

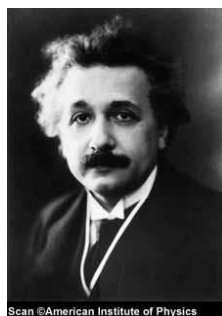
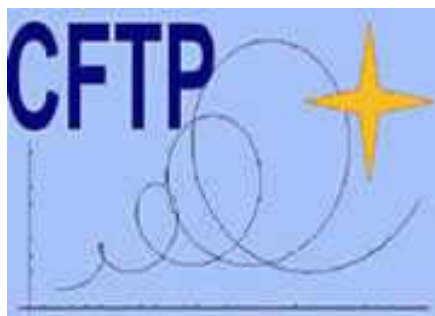
---

# O Sonho da Unificação das Interações

Jorge C. Romão

`jorge.romao@ist.utl.pt`

Centro de Física Teórica de Partículas  
Instituto Superior Técnico, Departamento de Física  
A. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal



# 1905: Ano “Mirabilis”

---

## ● Movimento Browniano

- Reconciliar Termodinâmica com a Teoria Cinética dos gases.
- Prova que os átomos existem (Perrin 1908).

## ● Efeito Fotoelétrico

- Conceito de quanta de luz → **fotão**
- Início da Mecânica Quântica



## ● Relatividade Restrita

- O Electromagnetismo já era uma teoria relativista

**Transformações de Lorentz**

- Não há propagação instantânea
- Equivalência massa–energia  $E = mc^2$

# As Interações Fundamentais

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

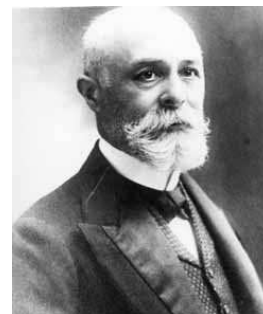
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc XIX	Estrutura Atómica
Fraca	Séc XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc XX	Coesão dos Núcleos



Newton



Maxwell



Becquerel

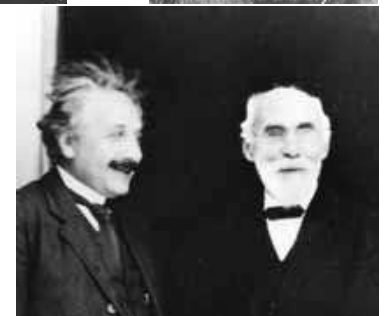


Yukawa

# Como Explicar as Interações?

## 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

# Einstein e a Busca da Teoria Unificada

---

Porquê quatro e não só uma interacção?

- Semelhanças entre Electromagnetismo e a Relatividade Geral:
  - Longo alcance: **fotão** e **gravitão** com massa nula
  - Variação com  $1/r^2$
- Einstein tentou **durante 30 anos** duas vias:
  - Teorias de Kaluza Klein a 5 dimensões
    - O campo electromagnético apareceria das componentes extra da métrica**
  - Modificações da Métrica
    - O campo electromagnético apareceria da parte não simétrica da métrica (ou da torsão)**

# O (In)Sucesso de Einstein

---

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!

# Teorias de Campo Modernas

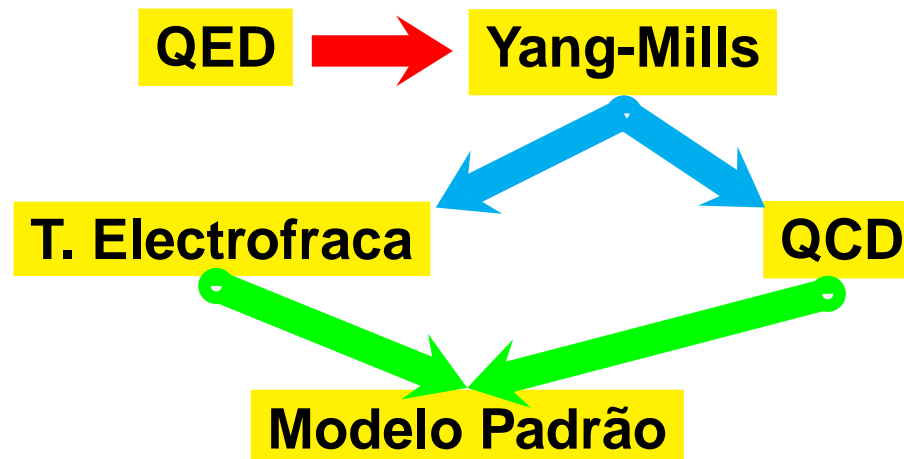
## Os Ingredientes Fundamentais

- Relatividade Restrita
- Mecânica Quântica



Teoria Quântica dos Campos

- Simetrias de padrão (gauge)



# Simetrias de Padrão (Gauge)

Teorias Modernas



Simetrias de Gauge

**Electromagnetismo**

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

$$V \xrightarrow{1} V_1 \xrightarrow{2} V_{12}$$

$$V \xrightarrow{2} V_2 \xrightarrow{1} V_{21}$$

**Grupo Abeliano**

$$V_{12} = V_{21}$$

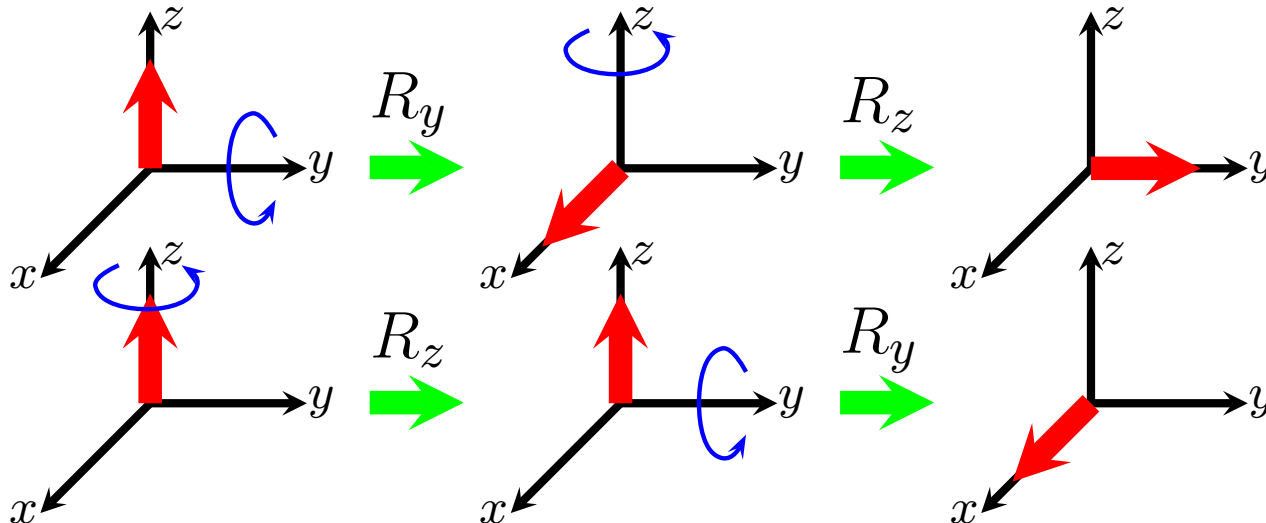


Weyl

**Interacção Forte & Fraca**



**Grupo Não Abeliano**



Yang & Mills

$$R_y R_z \neq R_z R_y$$



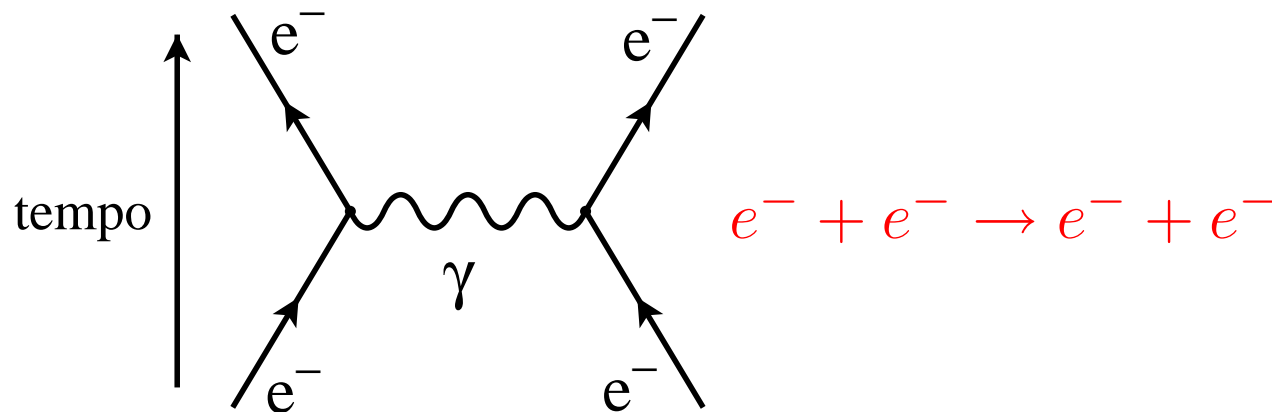
# A Descrição Moderna duma Força

Modernamente o conceito de força é substituído pelo de interacção.

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



Feynman



# Propriedades Gerais das Interações

<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 glúões	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

# O Modelo Padrão


---

- O Modelo Padrão tem por base a **Teoria Electrofraca** de Glashow- Weinberg-Salam (Prémio Nobel de 1979) e a **Cromodinâmica Quântica** (QCD). É um modelo de sucesso.
- **Avanços do lado teórico**: Prova da renormalização (Prémio Nobel de 1999) e liberdade assintótica (Prémio Nobel de 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).

Conduziram hoje a uma situação em que este modelo está testado ao nível de 0.1% (ou ainda inferior para algumas propriedades).

# Os Constituintes Elementares

- 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

# $E = mc^2$ e as 3 famílias

Quais são os leptões? Os mais conhecidos são o electrão e o neutrino. Mas a Natureza apresenta uma repetição que não sabemos explicar:

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

Matéria Normal

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

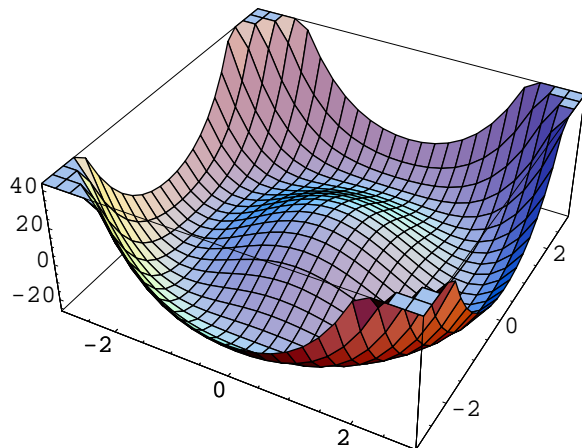
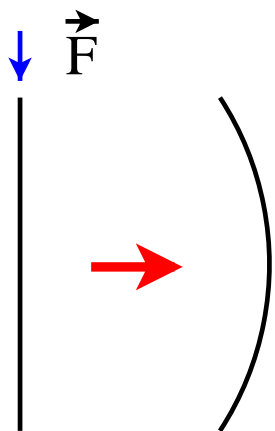
Produzidos em Laboratório

$$E = mc^2$$

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

# O bosão de Higgs

Quebra espontânea de simetria



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

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



**Modelo Padrão**

- Campos de Gauge adquirem massa
- Um bosão de Higgs é uma partícula real

# Os Bosões de Gauge

O Modelo Padrão tem o grupo de simetria  $G$ :

$$G = SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes SU(3)_c$$

**Bosões de gauge sem massa:**

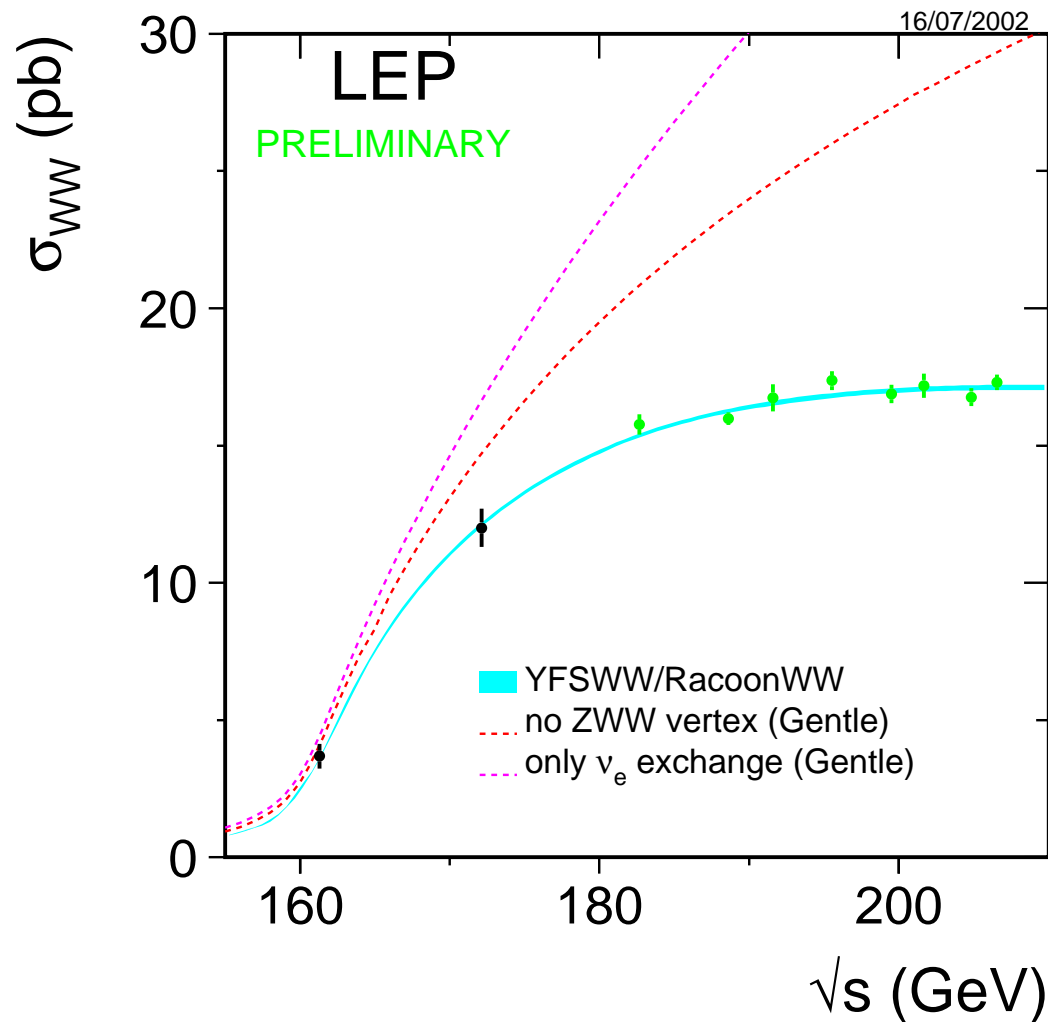
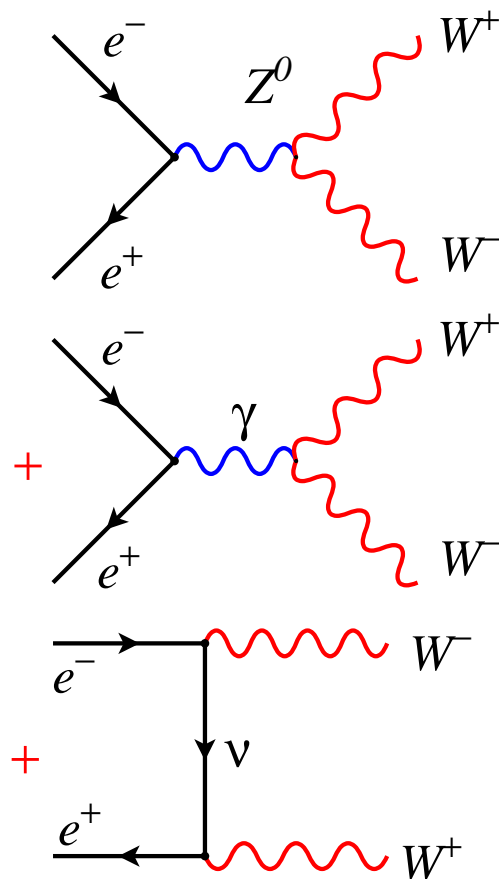
Grupo	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	$SU(3)_c$
Bosão de Gauge	$A^{1,2,3}$	$B$	$G^{1,2,\dots,8}$

**Mecanismo de Higgs:**

$$\begin{aligned}
 A^{1,2,3} + B &\rightarrow \begin{cases} W^+, W^- & M_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2 \\ Z^0 & M_Z = 91.2 \text{ GeV}/c^2 \\ \gamma & M_\gamma = 0 \end{cases} \\
 G^{1,2,\dots,8} &\rightarrow g^{1,2,\dots,8} \quad M_g = 0
 \end{aligned}$$

# Carácter Não Abelian do Modelo Padrão

## Teste dos vértices de gauge triplos





# Porque Somos Feitos de Matéria?

---

## 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  $\frac{n_B}{n_\gamma} \simeq 10^{-10}$  ?

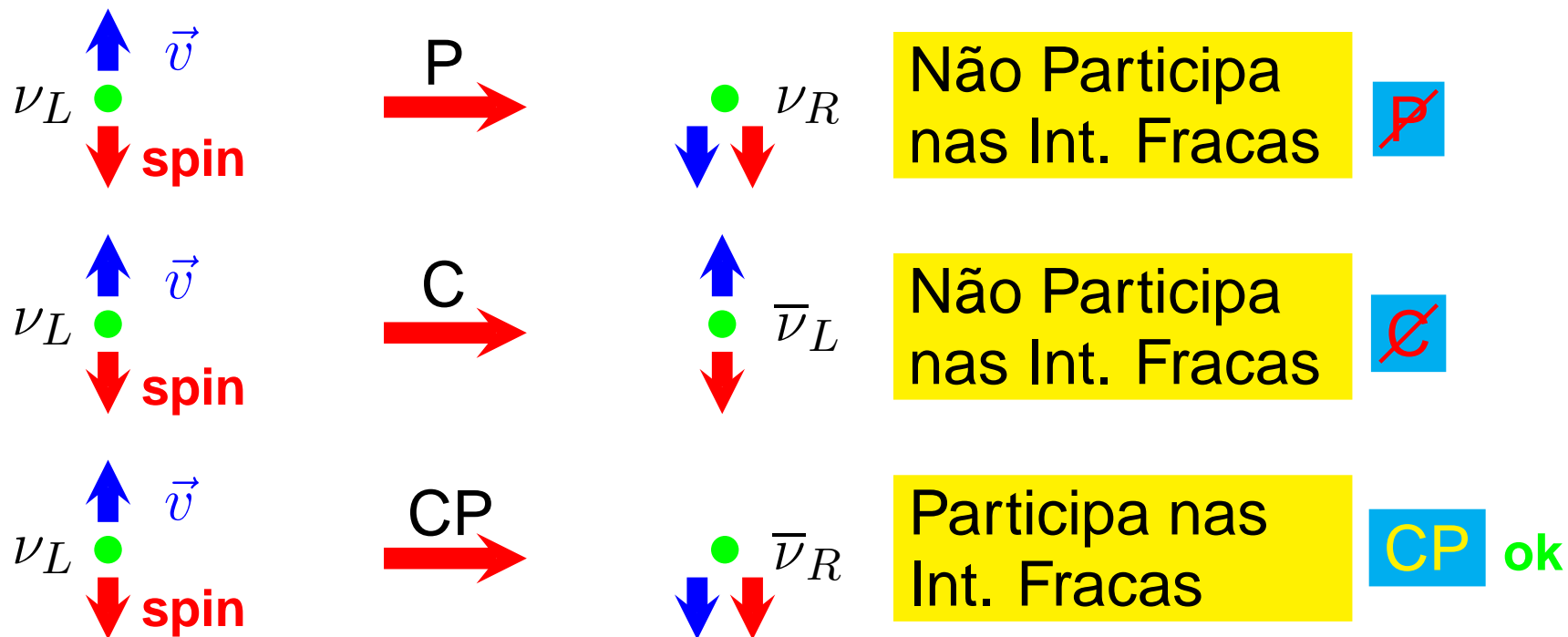
Condições para Bariogénese



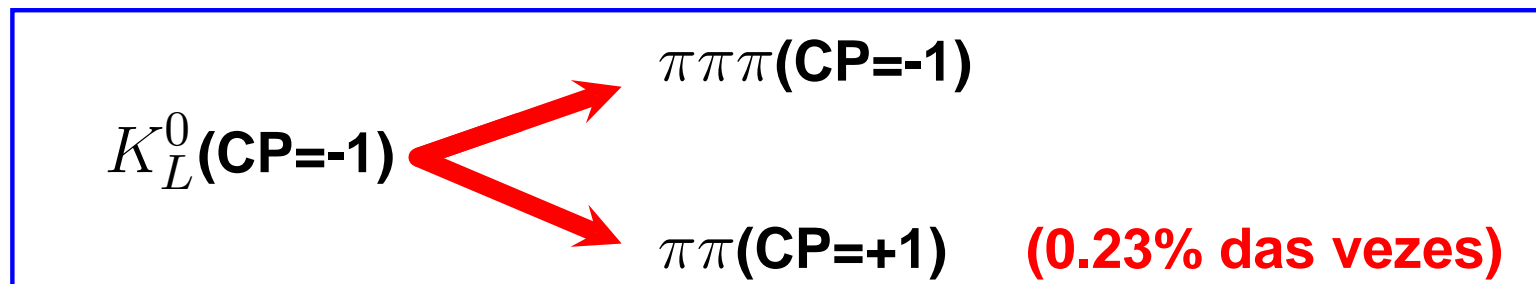
Sakharov

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

# Violação de CP



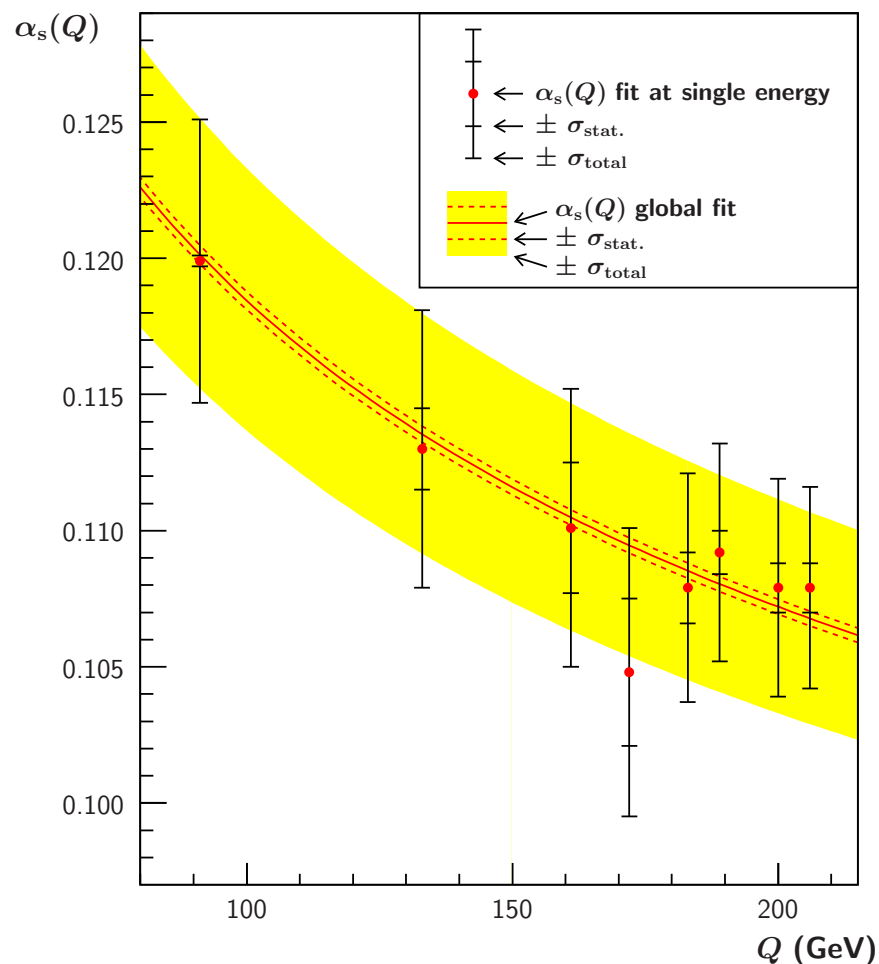
Mas em 1964 Cronin & Fitch (Prémio Nobel 1980)



# Liberdade Assimptótica

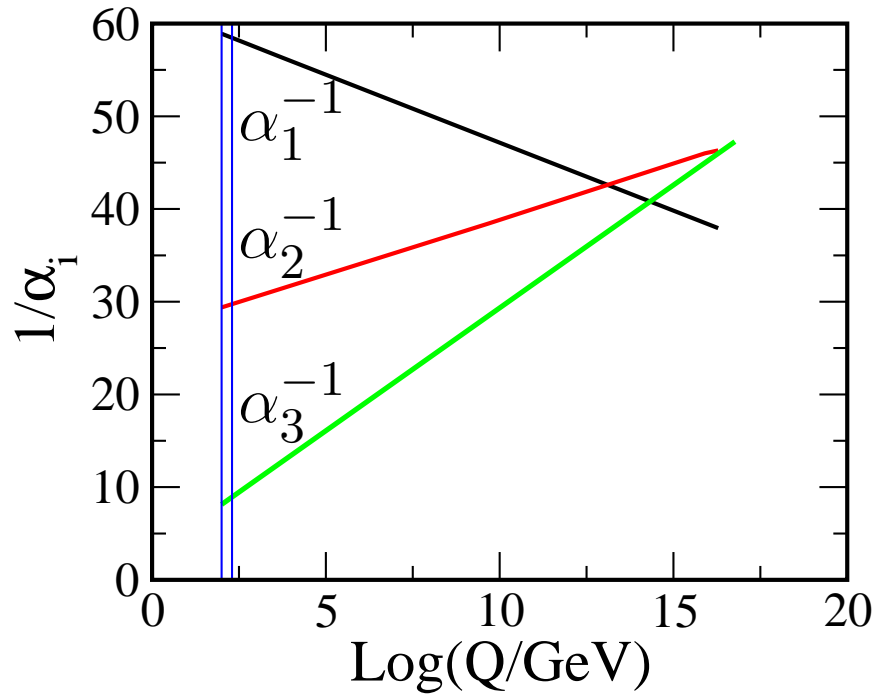
**Liberdade Assimptótica: Gross, Wilczek & Politzer mostraram que a energias elevadas as interações fortes tornam-se fracas (Prémio Nobel 2004).**

LEP QCD  
Working Group

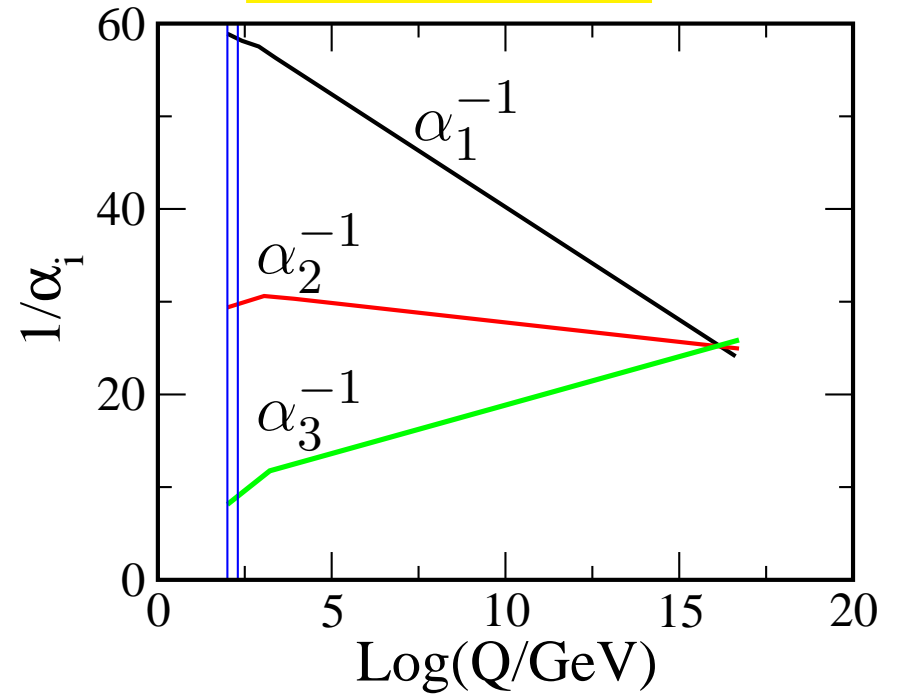


# Unificação das Interações

**Modelo Padrão**



**Supersimetria**



$$\alpha_i = \frac{g_i^2}{4\pi}$$

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} U_Y(1) \\ SU_L(2) \\ SU_c(3) \end{pmatrix}$$

Teoria Electrofraca

Cromodinâmica

# Para Além do Modelo Padrão ...

---

- **Neutrinos**

- **Supersimetria**

**Bosões**

Spin  $J$  (inteiro)



**Fermiões**

Spin  $J \pm \frac{1}{2}$  (semi-inteiro)

- **Modelos compostos**

- Fermiões excitados

- **Outros modelos exóticos**

- Gravidade em dimensões adicionais (**Kaluza-Klein**)
- Leptoquarks
- Partículas previstas por modelos de **Technicolour**

- **Gravitação**

- Superstrings (**Kaluza-Klein**)