



# Introdução ao Modelo Padrão (Standard Model)

## 3ª Aula

Augusto Barroso

# Qual é a Teoria?

- São Teorias Quânticas de Campo
- Teoria Electrofraca
  - Unificação do Electromagnetismo (**Electrodinâmica Quântica**) com a Interacção Fraca.
- Teoria Forte (**Cromodinâmica Quântica**).

# Gravidade versus Electromagnetismo

- Gravitoestática

$$|\vec{F}| = G \frac{mm'}{r^2}$$

$$\vec{F} = m\vec{g} = -m\vec{\nabla}\Phi$$

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$$

- Electroestática

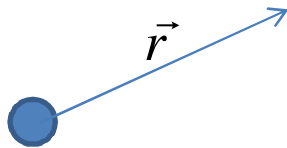
$$|\vec{F}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2}$$

$$\vec{F} = q\vec{E} = -q\vec{\nabla}V$$

$$\nabla^2V = -\frac{1}{\epsilon_0}\rho$$

# Electromagnetismo

- Uma carga cria um campo eléctrico



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}$$

- Mas, para um observador em movimento existe uma corrente eléctrica. Logo temos também um campo magnético.
- Temos:  $\vec{E}(t, x, y, z) \Leftrightarrow \vec{B}(t, x, y, z)$

# Electromagnetismo 2

- As equações que traduzem a Dinâmica do Campo electromagnético são:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{j}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

# Electromagnetismo 2'

- O campo Eléctrico e o campo Magnético são derivadas de uma quantidade que tem 4 componentes  $(A^0, A^1, A^2, A^3)$  a que chamamos campo electromagnético.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}A^0 - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$$

# QED 1

- A electrodinâmica quântica é uma teoria **quântica** de campo que descreve a interacção de electrões com o campo electromagnético.
- O campo electromagnético é descrito pelo campo  $A^\alpha$
- Os electrões (e as suas antipartículas) são descritos por uma campo  $\psi$

# QED 2

- A dinâmica dos electrões **livres** é dada pela equação de Dirac.

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

- Do mesmo modo que a dinâmica dos fótons livres é dada pela equação de Maxwell (sem fontes).

$$\partial_\alpha F^{\alpha\beta} = 0$$




# QED 3


- Campos Livres

$$\partial_{\alpha} F^{\alpha\beta} = 0$$

$$(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu} - m)\psi = 0$$

- Soluções


$$G_{\mu\nu}(t, \vec{x}; t', \vec{x}')$$


$$S(t, \vec{x}; t', \vec{x}')$$

# QED 4

- No caso geral as equações ficam acopladas:

$$\partial_{\alpha} F^{\alpha\beta} = e\bar{\psi}\gamma^{\beta}\psi$$

$$(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu} - m)\psi = -e\gamma^{\alpha}\psi A_{\alpha}$$

# QED 5

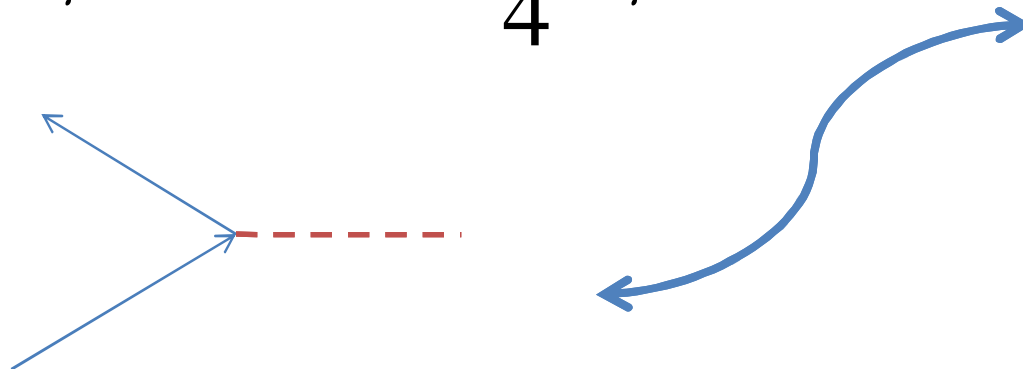
- As equações derivam de um princípio de mínimo.

$$S = \int d^4x L(\psi, A, \partial\psi, \partial A)$$

- Com a densidade Lagrangeana dada por

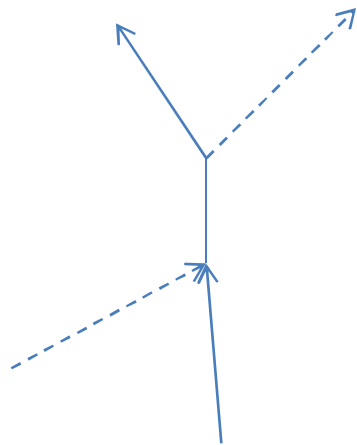
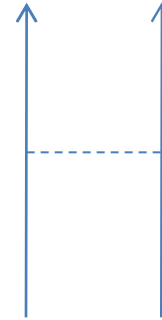
$$L = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - e\bar{\psi}\gamma_\mu\psi A^\mu$$

- Vértice

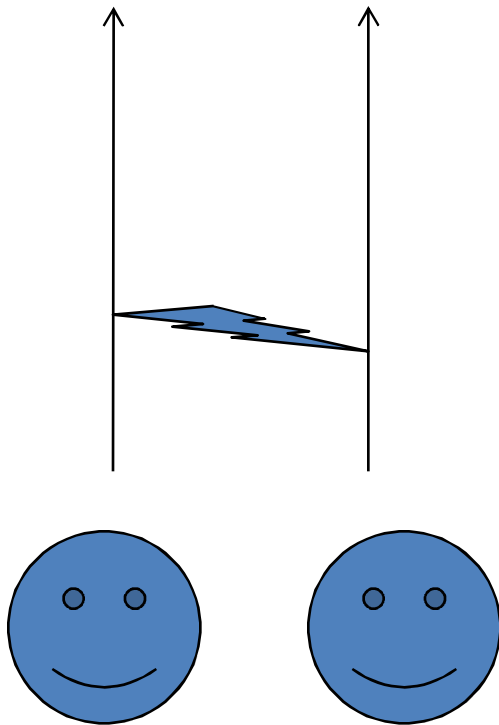


# QED 6

- Podemos resolver a teoria iterativamente
- Exemplo: dispersão  $e e$ .
- Dispersão  $e - \text{fotão}$



# A interacção Electromagnética

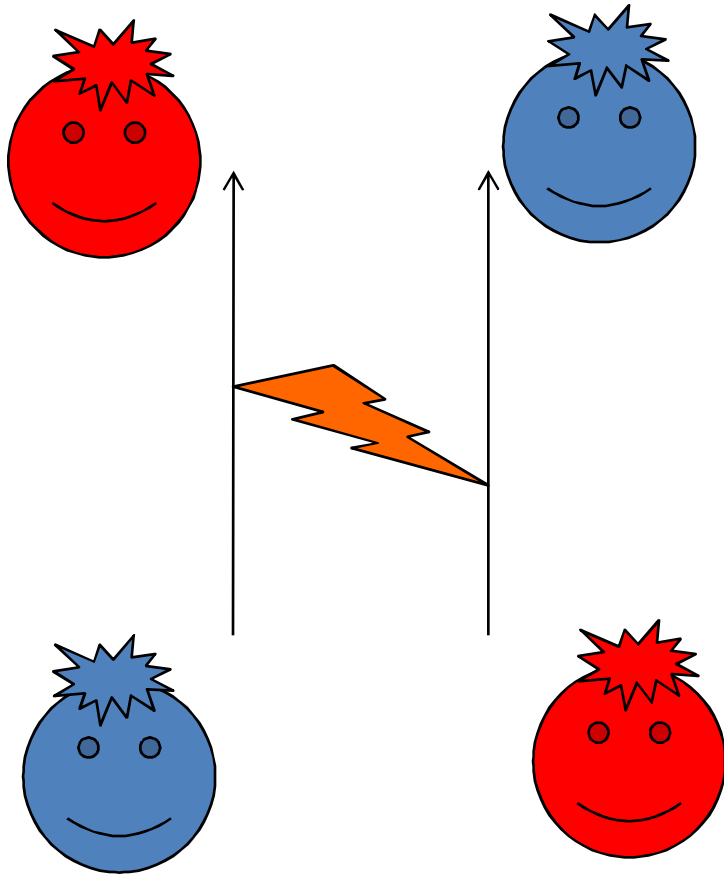


**Dois electrões interagem porque permutam entre si fotões**

# Cromodinâmica

- Cada um dos quarks é de facto uma matriz que corresponde às três cores  $\begin{bmatrix} q_R \\ q_B \\ q_Y \end{bmatrix}$
- Cada glúão tem cor e anti-cor. Exemplo  $\bar{R}B$

# A interacção Forte



**Dois quarks interagem porque permutam entre si gluões**

# Interacção Electrofraca

- Os campos agora também são matrizes.

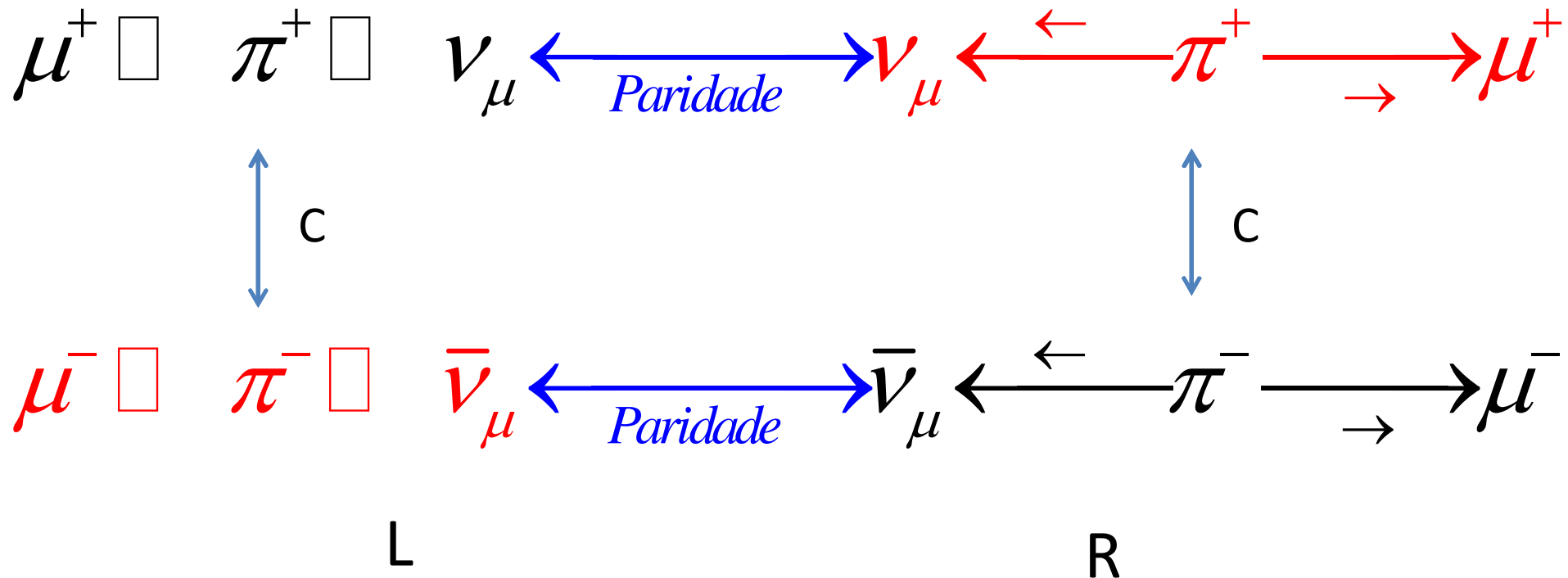
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_L$$

- A razão para só termos a chiralidade esquerda é a violação da Paridade.

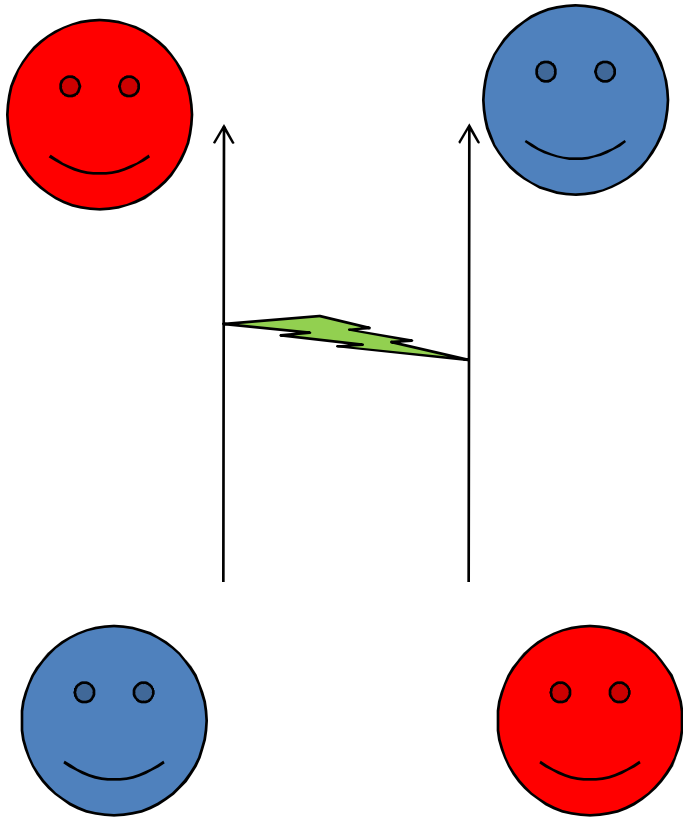


# As Interações Fracas Violam P, Violam C mas *parecem conservar CP*

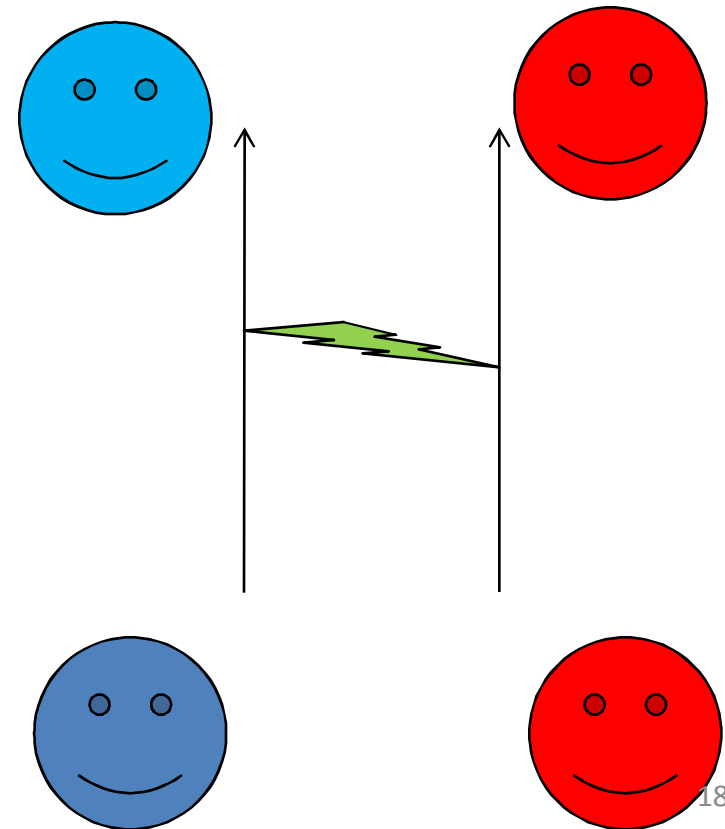


**As transições a vermelho não ocorrem .** Só ocorrem as que estão a preto

# A interacção Fraca



Um electrão e um neutrino interagem porque permutam entre si  $W^-$



Ou permutam um  $Z$

# E o Bosão de Higgs?

- Chiralidade:

$$L \xrightarrow{\leftarrow \vec{s}} \vec{p}$$

$$R \xrightarrow{\rightarrow \vec{s}} \vec{p}$$

- Uma partícula de spin 1 sem massa (exemplo: o fóton) só tem dois estados de polarização.
- Mas se tiver massa tem que ter 3 estados de polarização.

# Higgs 2

- Para que o  $W^+$ ,  $W^-$  e o  $Z$  tenham massa precisamos de fabricar as suas respectivas componentes longitudinais.
- Para isso introduzimos mais um dubleto de campos Complexos: 
$$\begin{pmatrix} \varphi^- \\ \varphi^0 \end{pmatrix}$$
- Temos 4 graus de liberdade (2x2)mas só precisamos de 3.
- **O que sobra é o Bosão de Higgs!**

# FIM

