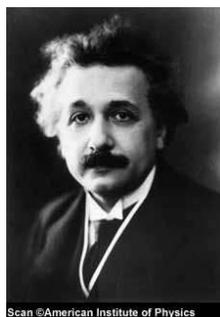

O Sonho da Unificação das Interações

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.

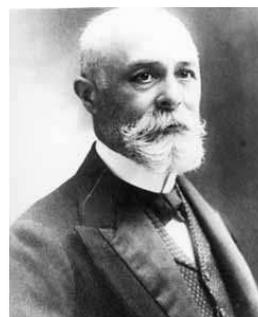
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc XIX	Estrutura Atômica
Fraca	Séc XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc XX	Coesão dos Núcleos



Newton



Maxwell



Becquerel

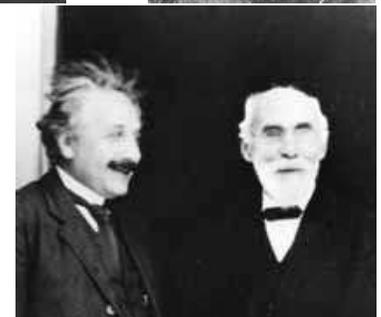


Yukawa

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

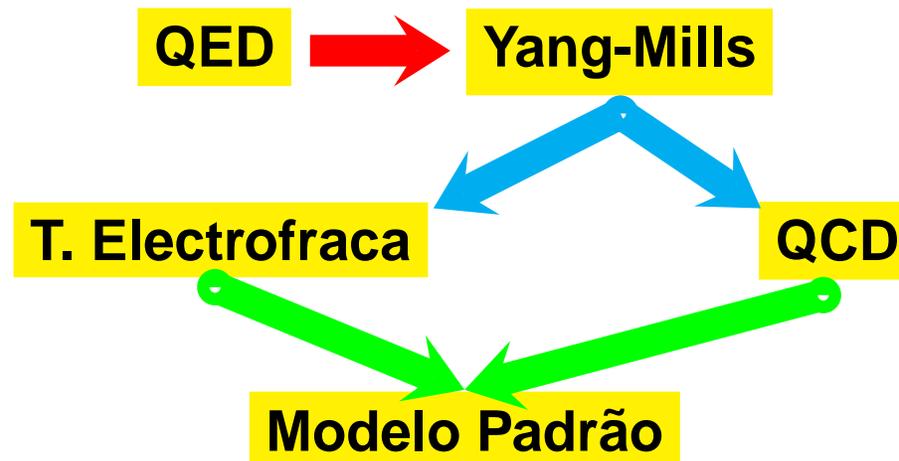
Em *Subtle is the Lord* (1982), o biógrafo de Einstein, Abraham Pais, é muito crítico dos trabalhos sobre a Unificação. No entanto a nossa compreensão hoje é diferente.

- Na altura (~ 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

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

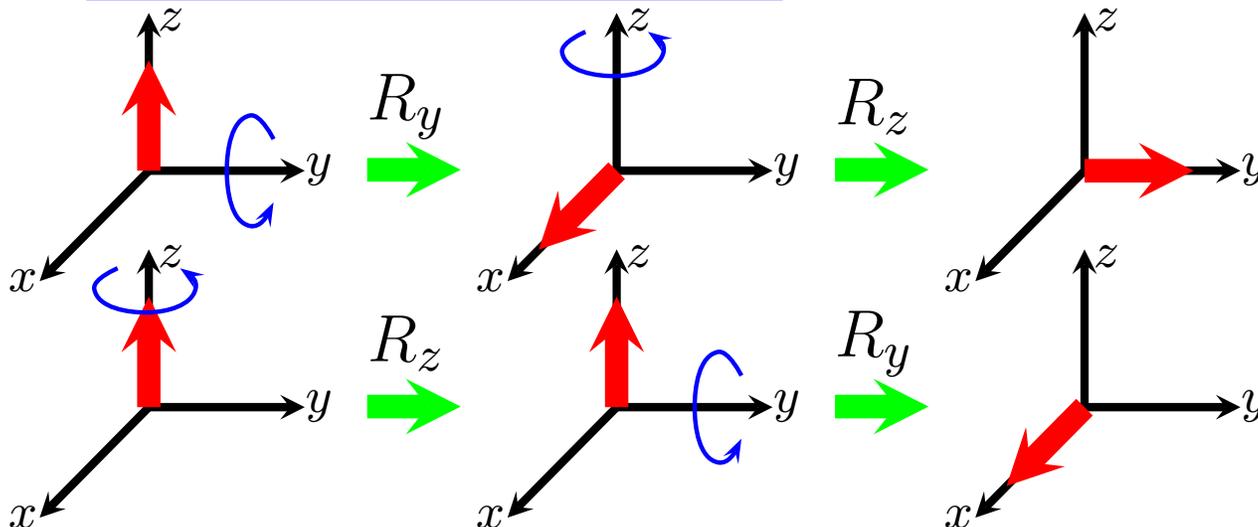


Weyl

Interacção Forte & Fraca



Grupo Não Abeliano



Yang & Mills

$$R_y R_z \neq R_z R_y$$

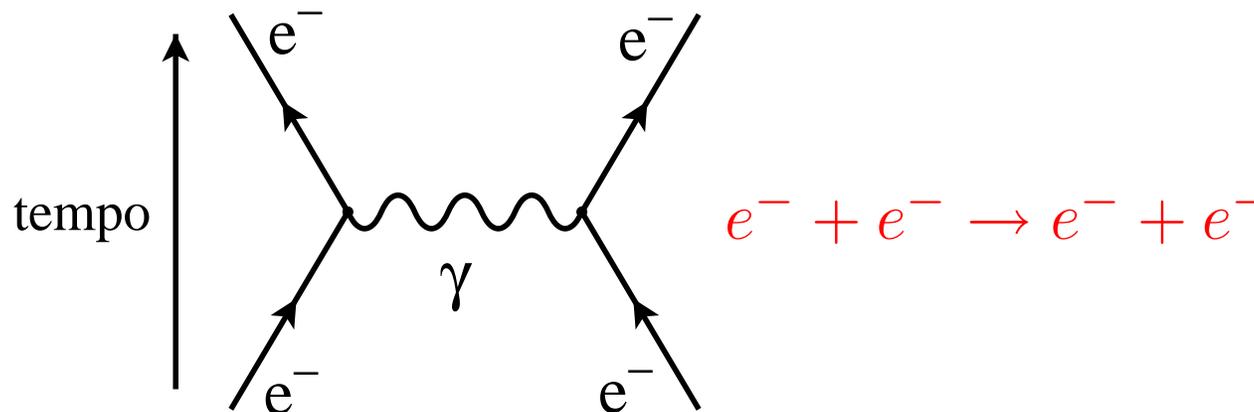
A Descrição Moderna duma Força

Modernamente o conceito de força é substituído pelo de interacção.

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



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 (γ)	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 (γ)	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

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

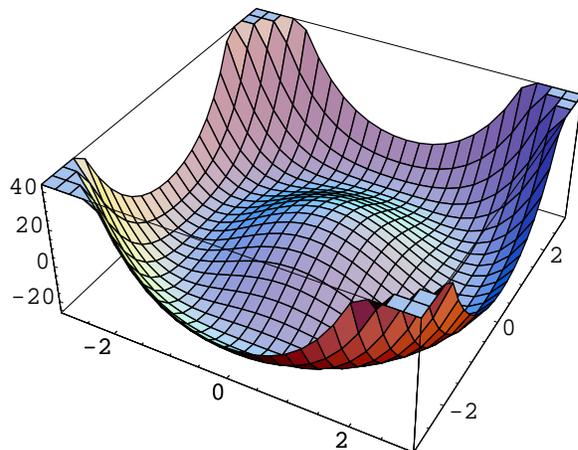
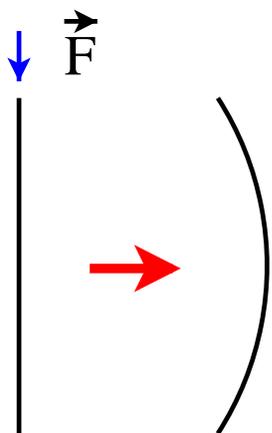
Produzidos em Laboratório

$$E = mc^2$$

LEP: Número de neutrinos leves: 2.994 ± 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:

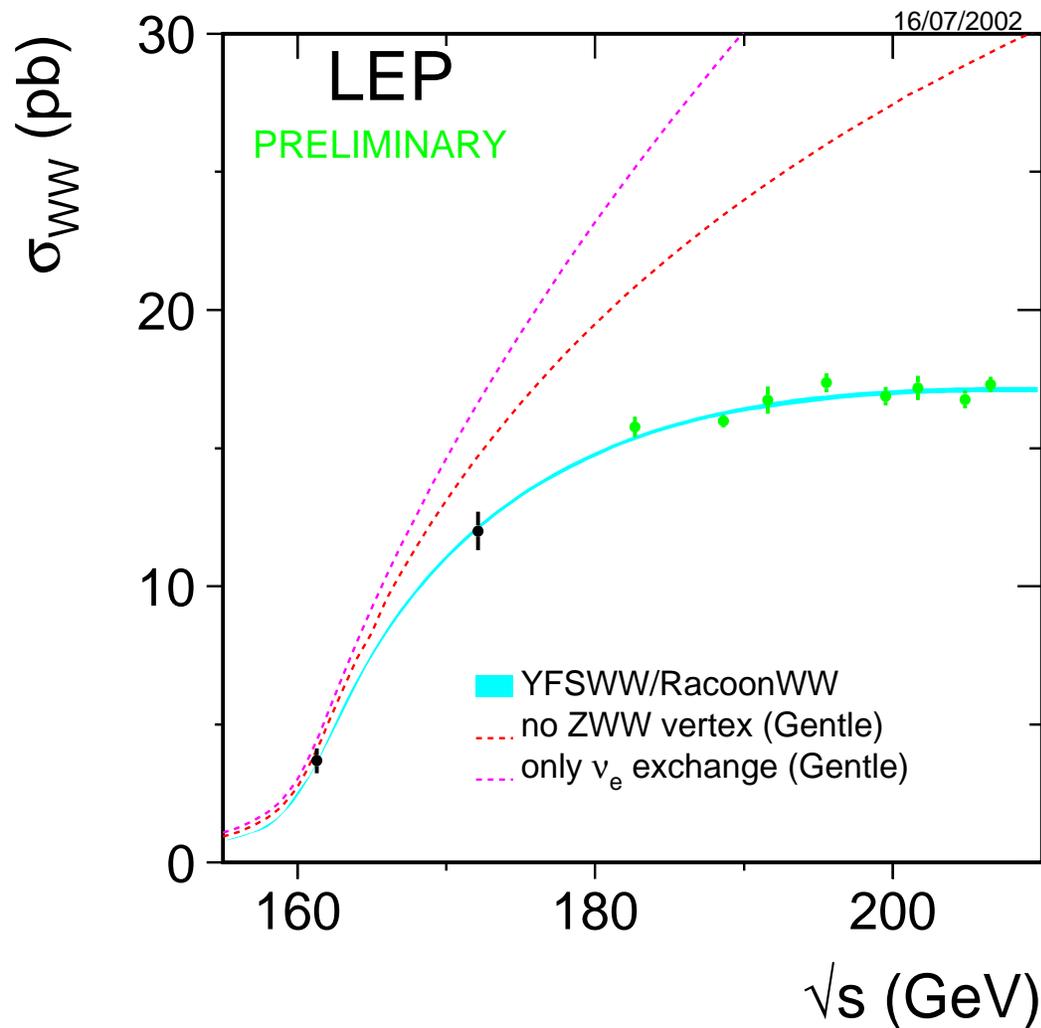
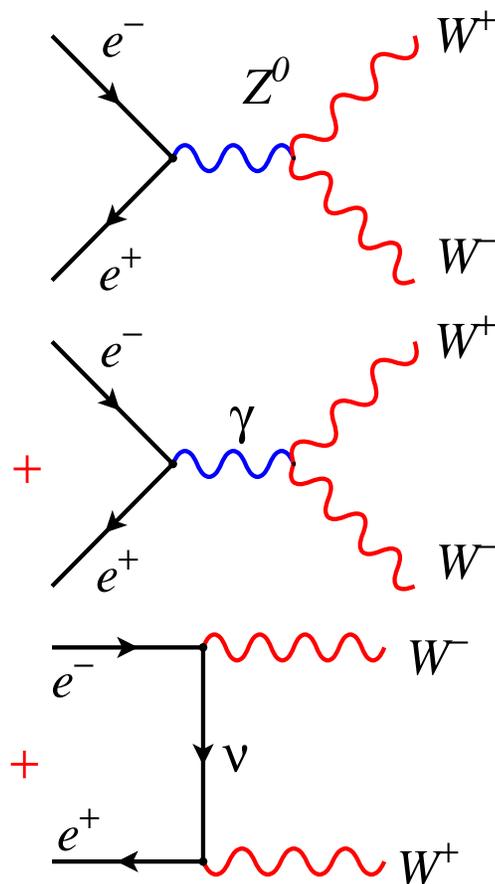
Grupo	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	$SU(3)_c$
Bosão de Gauge	$A^{1,2,3}$	B	$G^{1,2,\dots,8}$

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

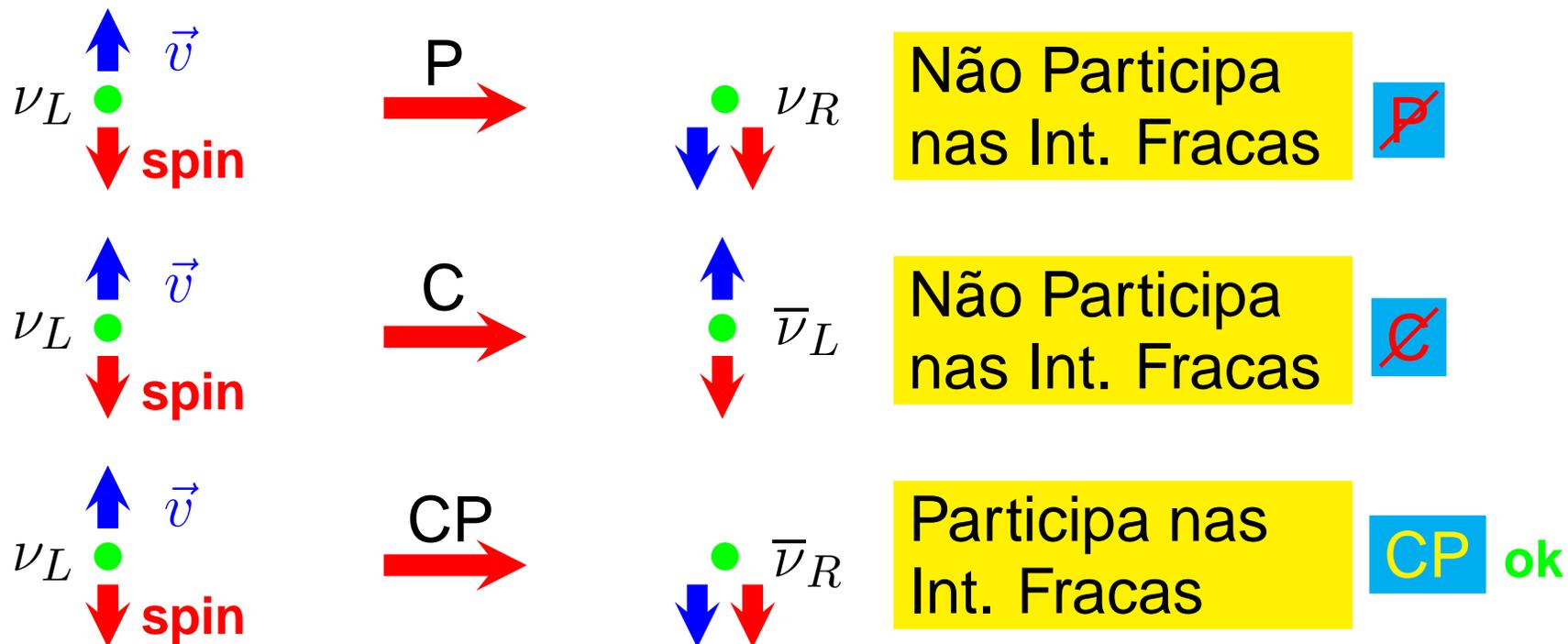
Condições para Bariogénese



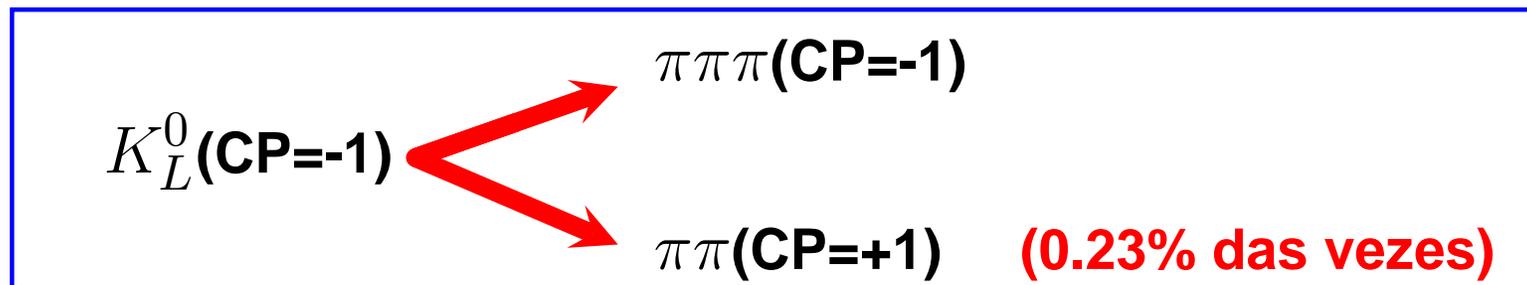
Sakharov

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

Violação de CP



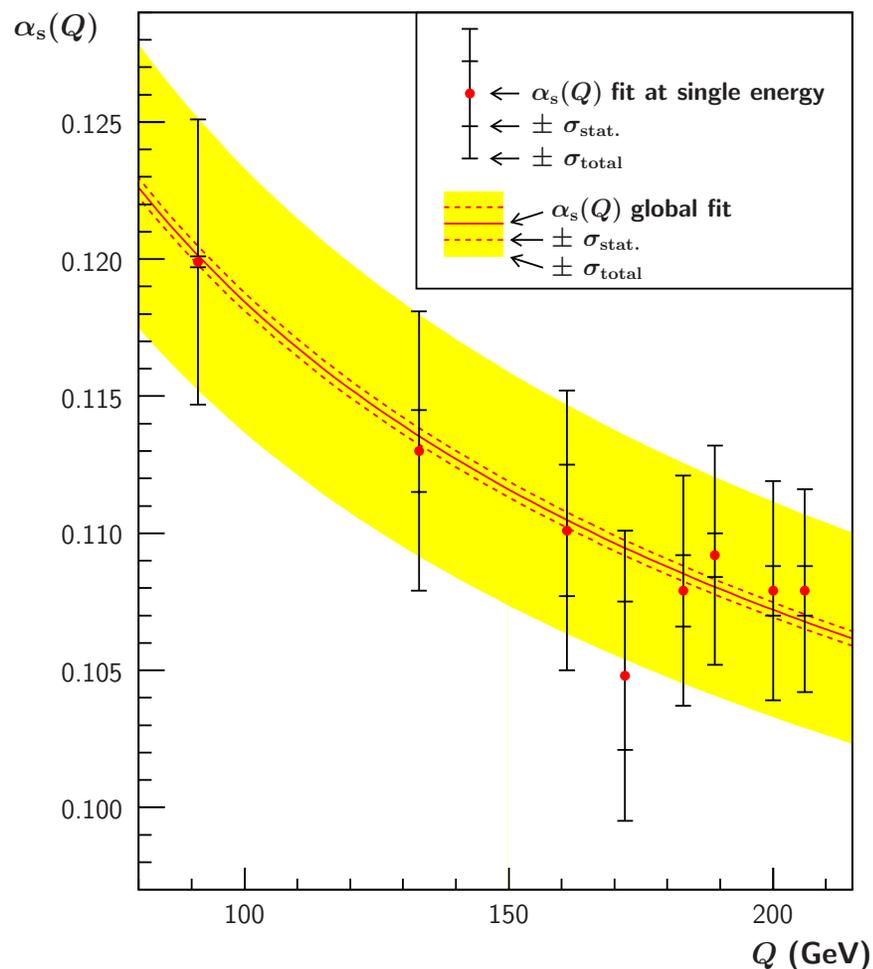
Mas em 1964 Cronin & Fitch (Prémio Nobel 1980)



Liberdade Assimptótica

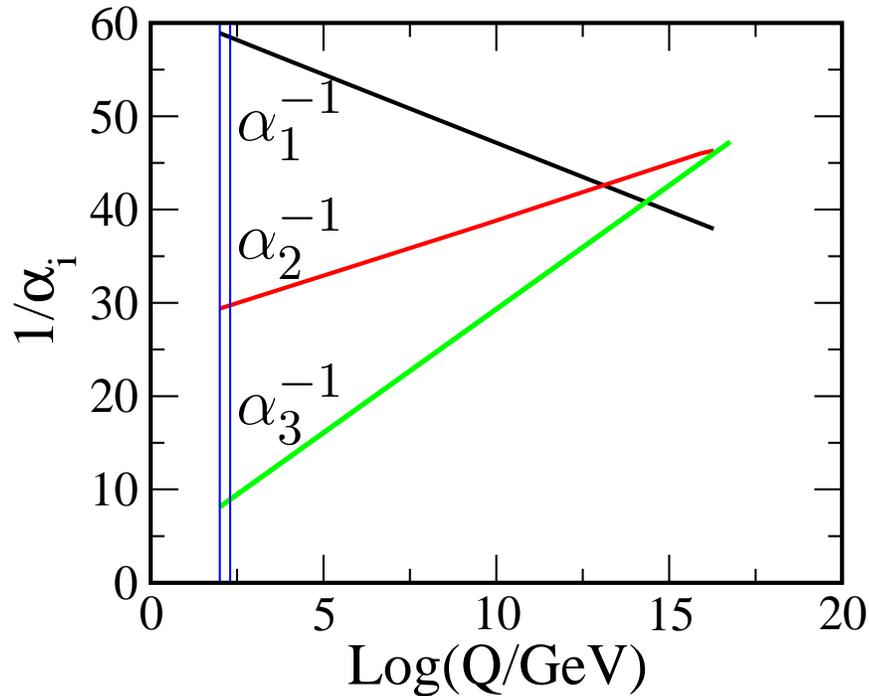
Liberdade Assimptótica: Gross, Wilczek & Politzer mostraram que a energias elevadas as interações fortes tornam-se fracas (Prémio Nobel 2004).

LEP QCD
Working Group

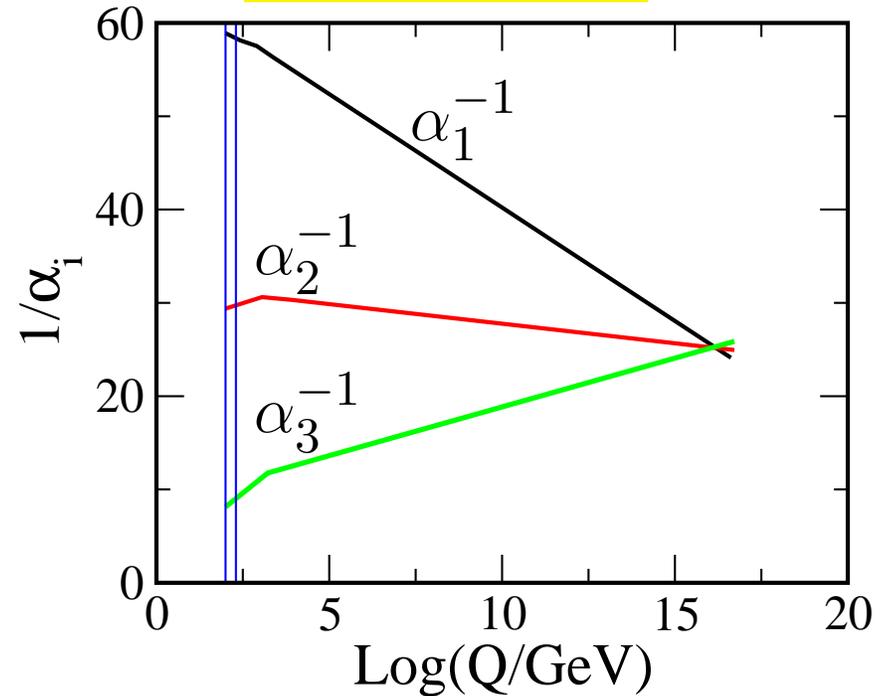


Unificação das Interações

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**)