



# **A Física das Partículas Elementares e as 125 Perguntas sobre Ciência**

Jorge C. Romão

Instituto Superior Técnico, Departamento de Física & CFTP

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

21 de Novembro de 2011

## Introdução

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

Das **125 perguntas da Revista Science** (2005) há seis que têm a ver mais directamente com a minha área de investigação e que escolhi para discutir aqui hoje.

- 1- De que é o Universo feito? De que são feitas as coisas?
- 5- As leis da Física podem ser unificadas?
- 32- Há mais matéria do que anti-matéria. Porquê?
- 33- Um protão decai?
- 36- Há alguma partícula mais pequena do que os quarks?
- 37- Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

## □ Pergunta 1

- ◆ As Interacções Fundamentais
- ◆ Os Constituintes Elementares

## □ As outras perguntas

- ◆ Porque somos feitos de matéria? (pergunta 32)
- ◆ Os neutrinos e as suas anti-partículas (pergunta 37)
- ◆ A Unificação e a estabilidade do protão (perguntas 5 e 33)
- ◆ A escala mais pequena (pergunta 36)

[Introdução](#)

**[Interacções \(1\)](#)**

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

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

**De que é o Universo feito? De que são feitas as coisas?**

# As Interações Fundamentais

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

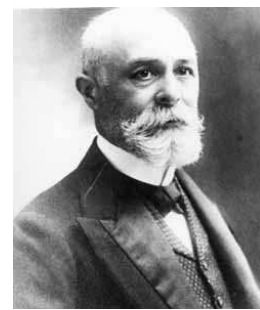
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc XIX	Estrutura Atómica
Fraca	Séc XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc XX	Coesão dos Núcleos



Newton



Maxwell



Becquerel

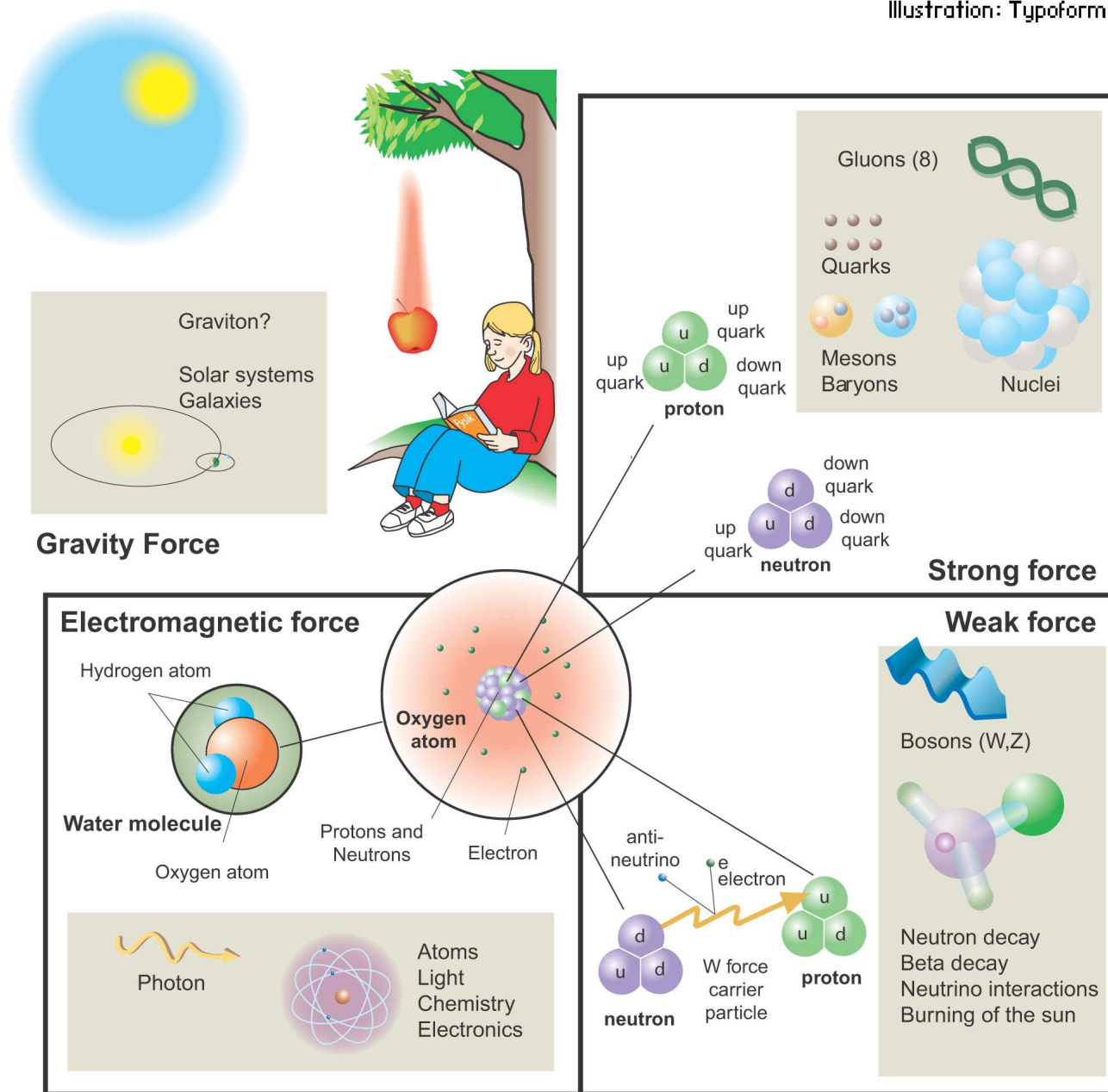


Yukawa

- [Introdução](#)
- [Interações \(1\)](#)
- Força**
- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

[Introdução](#)[Interações \(1\)](#)**• Força**

- Como Explicar?
- TC Modernas
- Simetrias Gauge
- Propriedades

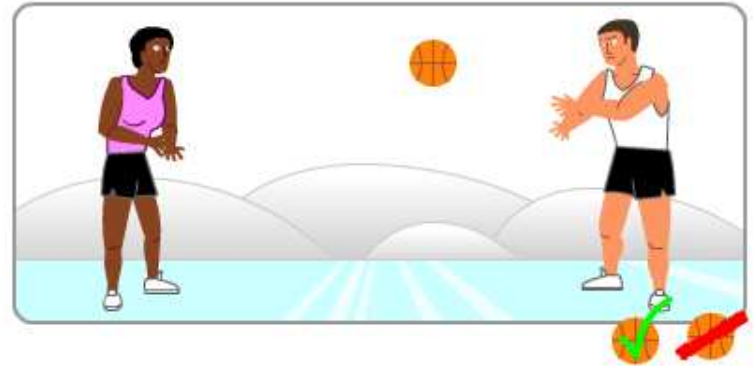
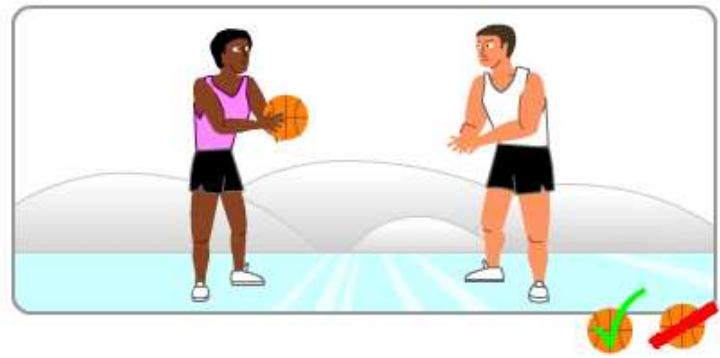
[Constituintes \(1\)](#)[Anti-Matéria \(32\)](#)[Neutrinos \(37\)](#)[Unificação \(5&33\)](#)[LHC e Escalas \(36\)](#)[Aprender Mais](#)

# A Descrição Moderna duma Força

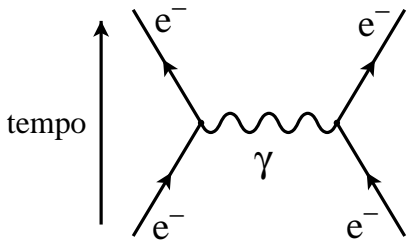
Modernamente o conceito de força é substituído pelo de interacção.

- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
  - **Força**
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - Simetrias Gauge
  - Propriedades
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [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>
---	--



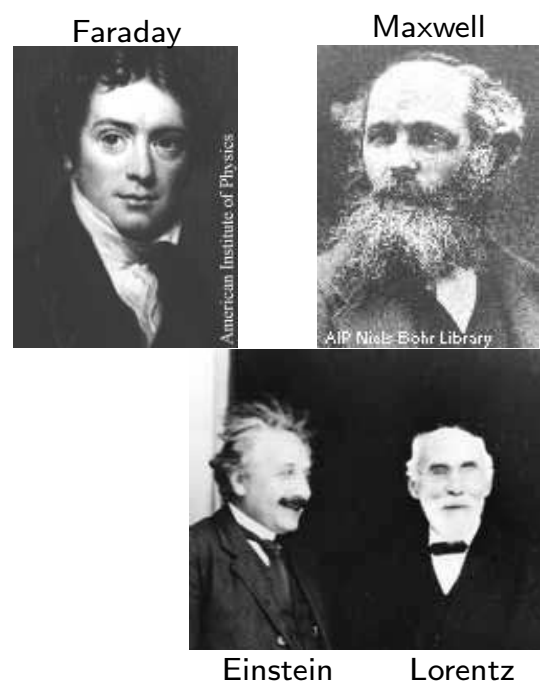
Feynman



- [Introdução](#)
- [Interações \(1\)](#)
  - Força
  - **Como Explicar?**
  - TC Modernas
  - Simetrias Gauge
  - Propriedades
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [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

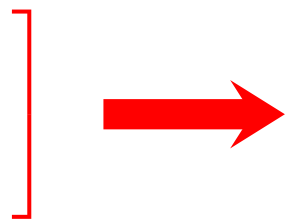
Electromagnetismo  $\supset$  Luz



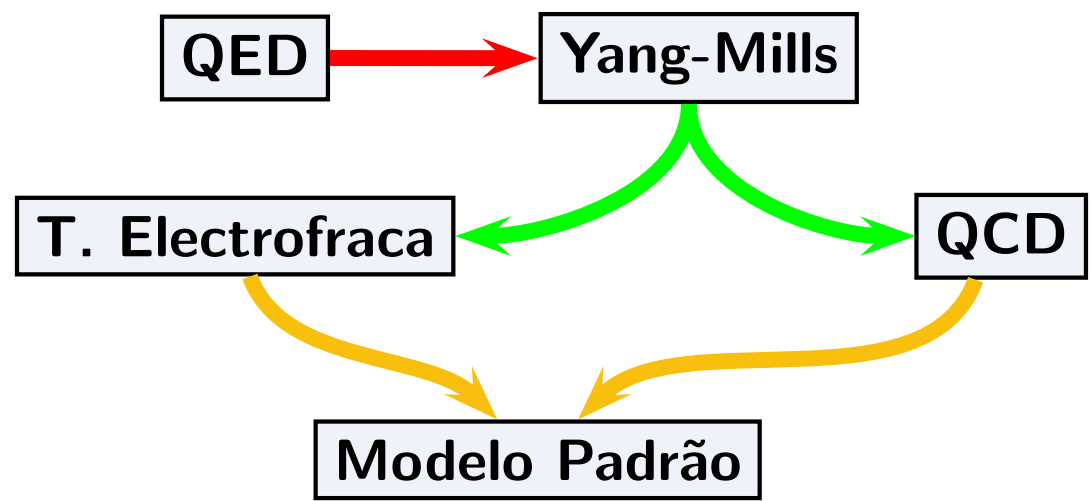
- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
  - Força
  - Como Explicar?
  - **TC Modernas**
  - Simetrias Gauge
  - Propriedades
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

## Os Ingredientes Fundamentais

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



Teoria Quântica dos Campos



# Simetrias de Padrão (Gauge)

- [Introdução](#)
- [Interações \(1\)](#)
  - Força
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - **Simetrias Gauge**
  - Propriedades
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

Teorias Modernas  $\longleftrightarrow$  Simetrias de Gauge

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

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

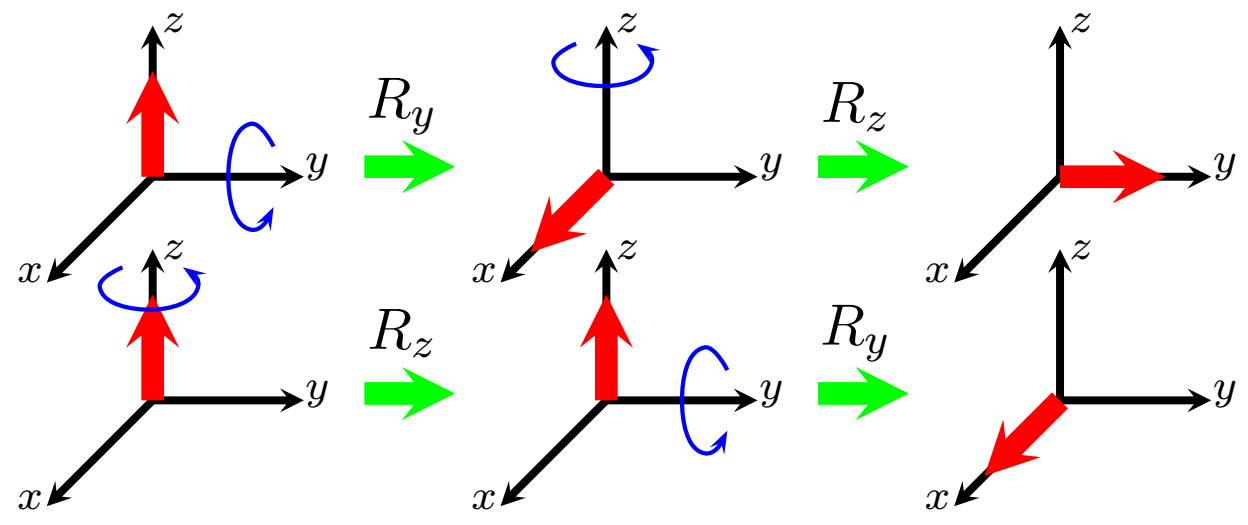
**Grupo Abeliano**  
 $V_{12} = V_{21}$   
 $2 + 3 = 3 + 2$



Weyl

**Interacção Forte & Fraca**

$\rightarrow$  **Grupo Não Abeliano**



Yang & Mills

$R_y R_z \neq R_z R_y$

# Propriedades Gerais das Interações

- [Introdução](#)
- [Interações \(1\)](#)
  - Força
  - Como Explicar?
  - TC Modernas
  - Simetrias Gauge
  - **Propriedades**
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

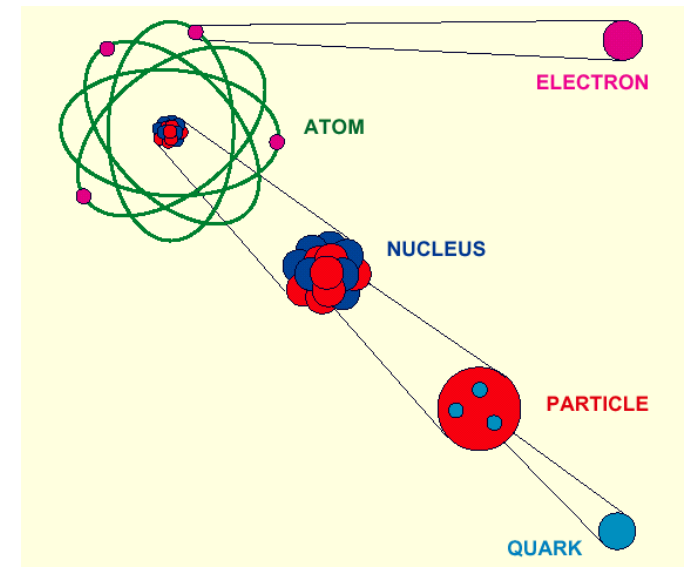
<i>Interação</i>	<i>Alcance</i>	<i>Intensidade</i>	<i>Portador</i>	<i>Massa</i>
Gravitacional	Infinito	$10^{-40}$	Gravitão	0
Fraca	$< 10^{-18}$ m	$10^{-5}$	$W^+, W^-, Z^0$	$\neq 0$
Electromagnética	Infinito	$10^{-2}$	fotão ( $\gamma$ )	0
Forte	$< 10^{-15}$ m	1	8 gluões	0

<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](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)**
  - Leptões
  - Quarks
  - Hadrões
  - Higgs
  - Resumo
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [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](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

• **Leptões**

• Quarks

• Hadrões

• Higgs

• Resumo

[Anti-Matéria \(32\)](#)

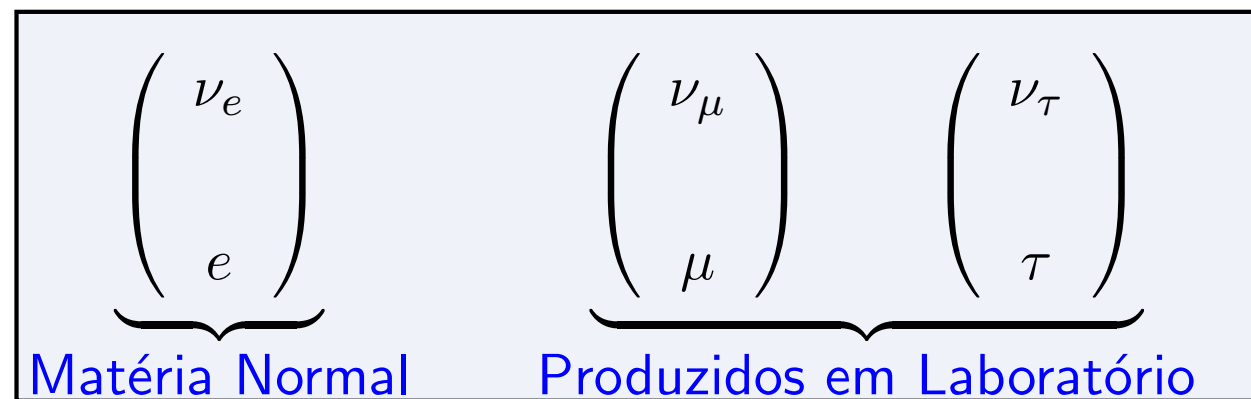
[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

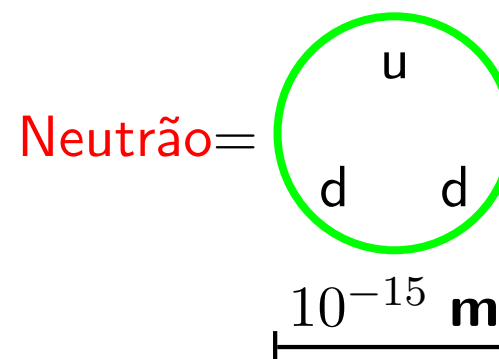
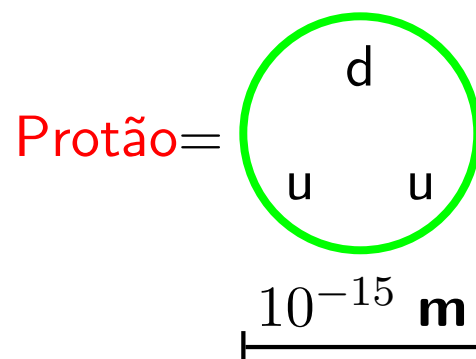
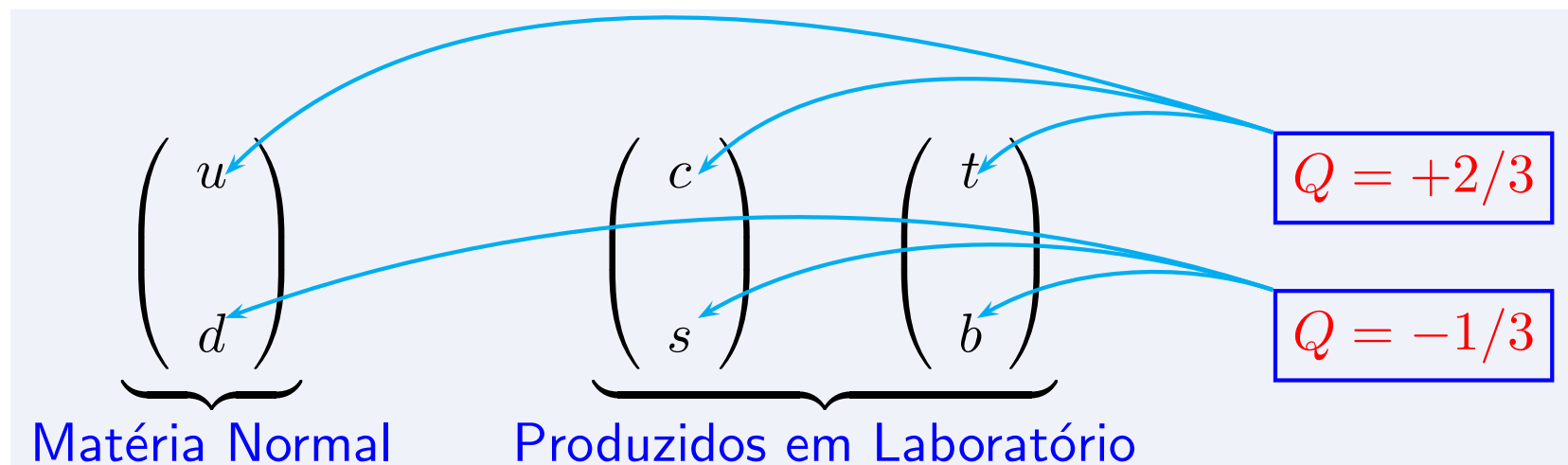
- ❑ Os leptões têm só interacção electrofraca.
- ❑ Quais são os leptões? Os mais conhecidos são o electrão e o neutrino.
- ❑ Mas a Natureza apresenta uma repetição que não sabemos explicar.



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

**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](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
  - Leptões
  - **Quarks**
  - Hadrões
  - Higgs
  - Resumo
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

- Leptões
- Quarks
- **Hadrões**
- Higgs
- Resumo

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

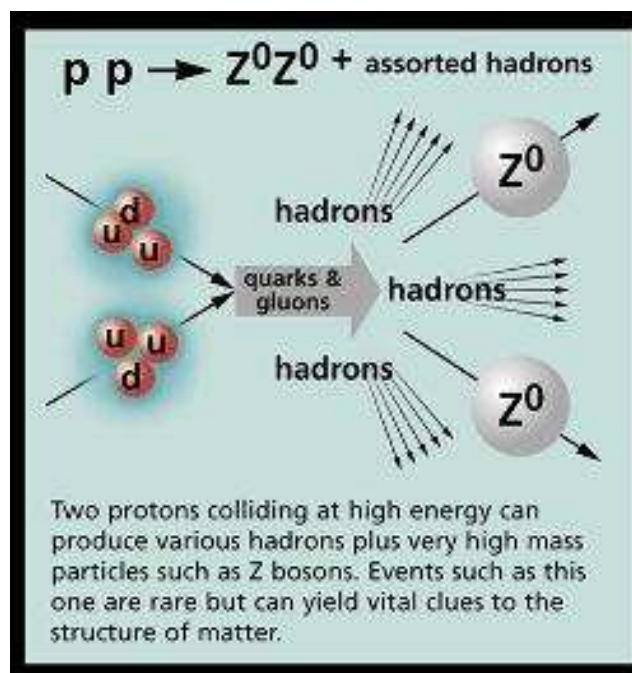
[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

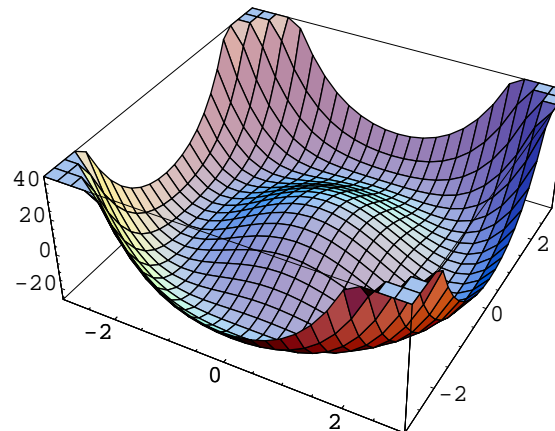
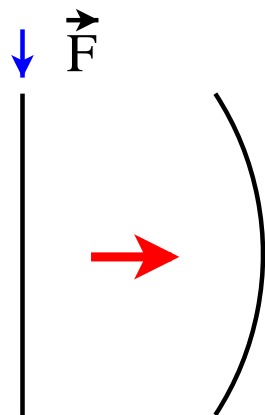
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons					
These are a few of the many types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	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](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
  - Leptões
  - Quarks
  - Hadrões
  - **Higgs**
  - Resumo
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [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. **Busca no LHC!**



[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

- Leptões
- Quarks
- Hadrões
- Higgs
- **Resumo**

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

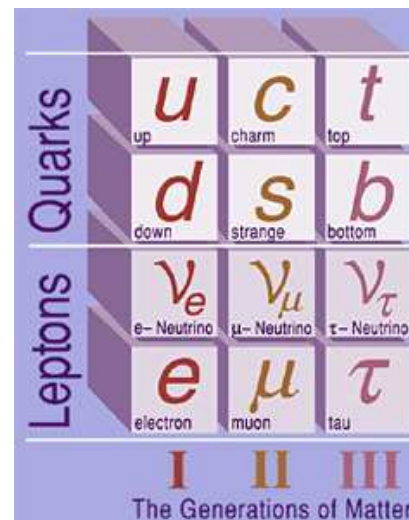
[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[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](#)[Interacções \(1\)](#)[Constituintes \(1\)](#)[Anti-Matéria \(32\)](#)

- Dirac
- Evolução
- Bariogénese
- Violação de CP

[Neutrinos \(37\)](#)[Unificação \(5&33\)](#)[LHC e Escalas \(36\)](#)[Aprender Mais](#)

# Há mais matéria do que anti-matéria. Porquê?

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

• **Dirac**

- Evolução
- Bariogénese
- Violação de CP

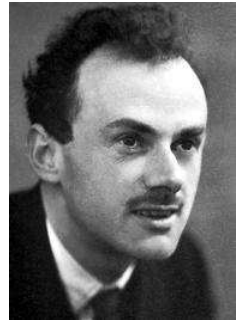
[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[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

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

• Dirac

• **Evolução**

• Bariogénese

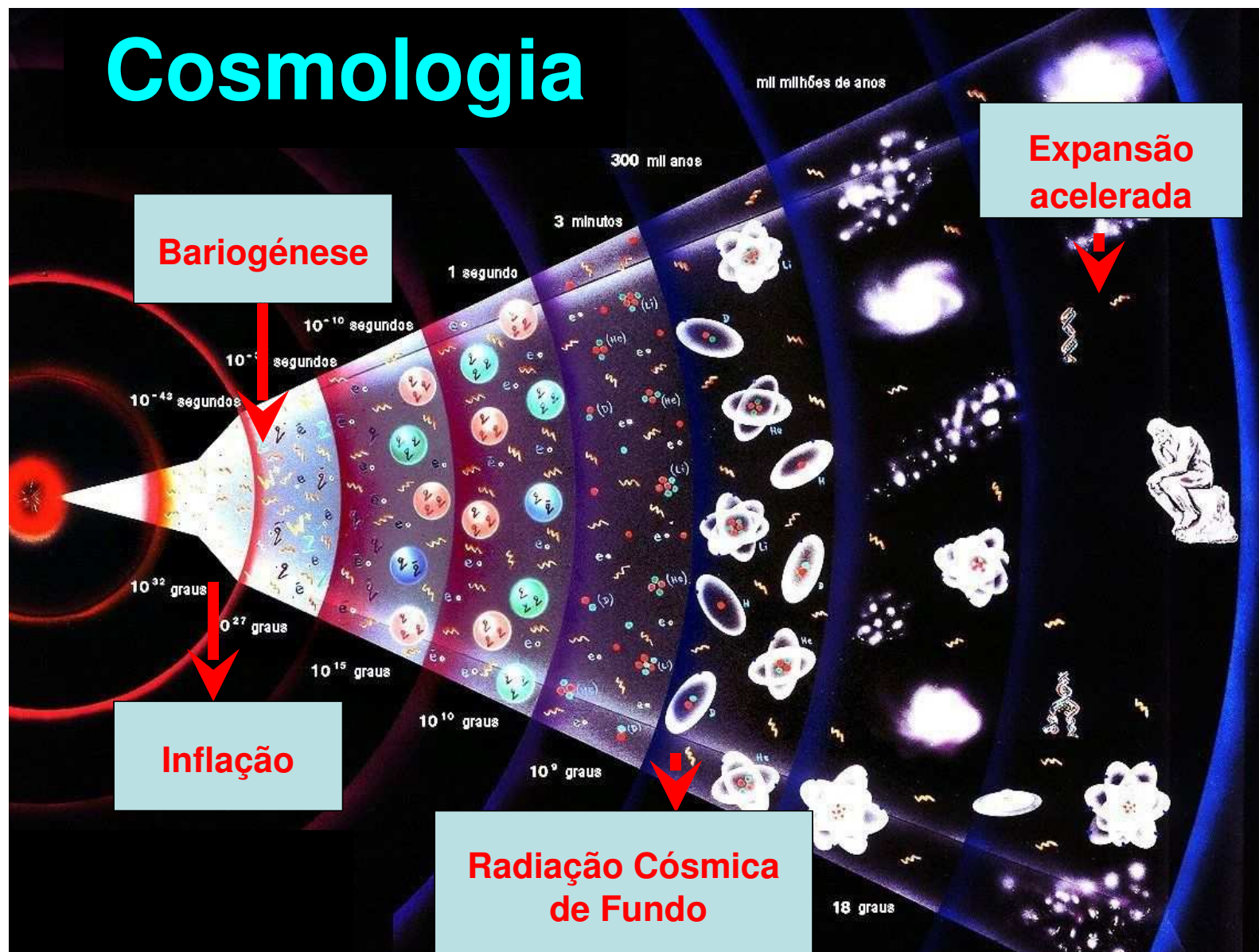
• Violação de CP

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)



[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

• Dirac

• Evolução

• **Bariogénese**

• Violação de CP

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

## Assimetria Bariónica do Universo

- ❑ No início do Universo havia iguais quantidades de matéria e anti-matéria.
- ❑ Porque é que não se aniquilou tudo, produzindo só radiação (fotões)?
- ❑ Como explicar o número actual  $\frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 10^{-10}$  ?

Condições para Bariogénese



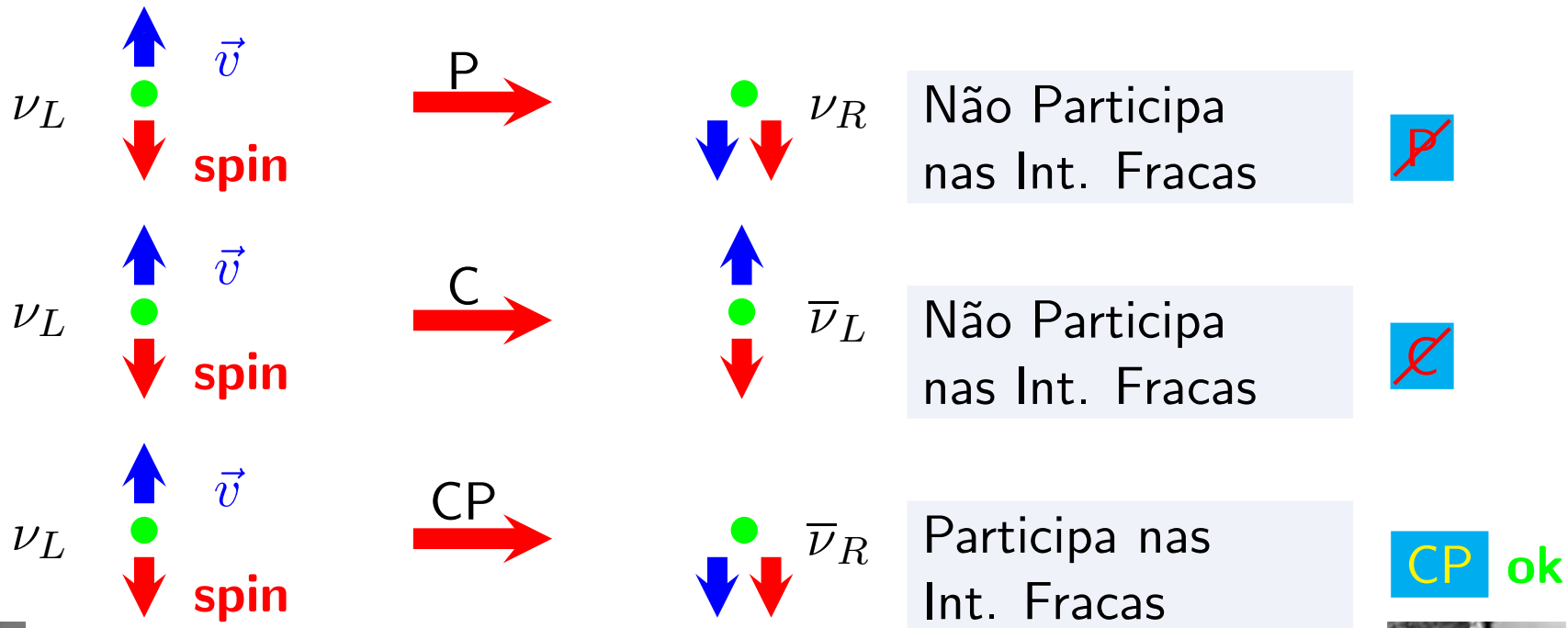
Sakharov

- ❑ Número Bariónico não conservado
- ❑ Situação de não equilíbrio
- ❑ Violação de CP



# Violação de CP

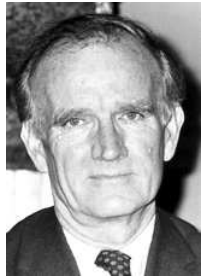
- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
  - Dirac
  - Evolução
  - Bariogénese
  - **Violação de CP**
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)



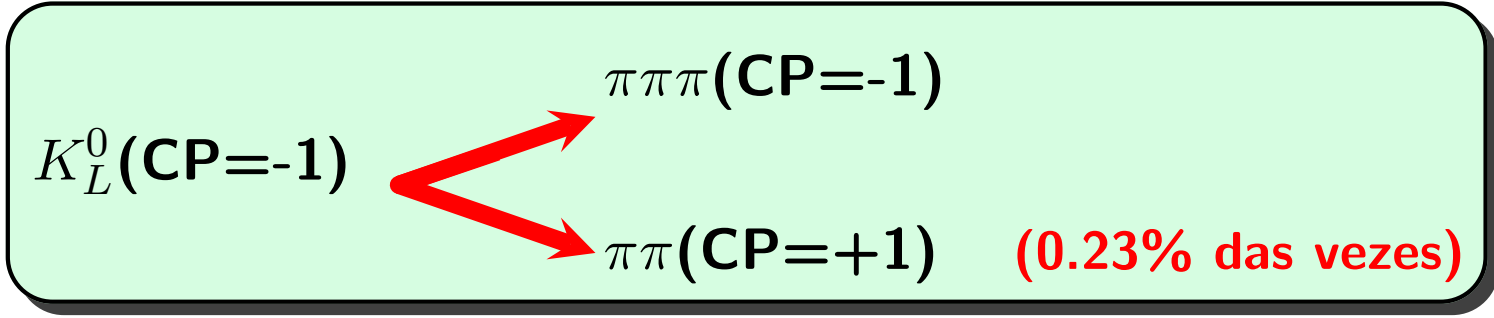
Mas em 1964 Cronin & Fitch (Prémio Nobel 1980)



Cronin



Fitch







## O Prémio Nobel da Física em 2008

”Descoberta do mecanismo de quebra espontânea de simetria em Física subatómica”

”Descoberta da origem da quebra de simetria que prevê a existência de pelo menos três famílias de quarks na Natureza”



Yoichiro Nambu



Makoto Kobayashi



Toshihide Maskawa

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

- Dirac
- Evolução
- Bariogénese
- Violação de CP

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

[Introdução](#)[Interacções \(1\)](#)[Constituintes \(1\)](#)[Anti-Matéria \(32\)](#)[Neutrinos \(37\)](#)

- Neutrinos
- Majorana

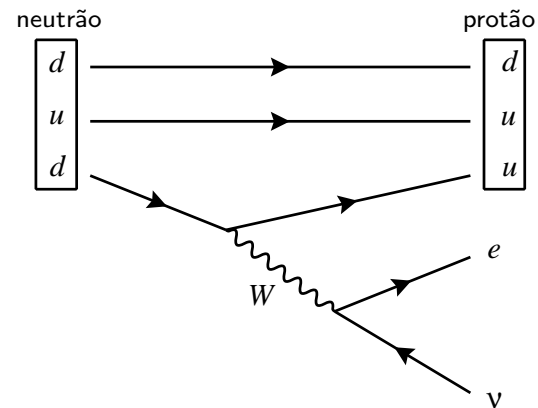
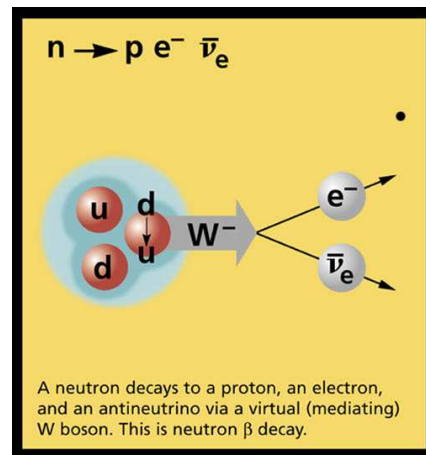
[Unificação \(5&33\)](#)[LHC e Escalas \(36\)](#)[Aprender Mais](#)

## Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?



- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- **Neutrinos**
- Majorana
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

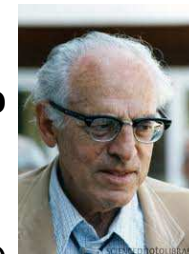
- Em 1931, Wolfgang Pauli introduziu o neutrino para “salvar” a lei da conservação de energia nos decaimentos radioactivos designados por decaimentos  $\beta$ .



Pauli



Fermi



Reines



Cowan

- 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.

# Os neutrinos têm massa?

- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- **Neutrinos**
- Majorana
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

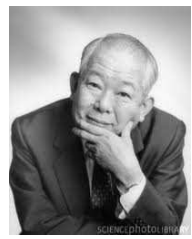
- ❑ Durante muito tempo os físicos pensaram que os neutrinos não tinham massa. As experiências davam só um limite superior por ser muito difícil fazer esta medida. A massa era compatível com ser zero, dentro do erro experimental.
- ❑ Em 1957, Bruno Pontecorvo, sugeriu uma maneira indirecta de detectar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



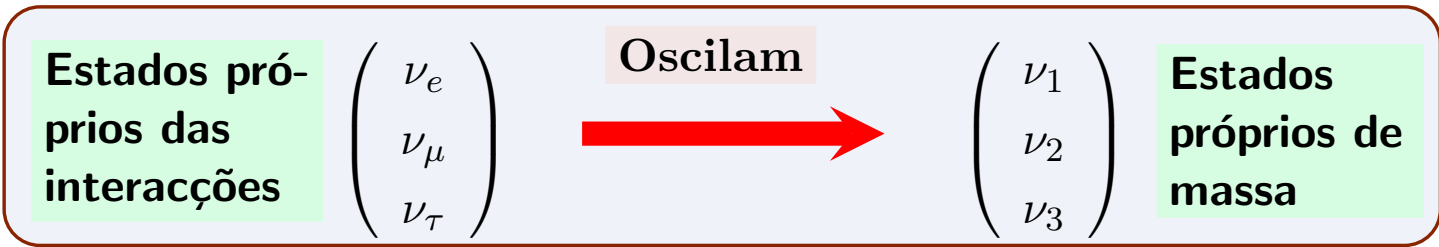
Pontecorvo



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](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- Neutrinos
- Majorana
- [Unificação \(5&33\)](#)
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

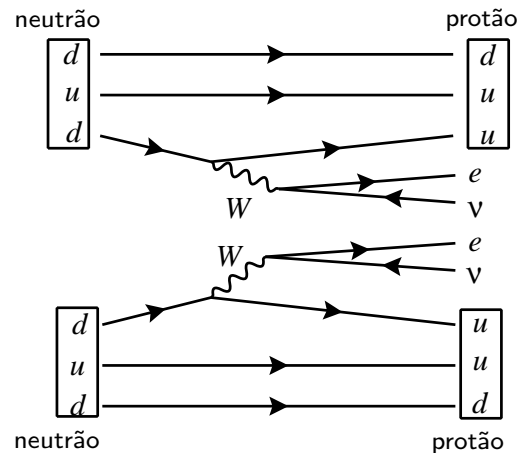
- ❑ O físico italiano Ettore Majorana, que desapareceu misteriosamente aos 32 anos em 1938, avançou a hipótese de que os neutrinos são as suas próprias anti-partículas. Em memória do seu nome, uma partícula que seja a sua própria anti-partícula, é designada partícula de Majorana.
- ❑ Esta é uma questão 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

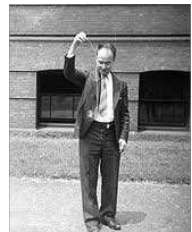
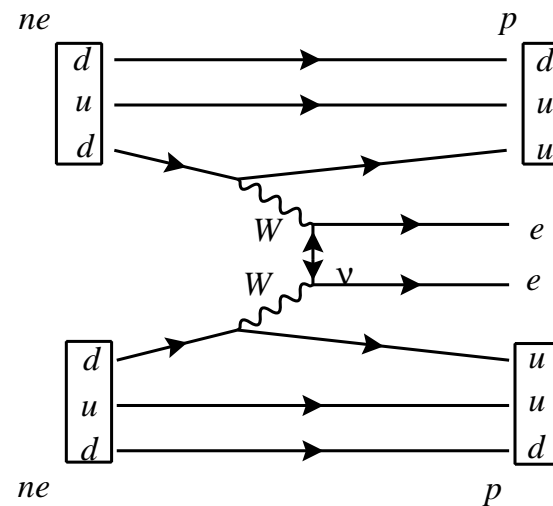


# Os neutrinos são as suas próprias anti-partículas?

- 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).



Majorana

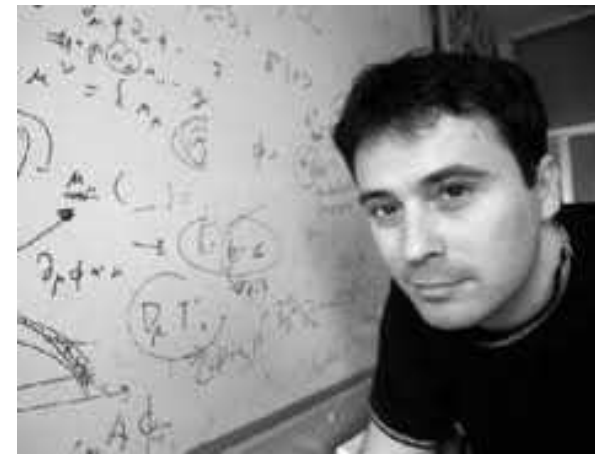
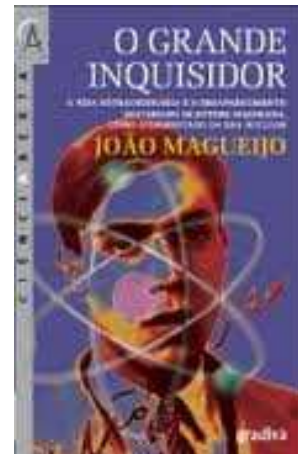
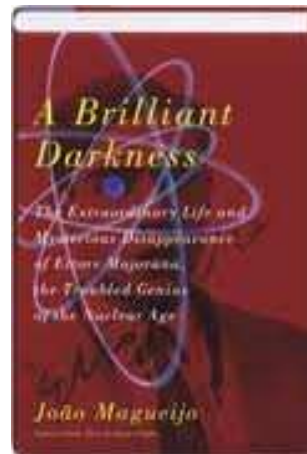


Furry

- 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.

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](#)[Interacções \(1\)](#)[Constituintes \(1\)](#)[Anti-Matéria \(32\)](#)[Neutrinos \(37\)](#)[Unificação \(5&33\)](#)

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

[LHC e Escalas \(36\)](#)[Aprender Mais](#)

- ❑ **As leis da Física podem ser unificadas?**
- ❑ **Um protão decai?**

## 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](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

● Einstein

● Modelo Padrão

● Unificação

● Decaimento p

● SuperK

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

● Einstein

● Modelo Padrão

● Unificação

● Decaimento p

● SuperK

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[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](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

• Einstein

• **Modelo Padrão**

• Unificação

• Decaimento p

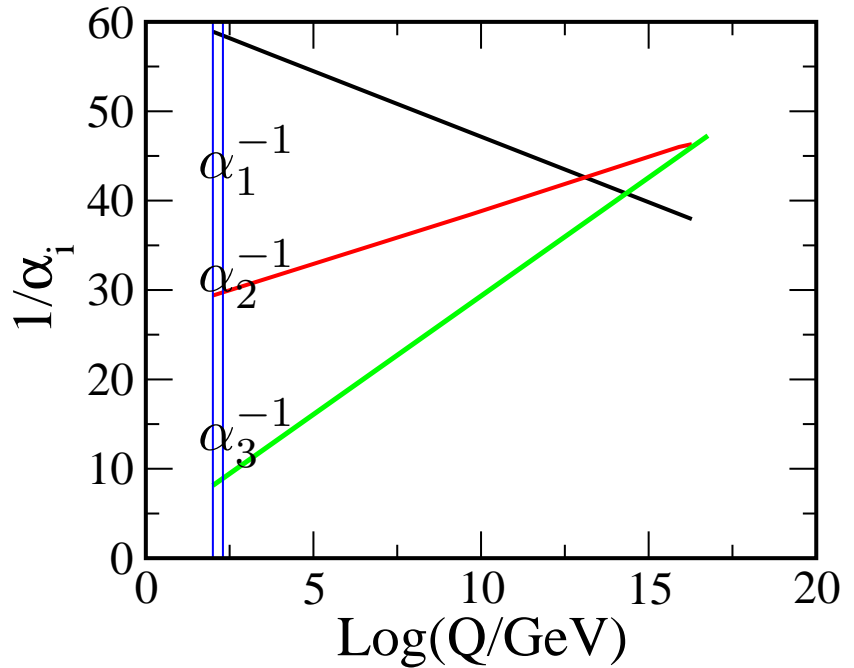
• SuperK

[LHC e Escalas \(36\)](#)

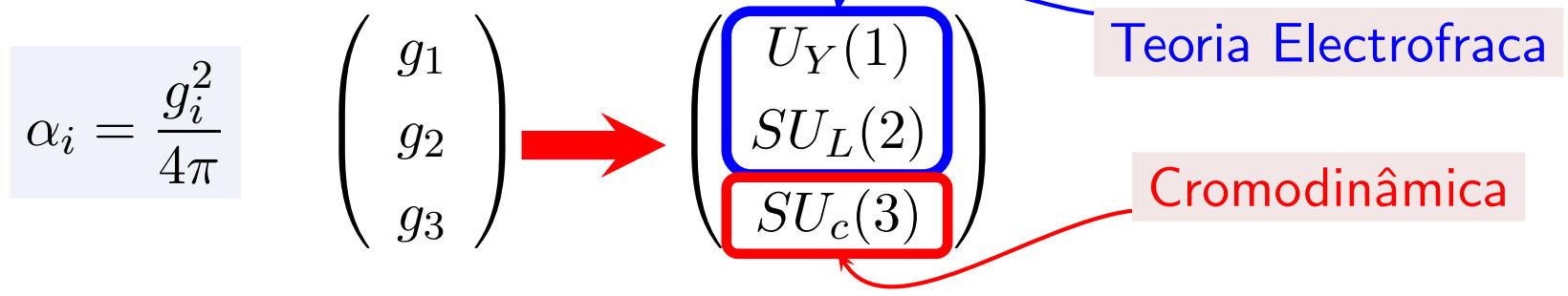
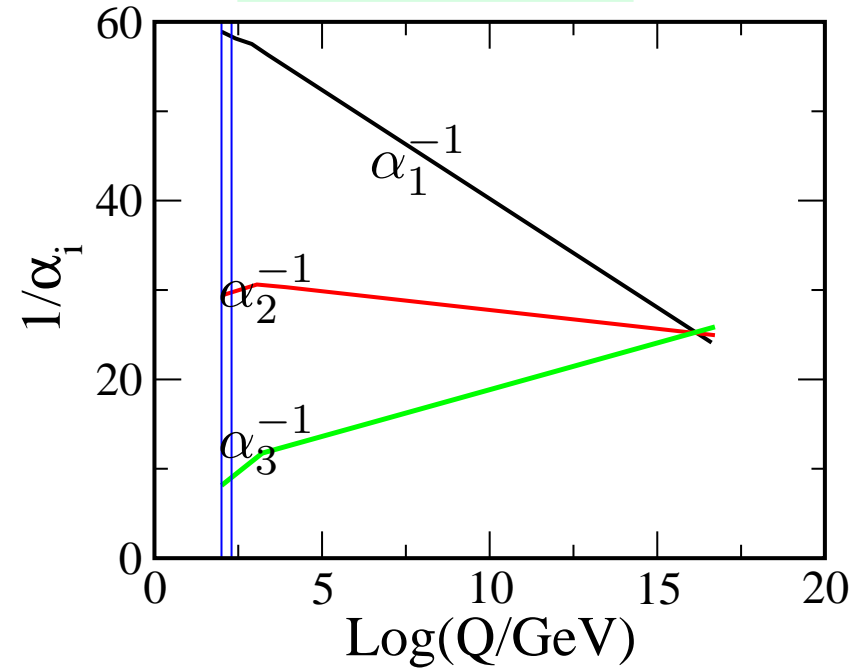
[Aprender Mais](#)

- [Introdução](#)
- [Interações \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
- Einstein
- Modelo Padrão
- **Unificação**
- Decaimento p
- SuperK
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)

### Modelo Padrão



### Supersimetria



[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

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

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[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

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

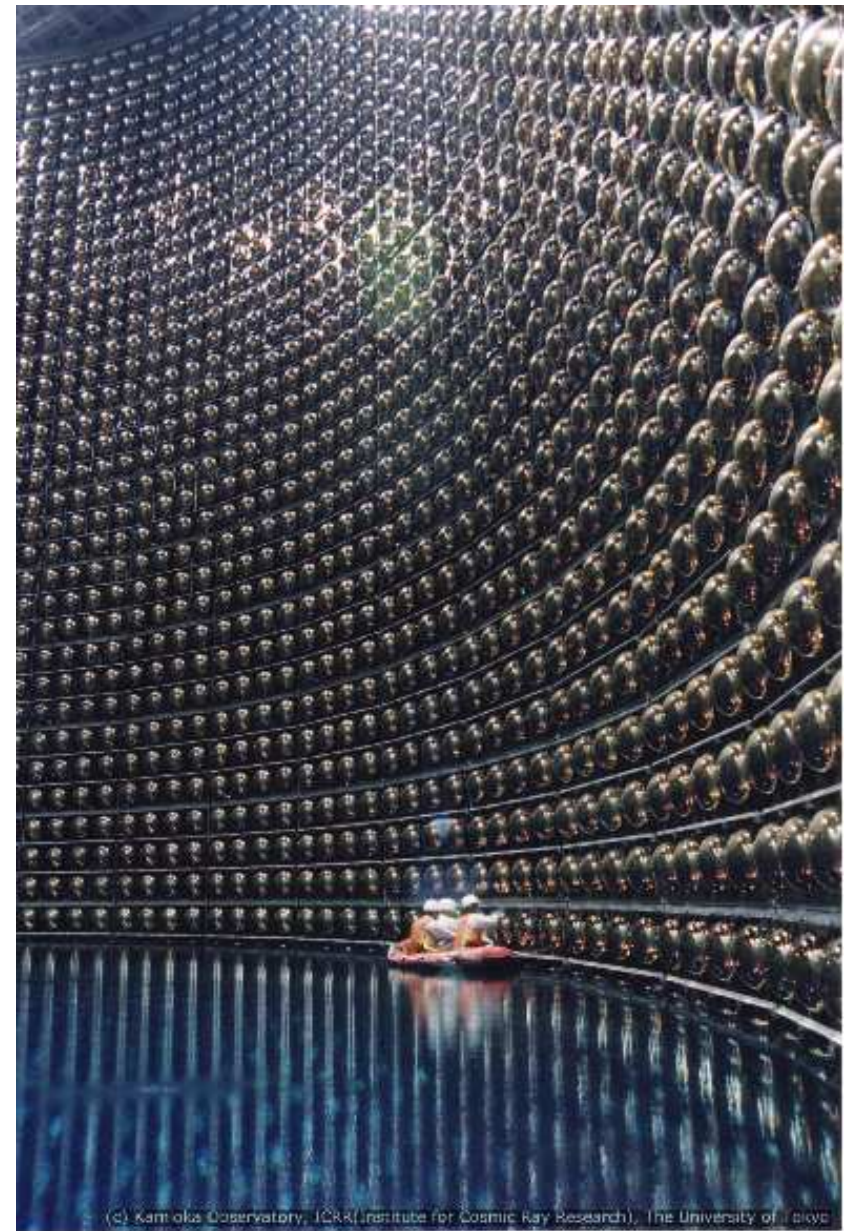
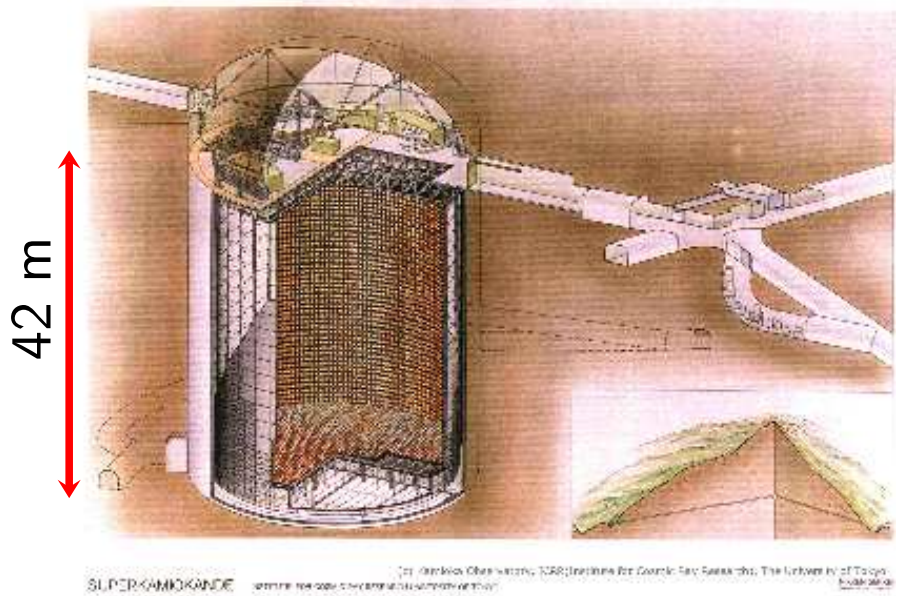
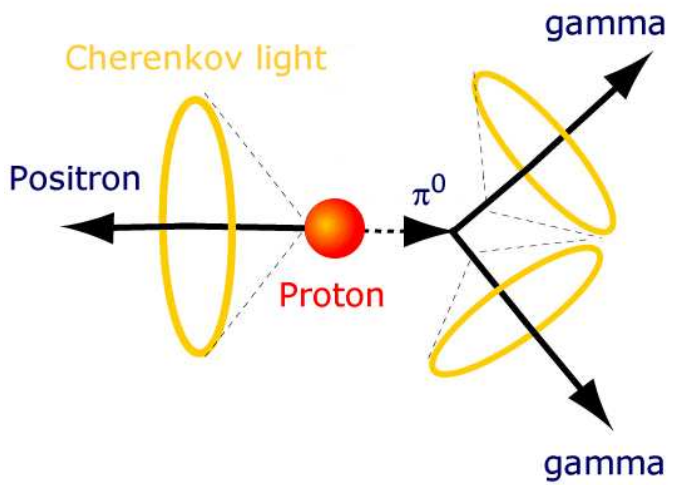
- ❑ Para comparar a idade do Universo é

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



# Super-Kamiokande e o decaimento do protão

- [Introdução](#)
- [Interacções \(1\)](#)
- [Constituintes \(1\)](#)
- [Anti-Matéria \(32\)](#)
- [Neutrinos \(37\)](#)
- [Unificação \(5&33\)](#)
  - Einstein
  - Modelo Padrão
  - Unificação
  - Decaimento p
  - **SuperK**
- [LHC e Escalas \(36\)](#)
- [Aprender Mais](#)



[Introdução](#)[Interacções \(1\)](#)[Constituintes \(1\)](#)[Anti-Matéria \(32\)](#)[Neutrinos \(37\)](#)[Unificação \(5&33\)](#)[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)

**Há alguma partícula mais pequena do que os quarks?**

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

**• Escalas**

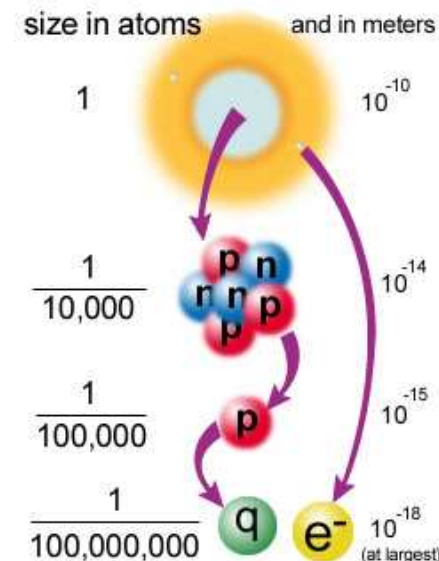
- O Sítio
- O Acelerador
- Energia do LHC
- Um Detector
- Física Básica
- WWW

[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 Å = $10^{-10}$ m	~ 1 keV	Átomos e Moléculas (Raios X)
1 fermi = $10^{-15}$ m	~ 100 MeV	Núcleos (Pequenos Aceleradores)
$10^{-18}$ m	~ 100 GeV	Distância mais pequena observada (LEP)



# LHC: Large Hadron Collider (Colisionador de Hadrões)

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

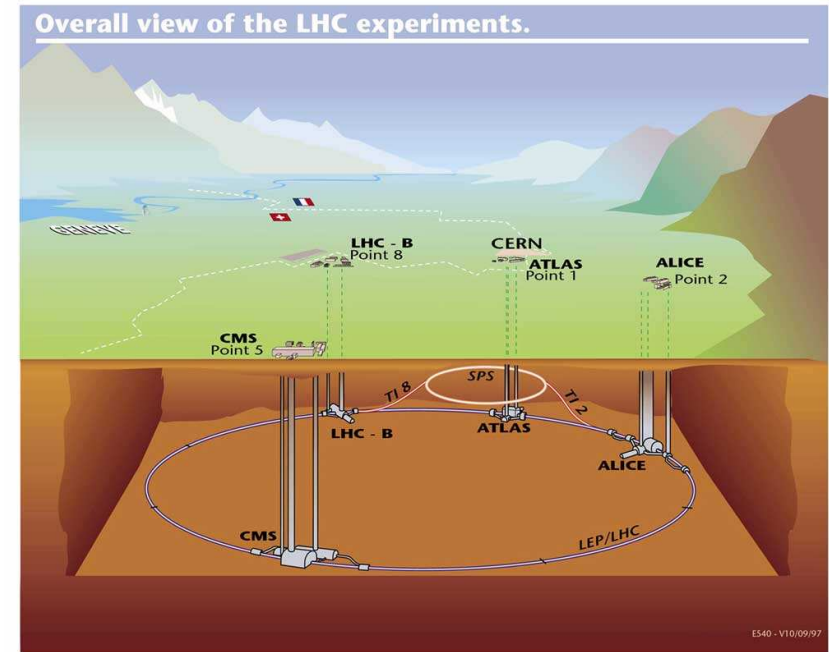
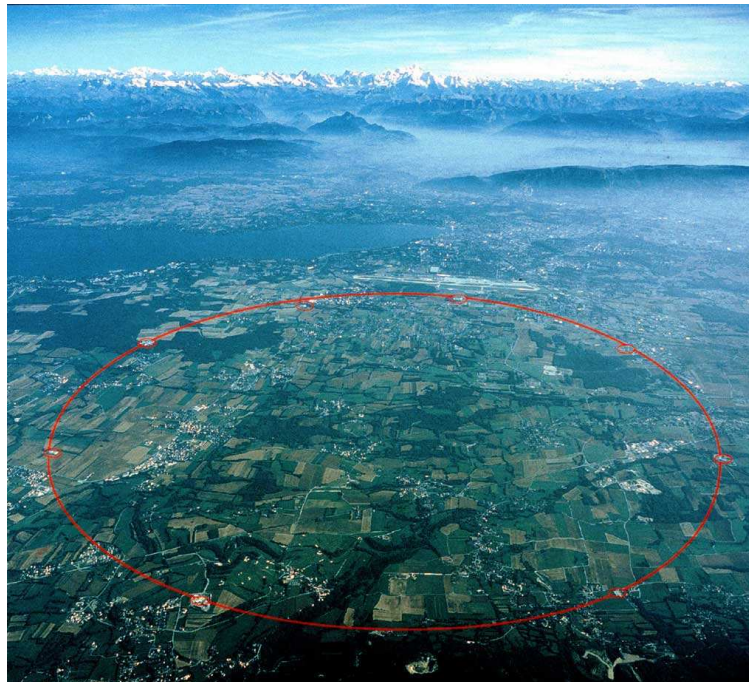
[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)



[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

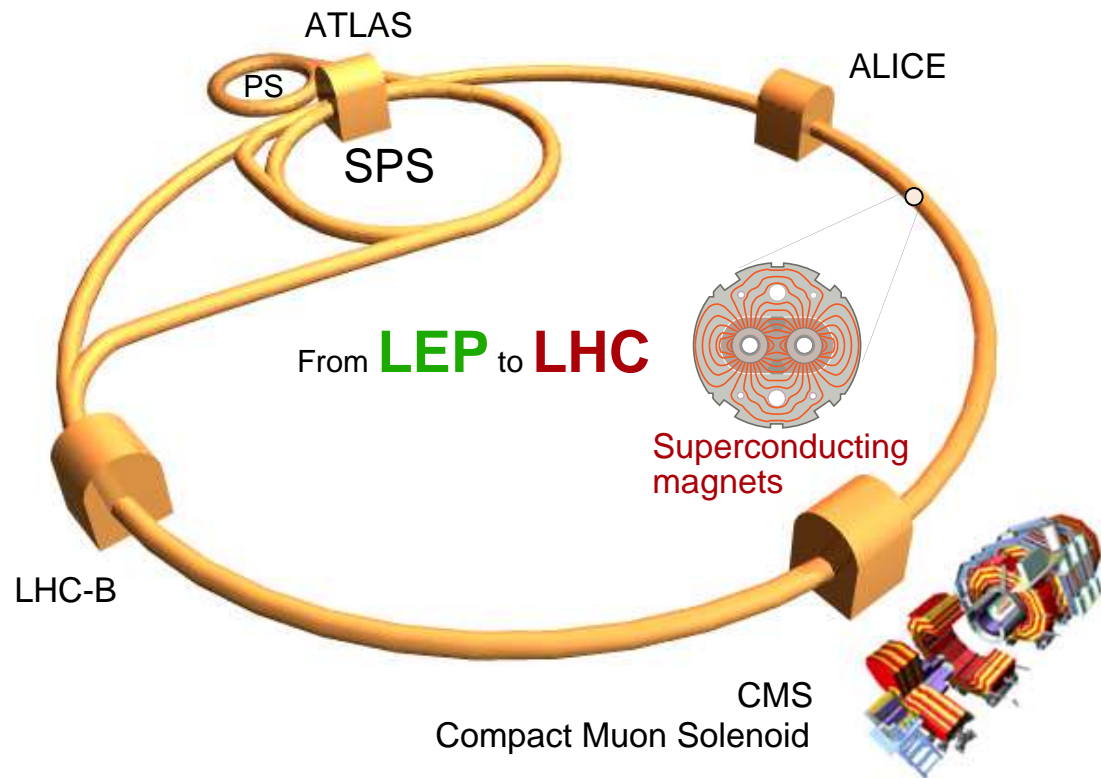
[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[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](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[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](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

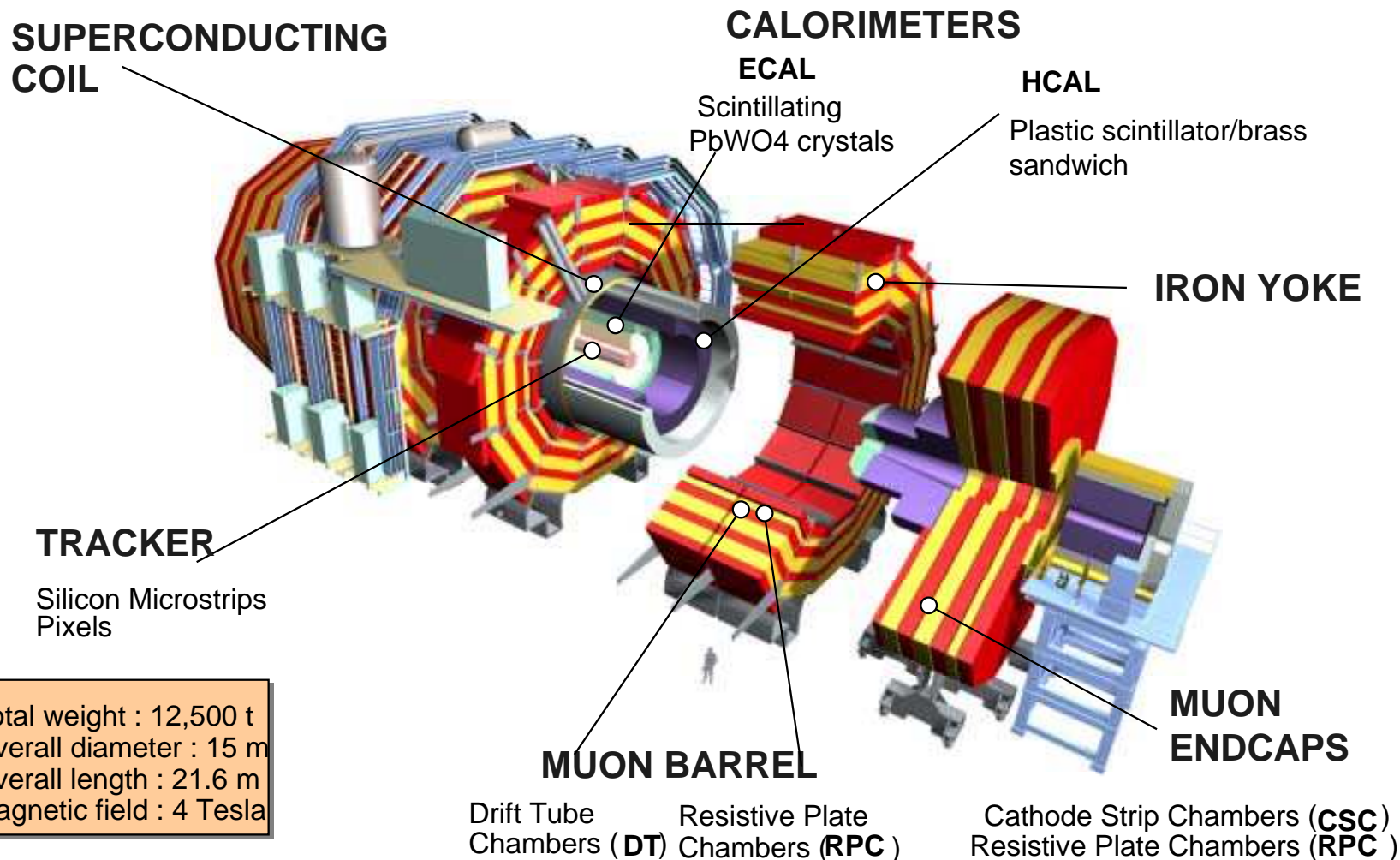
[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)

## The CMS Detector



[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

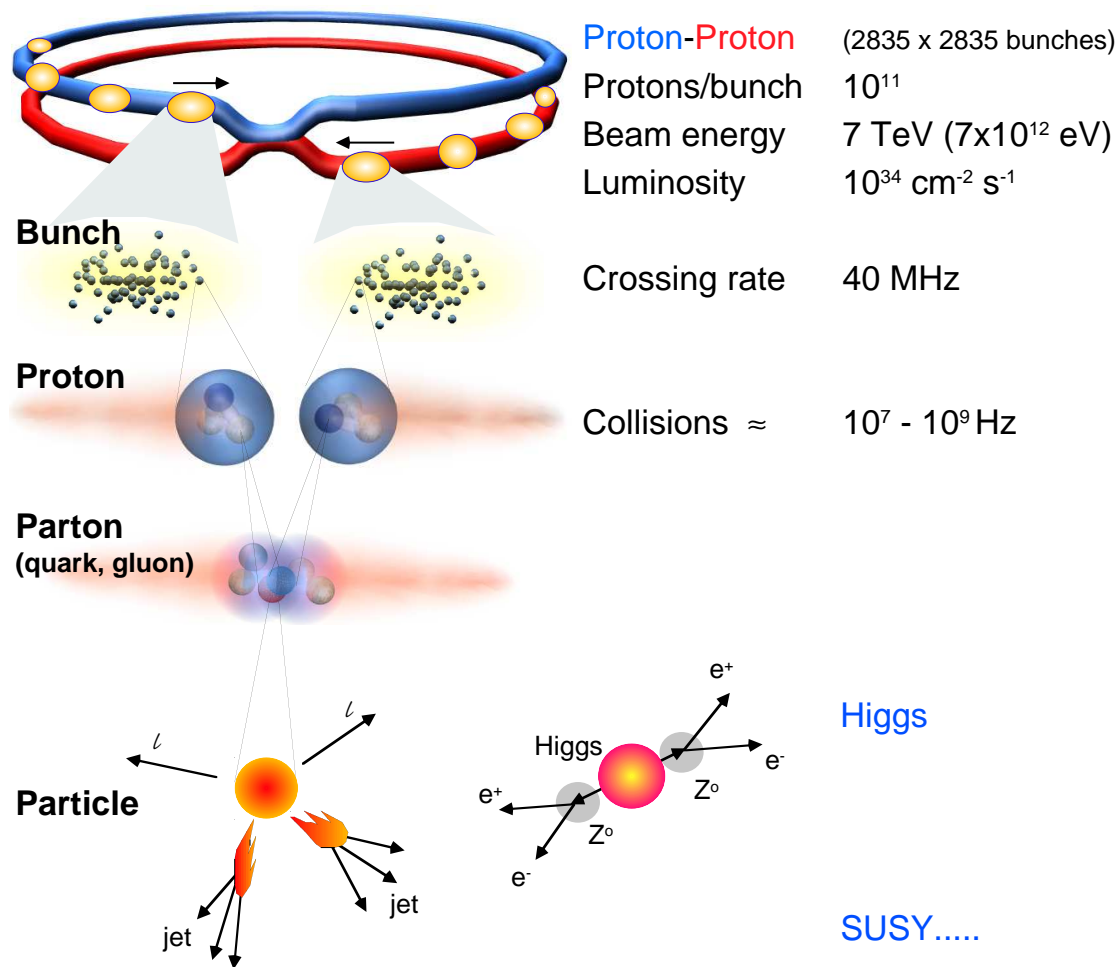
[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)

## Collisions at LHC



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

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)





[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

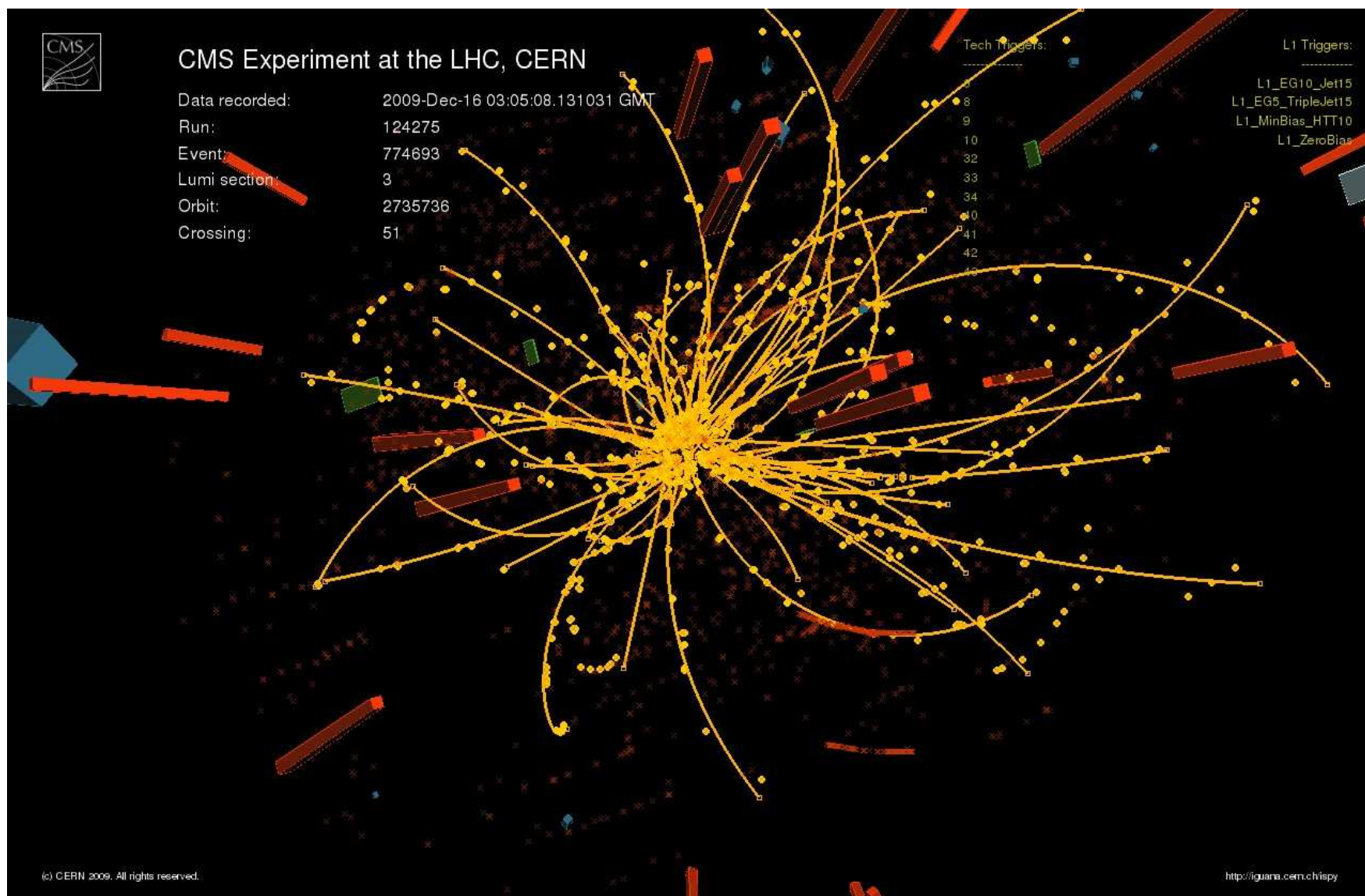
[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)



# 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.

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

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

[Aprender Mais](#)

[Introdução](#)

[Interacções \(1\)](#)

[Constituintes \(1\)](#)

[Anti-Matéria \(32\)](#)

[Neutrinos \(37\)](#)

[Unificação \(5&33\)](#)

[LHC e Escalas \(36\)](#)

[Aprender Mais](#)

- ❑ <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/>