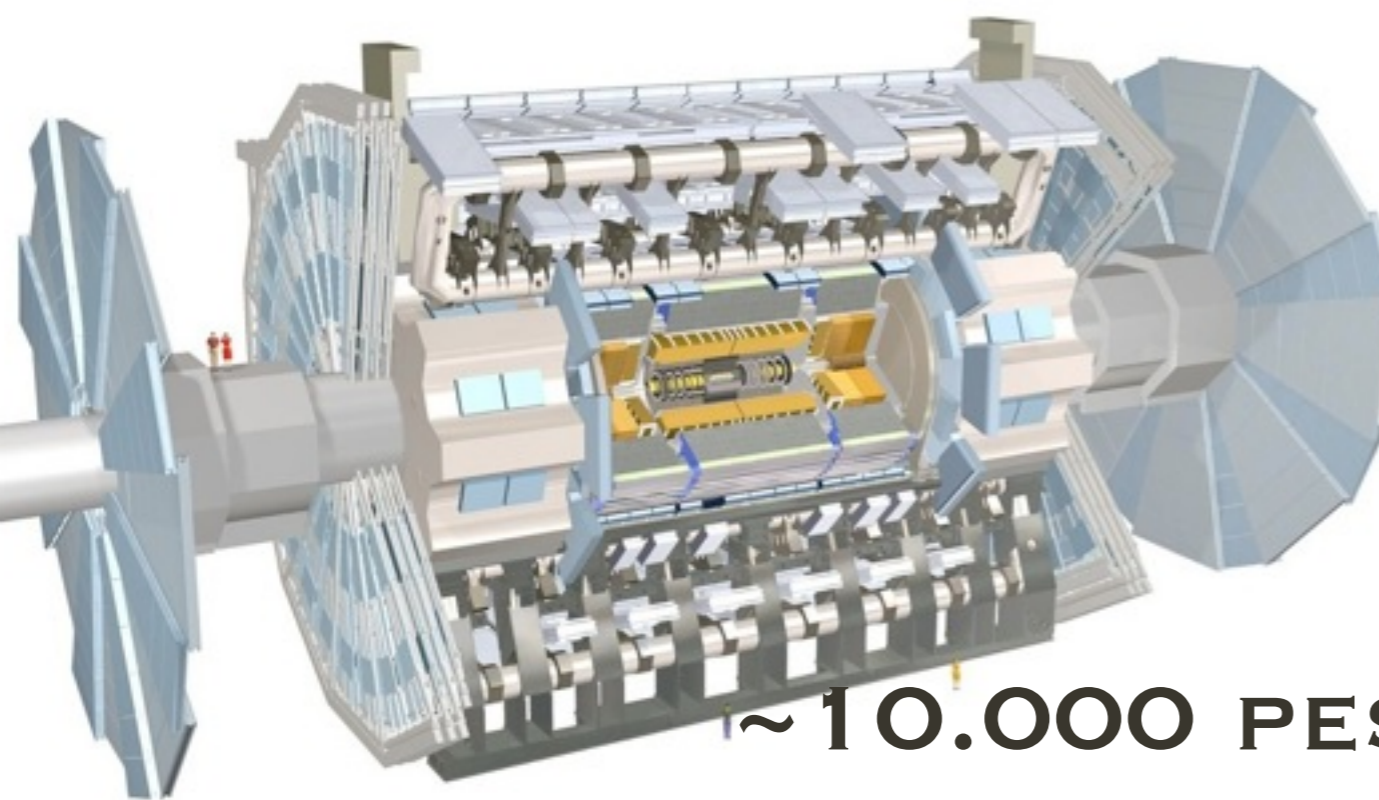
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *Bóson Brout-Englert-Higgs (BEH)* "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ^{33^o} Premio Nobel ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

Bóson de Brout-Englert-Higgs

- O bóson BEH foi descoberto 48 anos depois de ter sido proposto
- O Modelo Padrão continua sua carreira de sucesso
- A descoberta foi uma aventura científica global

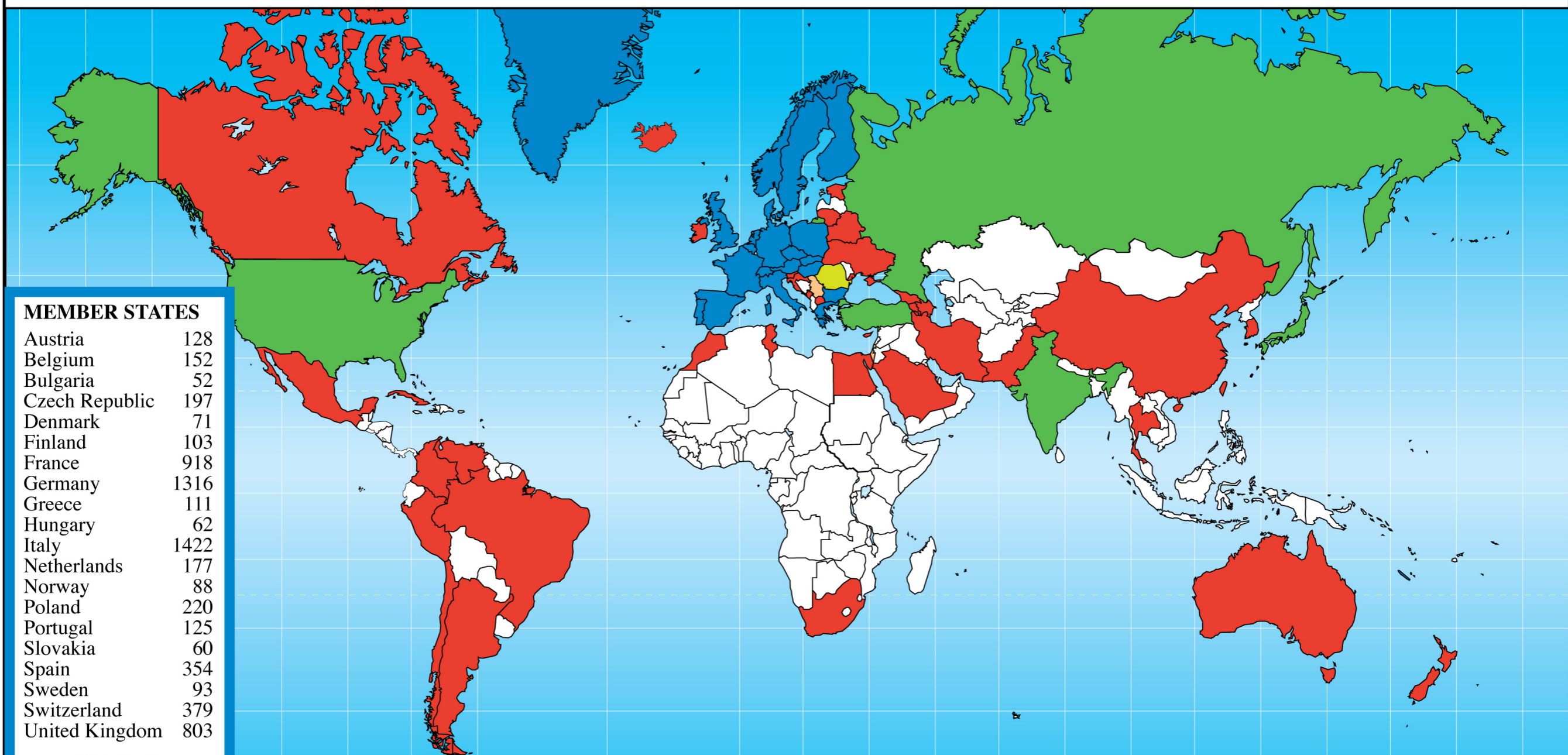


Detetores do LHC



~ 10.000 PESQUISADORES
~ 100 BRASILEIROS

Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 14 January 2013



MEMBER STATES

| | |
|----------------|------|
| Austria | 128 |
| Belgium | 152 |
| Bulgaria | 52 |
| Czech Republic | 197 |
| Denmark | 71 |
| Finland | 103 |
| France | 918 |
| Germany | 1316 |
| Greece | 111 |
| Hungary | 62 |
| Italy | 1422 |
| Netherlands | 177 |
| Norway | 88 |
| Poland | 220 |
| Portugal | 125 |
| Slovakia | 60 |
| Spain | 354 |
| Sweden | 93 |
| Switzerland | 379 |
| United Kingdom | 803 |

6831

OBSERVERS

| | |
|--------|------|
| India | 146 |
| Japan | 238 |
| Russia | 883 |
| Turkey | 94 |
| USA | 1757 |

3118

CANDIDATE FOR ACCESSION

| | |
|---------|----|
| Romania | 88 |
|---------|----|

ASSOCIATE MEMBER IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

| | |
|--------|----|
| Israel | 63 |
| Serbia | 31 |

OTHERS

| | | | | | | | | | |
|------------|-----|----------------|-----|------------|----|--------------|----|-----------|----|
| Argentina | 19 | Chile | 7 | Georgia | 10 | Morocco | 10 | Tunisia | 1 |
| Armenia | 15 | China | 114 | Iceland | 4 | New Zealand | 9 | Ukraine | 25 |
| Australia | 32 | China (Taipei) | 69 | Iran | 23 | Pakistan | 22 | Venezuela | 1 |
| Azerbaijan | 2 | Colombia | 10 | Ireland | 8 | Peru | 2 | | |
| Belarus | 22 | Croatia | 24 | Korea | 96 | Saudi Arabia | 3 | | |
| Brazil | 107 | Cuba | 3 | Lithuania | 13 | Slovenia | 30 | | |
| Canada | 168 | Cyprus | 7 | Malta | 1 | South Africa | 25 | | |
| | | Egypt | 11 | Mexico | 41 | Thailand | 5 | | |
| | | Estonia | 17 | Montenegro | 1 | T.F.Y.R.O.M. | 2 | | |

959

Mais de 10 nacionalidades: Brasil, França, Inglaterra, Sérvia, Holanda, Áustria, Itália, Portugal, Espanha, Suécia, Rússia



Obrigado

Referências

- <http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/>
- <http://teachers.web.cern.ch/teachers/>
- A Historical Profile of the Higgs Bosons. J. Ellis, M. K Gaillard e D. V. Nanopoulos. arXiv:1201.6045v1
- The Higgs: so simple yet so unnatural. G. Altarelli. arXiv: 1308.0545v1