



# A Física das Partículas Elementares em 2013

## Neutrinos e a descoberta do Bosão de Higgs

Jorge C. Romão

Instituto Superior Técnico, Departamento de Física & CFTP

A. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

3 de Dezembro de 2013

## Introdução

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

- De que é feito o Universo?
  - ◆ As Interacções Fundamentais
  - ◆ Os Constituintes Elementares
  - ◆ Matéria e Anti-matéria
  
- Neutrinos
  - ◆ Os neutrinos e as suas anti-partículas
  - ◆ A velocidade dos neutrinos e a Relatividade Restrita
  
- A Unificação e a estabilidade do próton
  
- A experiência LHC no CERN
  - ◆ A escala mais pequena
  - ◆ A descoberta do bóson de Higgs.

# As Interações Fundamentais

Todos os processos que ocorrem no Universo têm por base somente 4 **Forças** ou **Interações** fundamentais.

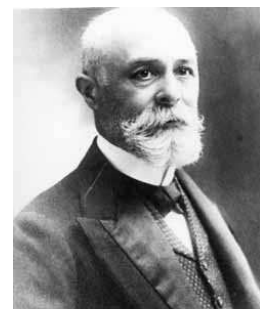
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc XIX	Estrutura Atómica
Fraca	Séc XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc XX	Coesão dos Núcleos



Newton



Maxwell



Becquerel



Yukawa

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

**• Força**

- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

Introdução

De que somos feitos?

**• Força**

- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

Neutrinos

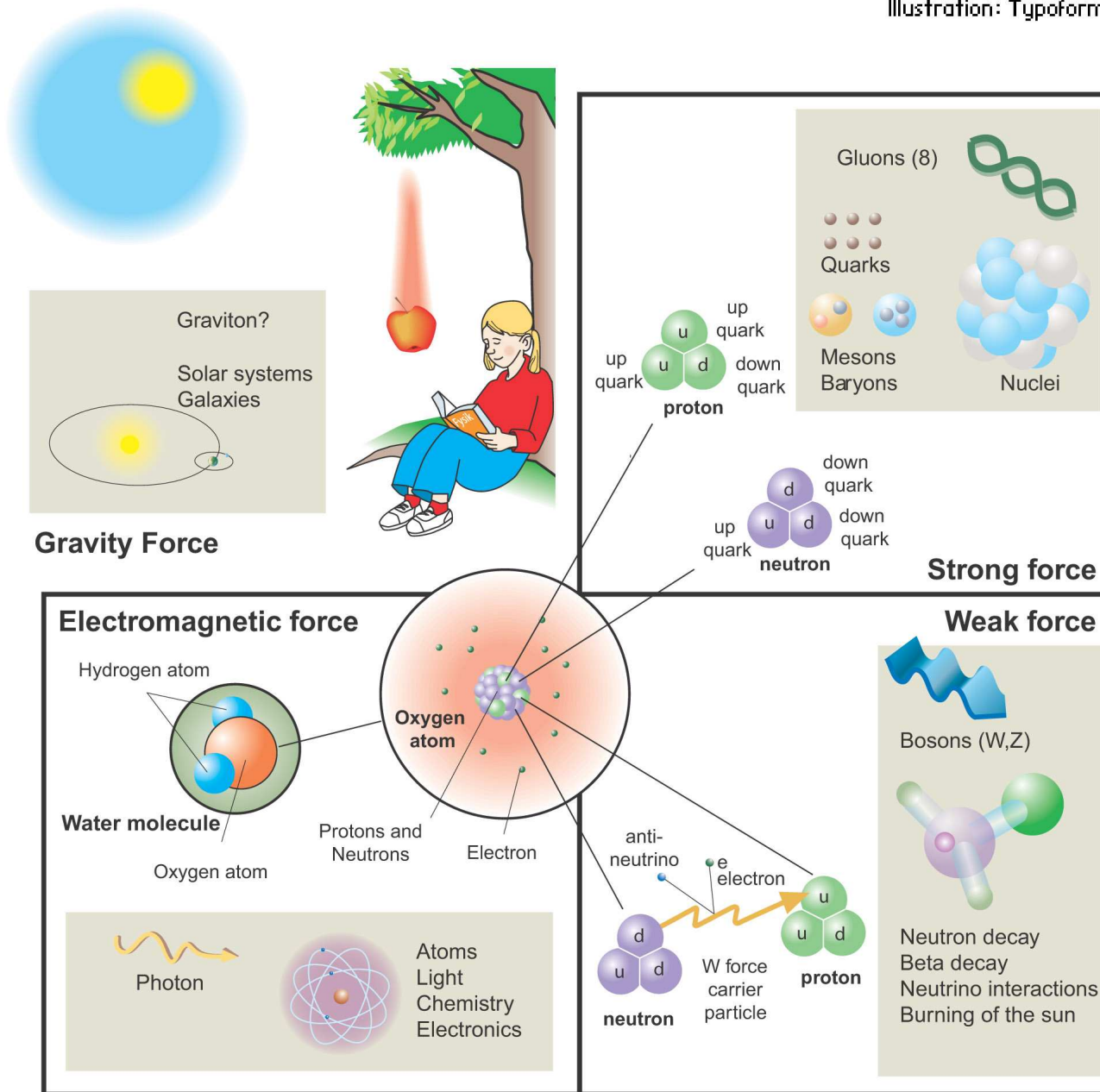
Unificação

LHC e o CERN

O Higgs em 2013

Aprender Mais

Illustration: Typoform



# A Descrição Moderna duma Força

Modernamente o conceito de força é substituído pelo de interacção.

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

**• Força**

- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

[Neutrinos](#)

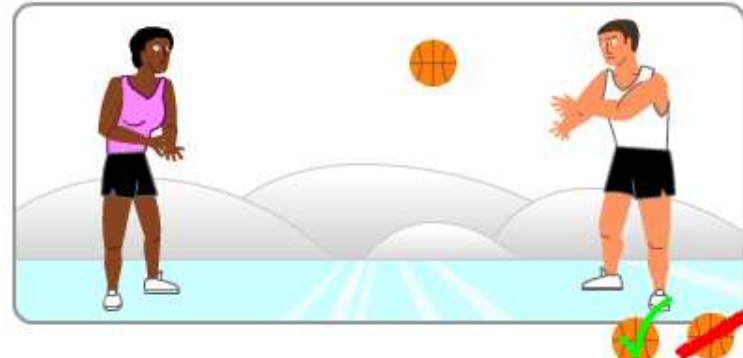
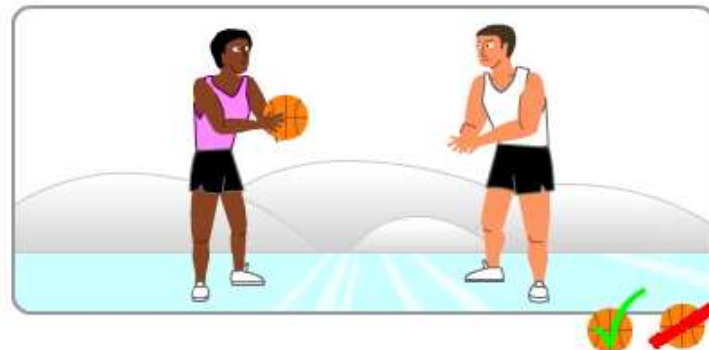
[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

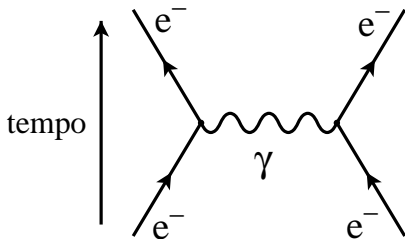
[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

<p><b>Mecânica Clássica</b></p> <p><b>Electromagnetismo</b></p> <p><b>Relatividade Restrita</b></p> <p><b>Mecânica Quântica</b></p>	<p><b>Interacção instantânea (força)</b></p> <p><b>Interacção através da noção de Campo</b></p> <p><b>Não há interacções instantâneas</b></p> <p><b>Interacções descritas por <i>troca</i> de partículas</b></p>
---	--



Feynman



## Introdução

### De que somos feitos?

- Força
- **Como Explicar?**
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

### Neutrinos

### Unificação

### LHC e o CERN

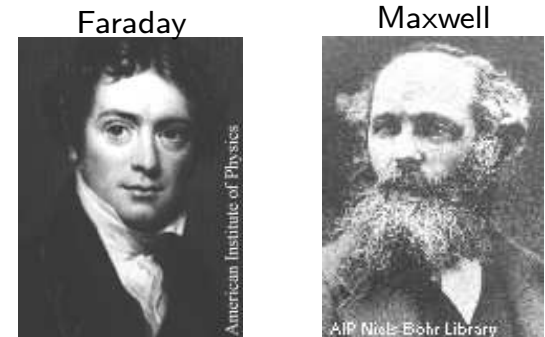
### O Higgs em 2013

### Aprender Mais

## Paradigma: O Electromagnetismo

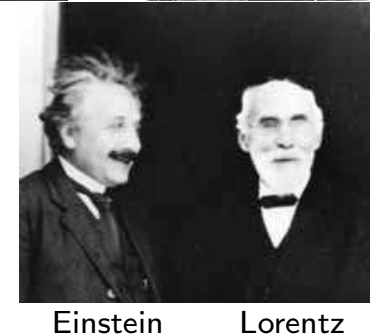
### □ Faraday, Maxwell

- ◆ Conceito de campo
- ◆ Velocidade finita de propagação



### □ Transformações de Lorentz

- ◆ Relatividade: Invariância, covariância ...



### □ Primeira Unificação

Electromagnetismo  $\supset$  Electricidade + Magnetismo

### □ Segunda Unificação

Electromagnetismo  $\supset$  Luz

## Introdução

### De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- **TC Modernas**
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

## Neutrinos

## Unificação

## LHC e o CERN

## O Higgs em 2013

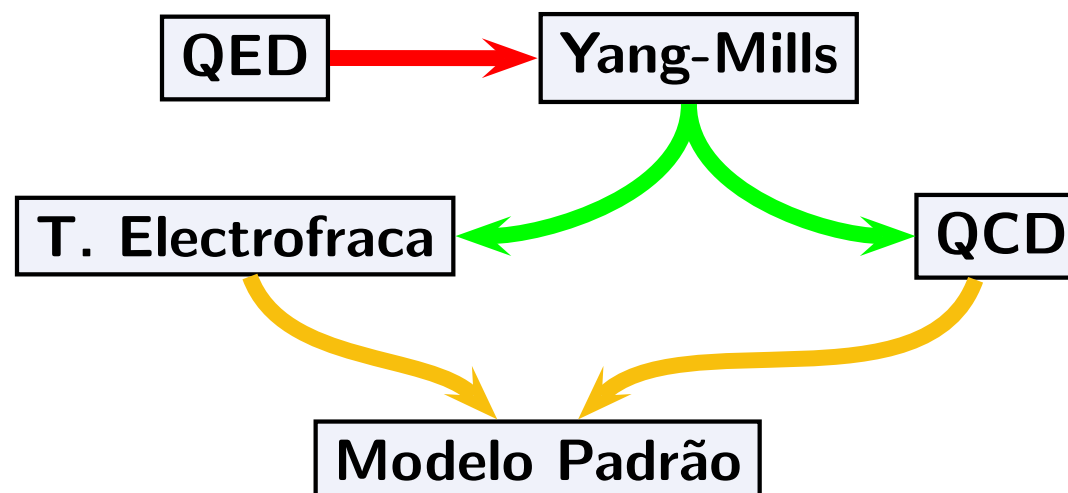
## Aprender Mais

### Os Ingredientes Fundamentais

- ❑ Relatividade Restrita
- ❑ Mecânica Quântica
- ❑ Simetrias de padrão (gauge)



Teoria Quântica dos Campos



# Simetrias de Padrão (Gauge)

- [Introdução](#)

---

- [De que somos feitos?](#)

  - Força
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - **Simetrias Gauge**
  - Propriedades
  - Os Constituintes
  - Leptões
  - Quarks
  - Hadrões
  - Higgs
  - Anti-Matéria
  - Resumo

---

- [Neutrinos](#)

---

- [Unificação](#)

---

- [LHC e o CERN](#)

---

- [O Higgs em 2013](#)

---

- [Aprender Mais](#)

Teorias Modernas  $\longleftrightarrow$  Simetrias de Gauge

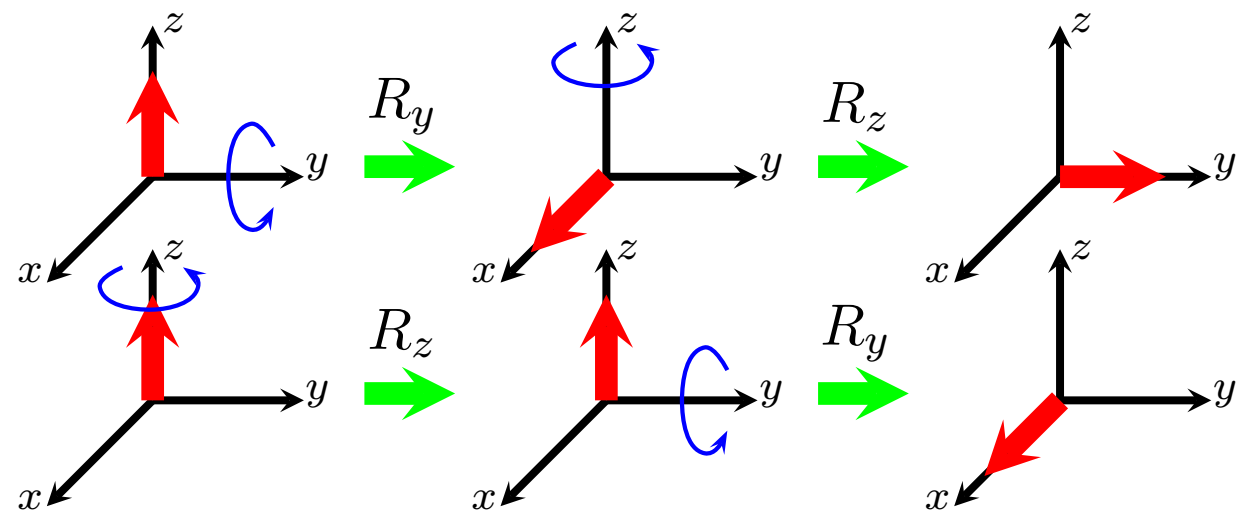
**Electromagnetismo**  $V$  ou  $V' = V + V_0 \rightarrow$  o mesmo  $\vec{E}$

$$\begin{array}{ccccc}
 V & \xrightarrow{1} & V_1 & \xrightarrow{2} & V_{12} \\
 V & \xrightarrow{2} & V_2 & \xrightarrow{1} & V_{21}
 \end{array}$$

**Grupo Abeliano**  
 $V_{12} = V_{21}$   
 $2 + 3 = 3 + 2$



**Interacção Forte & Fraca**  $\rightarrow$  **Grupo Não Abeliano**



Yang & Mills

$R_y R_z \neq R_z R_y$



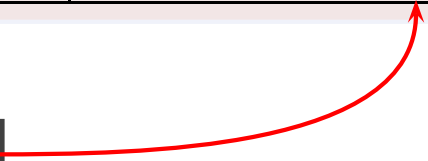
# Propriedades Gerais das Interações

- Introdução
- De que somos feitos?
  - Força
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - Simetrias Gauge
  - **Propriedades**
  - Os Constituintes
  - Leptões
  - Quarks
  - Hadrões
  - Higgs
  - Anti-Matéria
  - Resumo
- Neutrinos
- Unificação
- LHC e o CERN
- O Higgs em 2013
- Aprender Mais

<i>Interação</i>	<i>Alcance</i>	<i>Intensidade</i>	<i>Portador</i>	<i>Massa</i>
Gravitacional	Infinito	$10^{-40}$	Gravitão	0
Fraca	$< 10^{-18}$ m	$10^{-5}$	$W^+, W^-, Z^0$	$\neq 0$
Electromagnética	Infinito	$10^{-2}$	fotão ( $\gamma$ )	0
Forte	$< 10^{-15}$ m	1	8 gluões	0

<i>Interação</i>	<i>Relativista</i>	<i>Quântica</i>	<i>Designação</i>
Gravitacional	Sim	Não	Relatividade Geral
Fraca	Sim	Sim	Teoria Electrofraca
Electromagnética	Sim	Sim	
Forte	Sim	Sim	Cromodinâmica Quântica

**Modelo Padrão**



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
  - Força
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - Simetrias Gauge
  - Propriedades
- Os Constituintes**
  - Leptões
  - Quarks
  - Hadrões
  - Higgs
  - Anti-Matéria
  - Resumo
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

☐ Matéria (Spin 0)

◆ Bosão de Higgs

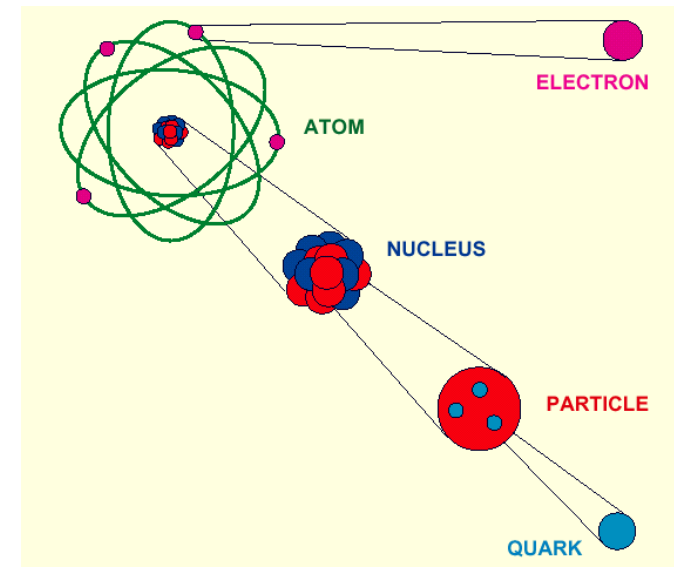
☐ Matéria (Spin 1/2)

◆ Leptões: **Só interacção electrofraca**

◆ Quarks: **Interacção electrofraca e forte**

☐ Portadores da Interacção (Spin 1)

◆ Bosões de gauge



<i>Interacção</i>	<i>Alcance</i>	<i>Intensidade</i>	<i>Portador</i>	<i>Massa</i>
Fraca	$< 10^{-18}$ m	$10^{-5}$	$W^+, W^-, Z^0$	$\neq 0$
Electromagnética	Infinito	$10^{-2}$	fotão ( $\gamma$ )	0
Forte	$< 10^{-15}$ m	1	8 gluões	0

## Introdução

### De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes

### • Leptões

- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

### Neutrinos

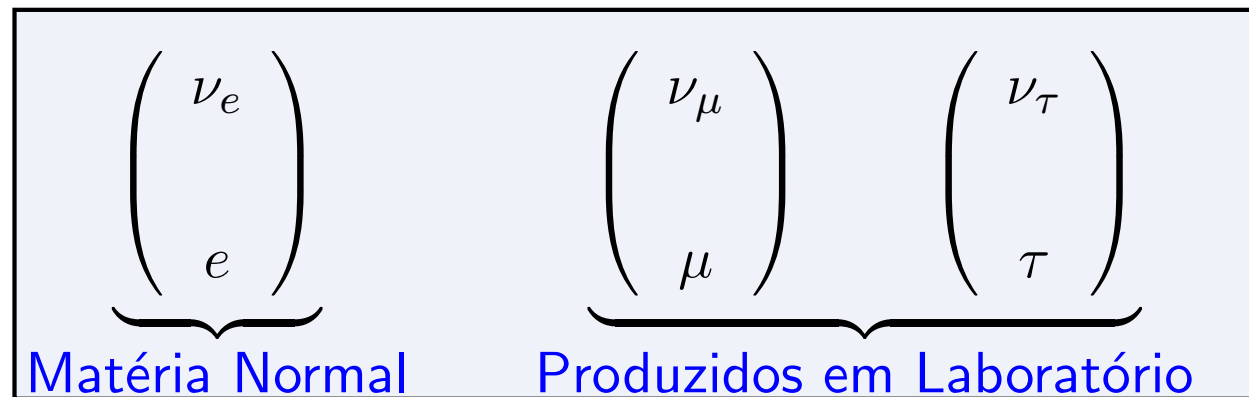
### Unificação

### LHC e o CERN

### O Higgs em 2013

### Aprender Mais

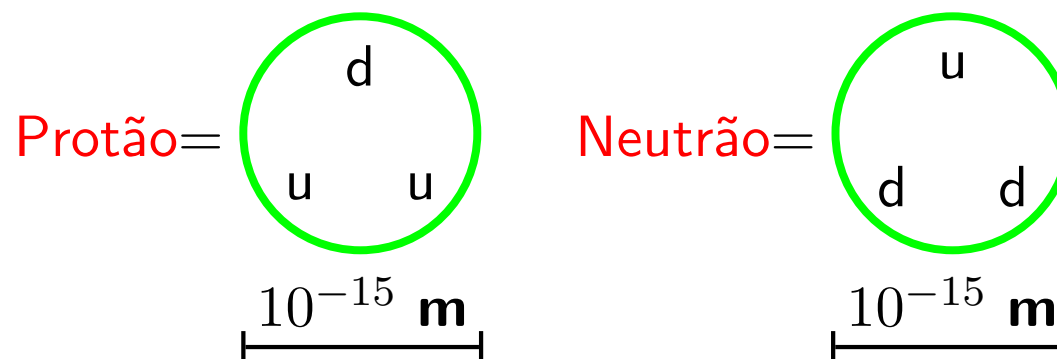
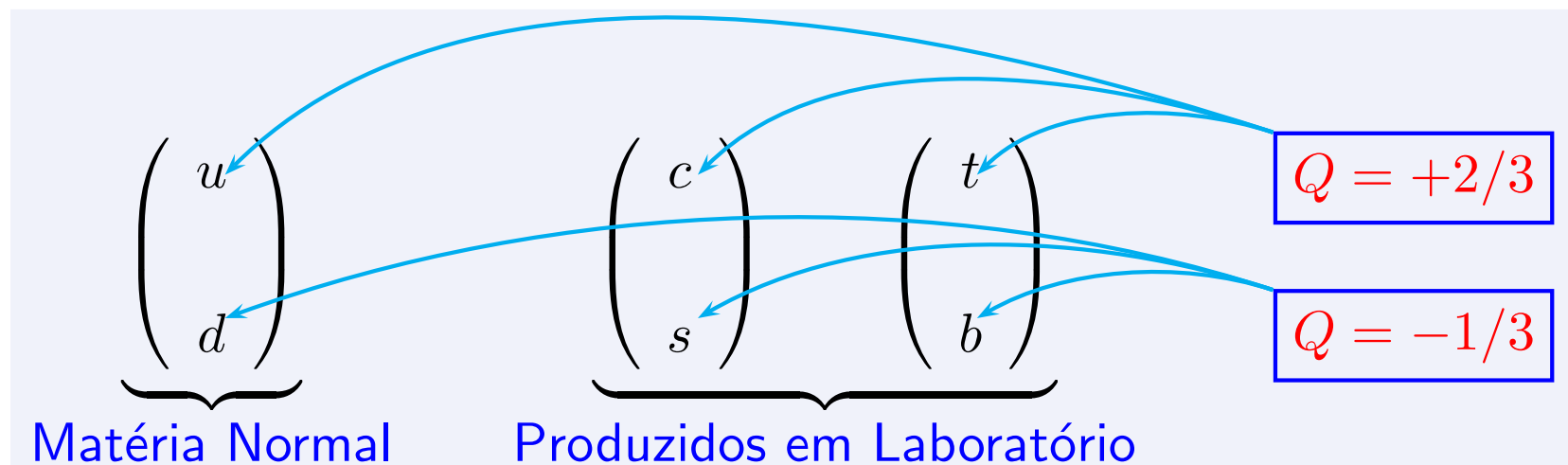
- Os leptões têm só interacção electrofraca.
- Quais são os leptões? Os mais conhecidos são o electrão e o neutrino.
- Mas a Natureza apresenta uma repetição que não sabemos explicar.



- $m_\tau = 3484 \times m_e, m_\mu = 212 \times m_e$

**LEP:** Número de neutrinos leves:  $2.994 \pm 0.012$

Quais são os quarks? Tanto quanto se sabe hoje há **seis** espécies diferentes. Verifica-se a mesma repetição que no caso dos leptões:



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- **Quarks**
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

## Introdução

### De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões

- Higgs
- Anti-Matéria
- Resumo

### Neutrinos

### Unificação

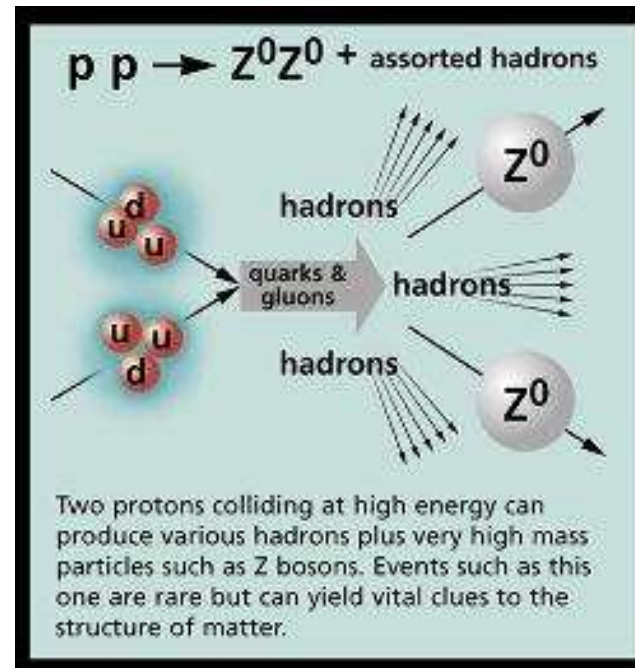
### LHC e o CERN

### O Higgs em 2013

### Aprender Mais

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
These are a few of the many types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons.					
These are a few of the many types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	antiproton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2



Introdução

De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- **Higgs**
- Anti-Matéria
- Resumo

Neutrinos

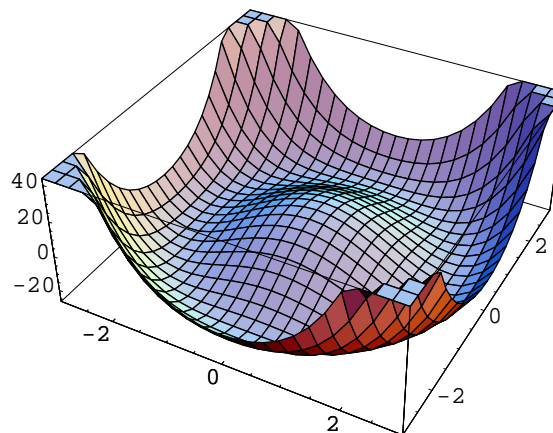
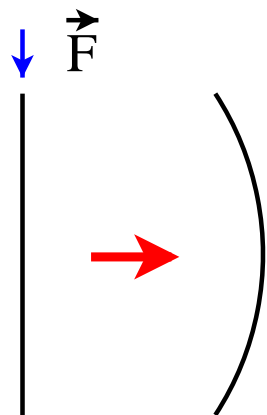
Unificação

LHC e o CERN

O Higgs em 2013

Aprender Mais

## Quebra espontânea de simetria



**T. de Goldstone:**  
Há uma partícula  
sem massa

**T. de Goldstone + Simetria de Gauge = Mecanismo de Higgs**



- Campos de Gauge adquirem massa  
 $M_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$ ,  $M_Z = 91.2 \text{ GeV}/c^2$ ,  $M_\gamma = 0$ ,  $M_g = 0$
- Um bóson de Higgs é uma partícula real. **Descoberta no LHC!**

## [Introdução](#)

### [De que somos feitos?](#)

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs

### [• Anti-Matéria](#)

- Resumo

## [Neutrinos](#)

## [Unificação](#)

## [LHC e o CERN](#)

## [O Higgs em 2013](#)

## [Aprender Mais](#)

- ❑ Em 1928, Paul Dirac propôs, como consequência da sua equação relativista para o electrão, a existência de anti-partículas. O anti-electrão, **positrão**, teria a mesma massa mas a carga oposta.
- ❑ Mostrou também que isto devia ser verdade para todas as partículas (na altura só era conhecido o electrão e o protão).
- ❑ Em 1932, Carl D. Anderson descobriu o positrão em colisões de raios cósmicos.
- ❑ Posteriormente foram descobertos o anti-protão, o anti-neutrão e anti-partículas para todas as partículas conhecidas.
- ❑ Como não têm carga, as partículas neutras podem ser idênticas às suas próprias anti-partículas, caso do fóton (e talvez do neutrino?), ou diferentes como no caso do neutrão. Neste último caso são as propriedades das interacções fortes que as distinguem.



Dirac



Anderson

# Resumo das Interacções e Constituintes

## Introdução

### De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- Anti-Matéria
- **Resumo**

## Neutrinos

## Unificação

## LHC e o CERN

## O Higgs em 2013

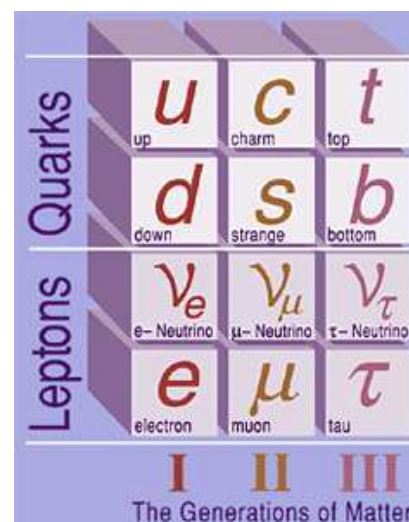
## Aprender Mais



### Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

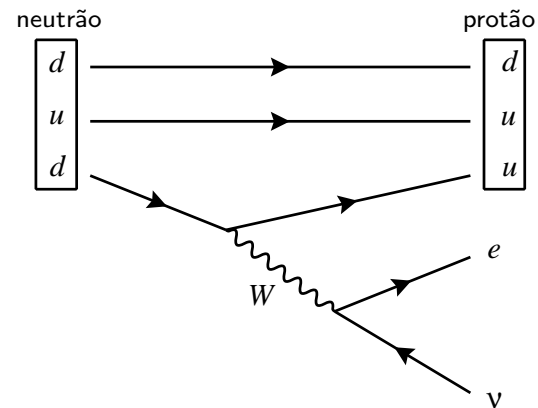
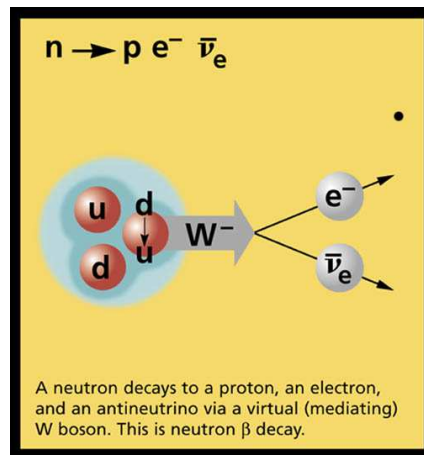
Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	$10^{-41}$ $10^{-41}$	0.8 $10^{-4}$	1 1	25 60





- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos**
- Majorana
- $\nu$ ,  $c$  e Relatividade
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

- Em 1931, Wolfgang Pauli introduziu o neutrino para “salvar” a lei da conservação de energia nos decaimentos radioactivos designados por decaimentos  $\beta$ .



Pauli



Fermi

- Foi Enrico Fermi que deu o nome **neutrino**, que em italiano significa **pequeno e neutro**.
- Há pelo menos 3 tipos de neutrinos. O primeiro a ser descoberto foi o neutrino do electrão por Frederick Reines e Clyde Cowan em 1956 (Prémio Nobel de 1995).
- Devido a terem somente interacção fraca as suas interacções são muito difíceis de detectar e exigem detectores enormes e muito tempo de detecção. Um neutrino que atravesse a Terra tem, em média, uma interacção.



Reines



Cowan

# Os neutrinos têm massa?

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos**
- Majorana
- $\nu$ ,  $c$  e Relatividade
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

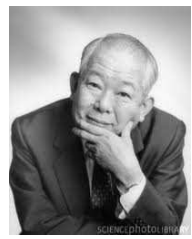
- ❑ Durante muito tempo os físicos pensaram que os neutrinos não tinham massa. As experiências davam só um limite superior por ser muito difícil fazer esta medida. A massa era compatível com ser zero, dentro do erro experimental.
- ❑ Em 1957, Bruno Pontecorvo, sugeriu uma maneira indirecta de detectar a massa dos neutrinos. Se tivessem massa, os neutrinos produzidos nas interacções fracas poderiam oscilar e mudar o seu “carácter”.
- ❑ Experiências com os neutrinos produzidos no Sol e na Atmosfera demonstraram que era esse o caso. Raymond Davis Jr. e Masatoshi Koshiba tiveram o Prémio Nobel de 2002 pelas suas contribuições para este resultado.



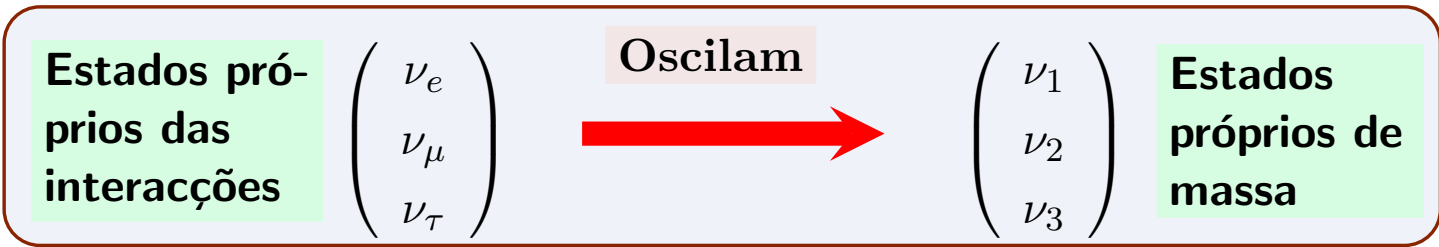
Pontecorvo



Davis



Koshiba



- ❑ Em cada segundo passam através de nós  $100000000000000 = 10^{14}$  neutrinos vindos do Sol!

# Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- **Neutrinos**
- Majorana
- $\nu$ ,  $c$  e Relatividade
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

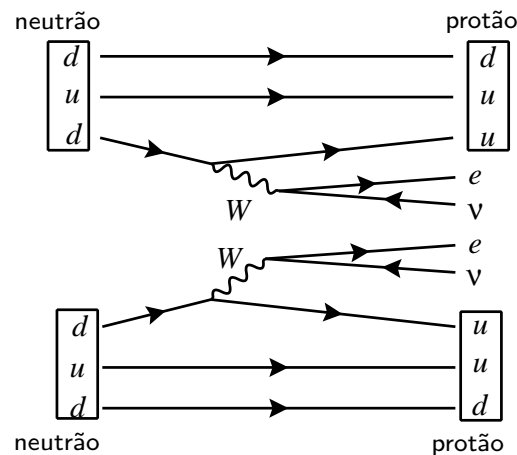
- ❑ O físico italiano Ettore Majorana, que desapareceu misteriosamente aos 32 anos em 1938, avançou a hipótese de que os neutrinos são as suas próprias anti-partículas. Em memória do seu nome, uma partícula que seja a sua própria anti-partícula, é designada partícula de Majorana.
- ❑ Esta é uma questão em aberto que, como sempre em Física, deve ser decidida experimentalmente.
- ❑ Em 1935, Maria Goeppert-Mayer previu que, em alguns núcleos, é possível que ocorram simultaneamente dois declínios  $\beta$ , processo designado por **duplo declínio**  $\beta$ . Neste processo dois neutrões passam a protões com a emissão de dois electrões e de dois neutrinos. Tal como no declínio  $\beta$  os neutrinos só são detectados indirectamente, através do balanço energético. Este processo é extremamente raro, mas já foi verificado experimentalmente.



Majorana



Goeppert-Mayer



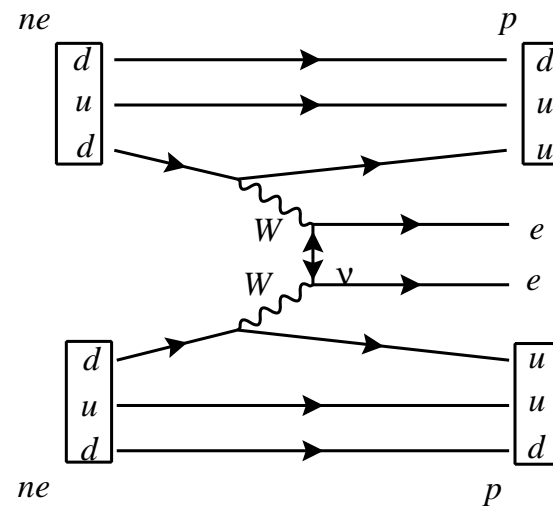


Majorana



Furry

- Em 1939, Wolfgang Furry propôs que um duplo decaimento  $\beta$  sem a emissão de neutrinos fosse possível. Para que isto aconteça, os neutrinos têm que ter massa e serem as suas próprias anti-partículas (partículas de Majorana).



- Neste momento estão, ou em começo de operação ou em construção, um número grande de experiências destinadas a baixar este limiar de detecção e a demonstrar o carácter de Majorana dos neutrinos.

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

• Neutrinos

• Majorana

•  $\nu$ ,  $c$  e Relatividade

[Unificação](#)

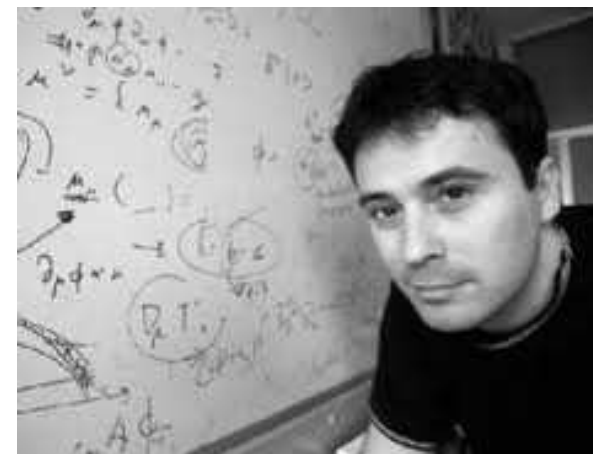
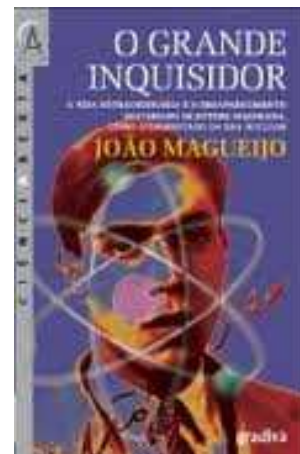
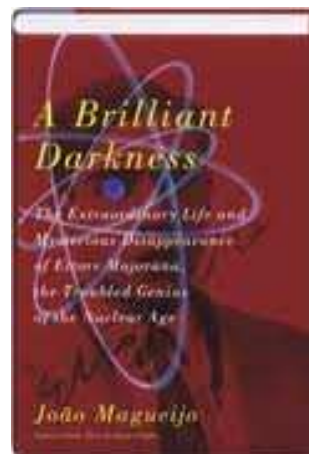
[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

Numa noite de Março de 1938, o físico italiano Ettore Majorana apanhou um navio de Nápoles, onde trabalhava há pouco tempo, para Palermo e desapareceu para sempre. Levava o passaporte e o equivalente a 50 mil euros. Tinha 31 anos. Ninguém sabe o que aconteceu, o corpo nunca foi encontrado. Suicidou-se, pois afinal estava deprimido há cinco anos? Ou quis isolar-se de todos, incluindo de uma mãe dominadora, refugiando-se num mosteiro?

Ninguém sabe, mas podem ver esta personagem fascinante em ...



João Magueijo

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

• Neutrinos

• Majorana

•  $\nu$ ,  $c$  e Relatividade

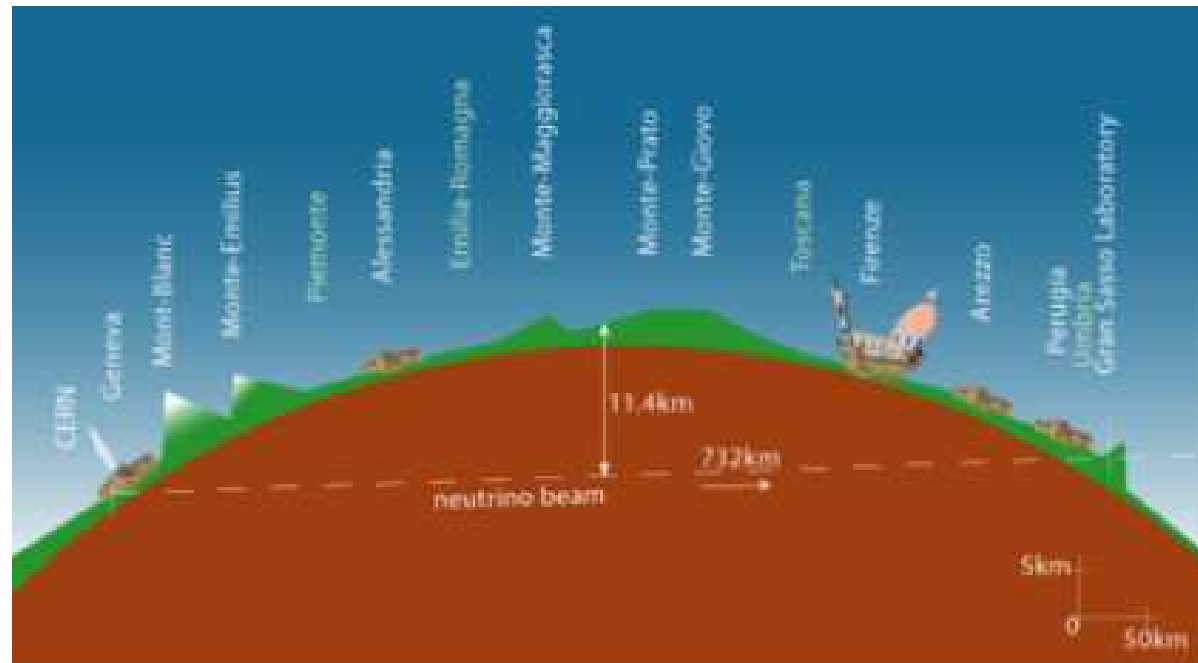
[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

- ❑ A teoria da Relatividade Restrita de Einstein (1905) tem como consequência que há uma velocidade limite a velocidade da luz  $c = 300000 \text{ Km/s}$ . Nenhuma partícula pode viajar a uma velocidade superior a  $c$
- ❑ A experiência OPERA envia um feixe de neutrinos do CERN até ao laboratório Gran Sasso em Itália, numa distância de 732 Km. Uma das coisas que medem é a velocidade destes neutrinos.
- ❑ Os resultados apresentados em 2011 apareceram em todo o lado pois contradiziam a teoria de Einstein. Contudo havia um erro experimental. Um cabo estava mal ligado!



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

• [Neutrinos](#)

• [Majorana](#)

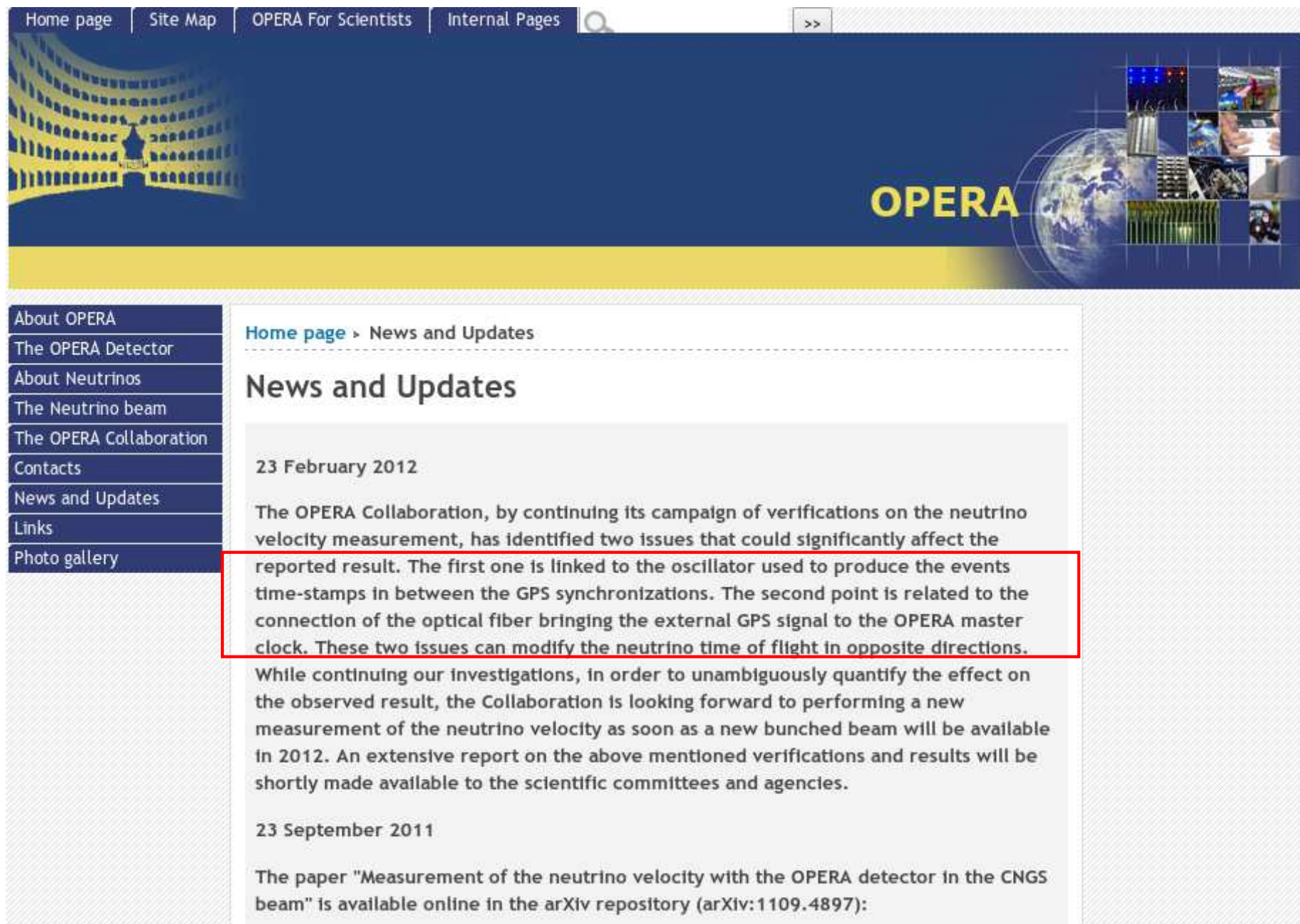
•  [\$\nu\$ ,  \$c\$  e Relatividade](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)



Home page | Site Map | OPERA For Scientists | Internal Pages

**OPERA**

About OPERA  
The OPERA Detector  
About Neutrinos  
The Neutrino beam  
The OPERA Collaboration  
Contacts  
News and Updates  
Links  
Photo gallery

[Home page](#) > News and Updates

## News and Updates

23 February 2012

The OPERA Collaboration, by continuing its campaign of verifications on the neutrino velocity measurement, has identified two issues that could significantly affect the reported result. The first one is linked to the oscillator used to produce the events time-stamps in between the GPS synchronizations. The second point is related to the connection of the optical fiber bringing the external GPS signal to the OPERA master clock. These two issues can modify the neutrino time of flight in opposite directions.

While continuing our investigations, in order to unambiguously quantify the effect on the observed result, the Collaboration is looking forward to performing a new measurement of the neutrino velocity as soon as a new bunched beam will be available in 2012. An extensive report on the above mentioned verifications and results will be shortly made available to the scientific committees and agencies.

23 September 2011

The paper "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam" is available online in the arXiv repository (arXiv:1109.4897):

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

• Neutrinos

• Majorana

•  $\nu$ ,  $c$  e Relatividade

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

É interessante analisar o impacto que este resultado teve nas notícias. Ver por exemplo

- ❑ Anúncio da colaboração no CERN

<http://www.youtube.com/watch?v=OBnm9-pi6yo>

- ❑ Nas notícias: Einstein estava errado!

<http://www.youtube.com/watch?v=WFzM16w9UOM>

- ❑ Afinal um cabo estava mal ligado!

<http://www.youtube.com/watch?v=DhYv3QsJh5M>



## Porquê quatro e não só uma interacção?

- Semelhanças entre Electromagnetismo e a Relatividade Geral:
  - ◆ Longo alcance: fóton e gravitão com massa nula
  - ◆ Variação com  $1/r^2$
  
- Einstein tentou **durante 30 anos** duas vias:
  - ◆ Teorias de Kaluza Klein a 5 dimensões
  - ◆ Modificações da métrica do espaço-tempo a 4 dimensões

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

● Einstein

● Modelo Padrão

● Unificação

● Decaimento p

● SuperK

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

● Einstein

● Modelo Padrão

● Unificação

● Decaimento p

● SuperK

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

Em *Subtle is the Lord* (1982), o biógrafo de Einstein, Abraham Pais, é muito crítico dos trabalhos sobre a Unificação. No entanto a nossa compreensão hoje é diferente.

- ❑ Na altura ( $\sim 1930$ ) só se conheciam o electrão e o protão.
- ❑ Apesar de tudo a gravitação ainda resiste à unificação.
- ❑ As teorias de Kaluza-Klein estão na base de todas as tentativas modernas de unificação que incluam a gravitação, como por exemplo as **teorias de cordas**.
- ❑ Tal como no caso da constante cosmológica, Einstein possivelmente estava certo antes de tempo!

# O Modelo Padrão: Um Modelo de Sucesso

- O Modelo Padrão: Teoria Electrofraca de Glashow- Weinberg-Salam (Prémio Nobel de 1979) mais a Cromodinâmica Quântica (QCD)



Glashow Weinberg Salam

1979

- **Avanços do lado teórico:** Prova da renormalização (Prémio Nobel de 1999) e liberdade assintótica (Prémio Nobel de 2004).



't Hooft Veltman

1999



Gross Politzer Wilczek

2004

- **Avanços do lado experimental:** Descoberta das correntes neutras (CERN 1973), descoberta do  $W^\pm$  e do  $Z^0$  (CERN 1983, Prémio Nobel de 1984), resultados do LEP (CERN 1989-2000).



Rubbia Van der Meer

1984

Conduziram hoje a uma situação em que este modelo está testado ao nível de 0.1%.

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

- Einstein
- **Modelo Padrão**

- Unificação
- Decaimento p
- SuperK

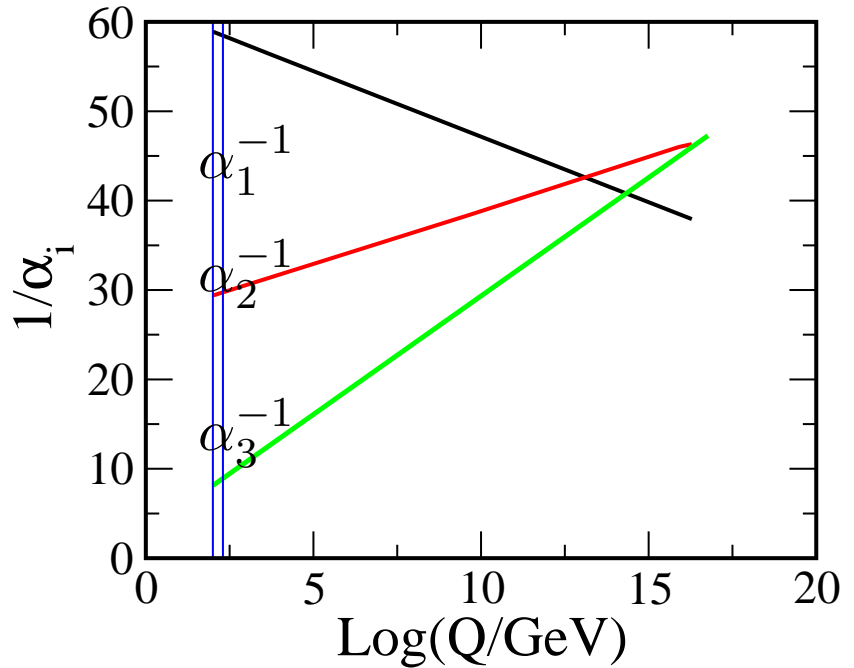
[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

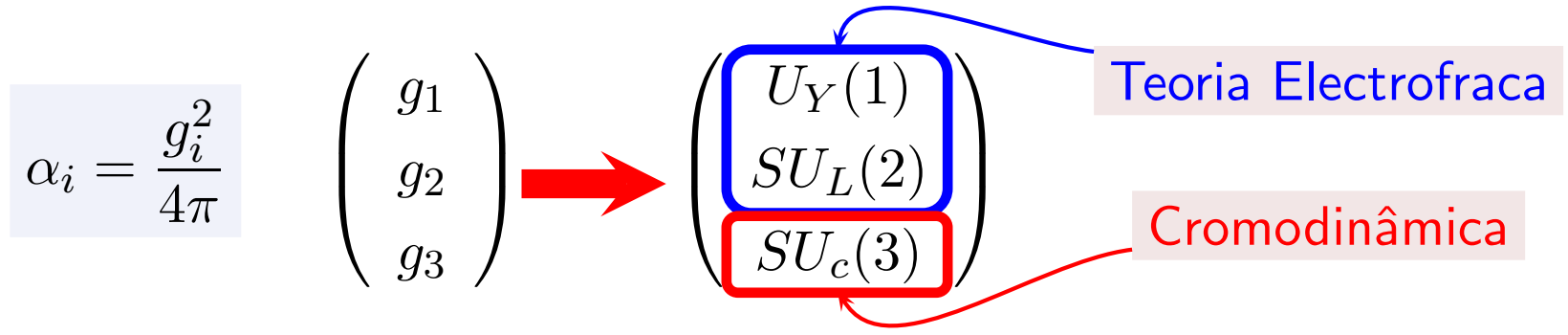
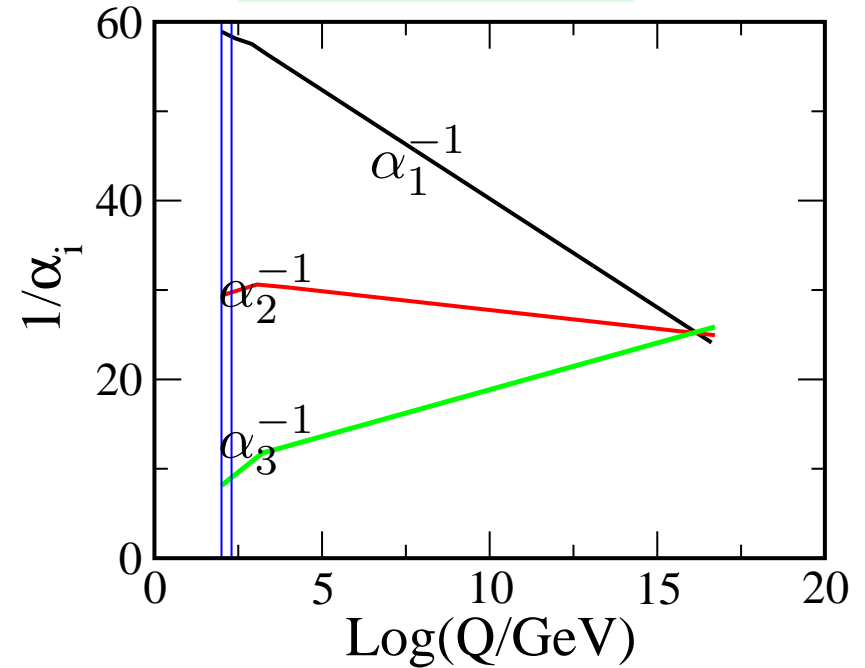
[Aprender Mais](#)

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- Einstein
- Modelo Padrão
- **Unificação**
- Decaimento p
- SuperK
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

### Modelo Padrão



### Supersimetria



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

- Einstein
- Modelo Padrão
- Unificação
- **Decaimento p**
- SuperK

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

- ❑ No Modelo Padrão o protão é absolutamente estável
- ❑ Em teorias de Grande Unificação (GUT) o protão pode decair
- ❑ Super-Kamiokande é o maior detector (50 000 toneladas de água pura) para observar o decaimento do protão. Está situado 1 Km debaixo do solo em Hida-city, Gifu no Japão.
- ❑ Até ao momento não há qualquer candidato o que dá um limite de

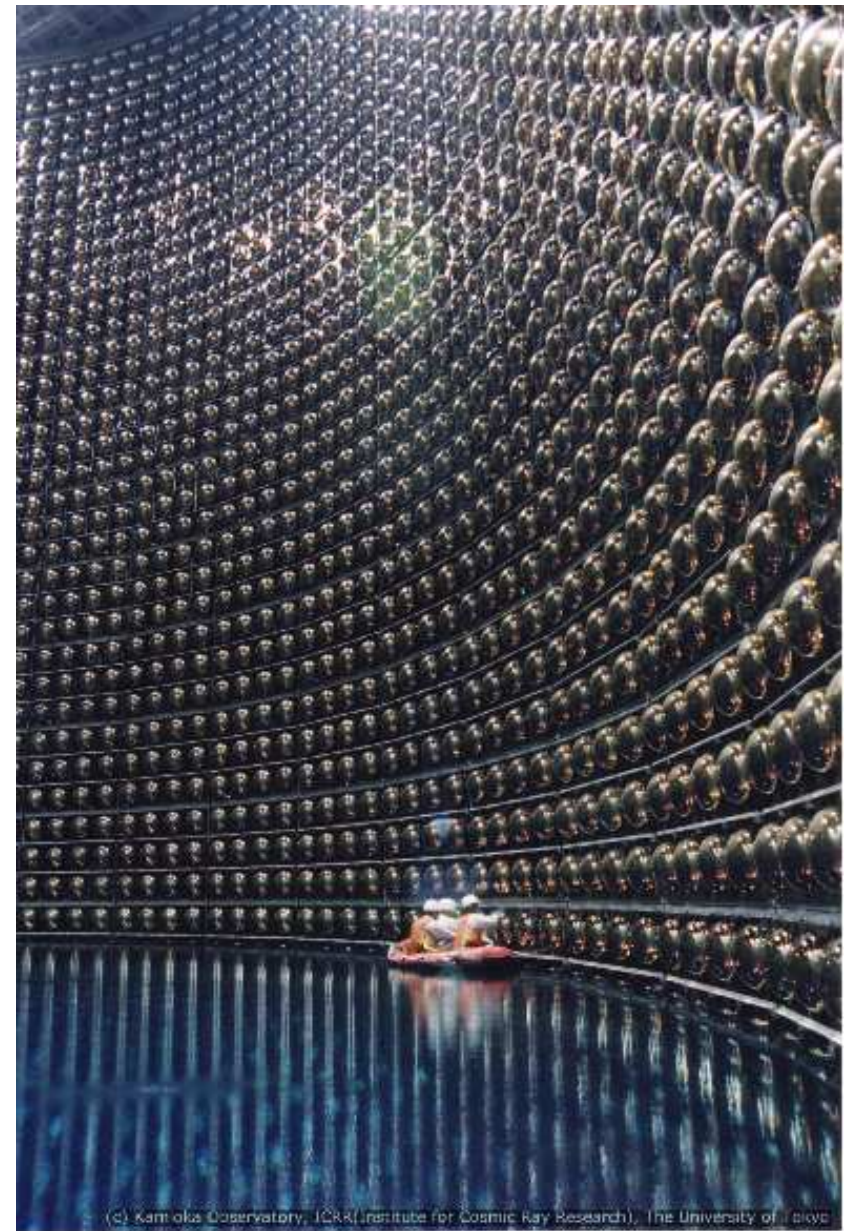
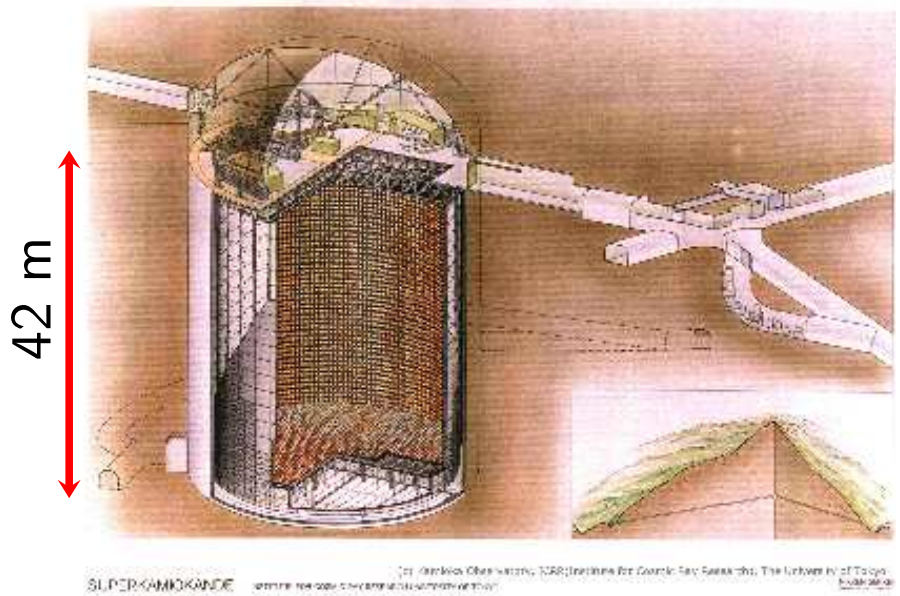
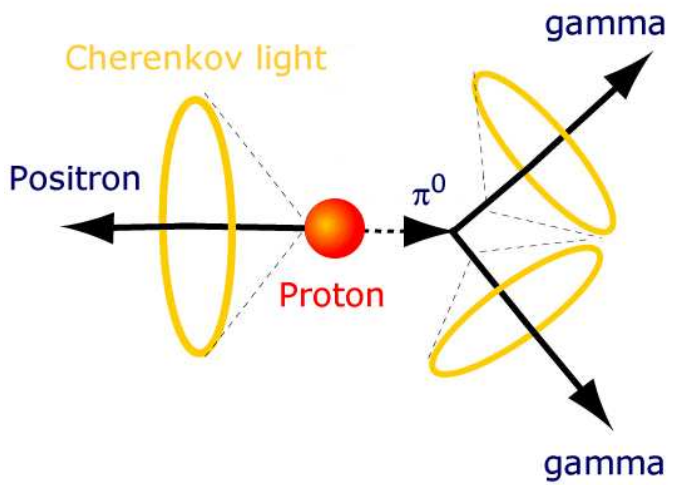
$$\tau_p > 8.2 \times 10^{33} \text{ anos}$$

- ❑ Para comparar a idade do Universo é

$$\tau_{\text{Universo}} = 13.75 \times 10^9 \text{ anos}$$

# Super-Kamiokande e o decaimento do próton

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- Einstein
- Modelo Padrão
- Unificação
- Decaimento p
- **SuperK**
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

**[LHC e o CERN](#)**

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- Um Detector
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

Vamos aqui tentar explicar porque é que os físicos constroem grandes máquinas para explorar os segredos do infinitamente pequeno.

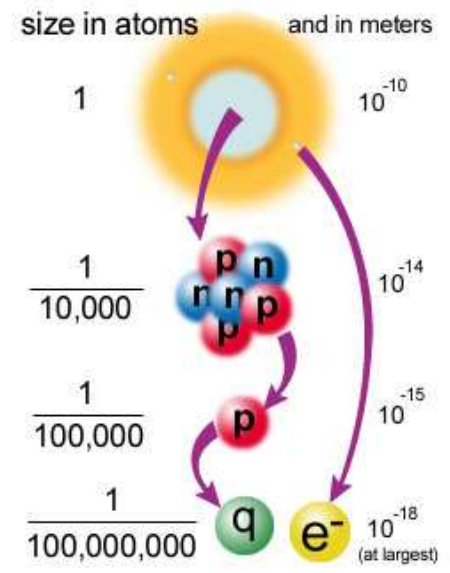
- Há alguma partícula mais pequena do que os quarks?
  - ◆ Escalas e Energia
  - ◆ O LHC
- A descoberta do bóson de Higgs
  - ◆ O que é o bóson de Higgs?
  - ◆ Os resultados experimentais
  - ◆ As implicações

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [● Escalas](#)
- [● O Sítio](#)
- [● O Acelerador](#)
- [● Energia do LHC](#)
- [● Um Detector](#)
- [● Física Básica](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Aprender Mais](#)

## Princípio de Incerteza de Heisenberg

Para **ver distâncias cada vez mais pequenas**  
 são necessárias **energias cada vez maiores**

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



Escala	Energia	Relevância
$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$	$\sim 1 \text{ keV}$	<b>Átomos e Moléculas</b> <b>(Raios X)</b>
$1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$	$\sim 100 \text{ MeV}$	<b>Núcleos</b> <b>(Pequenos Aceleradores)</b>
$10^{-18} \text{ m}$	$\sim 100 \text{ GeV}$	<b>Distância mais pequena observada (LEP)</b>



## Introdução

De que somos feitos?

Neutrinos

Unificação

LHC e o CERN

• Escalas

• O Sítio

• O Acelerador

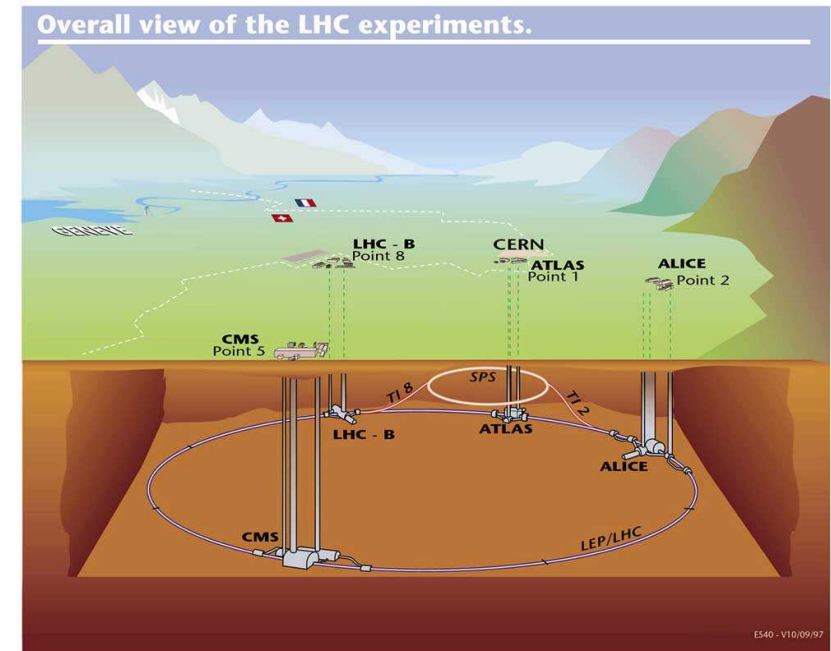
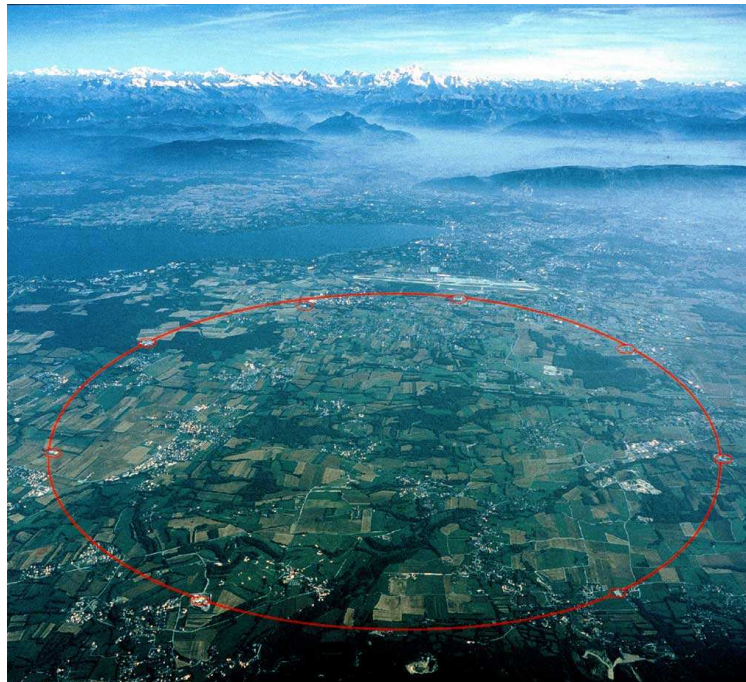
• Energia do LHC

• Um Detector

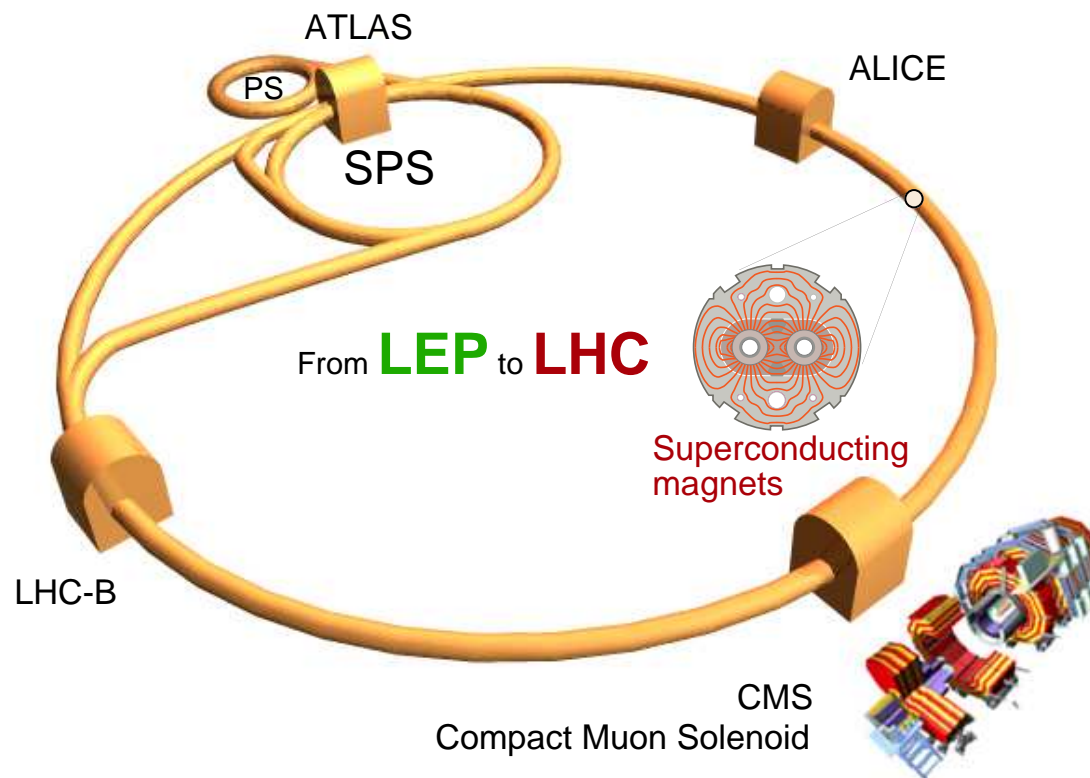
• Física Básica

O Higgs em 2013

Aprender Mais



## The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
<b>LEP</b>	e+ e-	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
<b>LHC</b>	p p	14 TeV	$10^{34}$
	Pb Pb	1312 TeV	$10^{27}$

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- **O Acelerador**
- Energia do LHC
- Um Detector
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- **Energia do LHC**

- Um Detector
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

O LHC acelera  $3 \times 10^{14}$  prótons a velocidades de 99.999999999% da velocidade da luz. A energia desse feixe corresponde a uma manada de 1000 elefantes deslocando-se a 30 m/s (108 km/hora) ou a  $3\mu\text{g}$  de anti-matéria.





[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

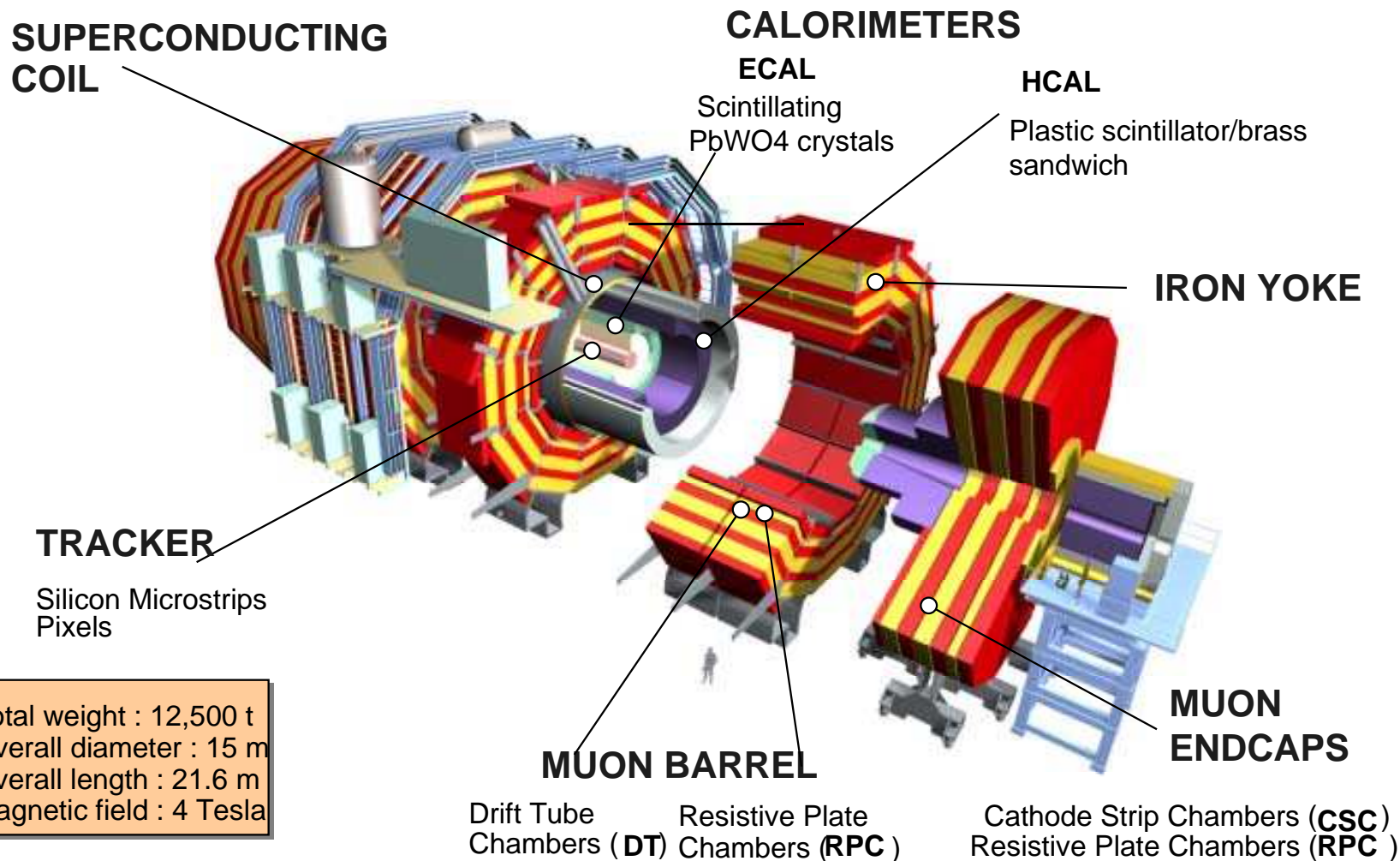
[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- **Um Detector**
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

## The CMS Detector



Total weight : 12,500 t  
 Overall diameter : 15 m  
 Overall length : 21.6 m  
 Magnetic field : 4 Tesla

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

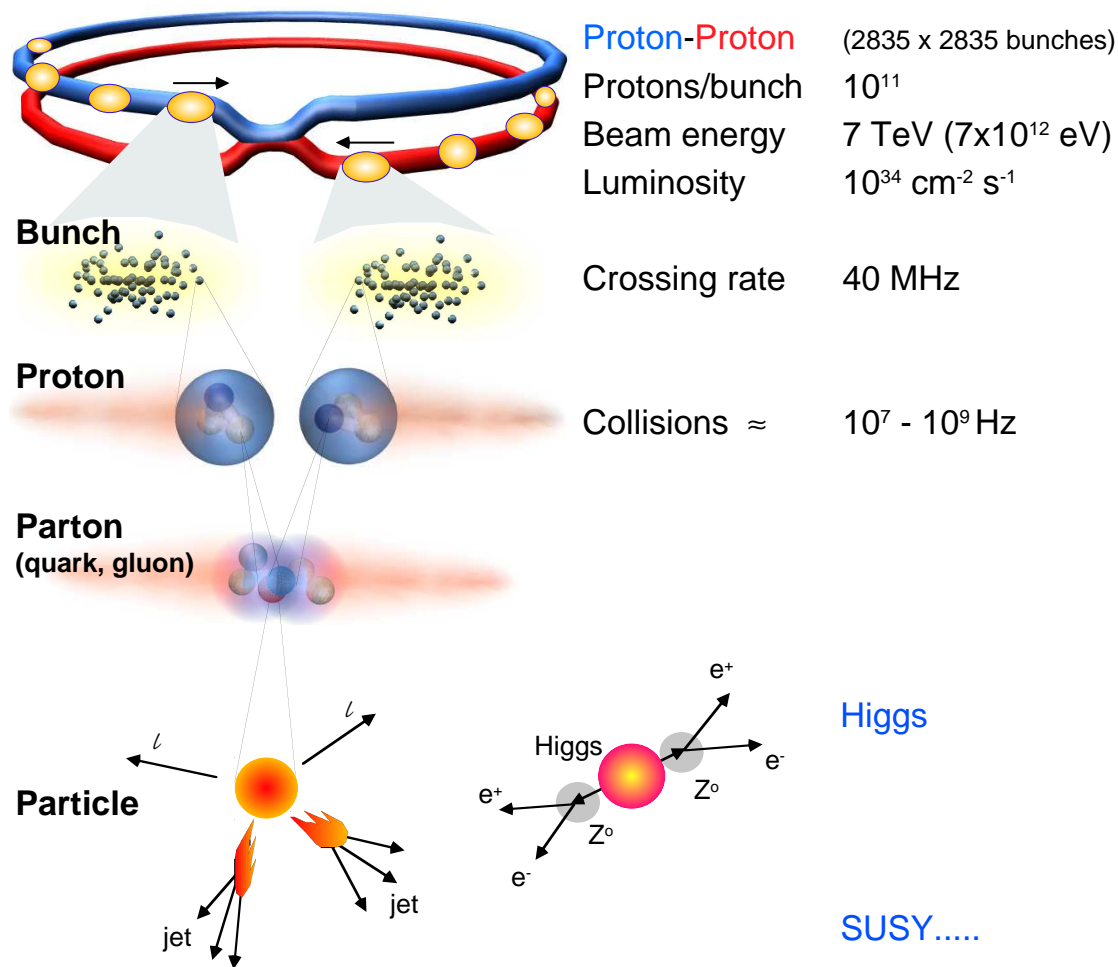
[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- Um Detector
- **Física Básica**

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

## Collisions at LHC



Selection of 1 in 10,000,000,000,000

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- Um Detector
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

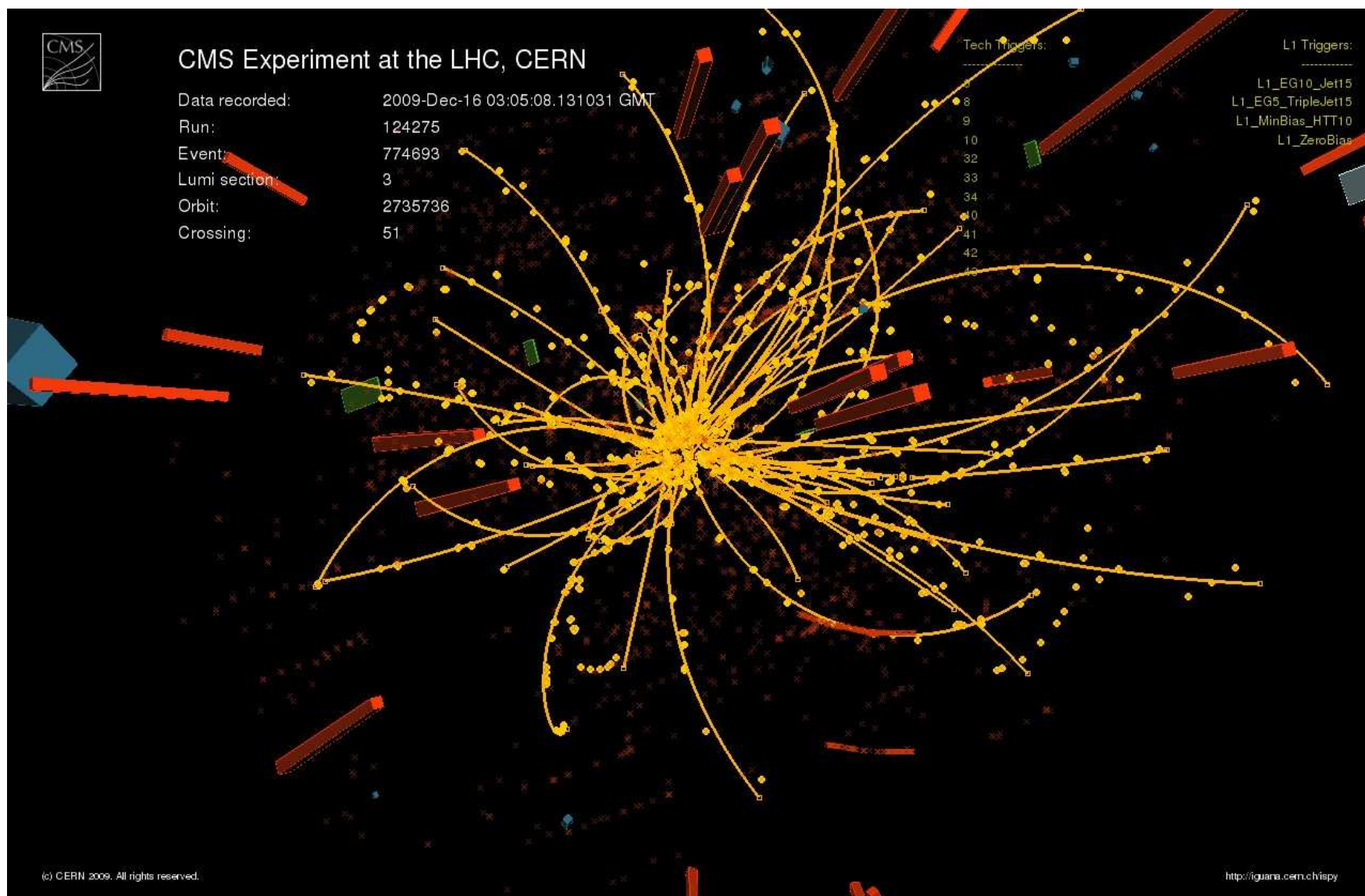
[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- Um Detetor
- Física Básica

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)



# O Mecanismo de “Higgs”

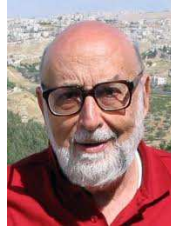
- Quem teve a ideia em 1964?



Higgs



Kibble



Englert



Brout



Hagen



Guaralnik

- O que fizeram?

- ◆ A resposta é muito técnica ▶

**T. de Goldstone + Simetria de Gauge = Mecanismo de Higgs**

- ◆ Ver videos de divulgação ▶

- Quem descobriu?

- ◆ LHC no CERN
- ◆ Os resultados e dificuldade em ter a certeza ▶
- ◆ O futuro

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

[Aprender Mais](#)



## Introdução

## De que somos feitos?

## Neutrinos

## Unificação

## LHC e o CERN

## O Higgs em 2013

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

## Aprender Mais

Volume 12, number 2

PHYSICS LETTERS

15 September 1964

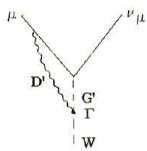


Fig. 1.

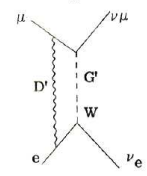


Fig. 2.

well into account the radiation correction to the  $\beta$ -decay constant found by Berman <sup>3</sup>) and Kinoshita and Sirlin <sup>4</sup>) we obtain for the muon life time

$$\frac{\tau_{\mu}}{\tau_{\mu}^0} = 1 - \frac{3e^2}{4\pi} \ln \frac{\Lambda^2}{\mu^2} + \frac{3e^2}{2\pi} \ln \frac{\Lambda_{\beta}}{2E} - \frac{3}{5} \frac{M_{\mu}^2}{\mu^2}, \quad (1)$$

where  $\tau_{\mu}^0$  is the muon life time calculated by means of universal theory of four fermion interaction with a constant taken from  $\beta$ -decay without any corrections,  $\Lambda_{\beta}$  is the cut off momentum due

to the strong interactions,  $\Lambda_{\beta} \sim M$ ,  $E$  is the energy of  $\beta$ -transition. According to experimental data  $\tau_{\mu}/\tau_{\mu}^0 = 0,988 \pm 0,004$ .

Substituting the numbers into (1) we obtain  $\tau_{\mu}/\tau_{\mu}^0 = 1,003$  and the disagreement between the theory and experiment will be in our case  $1.5 \pm 0.4\%$ . When discussing this result one should take into consideration that in (1) only the terms  $\sim e^2 \ln e^{-2}$  were correctly taken into account but the terms  $\sim e^2$  were discarded.

It seems to us that the conclusion that in the theory of weak interaction with intermediate W-meson  $\beta$ - and  $\mu$ -constants must be with good accuracy the same (taking into account the corrections due to the electromagnetic and weak interactions), is in favour of the weak interaction theory with W-meson unlike the four-fermion theory.

More detailed paper will be published elsewhere.

The author is indebted to B. V. Geshkenbein, I. Yu. Kobsarev, L. B. Okun, A. M. Perelomov, I. Ya. Pomeranchuk, V. S. Popov, A. P. Rudik and M. V. Terentyev for valuable discussions.

### References

- 1) B. L. Ioffe, M. V. Terentyev (in print).
- 2) T. D. Lee, Phys. Rev. 128 (1962) 899.
- 3) S. M. Berman, Phys. Rev. 112 (1958) 267.
- 4) T. Kinoshita, A. Sirlin, Phys. Rev. 113 (1959) 1652.

\*\*\*\*\*

## BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

Recently a number of people have discussed the Goldstone theorem <sup>1,2</sup>): that any solution of a Lorentz-invariant theory which violates an internal symmetry operation of that theory must contain a massless scalar particle. Klein and Lee <sup>3</sup>) showed that this theorem does not necessarily apply in non-relativistic theories and implied that their considerations would apply equally well to Lorentz-invariant field theories. Gilbert <sup>4</sup>), how-

ever, gave a proof that the failure of the Goldstone theorem in the nonrelativistic case is of a type which cannot exist when Lorentz invariance is imposed on a theory. The purpose of this note is to show that Gilbert's argument fails for an important class of field theories, that in which the conserved currents are coupled to gauge fields.

Following the procedure used by Gilbert <sup>4</sup>), let us consider a theory of two hermitian scalar fields

Volume 12, number 2

PHYSICS LETTERS

15 September 1964

$\varphi_1(x), \varphi_2(x)$  which is invariant under the phase transformation

$$\varphi_1 \rightarrow \varphi_1 \cos \alpha + \varphi_2 \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\varphi_2 \rightarrow -\varphi_1 \sin \alpha + \varphi_2 \cos \alpha.$$

Then there is a conserved current  $j_{\mu}$  such that

$$i \int d^3x j_0(x), \varphi_1(y) = \varphi_2(y). \quad (2)$$

We assume that the Lagrangian is such that symmetry is broken by the nonvanishing of the vacuum expectation value of  $\varphi_2$ . Goldstone's theorem is proved by showing that the Fourier transform of  $i \langle [j_{\mu}(x), \varphi_1(y)] \rangle$  contains a term  $\frac{2\pi}{\mu} \langle \varphi_2 \rangle \epsilon(k_0) k_{\mu} \delta(k^2)$ , where  $k_{\mu}$  is the momentum, as a consequence of Lorentz-covariance, the conservation law and eq. (2).

Klein and Lee <sup>3</sup>) avoided this result in the non-relativistic case by showing that the most general form of this Fourier transform is now, in Gilbert's notation,

$$F.T. = k_{\mu} \rho_1(k^2, nk) + n_{\mu} \rho_2(k^2, nk) + C_3 n_{\mu} \delta^4(k),$$

where  $n_{\mu}$ , which may be taken as (1, 0, 0, 0), <sup>3</sup>) picks out a special Lorentz frame. The conservation law then reduces eq. (3) to the less general form

$$F.T. = k_{\mu} \delta(k^2) \rho_4(nk) + [k^2 n_{\mu} - k_{\mu}(nk)] \rho_5(k^2, nk) + C_3 n_{\mu} \delta^4(k). \quad (4)$$

It turns out, on applying eq. (2), that all three terms in eq. (4) can contribute to  $\langle \varphi_2 \rangle$ . Thus the Goldstone theorem fails if  $\rho_4 = 0$ , which is possible only if the other terms exist. Gilbert's remark that no special timelike vector  $n_{\mu}$  is available in a Lorentz-covariant theory appears to rule out this possibility in such a theory.

There is however a class of relativistic field theories in which a vector  $n_{\mu}$  does indeed play a part. This is the class of gauge theories, where an auxiliary unit timelike vector  $n_{\mu}$  must be in-

troduced in order to define a radiation gauge in which the vector gauge fields are well defined operators. Such theories are nevertheless Lorentz-covariant, as has been shown by Schwinger <sup>5</sup>). (This has, of course, long been known of the simplest such theory, quantum electrodynamics.) There seems to be no reason why the vector  $n_{\mu}$  should not appear in the Fourier transform under consideration.

It is characteristic of gauge theories that the conservation laws hold in the strong sense, as a consequence of field equations of the form

$$j^{\mu} = \partial_{\nu} F^{\mu\nu}, \quad (5)$$

$$F_{\mu\nu}' = \partial_{\mu} A_{\nu}' - \partial_{\nu} A_{\mu}'.$$

Except in the case of abelian gauge theories, the fields  $A_{\mu}'$ ,  $F_{\mu\nu}'$  are not simply the gauge field variables  $A_{\mu}$ ,  $F_{\mu\nu}$ , but contain additional terms with combinations of the structure constants of the group as coefficients. Now the structure of the Fourier transform of  $i \langle [A_{\mu}'(x), \varphi_1(y)] \rangle$  must be given by eq. (3). Applying eq. (5) to this commutator gives us as the Fourier transform of  $i \langle [j_{\mu}(x), \varphi_1(y)] \rangle$  the single term  $[k^2 n_{\mu} - k_{\mu}(nk)] \rho(k^2, nk)$ . We have thus exorcised both Goldstone's zero-mass bosons and the "spurious" state (at  $k_{\mu} = 0$ ) proposed by Klein and Lee.

In a subsequent note it will be shown, by considering some classical field theories which display broken symmetries, that the introduction of gauge fields may be expected to produce qualitative changes in the nature of the particles described by such theories after quantization.

### References

- 1) J. Goldstone, Nuovo Cimento 19 (1961) 154.
- 2) J. Goldstone, A. Salam and S. Weinberg, Phys. Rev. 127 (1962) 965.
- 3) A. Klein and B. W. Lee, Phys. Rev. Letters 12 (1964) 266.
- 4) W. Gilbert, Phys. Rev. Letters 12 (1964) 713.
- 5) J. Schwinger, Phys. Rev. 127 (1962) 324.

\*\*\*\*\*



## Introdução

## De que somos feitos?

## Neutrinos

## Unificação

## LHC e o CERN

## O Higgs em 2013

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

## Aprender Mais

### 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)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson<sup>3</sup> has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone<sup>2</sup> himself: Two real<sup>4</sup> scalar fields  $\varphi_1, \varphi_2$  and a real vector field  $A_\mu$  interact through the Lagrangian density

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{2}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}, \quad (1)$$

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - eA_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$$

$e$  is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as  $-+++$ .  $L$  is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on  $\varphi_1 \pm i\varphi_2$  and of the second kind on  $A_\mu$ . Let us suppose that  $V'(\varphi_0^2) = 0$ ,  $V''(\varphi_0^2) > 0$ ; then spontaneous breakdown of U(1) symmetry occurs. Consider the equations [derived from (1) by treating  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ , and  $A_\mu$  as small quantities] governing the propagation of small oscillations

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0, \varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} \Delta\varphi_2 = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$\begin{aligned} B_\mu &= A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1), \\ G_{\mu\nu} &= \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0. \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass  $e\varphi_0$ . In the absence of the gauge field coupling ( $e=0$ ) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current: It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.<sup>5</sup>

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.<sup>6</sup> The model of the most immediate interest is that in which the scalar fields form an octet under SU(3): Here one finds the possibility of two nonvanishing vacuum expectation values, which may be chosen to be the two  $Y=0, I_3=0$  members of the octet.<sup>7</sup> There are two massive scalar bosons with just these quantum numbers; the remaining six components of the scalar octet combine with the corresponding components of the gauge-field octet to describe

massive vector bosons. There are two  $I = \frac{1}{2}$  vector doublets, degenerate in mass between  $Y = \pm 1$  but with an electromagnetic mass splitting between  $I_3 = +\frac{1}{2}$ , and the  $I_3 = \pm 1$  components of a  $Y=0, I=1$  triplet whose mass is entirely electromagnetic. The two  $Y=0, I=0$  gauge fields remain massless: This is associated with the residual unbroken symmetry under the Abelian group generated by  $Y$  and  $I_3$ . It may be expected that when a further mechanism (presumably related to the weak interactions) is introduced in order to break  $Y$  conservation, one of these gauge fields will acquire mass, leaving the photon as the only massless vector particle. A detailed discussion of these questions will be presented elsewhere.

It is worth noting that an essential feature of the type of theory which has been described in this note is the prediction of incomplete multiplets of scalar and vector bosons.<sup>8</sup> It is to be expected that this feature will appear also in theories in which the symmetry-breaking scalar fields are not elementary dynamic variables but bilinear combinations of Fermi fields.<sup>9</sup>

<sup>1</sup>P. W. Higgs, to be published.  
<sup>2</sup>J. Goldstone, Nuovo Cimento **19**, 154 (1961); J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, Phys. Rev. **127**, 965 (1962).  
<sup>3</sup>P. W. Anderson, Phys. Rev. **130**, 439 (1963).

<sup>4</sup>In the present note the model is discussed mainly in classical terms; nothing is proved about the quantized theory. It should be understood, therefore, that the conclusions which are presented concerning the masses of particles are conjectures based on the quantization of linearized classical field equations. However, essentially the same conclusions have been reached independently by F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Letters **13**, 321 (1964): These authors discuss the same model quantum mechanically in lowest order perturbation theory about the self-consistent vacuum.  
<sup>5</sup>In the theory of superconductivity such a term arises from collective excitations of the Fermi gas.  
<sup>6</sup>See, for example, S. L. Glashow and M. Gell-Mann, Ann. Phys. (N. Y.) **15**, 437 (1961).  
<sup>7</sup>These are just the parameters which, if the scalar octet interacts with baryons and mesons, lead to the Gell-Mann-Okubo and electromagnetic mass splittings: See S. Coleman and S. L. Glashow, Phys. Rev. **134**, B671 (1964).  
<sup>8</sup>Tentative proposals that incomplete SU(3) octets of scalar particles exist have been made by a number of people. Such a rôle, as an isolated  $Y=+1, I=\frac{1}{2}$  state, was proposed for the  $\kappa$  meson (725 MeV) by Y. Nambu and J. J. Sakurai, Phys. Rev. Letters **11**, 42 (1963). More recently the possibility that the  $\sigma$  meson (385 MeV) may be the  $Y=I=0$  member of an incomplete octet has been considered by L. M. Brown, Phys. Rev. Letters **13**, 42 (1964).  
<sup>9</sup>In the theory of superconductivity the scalar fields are associated with fermion pairs; the doubly charged excitation responsible for the quantization of magnetic flux is then the surviving member of a U(1) doublet.

### SPLITTING OF THE 70-PLET OF SU(6)

Mirza A. Baqi Béq  
The Rockefeller Institute, New York, New York

and

Virendra Singh\*  
Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey  
(Received 18 September 1964)

1. In a previous note,<sup>1</sup> hereafter called I, we proposed an expression for the mass operator responsible for lifting the degeneracies of spin-unitary spin supermultiplets [Eq. (31)-I]. The purpose of the present note is to apply this expression to the 70-dimensional representation of SU(6).

The importance of the 70-dimensional representation has already been underlined by Pais.<sup>2</sup> Since

$$35 \otimes 56 = 56 \oplus 70 \oplus 700 \oplus 1134, \quad (1)$$

it follows that 70 is the natural candidate for accommodating the higher meson-baryon reso-

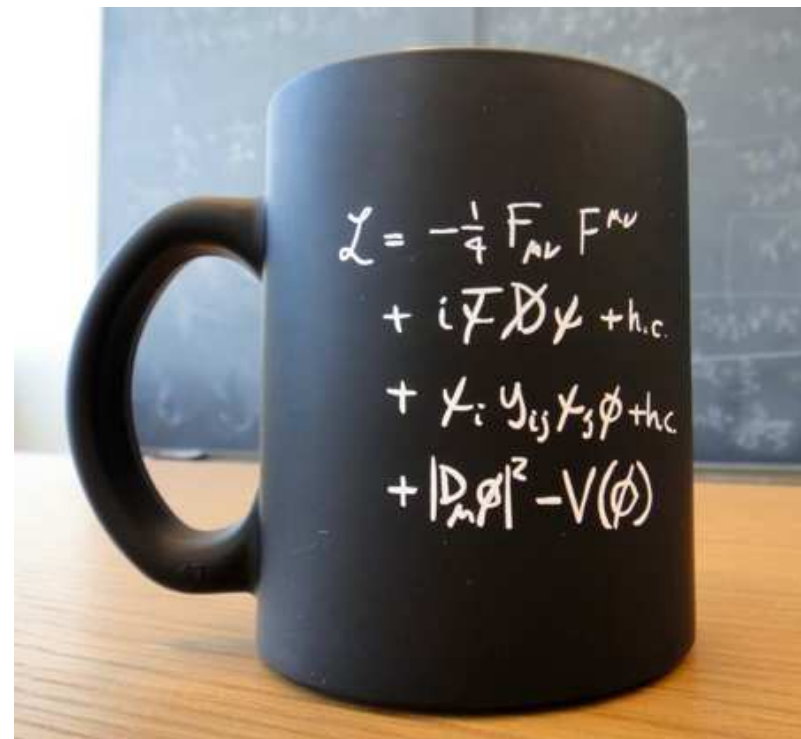
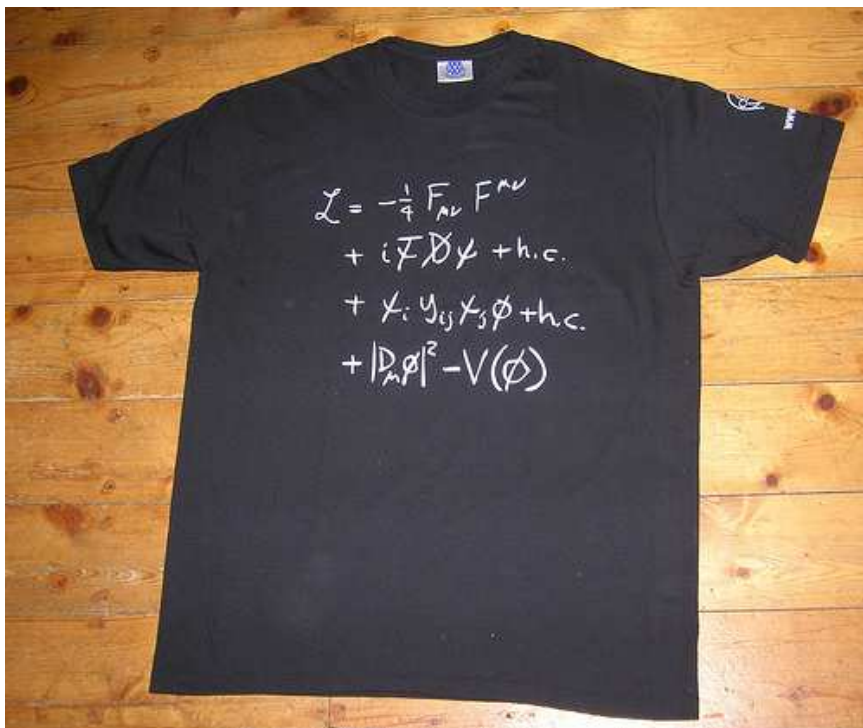
nances. Furthermore, since the SU(3) ⊗ SU(2) content is

$$70 = (1, 2) + (8, 2) + (10, 2) + (8, 4), \quad (2)$$

we may assume that partial occupancy of the 70 representation has already been established through the so-called  $\gamma$  octet<sup>3</sup> ( $\frac{1}{2}$ )<sup>-</sup>. Recent experiments appear to indicate that some ( $\frac{1}{2}$ )<sup>-</sup> states may also be at hand.<sup>3</sup> With six masses at one's disposal, our formulas can predict the masses of all the other occupants of 70 and also provide a consistency check on the input. Our discussion of the 70 representation thus appears to be of immediate physical interest.

# O Modelo Standard em Quatro Linhas ...

O CERN tem uns produtos à venda que numa forma sucinta, resumem todo o modelo standard, mas só para especialistas, claro!



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Evolução](#)
- [Exemplo CMS](#)
- [Exemplo Atlas](#)
- [Nobel Prize](#)
- [WWW](#)
- [Aprender Mais](#)

## Introdução

## De que somos feitos?

## Neutrinos

## Unificação

## LHC e o CERN

## O Higgs em 2013

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

## Aprender Mais

- ❑ The Higgs Boson, Part I

<http://www.youtube.com/watch?v=9Uh5mTxRQcg&feature=relmfu>

- ❑ The Higgs Boson, Part II: What is Mass

[http://www.youtube.com/watch?v=ASRplym\\_jFM&feature=relmfu](http://www.youtube.com/watch?v=ASRplym_jFM&feature=relmfu)

- ❑ The Higgs Boson, Part III: How to discover

<http://www.youtube.com/watch?v=6guXMfg88Z8&feature=fvwrel>

- ❑ Fermilab video

<http://www.youtube.com/watch?v=Rlg1Vh7uPyw&feature=related>

- ❑ CERN video

<http://www.youtube.com/watch?NR=1&feature=endscreen&v=QG8g5JW64BA>

Animated Video

- ❑ Peter Higgs

<http://www.youtube.com/watch?v=4Pi1EE8nutc&feature=related>



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

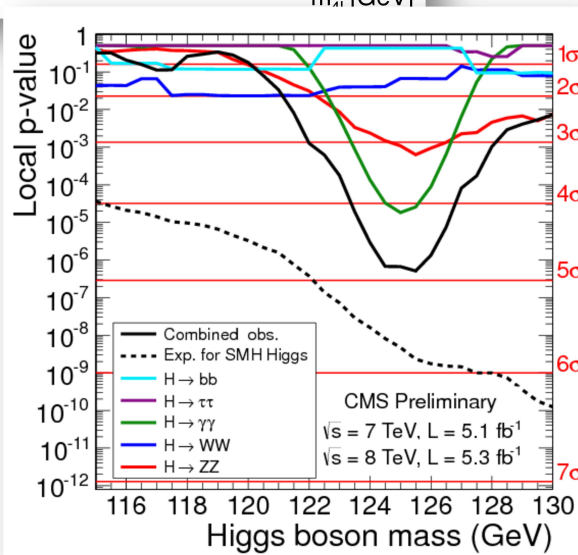
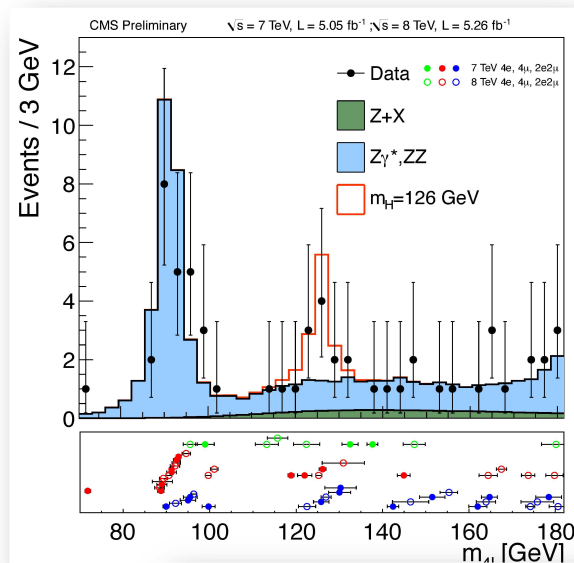
[O Higgs em 2013](#)

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

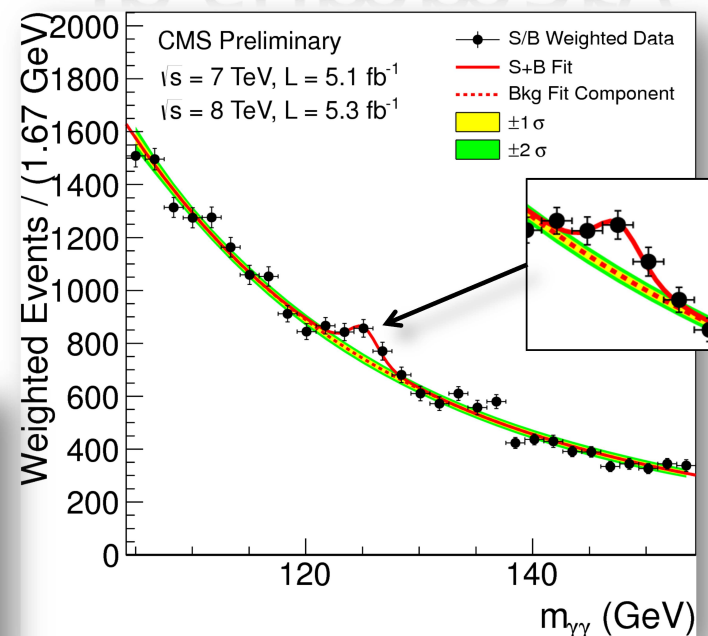
[Aprender Mais](#)



July 4<sup>th</sup> 2012 The Status of the Higgs Search J. Incandela for the CMS COLLABORATION



## In summary



# A evolução do resultado com o tempo

- [Introdução](#)

---

- [De que somos feitos?](#)

---

- [Neutrinos](#)

---

- [Unificação](#)

---

- [LHC e o CERN](#)

---

- [O Higgs em 2013](#)

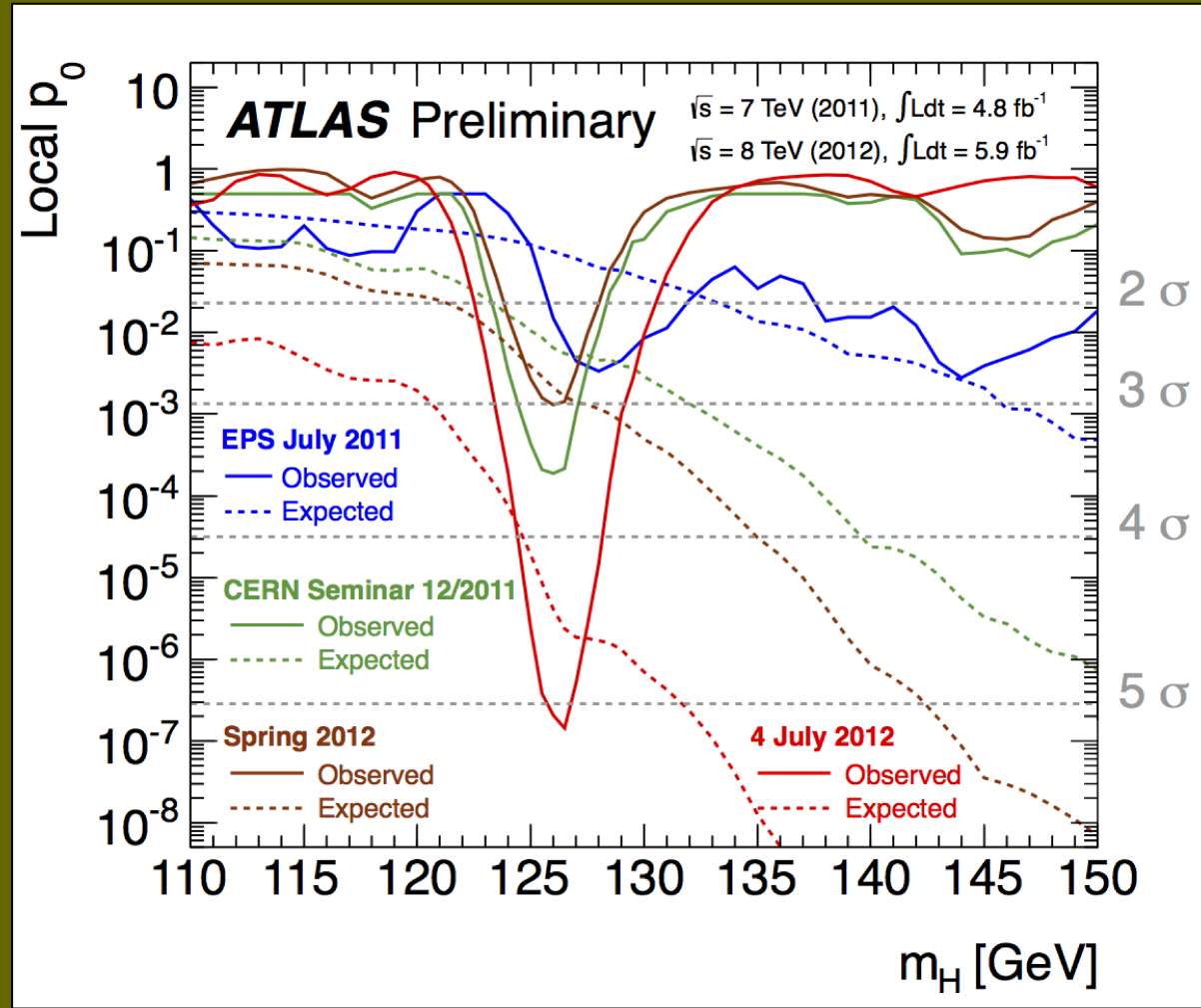
---

- Evolução**
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

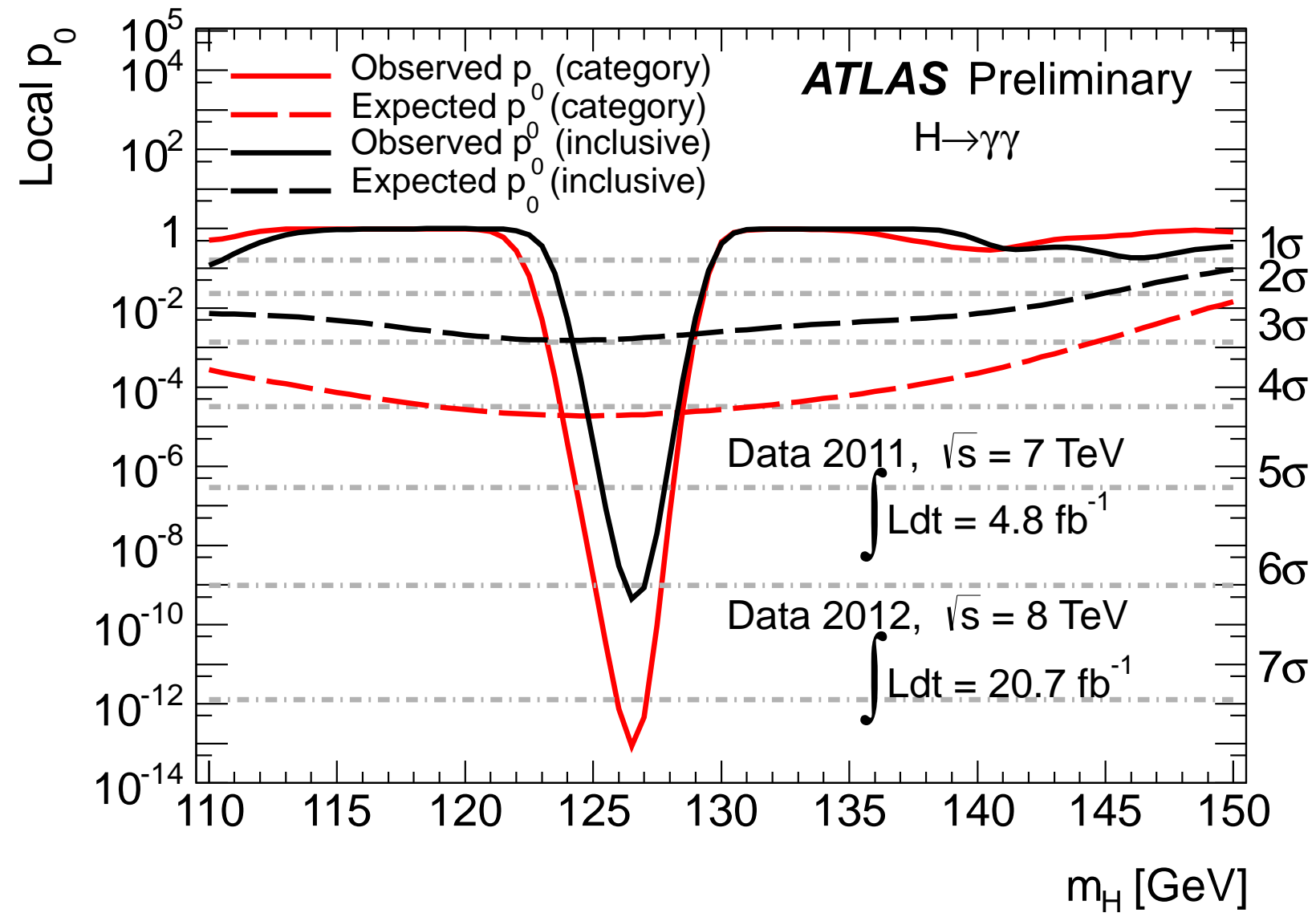
---

- [Aprender Mais](#)

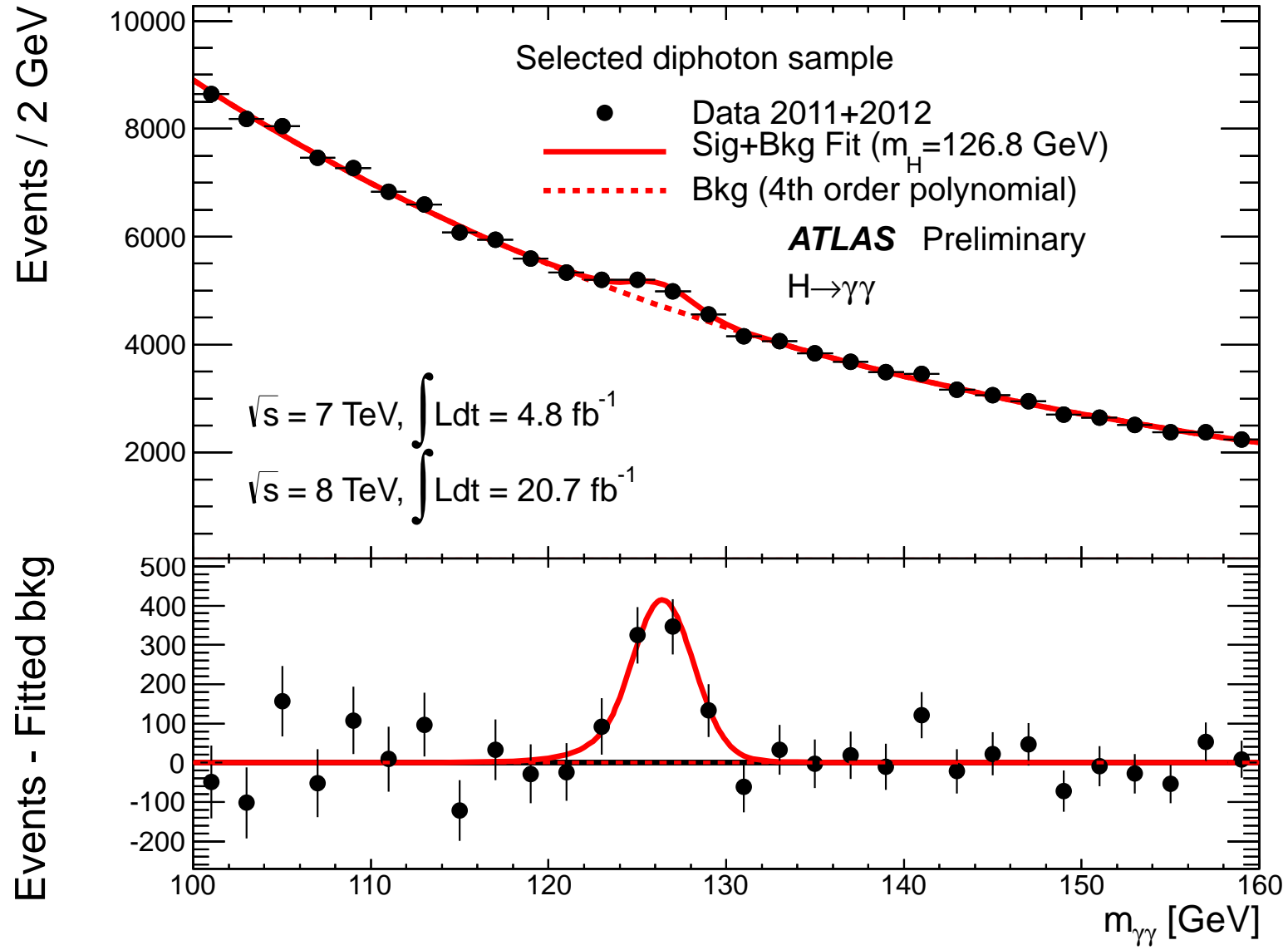
Evolution of the excess with time



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Evolução](#)
- [Exemplo CMS](#)
- [Exemplo Atlas](#)
- [Nobel Prize](#)
- [WWW](#)
- [Aprender Mais](#)



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [Neutrinos](#)
- [Unificação](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [O Higgs em 2013](#)
- [Evolução](#)
- [Exemplo CMS](#)
- [Exemplo Atlas](#)
- [Nobel Prize](#)
- [WWW](#)
- [Aprender Mais](#)





[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

• [Evolução](#)

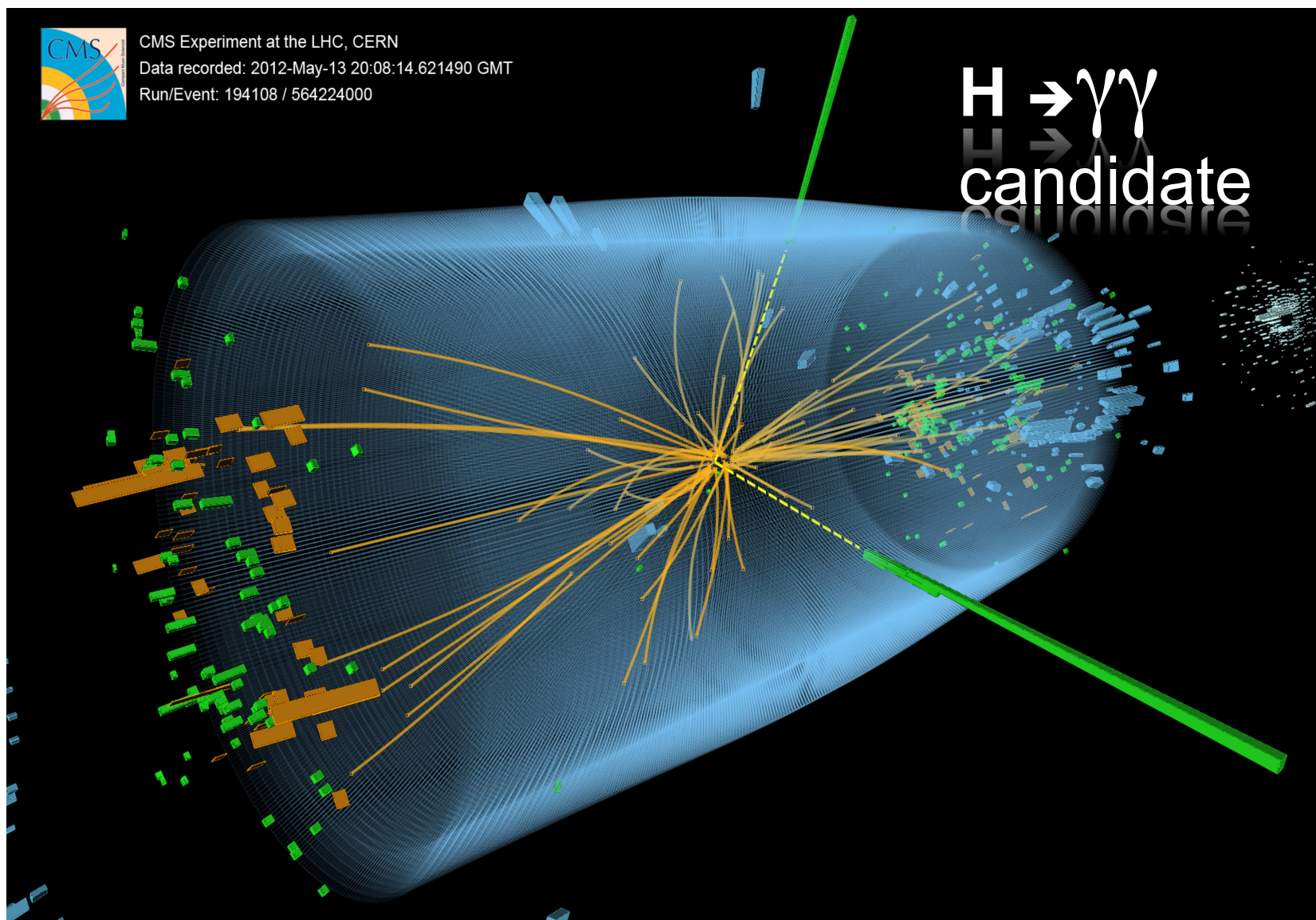
• [Exemplo CMS](#)

• [Exemplo Atlas](#)

• [Nobel Prize](#)

• [WWW](#)

[Aprender Mais](#)



# Exemplo de Atlas

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

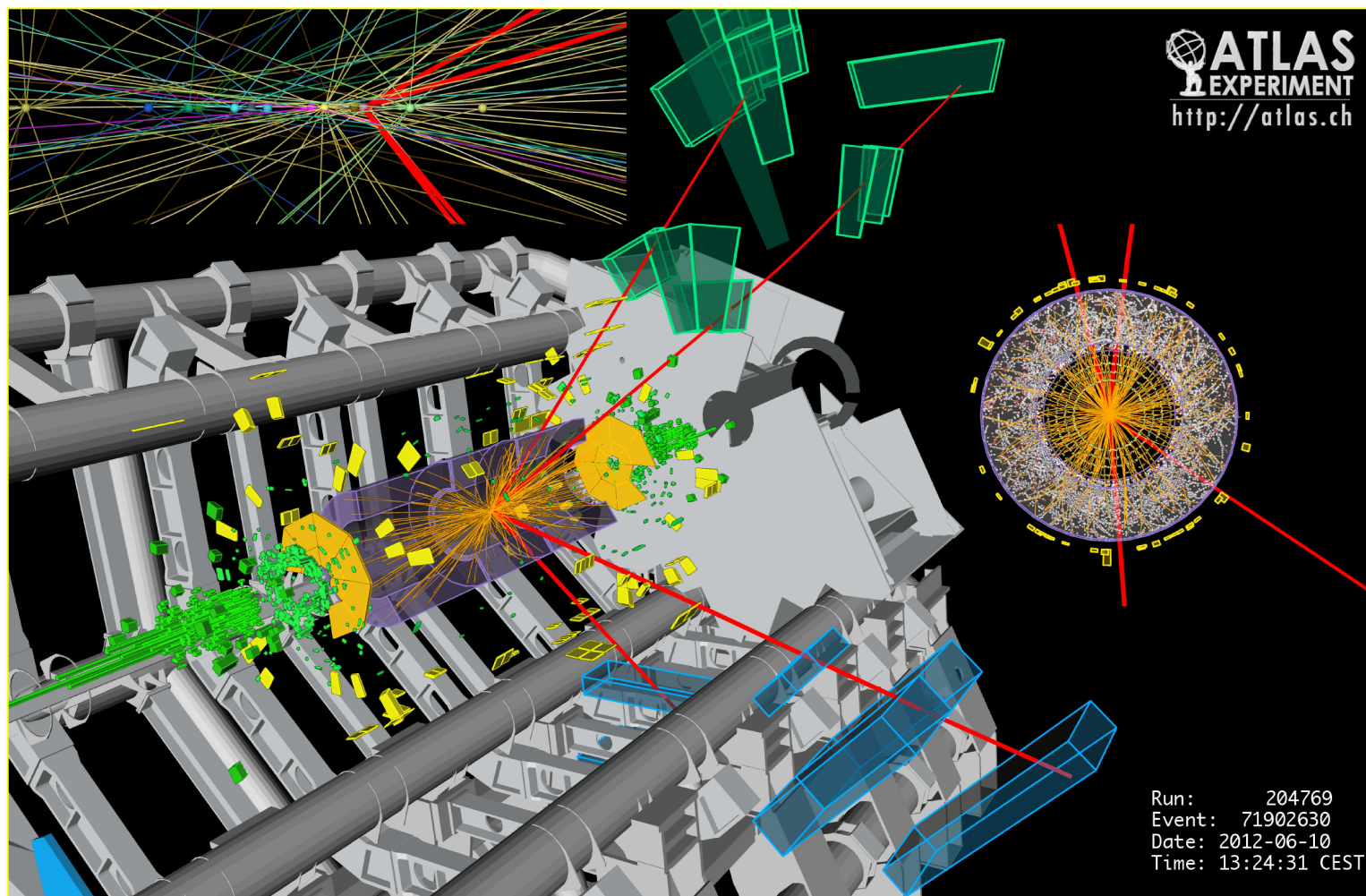
[O Higgs em 2013](#)

- Evolução
- Exemplo CMS
- **Exemplo Atlas**
- Nobel Prize
- WWW

[Aprender Mais](#)

4 $\mu$  candidate with  $m_{4\mu} = 125.1 \text{ GeV}$

$p_T$  (muons) = 36.1, 47.5, 26.4, 71.7 GeV  $m_{12} = 86.3 \text{ GeV}$ ,  $m_{34} = 31.6 \text{ GeV}$   
15 reconstructed vertices



36

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

- [Evolução](#)
- [Exemplo CMS](#)
- [Exemplo Atlas](#)
- [Nobel Prize](#)
- [WWW](#)

[Aprender Mais](#)



The Nobel Prize in Physics 2013

François Englert, Peter Higgs

## The Nobel Prize in Physics 2013



Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert



Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"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 ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

# World Wide Web@20



Fez vinte anos em 2009, que algo aconteceu no CERN que mudou o mundo para sempre: Tim Berners-Lee entregou um documento ao seu superior Mike Sendall com o título “Gestão de Informação: uma Proposta”. “Vago mas excitante” foi como Mike a descreveu e lhe deu autorização para desenvolver a ideia. No ano seguinte a Net, tal como a conhecemos hoje, tinha nascido.

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize
- WWW

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[Neutrinos](#)

[Unificação](#)

[LHC e o CERN](#)

[O Higgs em 2013](#)

[Aprender Mais](#)

- ❑ [/http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html](http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html)
- ❑ <http://www.particlephysics.ac.uk/teach/useful-links.html>
- ❑ <http://particleadventure.org/>
- ❑ <http://en.wikipedia.org/wiki/Higgs>
- ❑ <http://www.exploratorium.edu/origins/cern/ideas/higgs.html>
- ❑ <http://www.phy.uct.ac.za/courses/phy400w/particle/higgs.htm>
- ❑ <http://universe-review.ca/F02-cosmicbg.htm>
- ❑ <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/html/cpviolationtoc.htm>
- ❑ <http://www.auger.org/>
- ❑ <http://cms.cern.ch/>
- ❑ <http://atlasexperiment.org/>
- ❑ <https://cernland.web.cern.ch/>
- ❑ <http://cftp.ist.utl.pt/livrodanatureza/>