



A Física das Partículas Elementares Hoje: A descoberta do Bosão de Higgs e as Oscilações dos Neutrinos

Prémios Nobel de 2013 e 2015

Jorge C. Romão

Instituto Superior Técnico, Departamento de Física & CFTP

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

Novembro de 2015

Introdução

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

- De que é feito o Universo?
 - ◆ As Interações Fundamentais
 - ◆ Os Constituintes Elementares
 - ◆ Matéria e Anti-matéria
 - ◆ O Modelo Standard da Física de Partículas
- A experiência LHC no CERN
 - ◆ A escala mais pequena
 - ◆ A descoberta do bóson de Higgs e o Prémio Nobel 2013
- Neutrinos
 - ◆ Os neutrinos e as suas anti-partículas
 - ◆ As Oscilações de Neutrinos e o Prémio Nobel 2015
- Discussão

As Interações Fundamentais

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

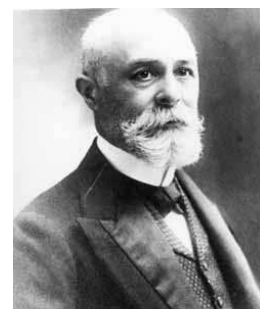
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc XIX	Estrutura Atómica
Fraca	Séc XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc XX	Coessão dos Núcleos



Newton



Maxwell



Becquerel



Yukawa

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

• Força

- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

Mapa das Interações

Introdução

De que somos feitos?

● Força

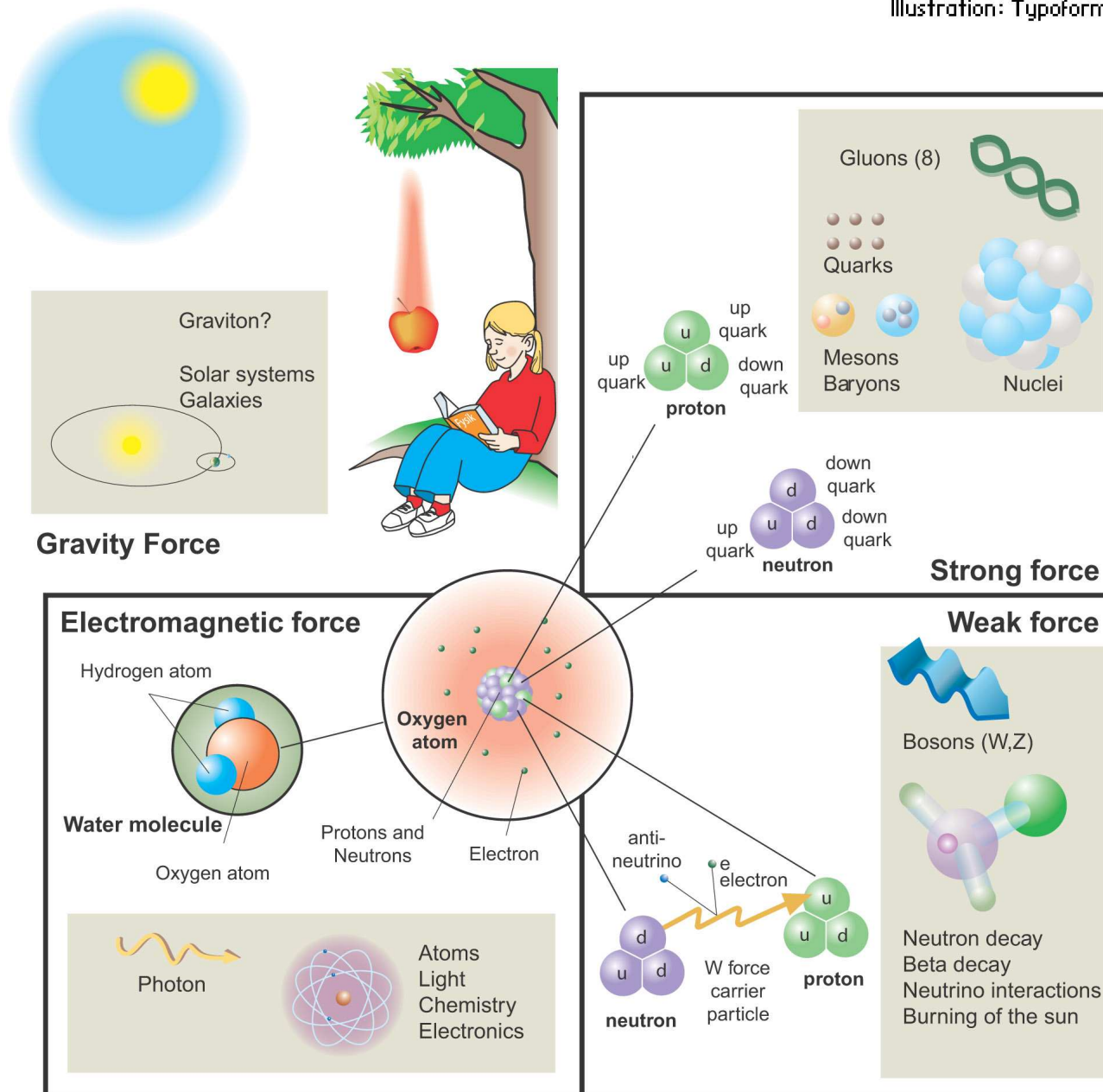
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

Illustration: Typoform

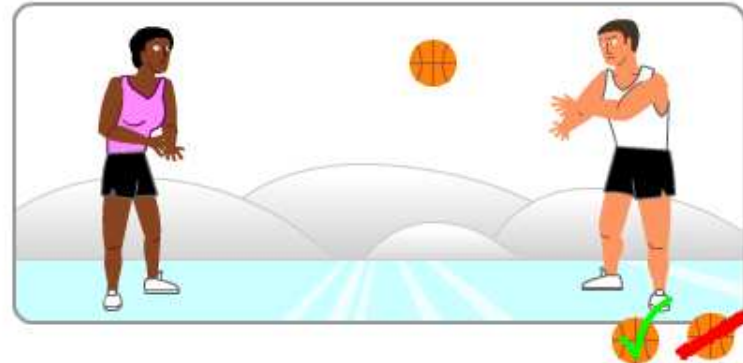
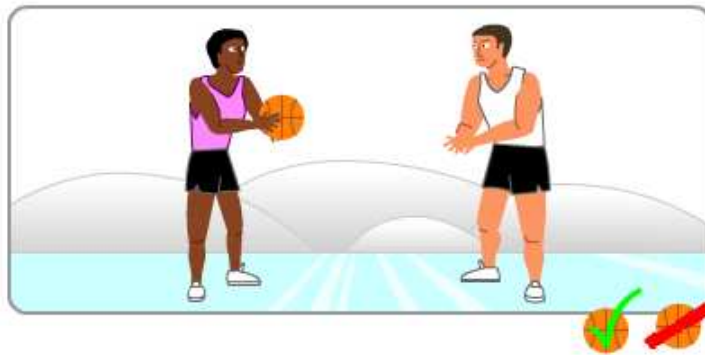


A Descrição Moderna duma Força

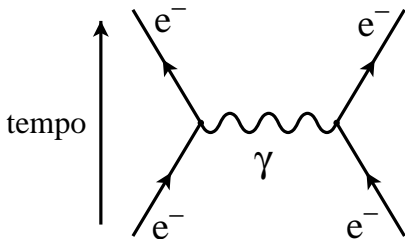
Modernamente o conceito de força é substituído pelo de interacção.

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- Força**
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- [Aprender Mais](#)

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



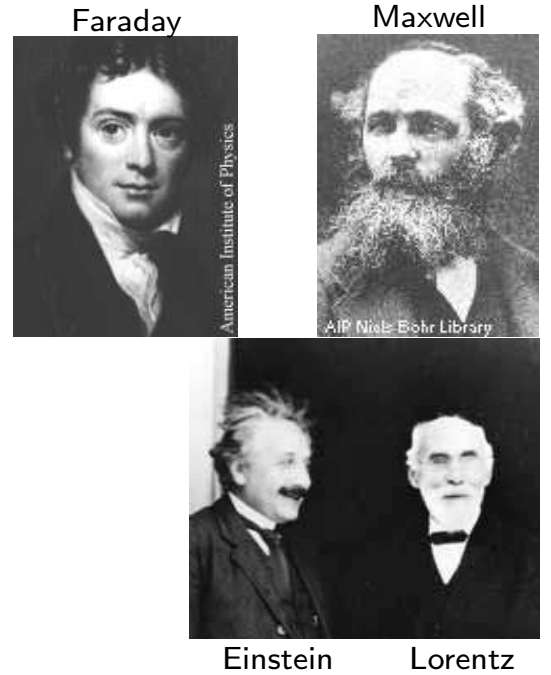
Feynman



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
 - Força
 - **Como Explicar?**
 - TC Modernas
 - Propriedades
 - Os Constituintes
 - Leptões
 - Quarks
 - Anti-Matéria
 - Modelo Padrão
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- [Aprender Mais](#)

Paradigma: O Electromagnetismo

- Faraday, Maxwell
 - ◆ Conceito de campo
 - ◆ Velocidade finita de propagação
- Transformações de Lorentz
 - ◆ Relatividade: Invariância, covariância ...
- Primeira Unificação



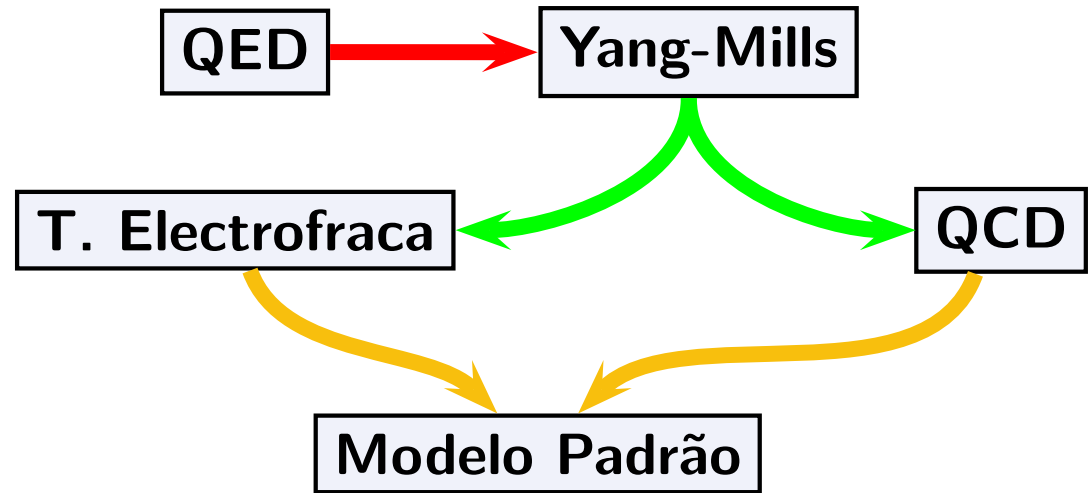
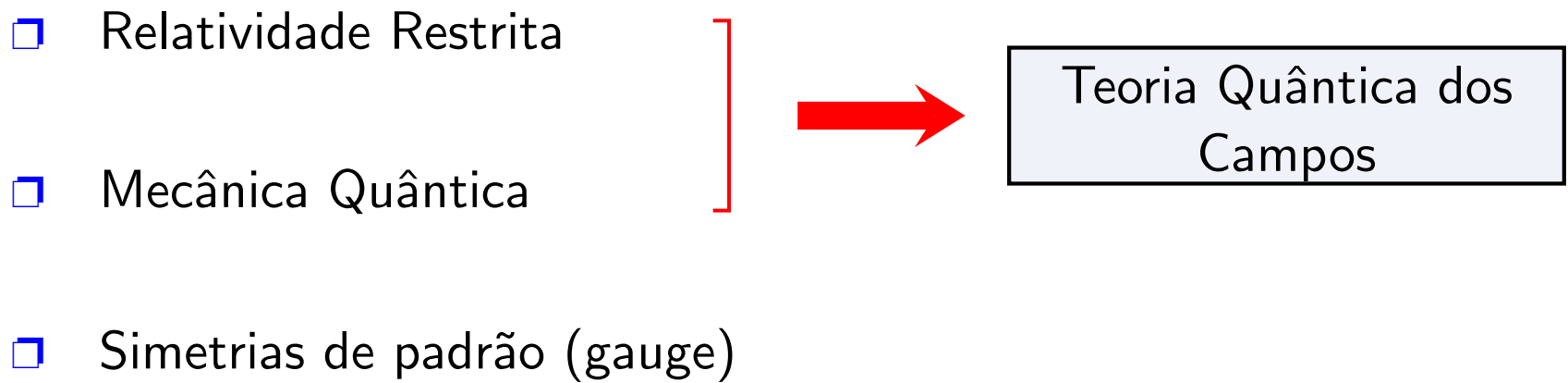
Electromagnetismo \supset Electricidade + Magnetismo

- Segunda Unificação

Electromagnetismo \supset Luz

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
 - Força
 - Como Explicar?
 - **TC Modernas**
 - Propriedades
 - Os Constituintes
 - Leptões
 - Quarks
 - Anti-Matéria
 - Modelo Padrão
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- [Aprender Mais](#)

Os Ingredientes Fundamentais



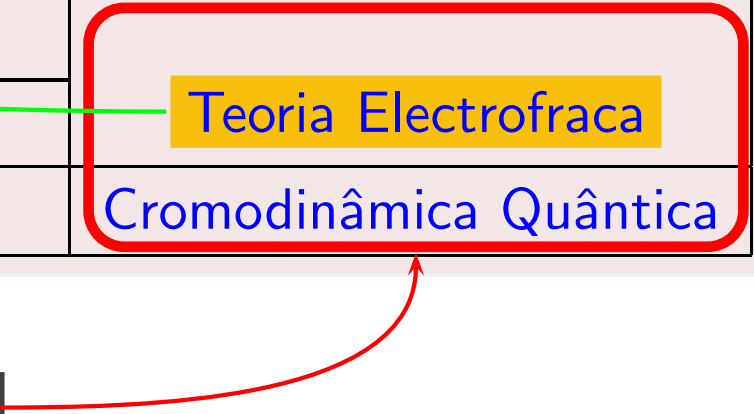
Propriedades Gerais das Interações

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
 - Força
 - Como Explicar?
 - TC Modernas
 - **Propriedades**
 - Os Constituintes
 - Leptões
 - Quarks
 - Anti-Matéria
 - Modelo Padrão
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- [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 (γ)	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

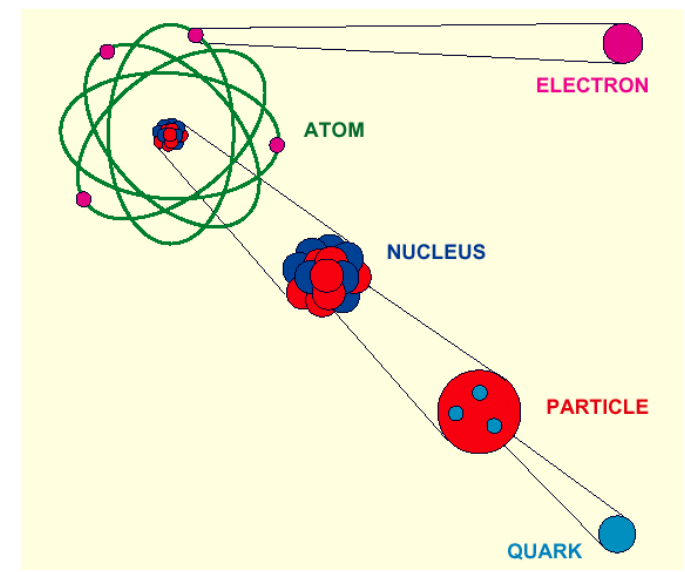
Modelo Padrão



Os Constituintes Elementares

- Introdução
- De que somos feitos?
 - Força
 - Como Explicar?
 - TC Modernas
 - Propriedades
 - Os Constituintes
 - Leptões
 - Quarks
 - Anti-Matéria
 - Modelo Padrão
- LHC e o CERN
- Neutrinos
- 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 (γ)	0
Forte	$< 10^{-15}$ m	1	8 gluões	0

Introdução

De que somos feitos?

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

• Leptões

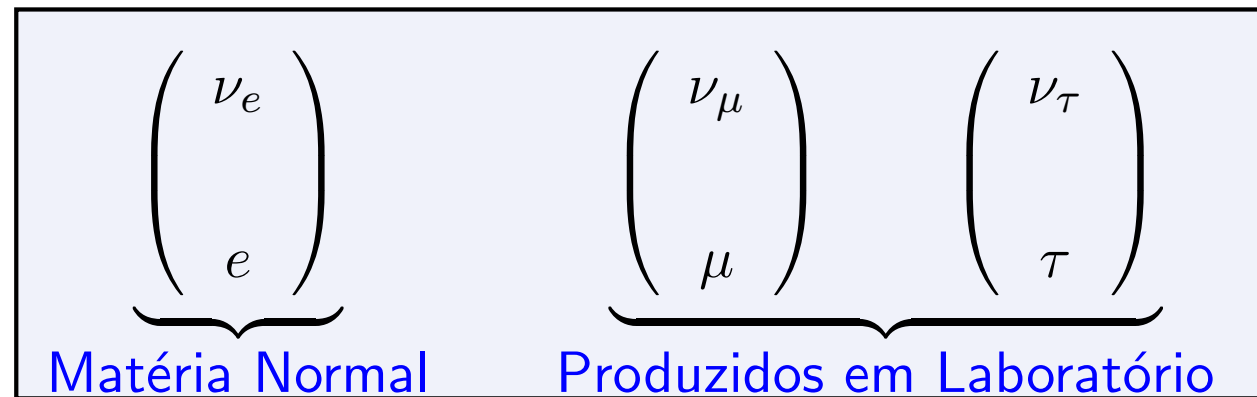
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

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 ± 0.012

Introdução

De que somos feitos?

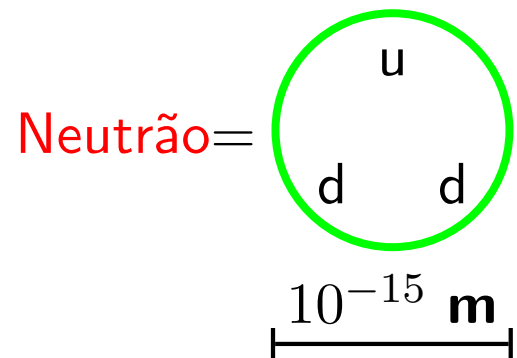
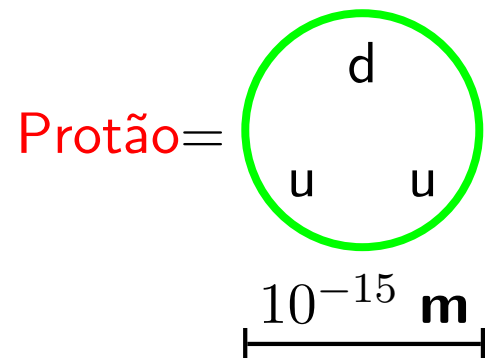
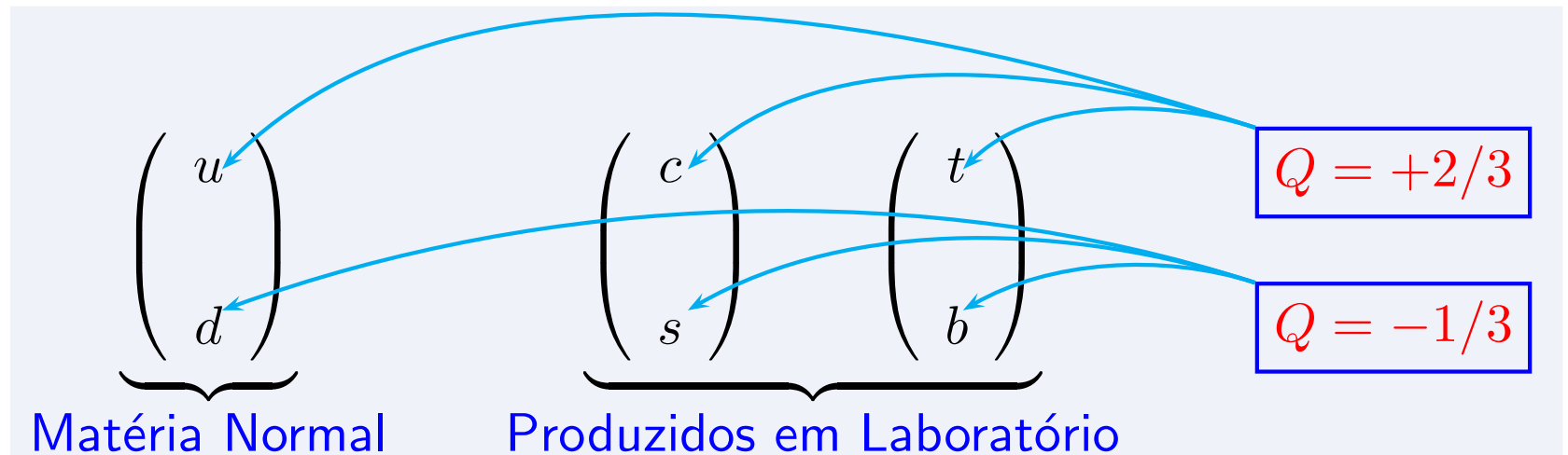
- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- **Quarks**
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

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
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.39	-1	Higgs Boson spin = 0		
W⁺	80.39	+1	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
Z⁰	91.188	0	H Higgs	126	0

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

Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
There are a few of the many types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	GeV/c ²	Spin
π^+	pion	u$\bar{\mathbf{d}}$	+1	0.140	0
K⁻	kaon	s$\bar{\mathbf{u}}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	u$\bar{\mathbf{d}}$	+1	0.770	1
B⁰	B-zero	d$\bar{\mathbf{b}}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	c$\bar{\mathbf{c}}$	0	2.980	0

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- **Anti-Matéria**
- Modelo Padrão

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[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

O Modelo Padrão: Um Modelo de Sucesso

Introdução

De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

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



1979

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



1999



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).



1984

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

O Modelo Standard em Quatro Linhas ...

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

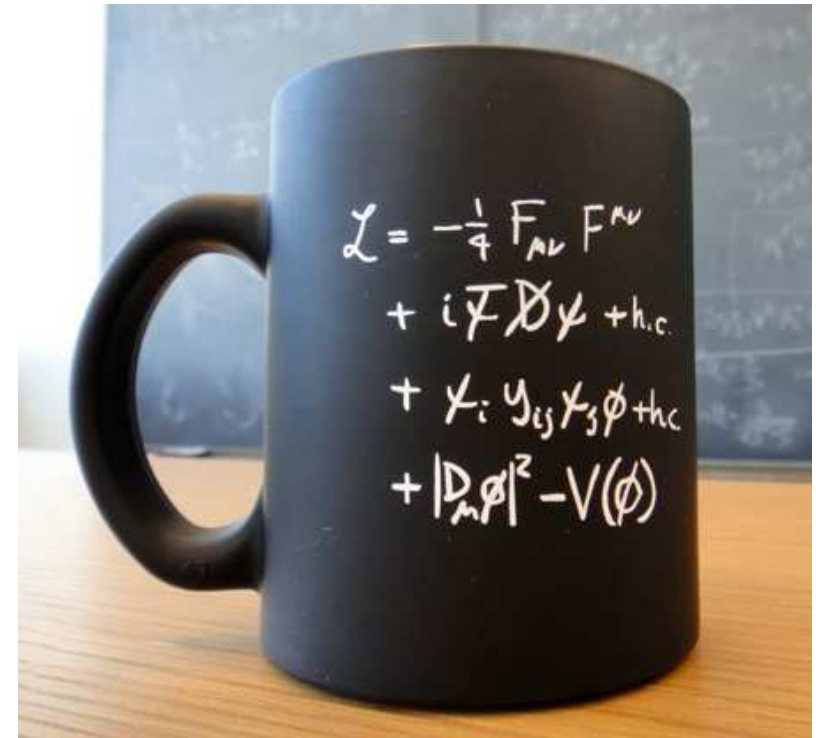
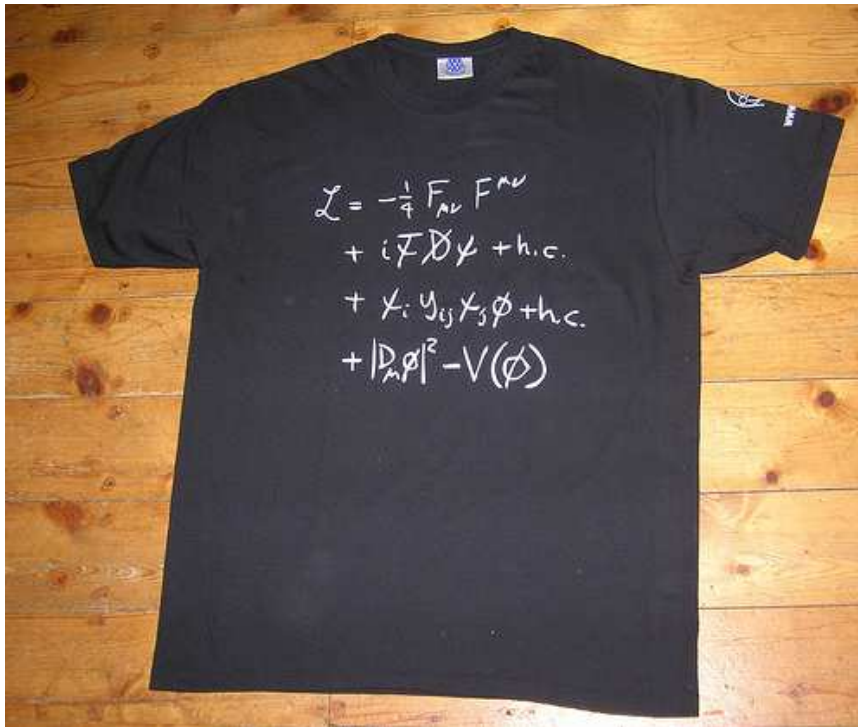
- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- **Modelo Padrão**

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

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



O Modelo Padrão: A Tabela das partículas e Interações

Introdução

De que somos feitos?

- Força
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Propriedades
- Os Constituintes
- Leptões
- Quarks
- Anti-Matéria
- Modelo Padrão

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS E INTERACÇÕES FUNDAMENTAIS

O Modelo Padrão é uma teoria quântica que resume o nosso conhecimento actual da física das partículas e interações fundamentais (as interações manifestam-se através das forças e dos decaimentos das partículas instáveis).

FERMIÕES			constituintes da matéria		
Leptões spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Sabor	Massa Aprox. GeV/c ²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electrão	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muão	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

*Ver em baixo o parágrafo sobre neutrinos.

Spin é o momento angular intrínseco das partículas. O spin é dado em unidades de \hbar , que é a unidade quântica de momento angular, com $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Cargas eléctricas são dadas em unidades de carga eléctrica do próton. Em unidades SI, a carga eléctrica do próton é 1.60×10^{-19} coulomb.

A unidade de **Energia** em física de partículas é o electrão-volt (eV), a energia ganha por um electrão ao atravessar a diferença de potencial de um volt. **Massas** são dadas em GeV/c² ($E = mc^2$) em que $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. A massa do próton é $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg.

Neutrinos

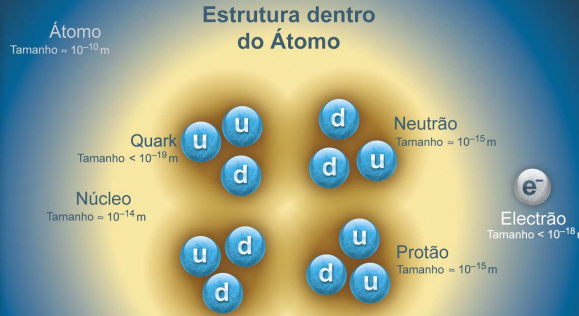
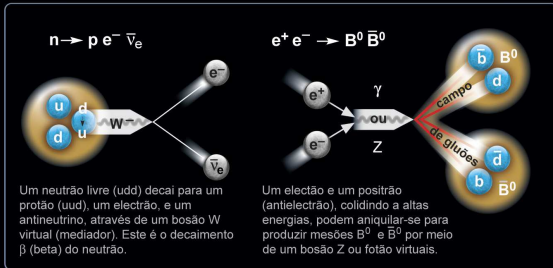
Os neutrinos são produzidos no Sol, supernovas, reactores nucleares, colisões em aceleradores, e muitos outros processos. Qualquer neutrino pode ser descrito como um de três estados de sabor de neutrinos: ν_e , ν_μ , ou ν_τ , de acordo com o tipo de leptão associado na sua produção. Cada estado destes é uma mistura quântica de três estados de massa de neutrinos ν_1 , ν_2 , e ν_3 , para os quais os intervalos de massas são indicados na tabela. O estudo dos neutrinos pode ajudar à compreensão da assimetria matéria-antimatéria e da evolução das estrelas e das estruturas das galáxias.

Matéria e Antimatéria

Para cada tipo de partícula existe o correspondente tipo de antipartícula, indicado com uma barra sobre o símbolo da partícula (exceto se se mostrar a carga + ou -). A partícula e a antipartícula têm a mesma massa e spin mas cargas eléctricas opostas. Alguns bósons electricamente neutros (por ex., Z^0 , γ , e $\eta_c = c\bar{c}$, mas não $K^0 = d\bar{s}$) são as próprias antipartículas.

Processos com Partículas

Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as nuvens de glúões.



Se os prótons e neutrões tivessem um tamanho de 10 cm, então os quarks e os electrões seriam menores do que 0.1 mm, e o átomo teria 10 km de diâmetro.

Propriedades das Interações

As intensidades das interações são indicadas relativamente à intensidade da força electromagnética entre dois quarks u separados pelas distâncias referidas.

Propriedade	Interação Gravitáica	Interação Fraca (Electrofraca)	Interação Electromagnética	Interação Forte
Actua em:	Massa – Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Glúões
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	W^+ W^- Z^0	γ	Glúões
Intensidade a $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

BOSÕES		
mediadores das forças		
spin = 0, 1, 2, ...		
Electrofraca spin = 1		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
γ fóton	0	0
W^- bósons W	80.39	-1
W^+ bósons W	80.39	+1
Z^0 bóson Z	91.188	0

Forte (cor) spin = 1		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
g glúão	0	0

Bóson de Higgs spin = 0		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
H Higgs	126	0

Bóson de Higgs

O bóson de Higgs é um elemento fundamental do Modelo Padrão. A sua descoberta confirma o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem massa.

Carga de cor

Só os quarks e os glúões é que possuem "carga de cor" e são sensíveis à interacção forte. Cada quark pode ter uma de três cores ("vermelho", "verde", "azul"). Mas estas não têm nada que ver com as cores da luz visível. Tal como as partículas electricamente carregadas interagem trocando fótons, nas interações fortes, partículas com carga de cor interagem trocando glúões.

Quarks Confinados em Mesões e Bariões

Quarks e glúões não podem ser isolados – estão confinados em partículas de cor neutra chamadas hadrões. Este confinamento (ligação) resulta das múltiplas trocas de glúões entre os constituintes "coloridos". Quando as partículas "coloridas" (quarks e glúões) se afastam, a energia no campo de forças de cor entre elas aumenta. Esta energia pode ser convertida em sucessivos pares quark-antiquark. Estes quarks (q) e antiquarks (\bar{q}) combinam-se em hadrões, que são as partículas observáveis.

Dois tipos de hadrões foram observados na natureza: **mesões** qq e **bariões** qqq. Entre os muitos tipos de bariões observados temos o próton (uud), antipróton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), e neutrão (udd). As cargas eléctricas dos quarks somam-se para o próton ter carga 1 e o neutrão carga 0. Entre os vários tipos de mesões temos o píon π^- ($\bar{u}d$), kaão K^+ ($u\bar{s}$), e B^0 ($d\bar{b}$).

Saiba mais em ParticleAdventure.org



Mistérios por resolver

Motivados por novas questões na nossa compreensão física do Universo, os físicos de partículas seguem caminhos diferentes na direcção de novas descobertas maravilhosas. As experiências poderão vir a encontrar dimensões extra de espaço, buracos negros microscópicos, ou sinais da teoria das cordas.

Porque acelera o Universo?



A expansão do Universo parece estar a acelerar. Será devido à Constante Cosmológica de Einstein? Se não, poderão as experiências vir a revelar novas forças da Natureza ou até dimensões (escondidas) de espaço?

Onde está a Antimatéria?



Matéria e antimatéria terão sido criadas em iguais quantidades no Big Bang. Porque é que agora vemos só matéria, à excepção de quantidades diminutas de antimatéria criadas em laboratório ou nos Raios Cósmicos?

O que é a Matéria Escura?



Grande parte da massa observada nas galáxias e aglomerados de galáxias é formada por matéria invisível. Pode esta matéria escura ser feita de novos tipos de partículas que apenas interagem fracamente com a matéria normal?

Existem Dimensões Extra?



Uma indicação para dimensões extra de espaço pode ser a baixíssima intensidade da força gravitica, quando comparada com as outras três forças fundamentais da Natureza (um íman pode levantar um clipe, sobrepondo-se à gravidade exercida por todo o planeta Terra).

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

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

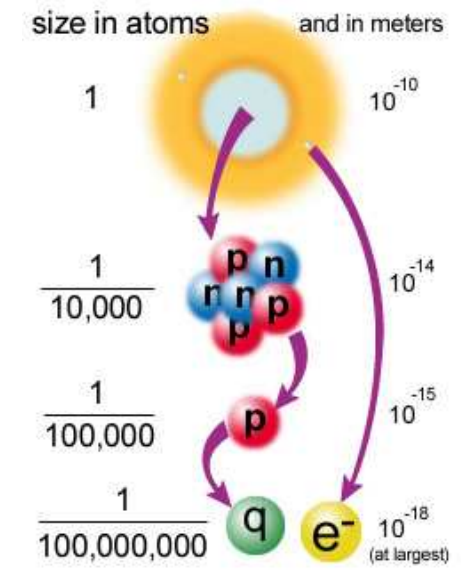
- Há alguma partícula mais pequena do que os quarks?
 - ◆ Escalas e Energia
 - ◆ O LHC
- A descoberta do bóson de Higgs
 - ◆ O que é o bóson de Higgs?
 - ◆ Os resultados experimentais
 - ◆ As implicações

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [● Escalas](#)
- [● O Sítio](#)
- [● Energia do LHC](#)
- [● Um Detector](#)
- [● Evolução](#)
- [● Exemplo CMS](#)
- [● Exemplo Atlas](#)
- [● Nobel Prize](#)
- [Neutrinos](#)
- [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
$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$	$\sim 1 \text{ keV}$	Átomos e Moléculas (Raios X)
$1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$	$\sim 100 \text{ MeV}$	Núcleos (Pequenos Aceleradores)
10^{-18} m	$\sim 100 \text{ GeV}$	Distância mais pequena observada (LEP)

Introdução

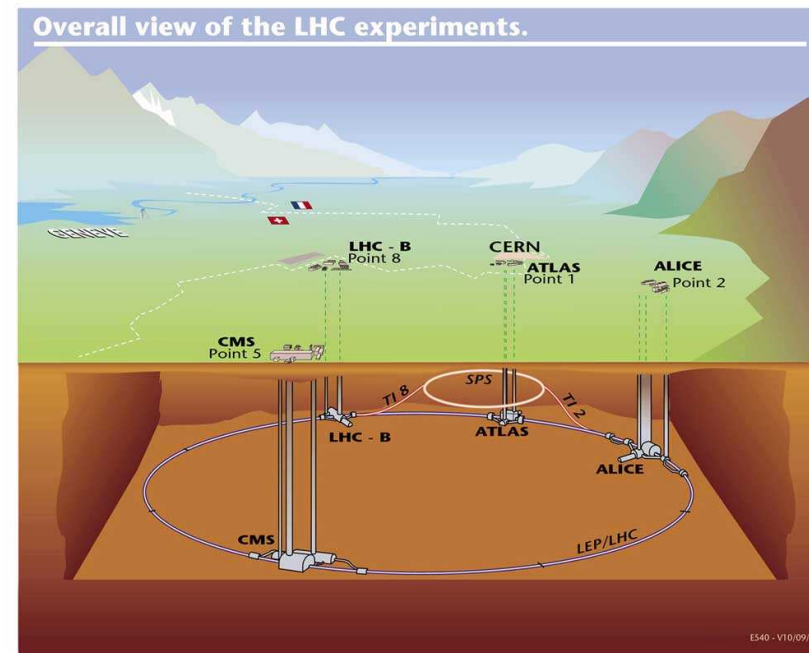
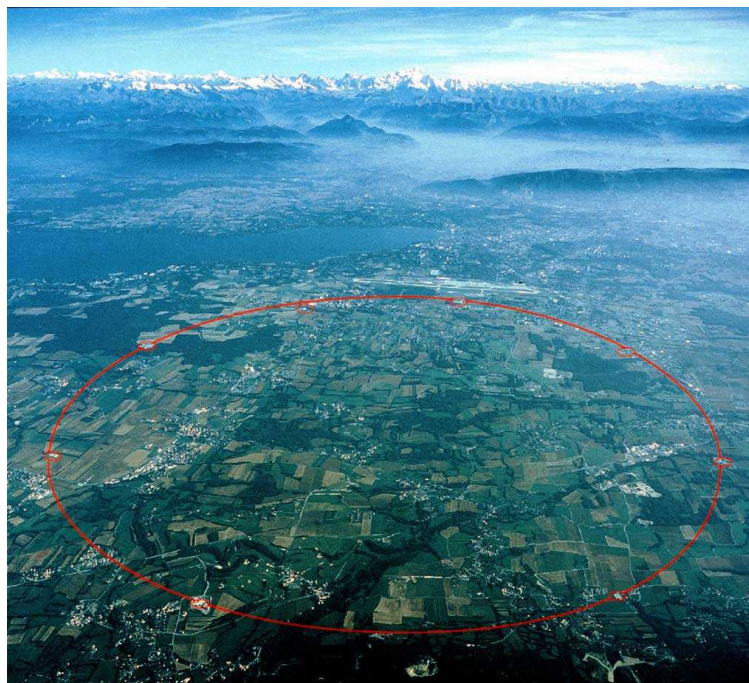
De que somos feitos?

LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- **Energia do LHC**
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

O LHC acelera 3×10^{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?

LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- **Um Detector**

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais

The CMS Detector

SUPERCONDUCTING COIL

CALORIMETERS

ECAL

Scintillating
PbWO₄ crystals

HCAL

Plastic scintillator/brass
sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Silicon Microstrips
Pixels

MUON BARREL

Drift Tube
Chambers (DT) Resistive Plate
Chambers (RPC)

MUON ENDCAPS

Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

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

Introdução

De que somos feitos?

LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC

Um Detector

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais



Introdução

De que somos feitos?

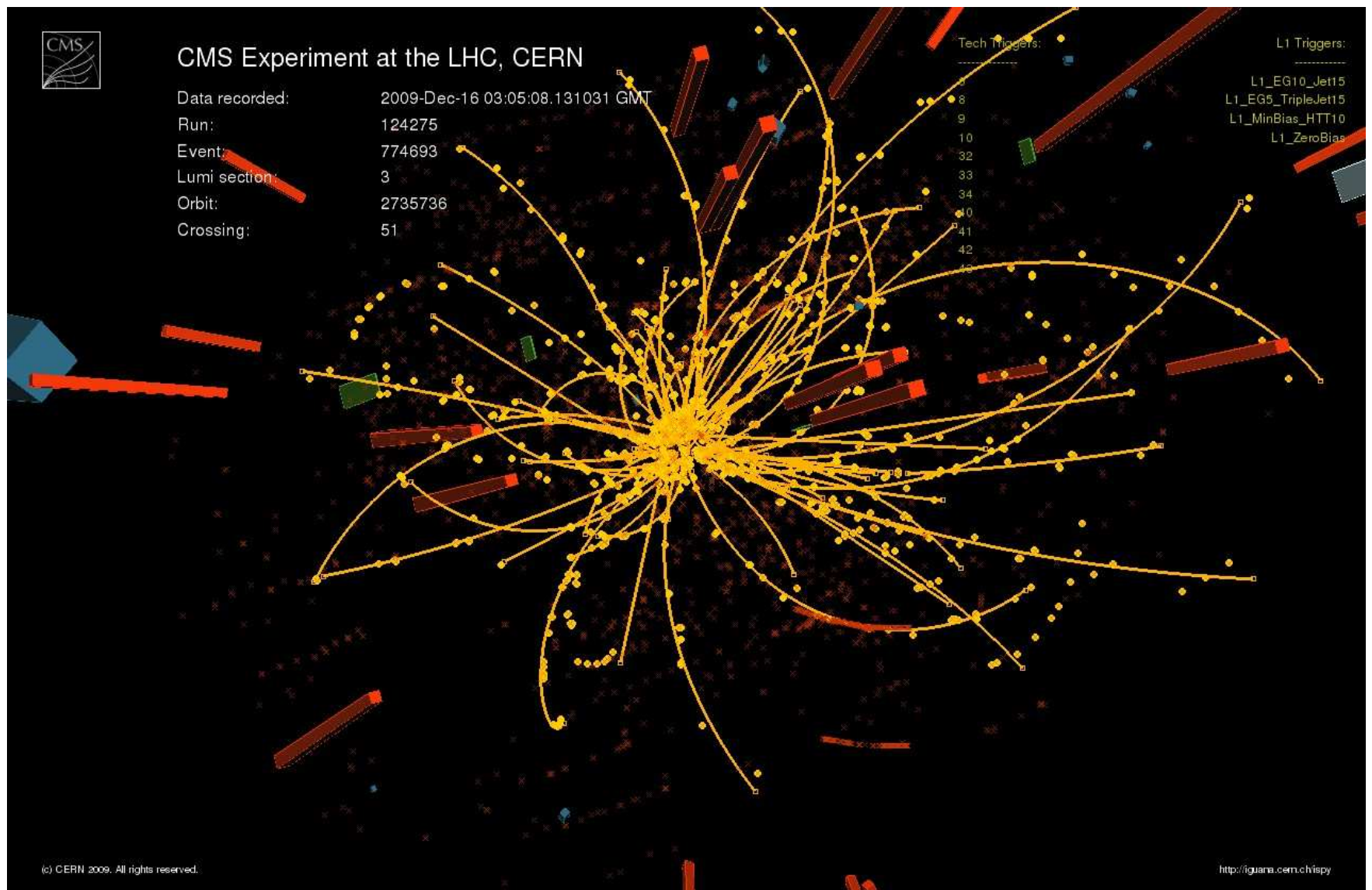
LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector

- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais



O Mecanismo de “Higgs”

Introdução

De que somos feitos?

LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector

Evolução

- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais

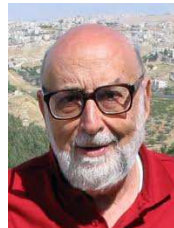
☐ Quem teve a ideia em 1964?



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

A evolução do resultado com o tempo

- [Introdução](#)

- [De que somos feitos?](#)

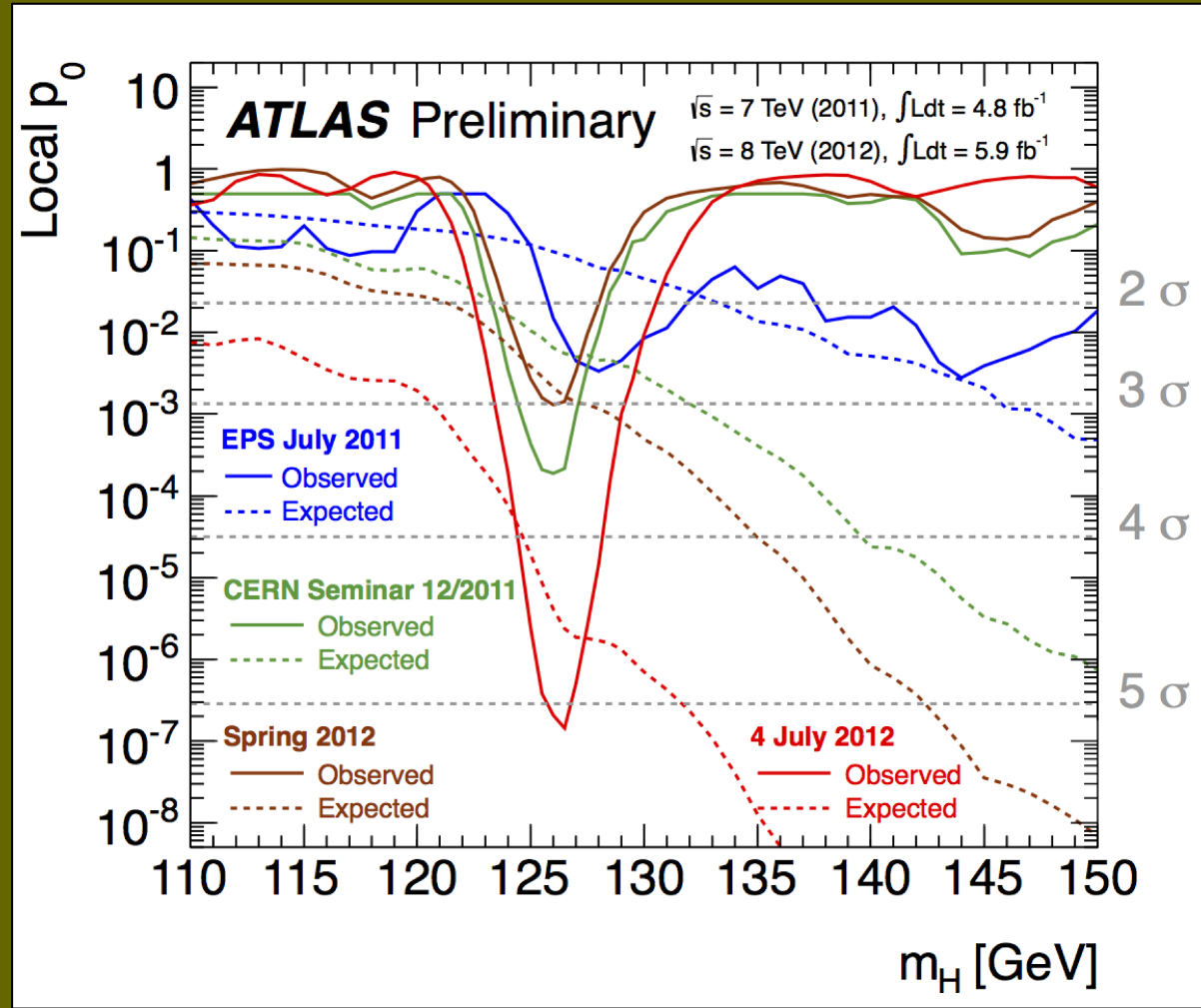
- [LHC e o CERN](#)

 - Escalas
 - O Sítio
 - Energia do LHC
 - Um Detector
 - **Evolução**
 - Exemplo CMS
 - Exemplo Atlas
 - Nobel Prize

- [Neutrinos](#)

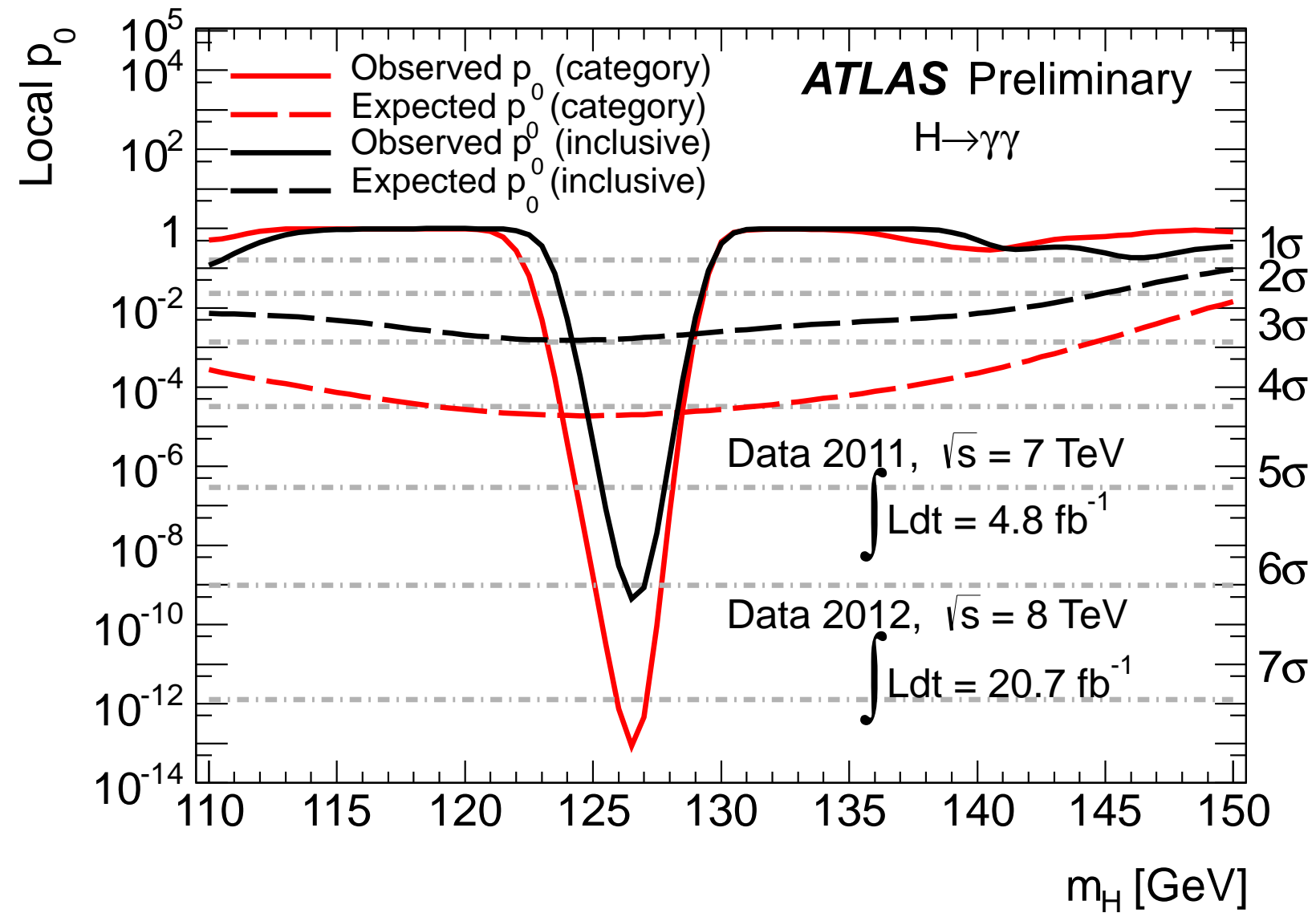
- [Aprender Mais](#)

Evolution of the excess with time



Energy-scale systematics not included

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [• Escalas](#)
- [• O Sítio](#)
- [• Energia do LHC](#)
- [• Um Detector](#)
- [• Evolução](#)
- [• Exemplo CMS](#)
- [• Exemplo Atlas](#)
- [• Nobel Prize](#)
- [Neutrinos](#)
- [Aprender Mais](#)



- [Introdução](#)

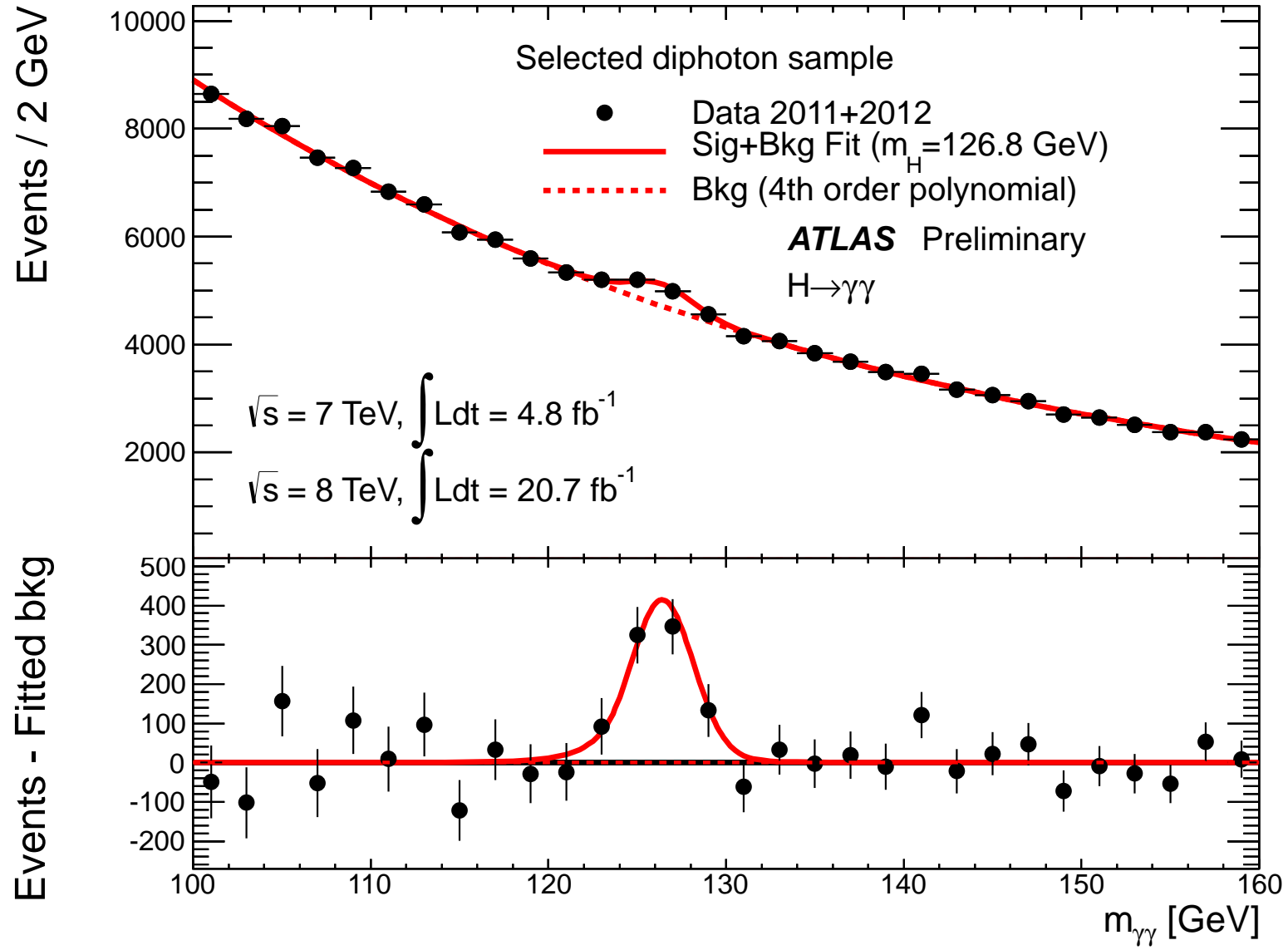
- [De que somos feitos?](#)

- [LHC e o CERN](#)

- [• Escalas](#)
- [• O Sítio](#)
- [• Energia do LHC](#)
- [• Um Detector](#)
- [• Evolução](#)
- [• Exemplo CMS](#)
- [• Exemplo Atlas](#)
- [• Nobel Prize](#)

- [Neutrinos](#)

- [Aprender Mais](#)



Introdução

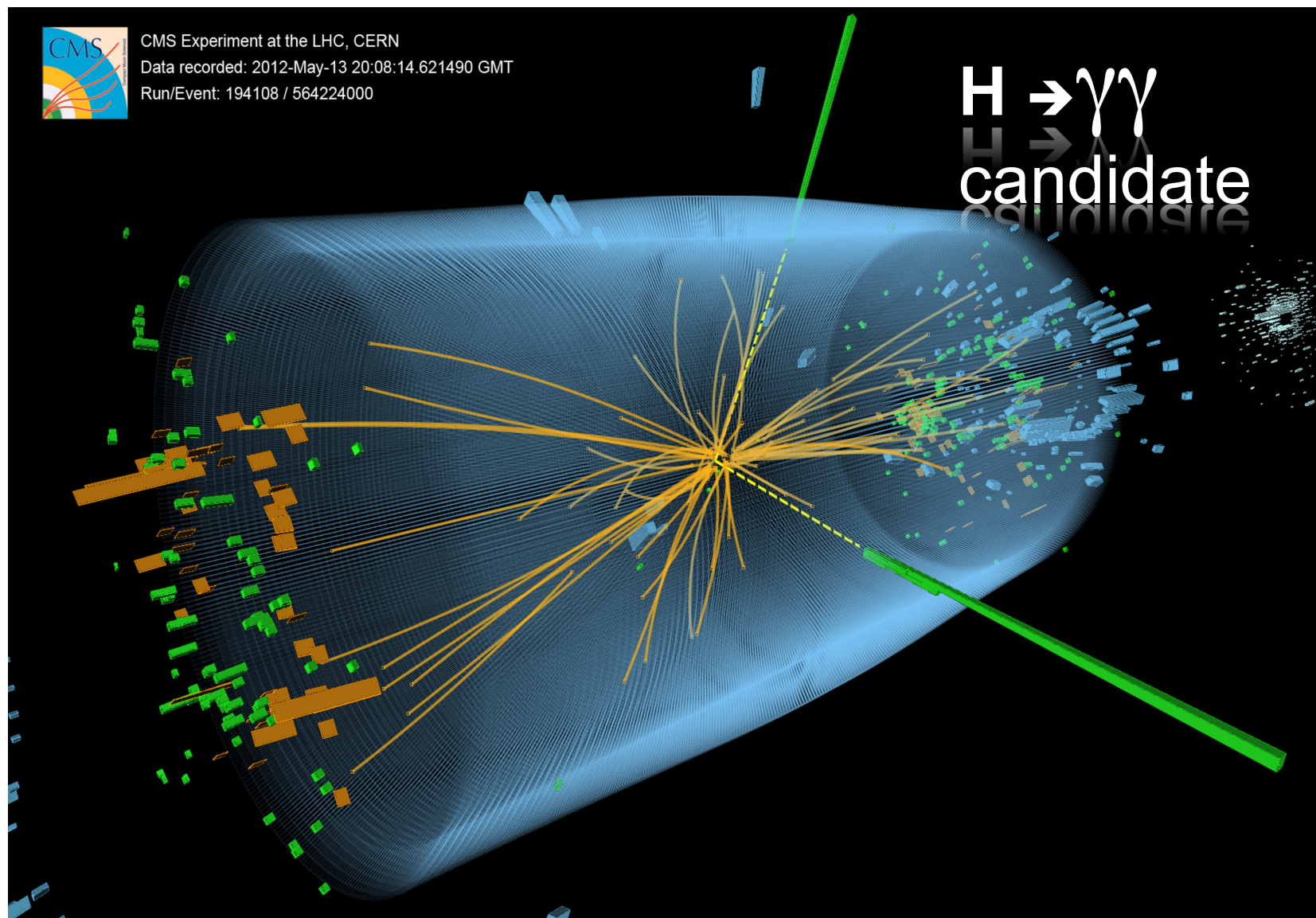
De que somos feitos?

LHC e o CERN

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais



Introdução

De que somos feitos?

LHC e o CERN

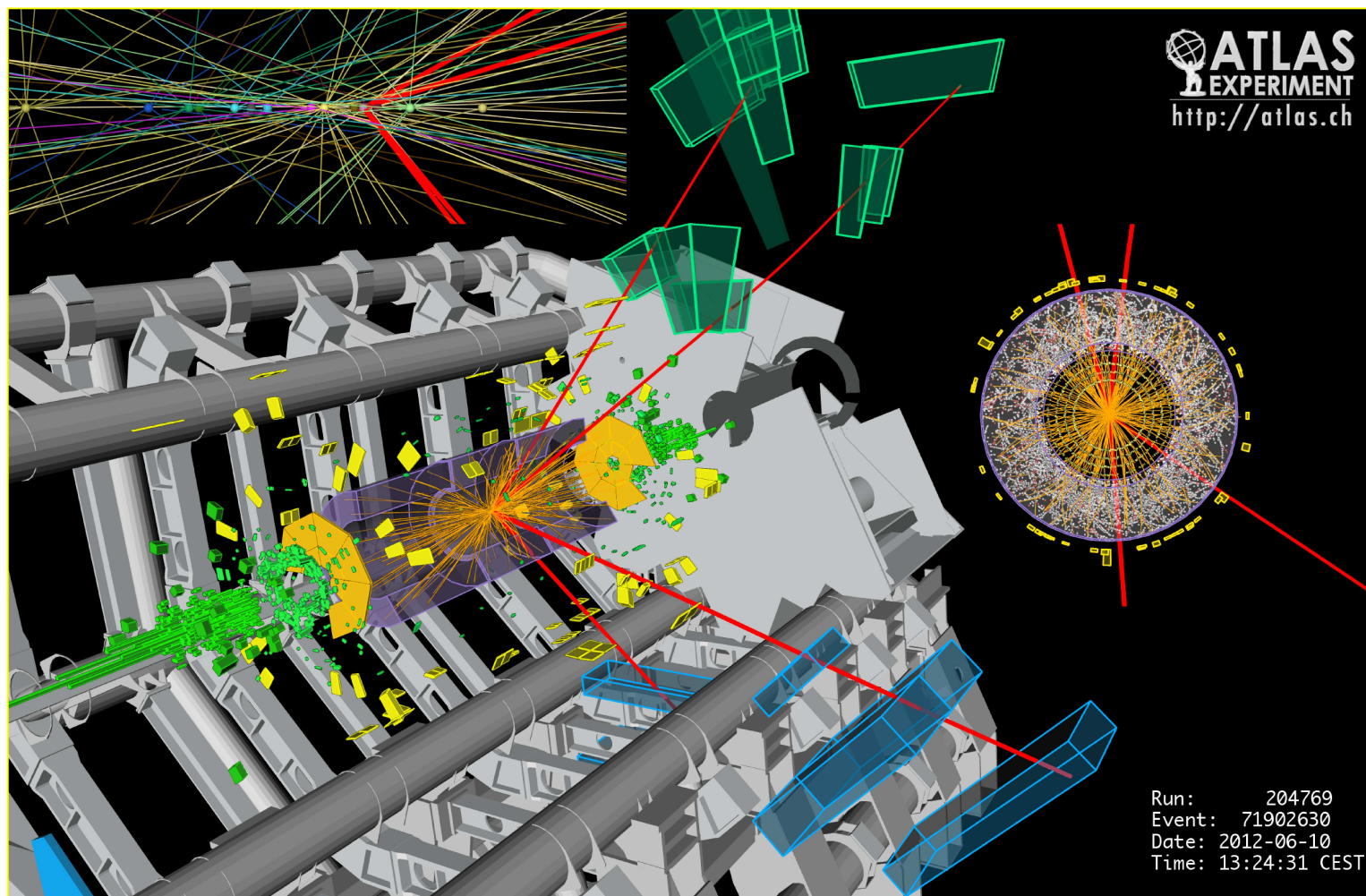
- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- **Exemplo Atlas**
- Nobel Prize

Neutrinos

Aprender Mais

4 μ 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



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

- Escalas
- O Sítio
- Energia do LHC
- Um Detector
- Evolução
- Exemplo CMS
- Exemplo Atlas

• **Nobel Prize**

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)



The Nobel Prize in Physics 2013

François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

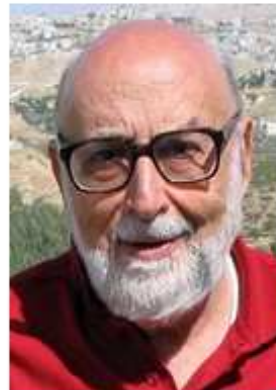


Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert



Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

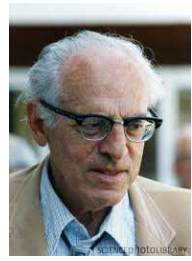
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental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



Pauli



Fermi

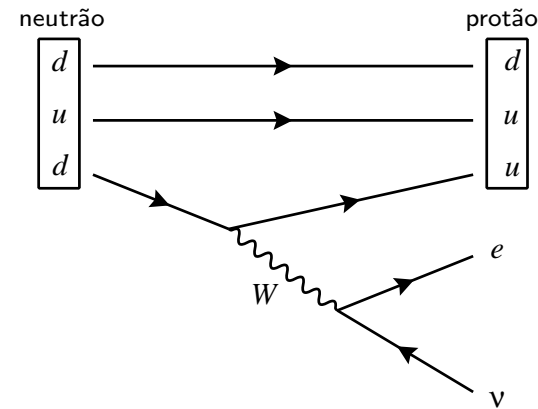
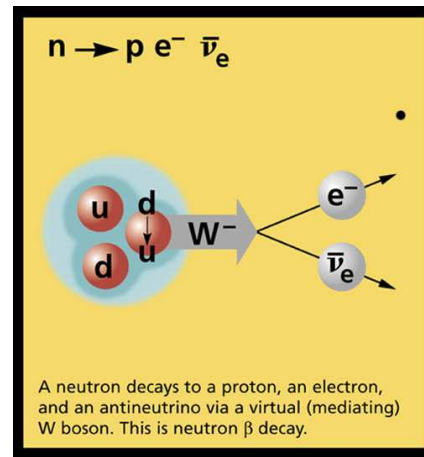


Reines



Cowan

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



- 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 atravessasse a Terra tem, em média, uma interacção.

[Introdução](#)[De que somos feitos?](#)[LHC e o CERN](#)[Neutrinos](#)[● Neutrinos](#)

- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- SNO
- Discussão

[Aprender Mais](#)

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Oloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen dürfte von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, geht aus und der Ernst der Situation beim kontinuierliche beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir nämlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.- Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Baer untertanigster Diener

ges. W. Pauli

Physics Institute
of the ETH
Zürich

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton mass. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes." Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

signed W. Pauli

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

● **Neutrinos**

- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- SNO
- Discussão

[Aprender Mais](#)

Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

● **Neutrinos**

● Majorana

● Nobel 2015

● SuperK

● SNO

● Discussão

[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.



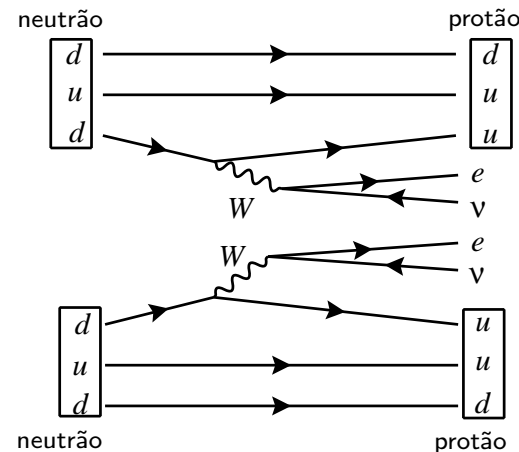
Majorana

□ 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 decaimentos β , processo designado por **duplo decaimento β** . Neste processo dois neutrões passam a prótons com a emissão de dois electrões e de dois neutrinos. Tal como no decaimento β os neutrinos só são detectados indirectamente, através do balanço energético. Este processo é extremamente raro, mas já foi verificado experimentalmente.



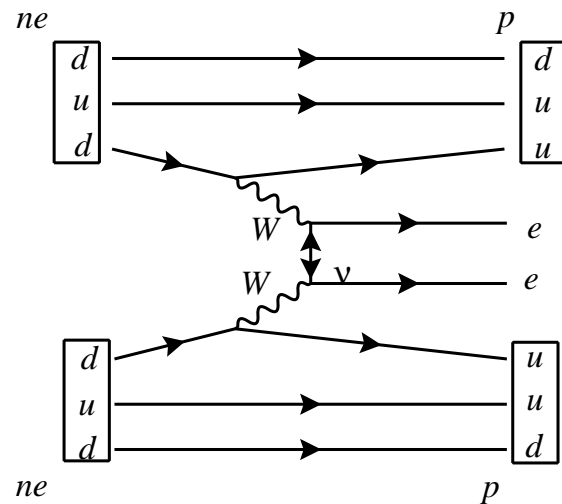
Goeppert-Mayer



Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
 - Neutrinos
 - Majorana
 - Nobel 2015
 - SuperK
 - SNO
 - Discussão
- [Aprender Mais](#)

- Em 1939, Wolfgang Furry propôs que um duplo decaimento β 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).



Majorana



Furry

- 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?](#)

[LHC e o CERN](#)

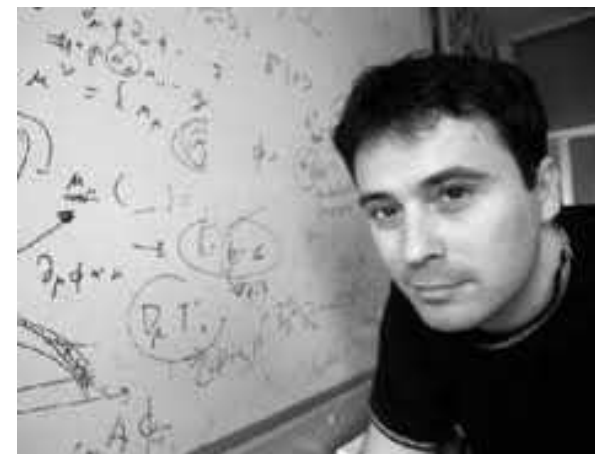
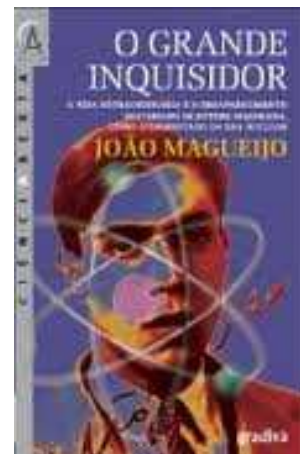
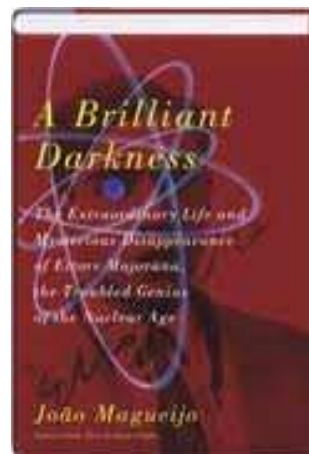
[Neutrinos](#)

- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- SNO
- Discussão

[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](#)

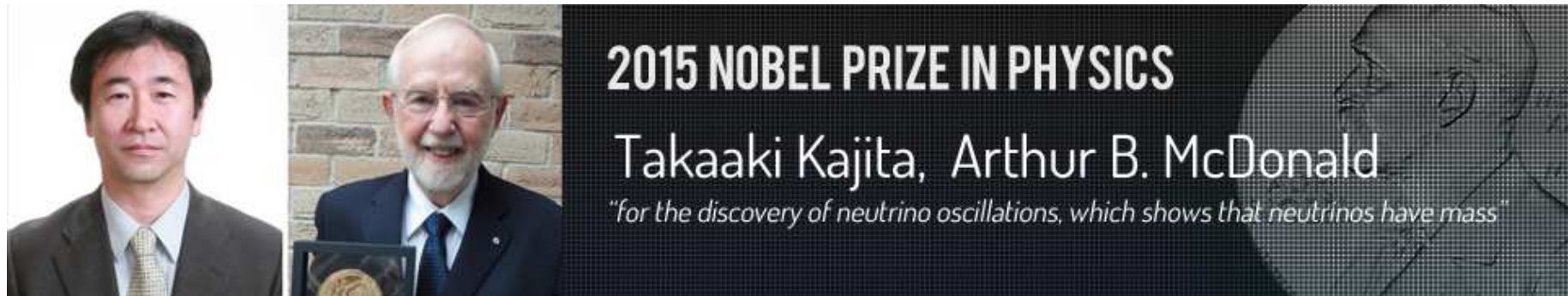
[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

- Neutrinos
- Majorana
- **Nobel 2015**
- SuperK
- SNO
- Discussão

[Aprender Mais](#)



[English](#)
[English \(pdf\)](#)

[Swedish](#)
[Swedish \(pdf\)](#)

Press Release

6 October 2015

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita
Super-Kamiokande Collaboration
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald
Sudbury Neutrino Observatory Collaboration
Queen's University, Kingston, Canada

“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”

Os neutrinos têm massa?

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
 - Neutrinos
 - Majorana
 - **Nobel 2015**
 - SuperK
 - SNO
 - Discussão
- [Aprender Mais](#)

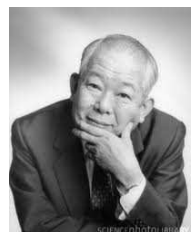
- ❑ Durante muito tempo os físicos pensaram que os neutrinos não tinham massa. As experiências davam só um limite superior por ser muito difícil fazer esta medida. A massa era compatível com ser zero, dentro do erro experimental.
- ❑ Em 1957, Bruno Pontecorvo, sugeriu uma maneira indirecta de detectar 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 a demonstração da existência de neutrinos de origem astrofísica.



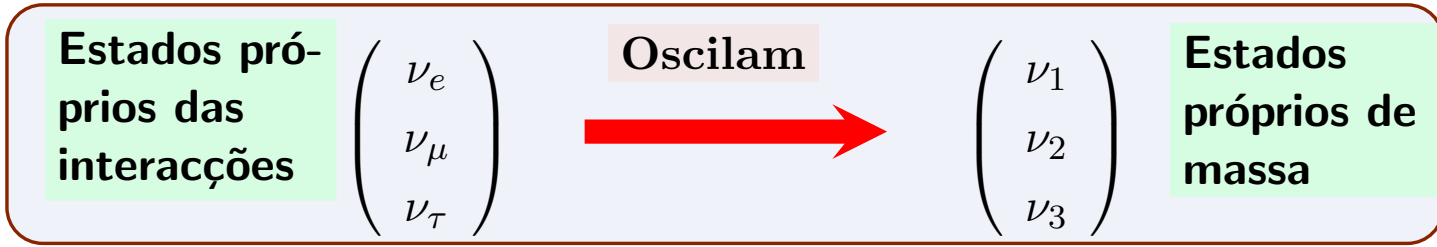
Pontecorvo



Davis

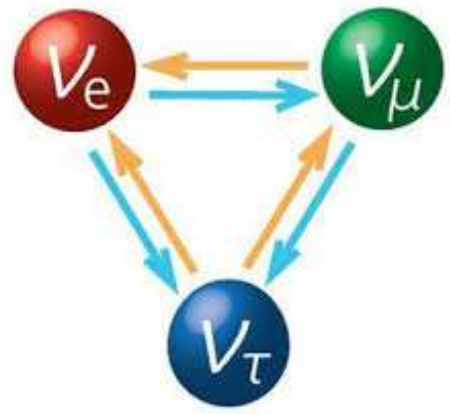


Koshiba

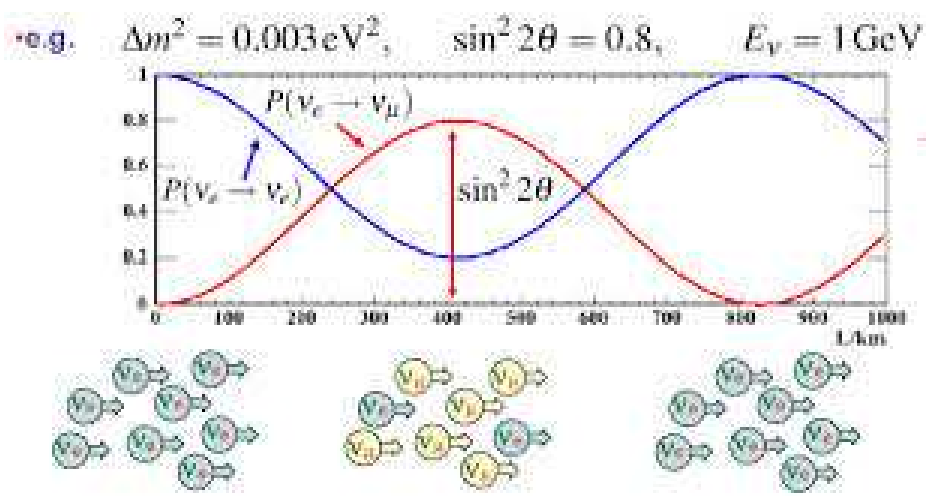
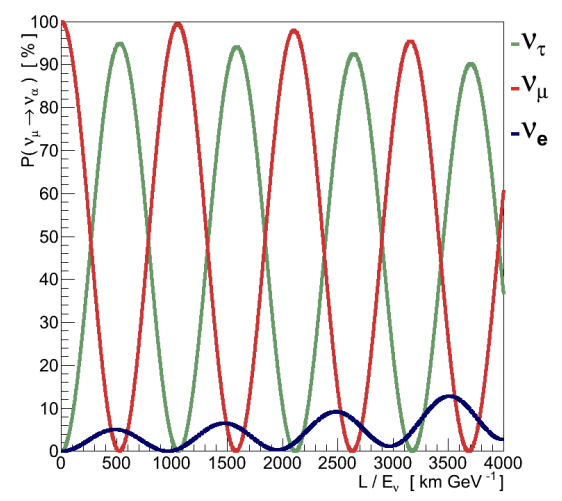


- ❑ Em cada segundo passam através de nós 100000000000000 = 10^{14} neutrinos vindos do Sol!

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
 - Neutrinos
 - Majorana
 - **Nobel 2015**
 - SuperK
 - SNO
 - Discussão
- [Aprender Mais](#)

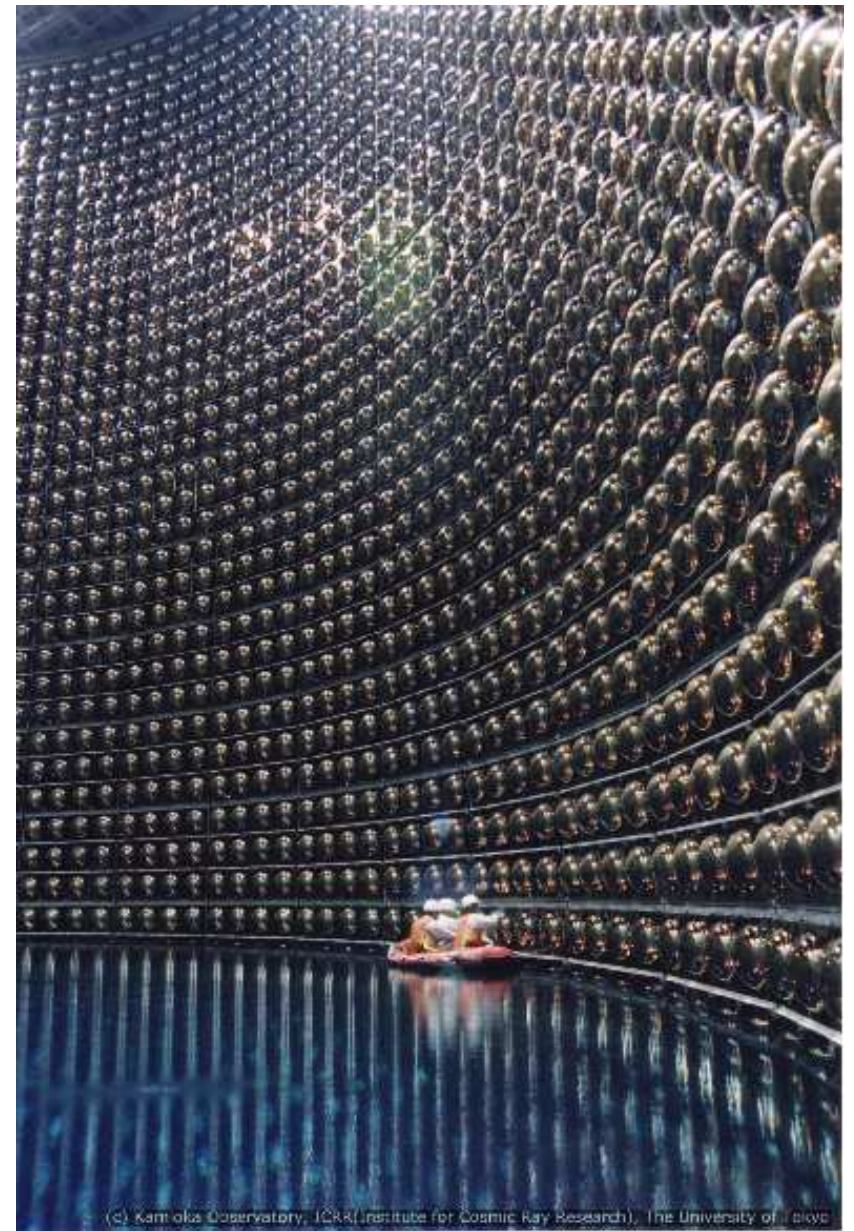
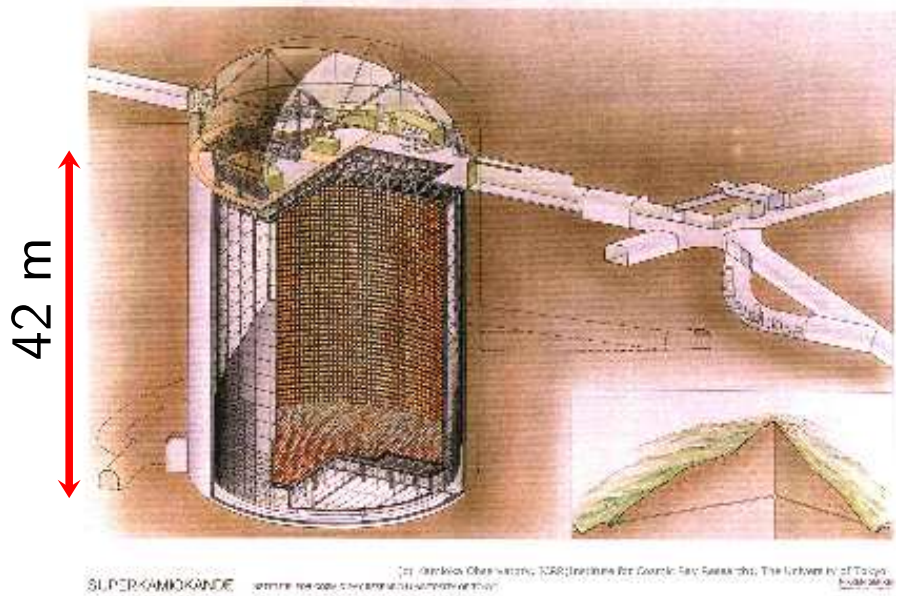
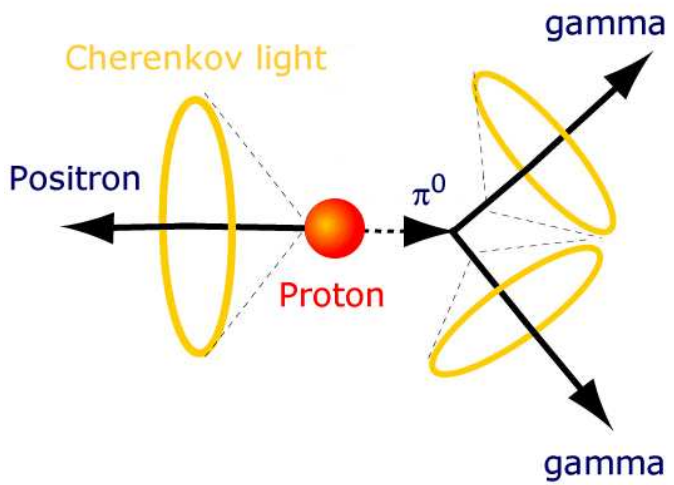


Torn between identities – tau-, electron- or muon-neutrino?



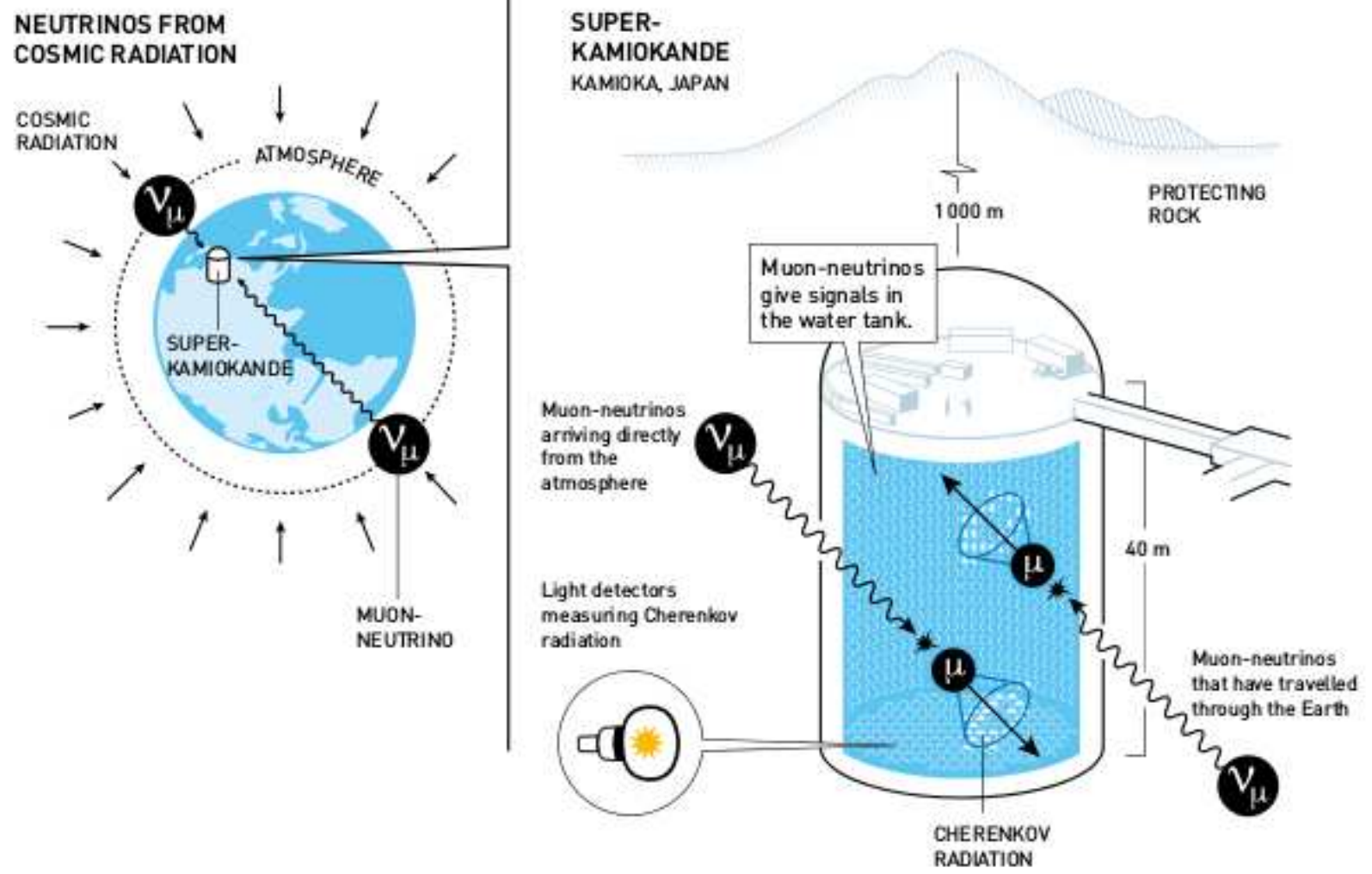
A Experiência Super-Kamiokande

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- **SuperK**
- SNO
- Discussão
- [Aprender Mais](#)



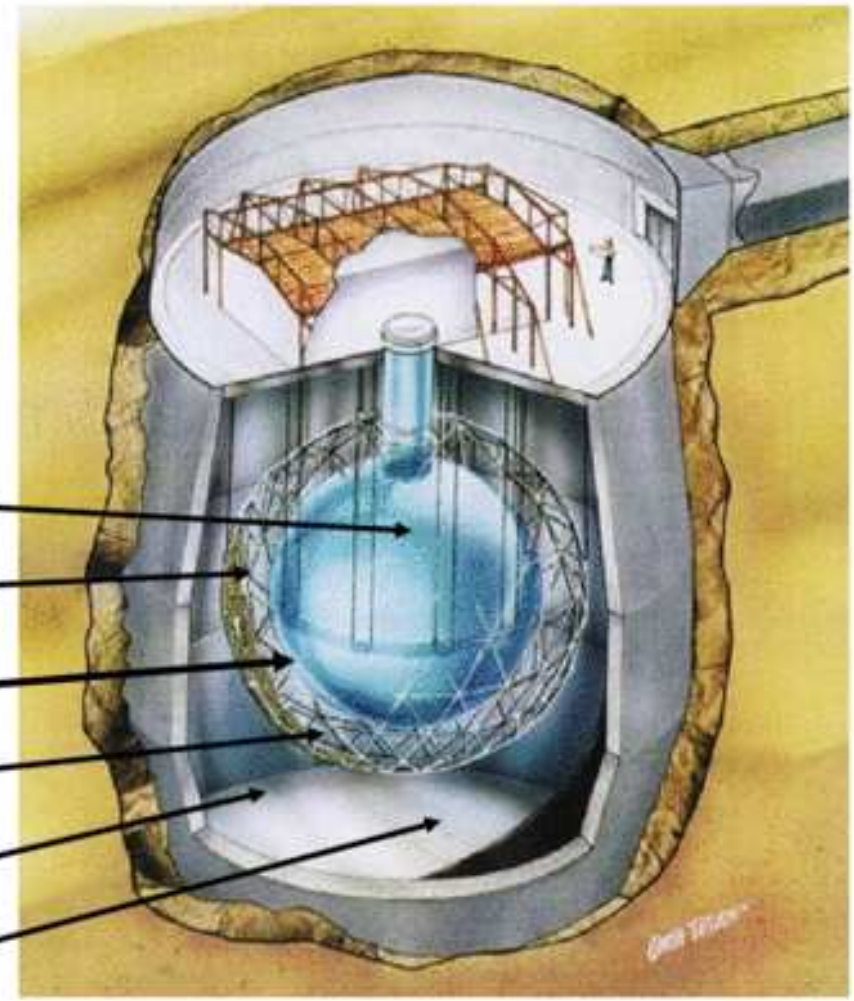
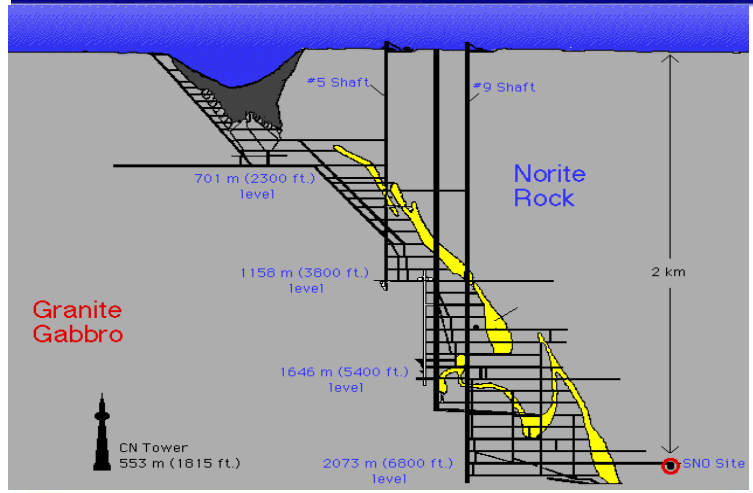
A Experiência Super-Kamiokande

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- **SuperK**
- SNO
- Discussão
- [Aprender Mais](#)



- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- **SNO**
- Discussão
- [Aprender Mais](#)

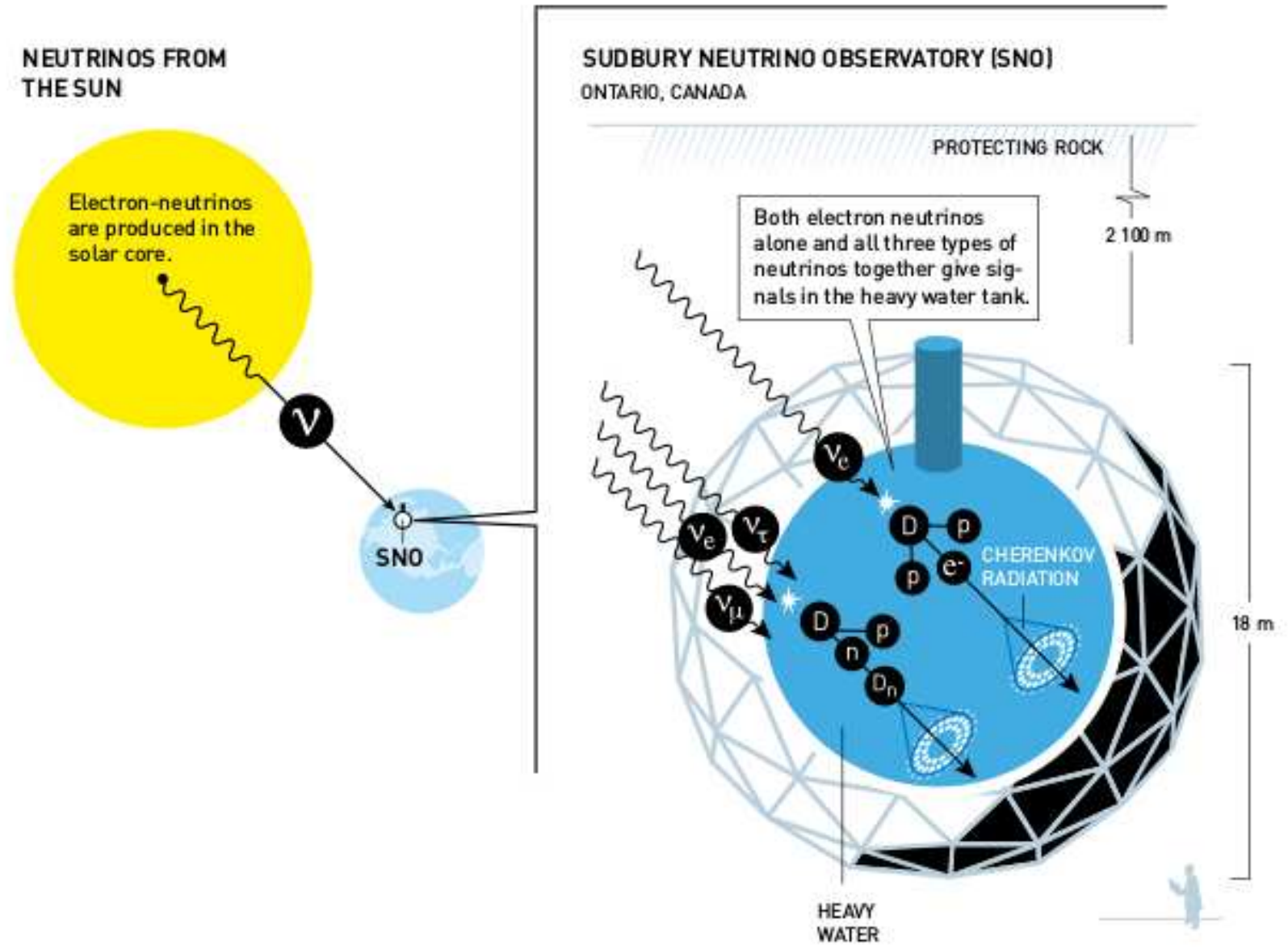
Sudbury Neutrino Observatory



- D₂O (água pesada) : 1000 ton**
- Estrutura de suporte para 9500 PMTs**
- Esfera de Acrílico: diâm. 12 m**
- Camada H₂O interna: 1700 ton**
- Camada H₂O externa: 5300 ton**
- Liner de Urylon: selagem Rádion**

A Experiência SNO

- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
 - Neutrinos
 - Majorana
 - Nobel 2015
 - SuperK
 - **SNO**
 - Discussão
- [Aprender Mais](#)

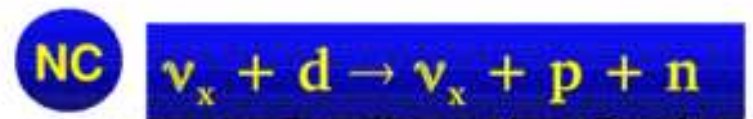


- [Introdução](#)
- [De que somos feitos?](#)
- [LHC e o CERN](#)
- [Neutrinos](#)
- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- **SNO**
- Discussão
- [Aprender Mais](#)

Reacções de Neutrinos em SNO



apenas ν_e
Sensível à energia

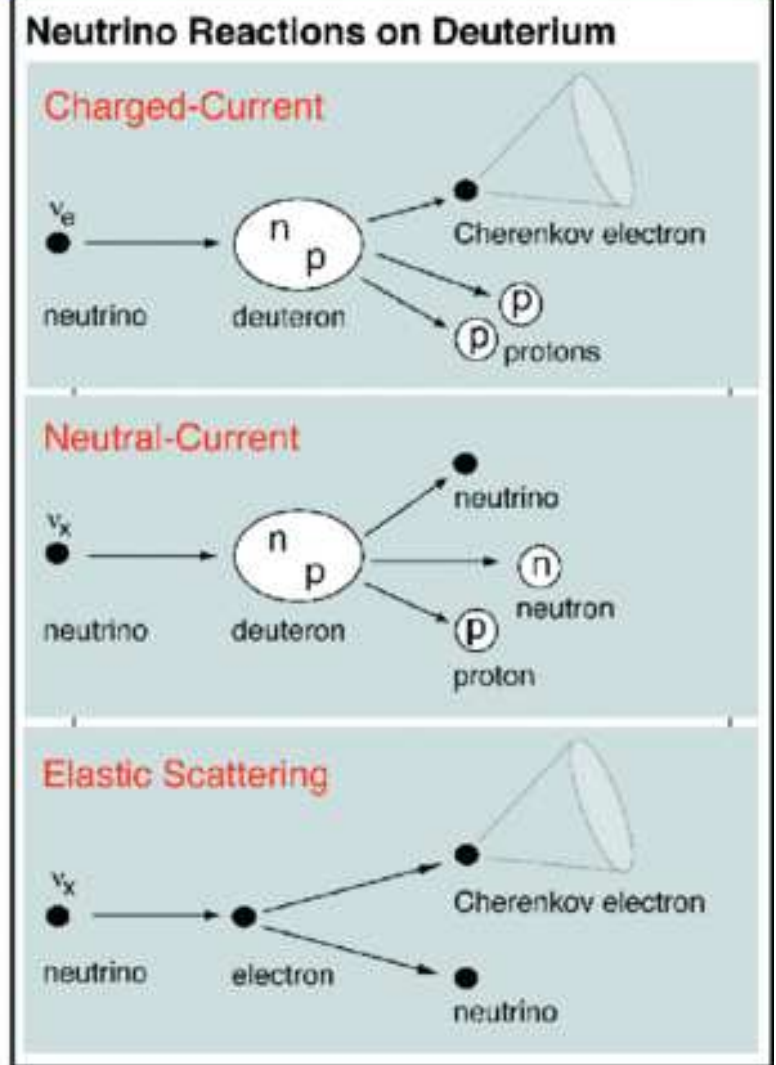


mesma secção eficaz p/ os 3 sabores
Medição do fluxo total de neutrinos ^8B



Secção eficaz maior para ν_e do que para ν_x

baixa estatística
Forte direccionalidade



- Introdução
- De que somos feitos?
- LHC e o CERN
- Neutrinos
 - Neutrinos
 - Majorana
 - Nobel 2015
 - SuperK
 - **SNO**
 - Discussão
- Aprender Mais

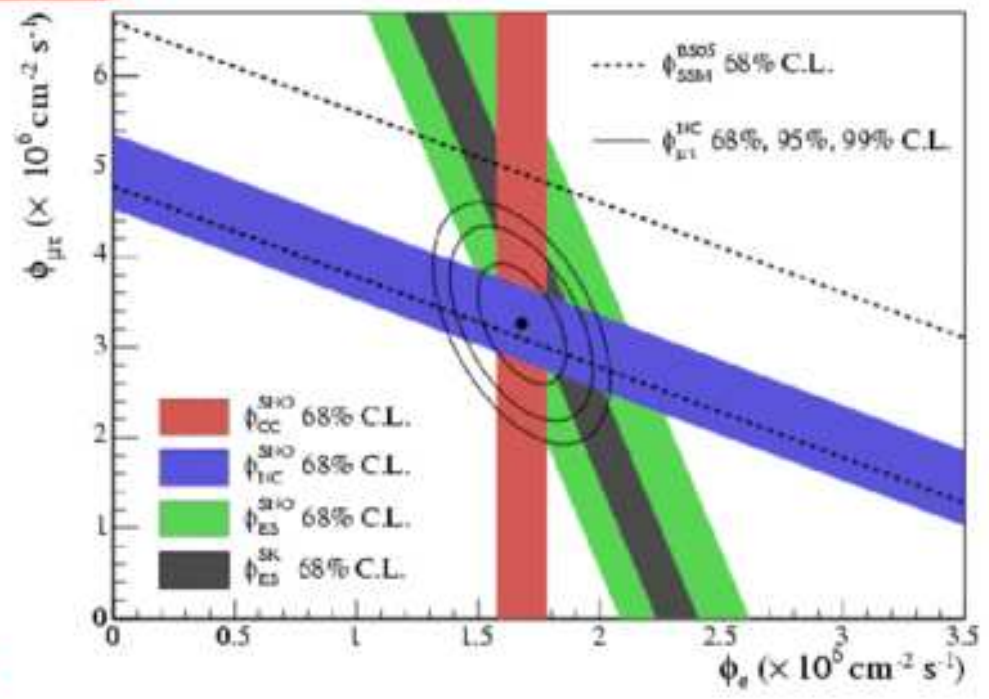
Salt phase fluxes

$$\begin{aligned} \phi_{CC} &= 1.68^{+0.06}_{-0.06} \text{ (stat.) } ^{+0.08}_{-0.09} \text{ (syst.)} \\ \phi_{NC} &= 4.94^{+0.21}_{-0.21} \text{ (stat.) } ^{+0.38}_{-0.34} \text{ (syst.)} \\ \phi_{ES} &= 2.35^{+0.22}_{-0.22} \text{ (stat.) } ^{+0.15}_{-0.15} \text{ (syst.)} \end{aligned}$$

(In units of $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.340 \pm 0.023 \text{ (stat.) } ^{+0.029}_{-0.031}$$

- Agreement with previous results with better accuracy
- Confirmed
 - Flavor transformation
 - Solar model ^8B flux



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- **SNO**
- Discussão

[Aprender Mais](#)

- ❑ Muitas experiências tinham detectado que os neutrinos do Sol não chegavam à Terra nas quantidades que a teoria previa.
- ❑ Tal era o caso da experiência de Raymond Davis que recebeu o Prémio Nobel em 2002 juntamente com Masatoshi Koshiba de Kamiokande.
- ❑ A experiência Super-Kamiokande mostrou isto com grande detalhe para os neutrinos atmosféricos.
- ❑ No entanto foi a experiência SNO que esclareceu que eles não tinham desaparecido, mas tinham somente mudado a sua identidade.
- ❑ A soma total das três variedades estava de acordo com o que seria de esperar.

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)



[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

- Neutrinos
- Majorana
- Nobel 2015
- SuperK
- SNO

• **Discussão**

[Aprender Mais](#)

- ❑ Quais são as perguntas que movem hoje os Físicos de Partículas?
 - ◆ Como explicar a massa dos neutrinos?
 - ◆ Como explicar a matéria escura?
 - ◆ Há só um Higgs? Tem as características esperadas?
 - ◆ Há unificação das interações?
 - ◆ ... 
- ❑ Porque são difíceis de responder?
- ❑ Física Teórica versus Física Experimental
- ❑ A comunidade internacional e os grandes equipamentos
- ❑ A justificação dos grandes investimentos 
- ❑ A publicação no ArXiv
<http://xxx.lanl.gov/archive>
<http://inspirehep.net/>

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[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/>

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

[Slides Extra](#)

- WWW
- Higgs
- Simetrias Gauge

Slides Extra

- [Introdução](#)

- [De que somos feitos?](#)

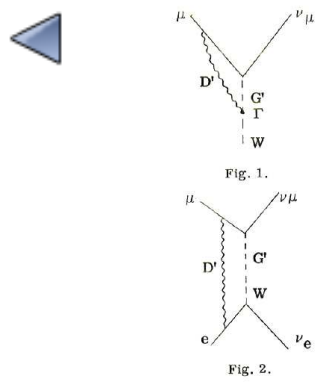
- [LHC e o CERN](#)

- [Neutrinos](#)

- [Aprender Mais](#)

- [Slides Extra](#)

- [WWW](#)
- [Higgs](#)
- [Simetrias Gauge](#)



well into account the radiation correction to the β -decay constant found by Berman³⁾ and Kinoshita and Sirlin⁴⁾ we obtain for the muon life time

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

where τ_{μ}^0 is the muon life time calculated by means of universal theory of four fermion interaction with a constant taken from β -decay without any corrections, Λ_{β} is the cut off momentum due

to the strong interactions, $\Lambda_{\beta} \sim M$, E is the energy of β -transition. According to experimental data $\tau_{\mu}^0/\tau_{\mu} = 0.988 \pm 0.004$.

Substituting the numbers into (1) we obtain $\tau_{\mu}^0/\tau_{\mu} = 1.003$ 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 β - and μ -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. Terentev for valuable discussions.

References

- 1) B. L. Ioffe, M. V. Terentev (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^{1,2)}: 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 Lee³⁾ 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. Gilbert⁴⁾, 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 Gilbert⁴⁾, let us consider a theory of two hermitian scalar fields

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

$$\begin{aligned} \varphi_1 &\rightarrow \varphi_1 \cos \alpha + \varphi_2 \sin \alpha, \\ \varphi_2 &\rightarrow -\varphi_1 \sin \alpha + \varphi_2 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Then there is a conserved current j_{μ} 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 φ_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 $2\pi \langle \varphi_2 \rangle \epsilon(k_0) \delta(k_{\mu}) \delta(k^2)$, where k_{μ} is the momentum, as a consequence of Lorentz-covariance, the conservation law and eq. (2).

Klein and Lee³⁾ 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,

$$F.T. = k_{\mu} \rho_1(k^2, nk) + n_{\mu} \rho_2(k^2, nk) + C_3 n_{\mu} \delta^4(k), \quad (3)$$

where n_{μ} , which may be taken as (1, 0, 0, 0), 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_{μ} 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_{μ} does indeed play a part. This is the class of gauge theories, where an auxiliary unit timelike vector n_{μ} 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 Schwinger⁵⁾. (This has, of course, long been known of the simplest such theory, quantum electrodynamics.) There seems to be no reason why the vector n_{μ} 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

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

Except in the case of abelian gauge theories, the fields A_{μ} , $F_{\mu\nu}$ are not simply the gauge field variables A_{μ} , $F_{\mu\nu}$, 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) 265.
- 4) W. Gilbert, Phys. Rev. Letters 12 (1964) 713.
- 5) J. Schwinger, Phys. Rev. 127 (1962) 324.

[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

[Slides Extra](#)

- WWW
- Higgs
- Simetrias Gauge

- ❑ 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=ASRpIym_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=RIg1Vh7uPyw&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?

LHC e o CERN

Neutrinos

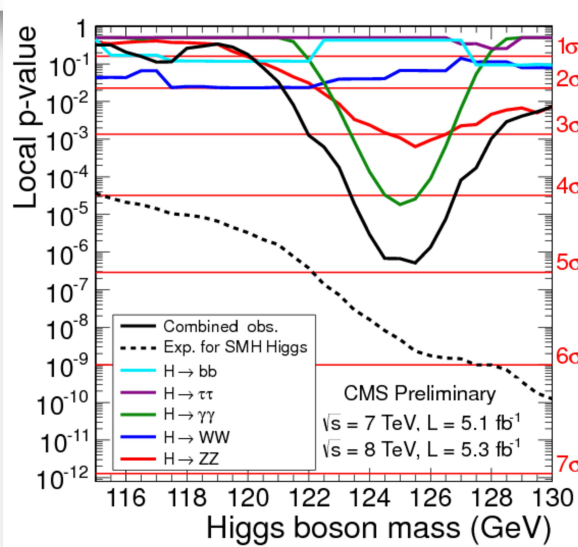
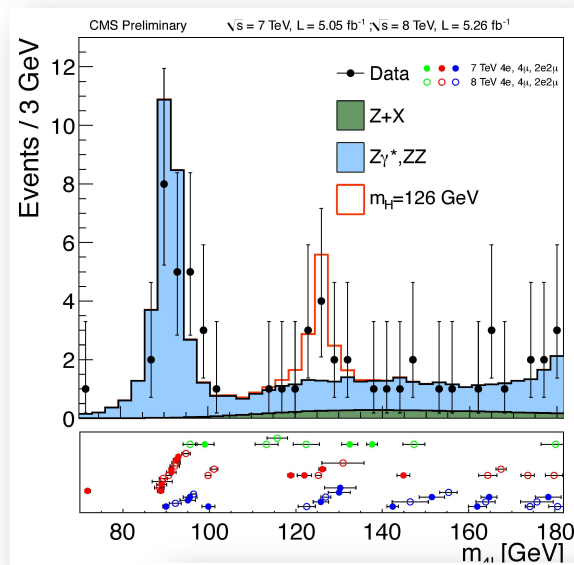
Aprender Mais

Slides Extra

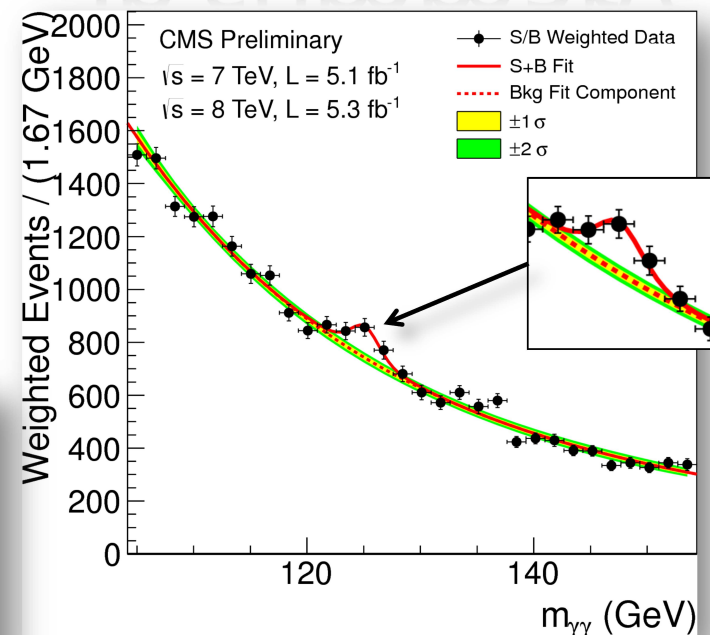
- WWW
- Higgs
- Simetrias Gauge



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



In summary



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

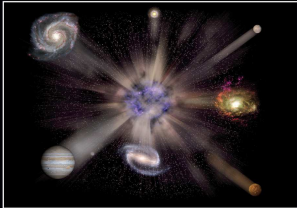
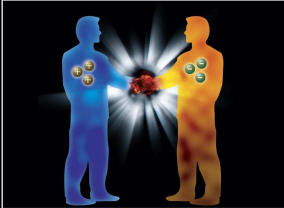
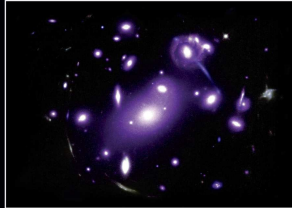

[Aprender Mais](#)

[Slides Extra](#)

- WWW
- Higgs
- Simetrias Gauge

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

Why is the Universe Accelerating?	Why No Antimatter?	What is Dark Matter?	Are there Extra Dimensions?
			
The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?	Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?	Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?	An indication for extra dimensions may be the extreme weakness of gravity compared with the other three fundamental forces (gravity is so weak that a small magnet can pick up a paper clip overwhelming Earth's gravity).



World Wide Web@20



[Introdução](#)

[De que somos feitos?](#)

[LHC e o CERN](#)

[Neutrinos](#)

[Aprender Mais](#)

[Slides Extra](#)

● WWW

● Higgs

● Simetrias Gauge



Fez vinte e cinco anos em 2014, 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.



Introdução

De que somos feitos?

LHC e o CERN

Neutrinos

Aprender Mais

Slides Extra

WWW

Higgs

Simetrias Gauge

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 note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² 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 Anderson³ 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 Goldstone² himself: Two real⁴ scalar fields φ_1, φ_2 and a real vector field A_μ 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_μ . 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_μ 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.⁵

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.⁶ 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.⁷ 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.⁸ 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.⁹

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

⁴In 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.
⁵In the theory of superconductivity such a term arises from collective excitations of the Fermi gas.

⁶See, for example, S. L. Glashow and M. Gell-Mann, Ann. Phys. (N.Y.) **15**, 437 (1961).

⁷These 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).

⁸Tentative 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 κ meson (725 MeV) by Y. Nambu and J. J. Sakurai, Phys. Rev. Letters **11**, 42 (1963). More recently the possibility that the σ 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).

⁹In 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 Bég
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,¹ 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.² Since

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

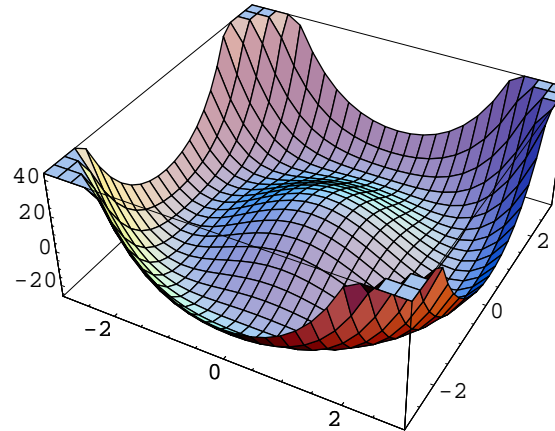
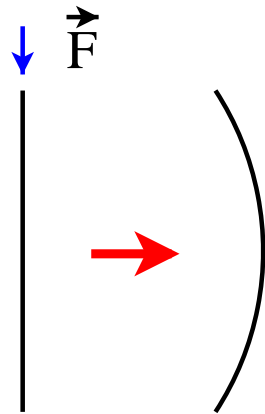
it follows that 70 is the natural candidate for accommodating the higher meson-baryon reso-

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 γ octet³ ($\frac{1}{2}$)⁻. Recent experiments appear to indicate that some ($\frac{1}{2}$)⁻ states may also be at hand.³ 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.

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!**

Simetrias de Padrão (Gauge)

- Introdução
- De que somos feitos?
- LHC e o CERN
- Neutrinos
- Aprender Mais
- Slides Extra
 - WWW
 - Higgs
 - Simetrias Gauge

Teorias Modernas \longleftrightarrow Simetrias de Gauge

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

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

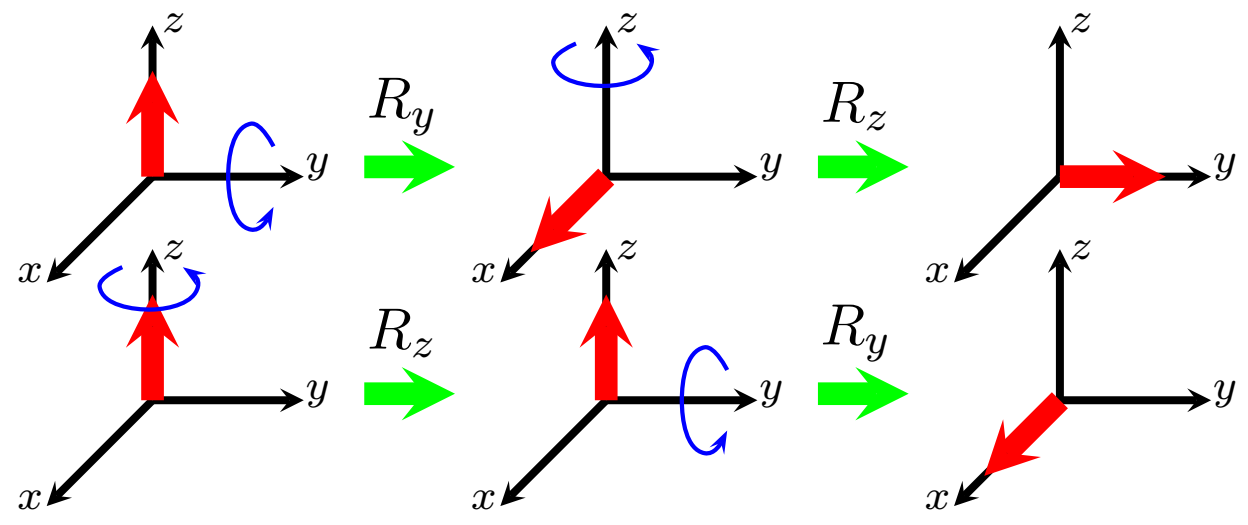
Grupo Abeliano
 $V_{12} = V_{21}$
 $2 + 3 = 3 + 2$



Weyl

Interacção Forte & Fraca

\rightarrow **Grupo Não Abeliano**



Yang & Mills

$R_y R_z \neq R_z R_y$