A FÍSICA DO LHC: Conceitos teóricos e principais resultados

2ª Aula

Carla Göbel
Depto. de Física - PUC-Rio



Tópicos de Hoje

1. Cromodinâmica Quântica: SU(3) de cor
   - Liberdade Assintótica e Confinamento
   - Evidência para Cor e Carga Fracionária
   - Espalhamento Profundamente Inelástico
2. Interações Fracas
   - Teoria de Fermi
   - Universalidade e Teoria de Cabibbo
   - Mecanismo de GIM e matriz de mistura de quarks

Cromodinâmica Quântica: SU(3) de cor

Cromodinâmica Quântica: SU(3) de cor

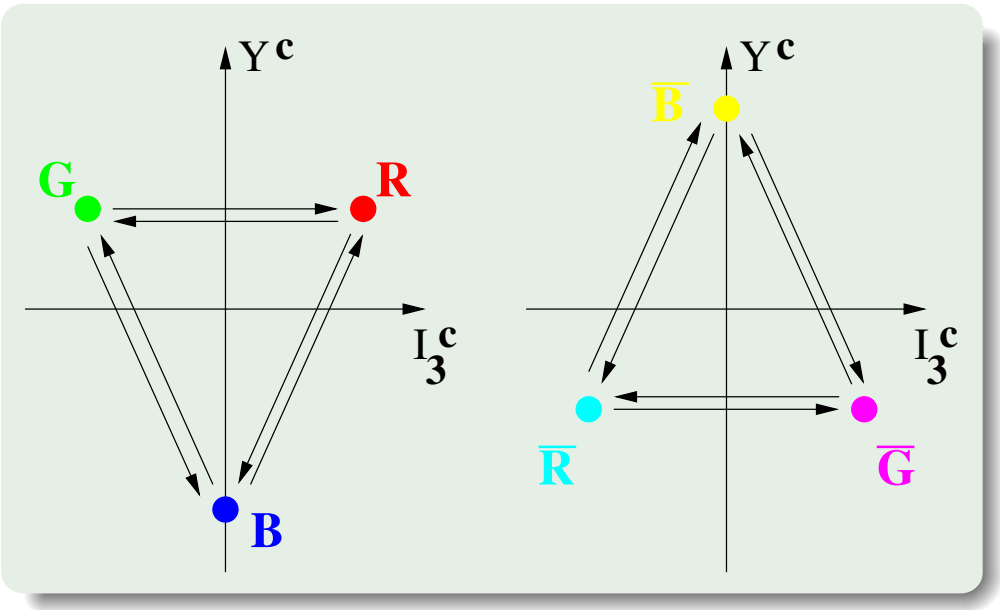
♣ QCD - a teoria das interações fortes - é descrita por uma simetria SU(3) de cor

♣ é uma simetria exata – em contraste com a simetria SU(3) de *sabor*

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

♣ também indexada por dois números quânticos:

- I_3^c isospin de cor
- Y^c hipercarga de cor



Por que COR é necessária?

♣ "Δ^{++} puzzle": é um estado uuu com $J = \frac{3}{2} \Rightarrow$ férmions idênticos aparentemente no mesmo estado quântico. O mesmo se aplica a outros bárions, como $\Omega^- = (sss)$

viola o princípio de exclusão de Pauli?!

♣ Estados como qq ou $q\bar{q}q$ ou q não são observados, apenas qqq, $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ e $q\bar{q}$

$\Rightarrow$ QCD resolve ambos problemas, pela introdução da carga de cor e afirmando que os estados observados devem ser singletos de cor

⊛ **Confinamento de Cor:**

- apenas estados singletos de cor podem existir como partículas livres
- quarks livres não podem ser observados

Singletos de Cor: $I_3^c = Y^c = 0$, invariantes sob $SU(3)$

Estados de Quark Possíveis

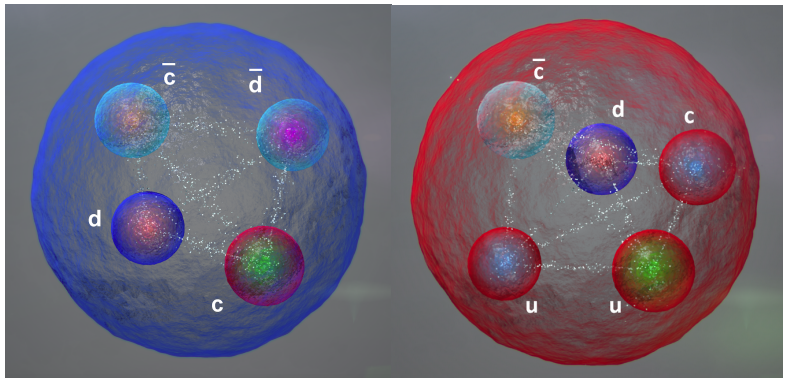
- Como no $SU(3)$ de sabor, combinações $q\bar{q}$ dão um octeto e um singleto. Aqui, apenas o estado singleto é um observável:

$$\psi_c^{q\bar{q}} = \frac{1}{\sqrt{3}}(R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B})$$

- Para bárions, combinações de 3 quarks dão um decupleto, 2 octetos e um singleto, que é

$$\psi_c^{qqq} = \frac{1}{\sqrt{6}}(RGB - RBG + GBR - GRB + BRG - BGR)$$

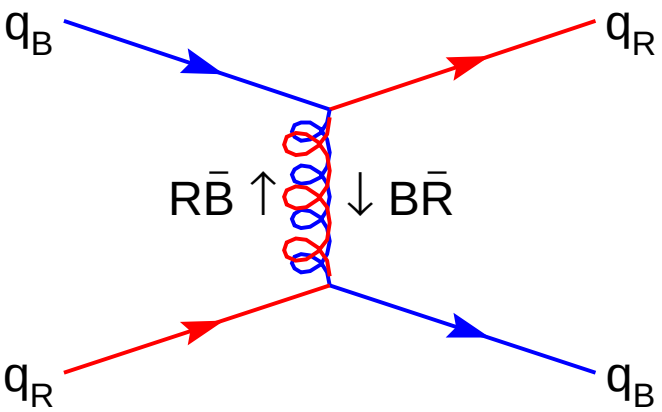
- Os hádrons permitidos são então $q\bar{q}$, qqq, $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
- também possíveis: tetraquarks e pentaquarks $q\bar{q}q\bar{q}$, $qqq\bar{q}q$

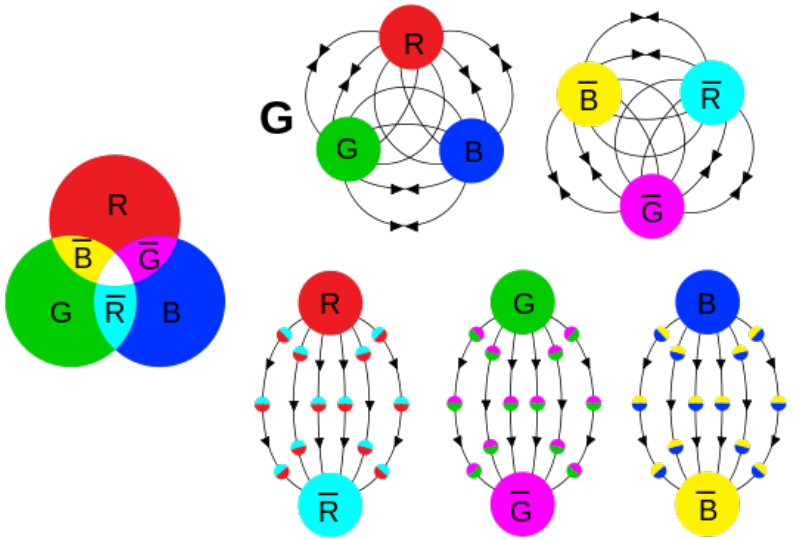


han?? Isso existe???

Glúons

- glúons são os mediadores da interação forte
- SU(3) não-abeliano $\Rightarrow$ glúons carregam carga de cor

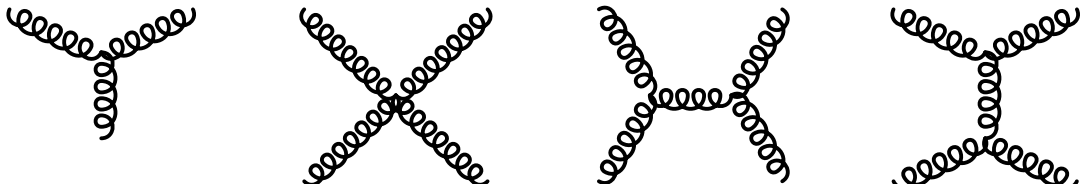




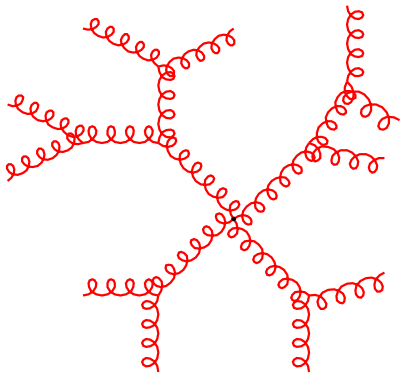
- existem 8 geradores $SU(3)$: 8 glúons
- como são estados com cor, não podem ser observados livres
- é por esta razão que o campo gluônico aparece de curta distância apesar de ser não-massivo

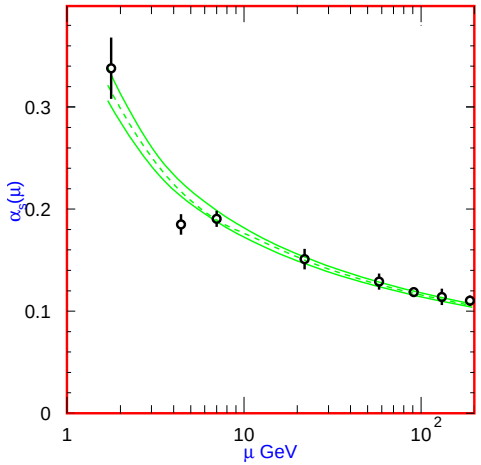
Liberdade Assintótica e Confinamento

Auto-interação do glúon e Liberdade Assintótica



♣ Devido à auto–interação, a intensidade do acoplamento forte α_S decresce a curtas distâncias





- para $Q^2 \approx 1\text{GeV}$ $\Rightarrow \alpha_S \sim 1$
- para $Q^2 \approx 30\text{GeV}$ $\Rightarrow \alpha_S \sim 0.2$

• teoria de perturbação para QCD somente possível a altas energias

• os quarks estão fracamente ligados dentro dos hádrons

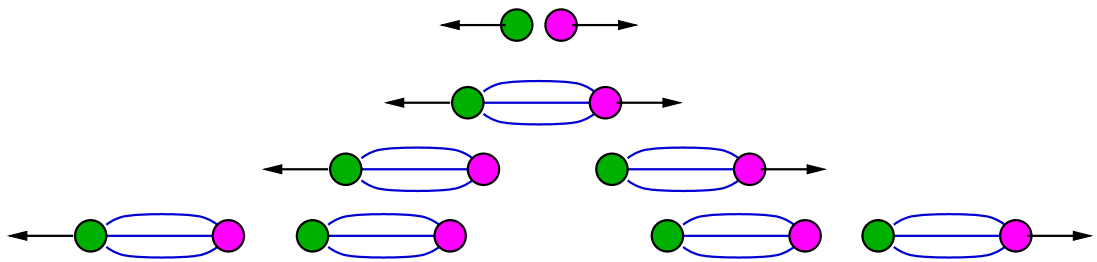
$\Rightarrow$ **LIBERDADE ASSINTÓTICA**

Confinamento de Cor e Jatos

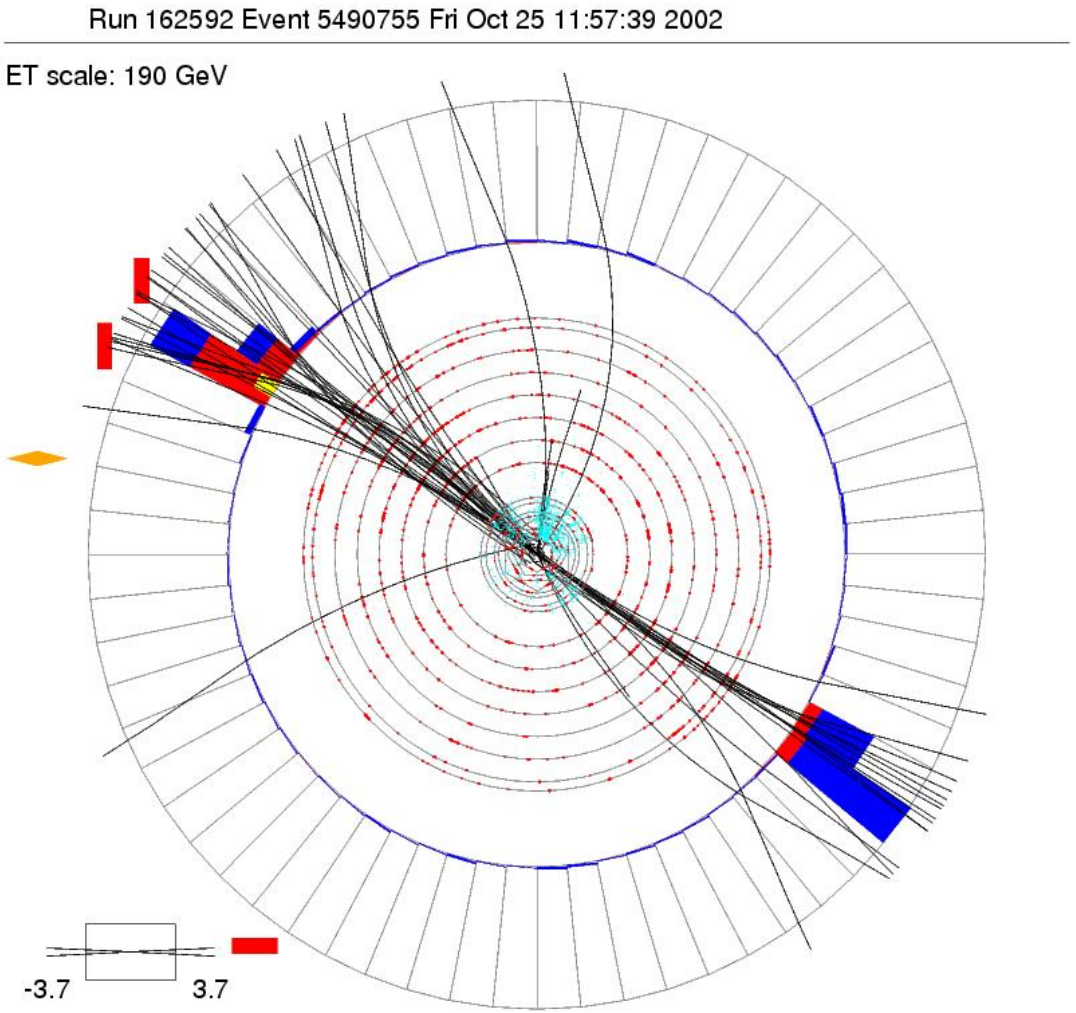
- crescimento de α_S para baixas energias:
  - interação forte se torna mais e mais "forte"
  - cálculos perturbativos não são possíveis!
- acredita-se que a autointeração do glúon seja responsável pelo

CONFINAMENTO

- ao tentar separar os quarks, um "tubo de fluxo de cor" aparece
- pares $q\bar{q}$ são produzidos: hadronização $\Rightarrow$ **JATOS**



Ex. Um Evento Di-Jato no D0



Evidência para Cor e Carga Fracionária

Evidência para Cor e Carga Fracionária

♣ Do resultado para a seção de choque $ee \to \mu\mu$ no limite ultra–relativístico, facilmente se escreve a seção de choque para $ee \to q\bar{q}$:

$$\sigma_{ee \to q_i \bar{q}_i} = 3 \, \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \, e_q^2$$

onde e_q é a fraçaão de carga do quark e o fator 3 vem dos possíveis estados de cor

♣ Como apenas hádrons são observados no estado final, espera-se

$$\sigma(ee \to \text{hadrons}) = \; 3 \sum_{q=\text{u},d,s,\ldots} \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \, e_q^2$$

onde soma-se sobre todos os possíveis estados de quark.

Evidência para Cor e Carga Fracionária (cont.)

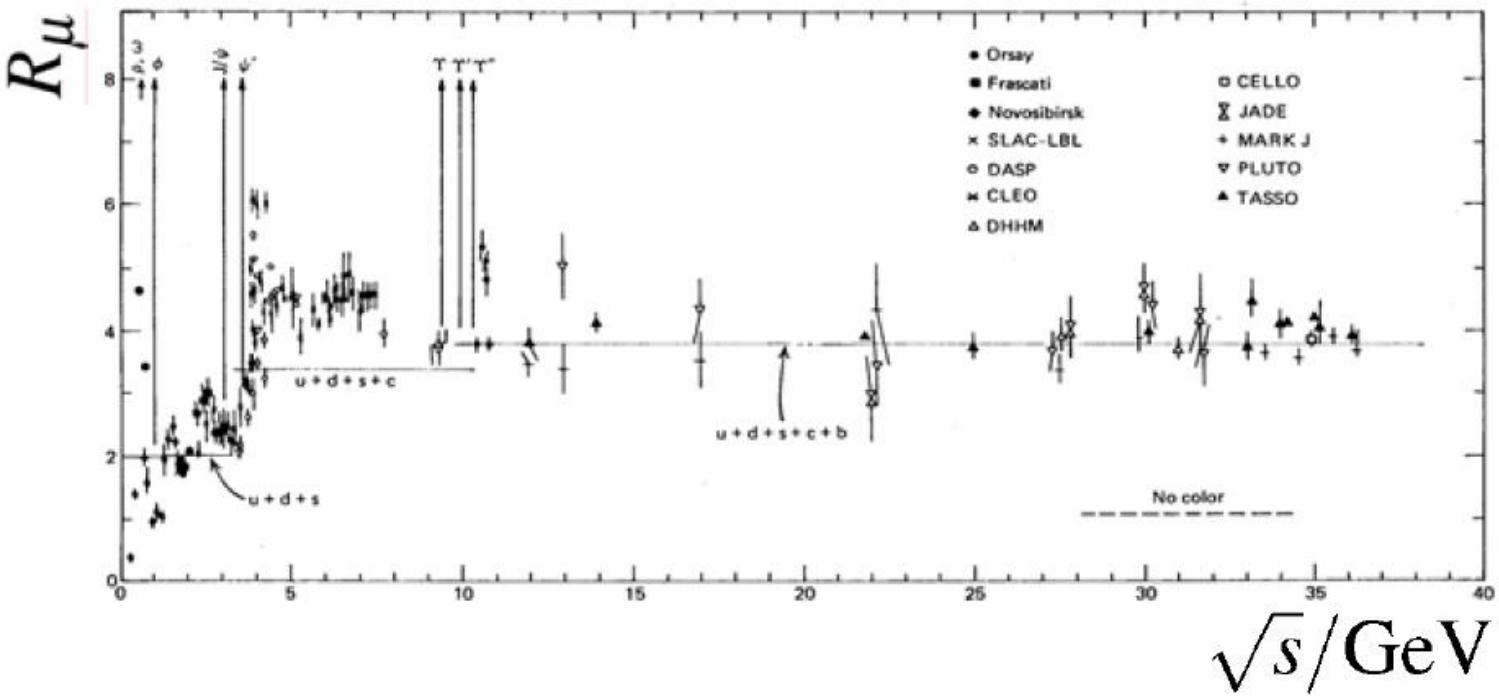
♣ Definindo então a razão R_μ:

$$R_\mu = \frac{\sigma(ee \to \text{hadrons})}{\sigma(ee \to \mu\mu)} = 3 \sum_{q=\text{u},d,s,\ldots} e_q^2$$

- u,d,s $\Rightarrow$ $R_\mu = 3\left(\frac{1}{9} + \frac{4}{9} + \frac{1}{9}\right) = 2$
- u,d,s,c $\Rightarrow$ $R_\mu = 3\left(\frac{2}{9} + \frac{8}{9}\right) = \frac{10}{3}$
- u,d,s,c,b $\Rightarrow$ $R_\mu = \frac{11}{3}$

♣ Estes valores incluem ambos efeitos: 3 estados de cor e carga fracionária

Evidência para Cor e Carga Fracionária (cont..)

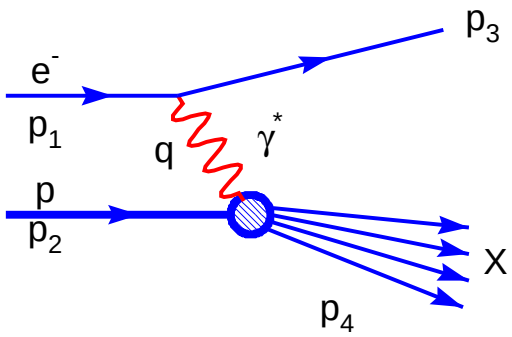


Espalhamento Profundamente Inelástico

O que há dentro do próton?

DIS ("deep inelastic scattering") : colisões elétron-próton a altíssimas energias

DIS para estudar os "partons" dentro do próton via interação EM



- ao menos um bárion no estado final: $M_X > M_p$
- $x \equiv \frac{Q^2}{2p_2 \cdot q}$ Bjorken x
- $Q^2 = -q^2$ and
  $M_X^2 = p_4^2 = (q + p_2)^2 = -Q^2 + 2p_2 \cdot q + M^2$
  $\Rightarrow Q^2 \leq 2p_2 \cdot q \Rightarrow 0 < x < 1$
- $y \equiv \frac{p_2 \cdot q}{p_2 \cdot p_1} = 1 - \frac{E_3}{E_1} \Rightarrow 0 < y < 1$

O que há dentro do próton?

♣ Sabemos de QED que $\overline{|\mathcal{M}|^2}$ tem a forma

$$\overline{|\mathcal{M}|^2} = \frac{e^4}{Q^4} L_{\text{el}}^{\mu\nu} W_{\mu\nu}^{\text{proton}}$$

Como o próton não é puntual, $W_{\mu\nu}^{\text{proton}}$ não pode ser obtido a partir de primeiros princípios

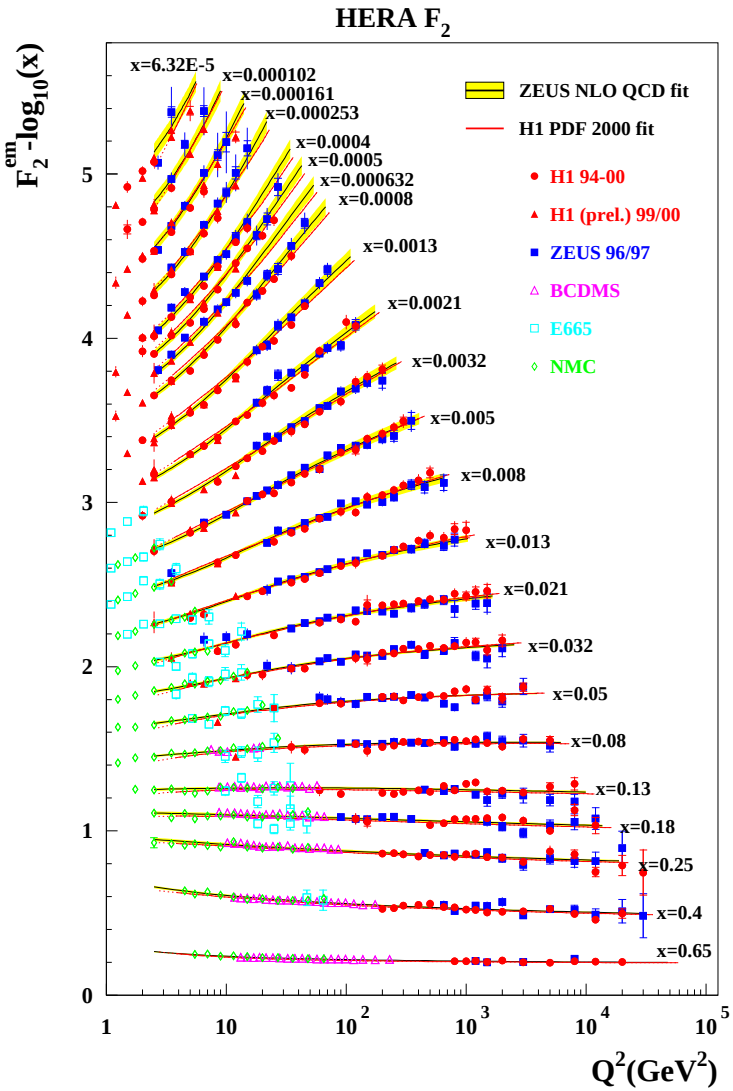
$\Rightarrow$ mas $W_{\mu\nu}^{\text{proton}}$ pode ser escrito como funções de Q^2 e x:

funções de estrutura

♣ A forma mais geral invariante de Lorentz no limite de altas energias ($Q^2 \gg M^2 y^2$) é

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[(1-y) \frac{F_2(x,Q^2)}{x} + y^2 F_1(x,Q^2) \right]$$

O que há dentro do próton?



F_1 e F_2 são praticamente independentes de Q^2
o que isto signifca?

- x é identificado como a fração do momento do próton, carregada pelo quark espalhado
- Pode-se mostrar que (como em $ee \to qq$, somando sobre os quarks)

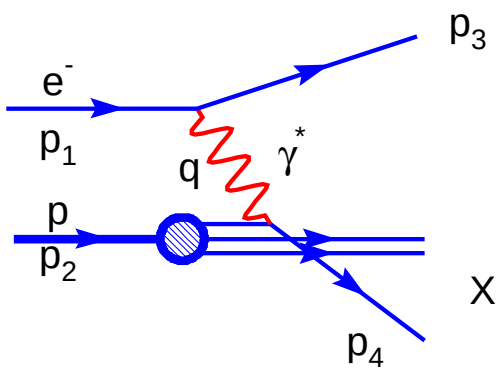
$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\left[(1-y)+\frac{y^2}{2}\right]\sum_q e_q^2 f_q(x)$$

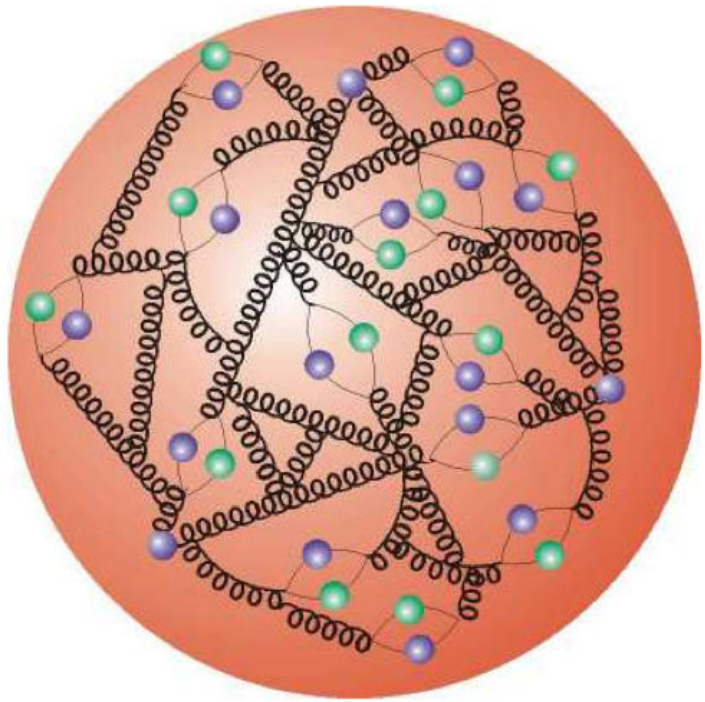
$$F_2(x,Q^2) = 2xF_1(x,Q^2) = x\sum_q e_q^2 f(x)$$

$f_q(x)$ são as funcões de distribuicão de momento partônicas: probabilidade que o quark q carregue fração de momento x

O que há dentro do próton? Conclusões ....

- há partículas puntuais carregadas de spin $\frac{1}{2}$ dentro dos prótons
- mas não somente ... mar de quarks/antiquarks (quarks de valência)
- ... e objetos neutros – glúons – que carregam da ordem de 50% do momento do próton!





Interações Fracas

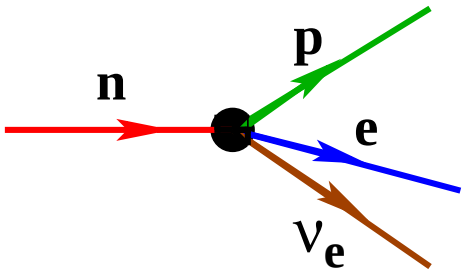
Teoria de Fermi

A Teoria de Fermi para as Interações Fracas

♣ A interação fraca é responsável pelo decaimento β nuclear (entre outros)

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

♣ Devido a seu curto alcance, Fermi propôs uma interação vetorial *a la* EM porém pontual (sem propagador)



$$\mathcal{M}_{fi} = G\,(\bar{u}_p \gamma^\mu u_n)\,(\bar{u}_e \gamma_\mu u_{\nu_e})$$

...mas em 56/57 ficou evidente que paridade não era conservada em interações fracas:

Corrente fraca não é puramente vetorial (V) como a corrente EM

$$j^\mu_{\text{em}} \propto \bar{\psi}_f \gamma^\mu \psi_i$$

$\Rightarrow$ há contribuição de correntes que violam paridade!

A Corrente V-A

♣ Evidências acumuladas mostraram que apenas ν_L (neutrino de quiralidade esquerda) and $\bar{\nu}_R$ (antineutrino de quiralidade direita) estão envolvidos nas interações fracas

Máxima violação de paridade

$\Rightarrow$ é necessário construir uma corrente que projete apenas férmions de mão–esquerda

- corrente puramente vetorial $\propto \gamma^\mu$
- corrente puramente axial $\propto \gamma^5\gamma^\mu$

$\gamma^\mu = \{\gamma^0, \gamma^1, \gamma^2, \gamma^3\}$: matrizes de Dirac; $\gamma^5 = \gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$

♣ o operador $\frac{1}{2}(1-\gamma^5)$ projeta apenas férmions de mão esquerda (ou antiférmions de mão direita)

$\Rightarrow$ A corrente fraca carregada tem a forma $V-A$

$$j^\mu_{\text{fraca}} \propto \bar{u}_e \gamma^\mu (1-\gamma^5) u_{\nu_e}$$

A constante de acoplamento fraco e M_W

Entende-se hoje que os decaimentos fracos a baixas energias aparecem como pontuais porque o bóson W é muito massivo

Comparando com o propagador não massivo da QED, precisa-se substituir

$$\frac{ig_{\mu\nu}}{q^2} \longrightarrow \frac{i(g_{\mu\nu} - q_\mu q_\nu / M_W^2)}{q^2 - M_W^2}$$

para $q^2 \ll M_W^2$ temos uma interação pontual, identificando

$$\frac{G}{\sqrt{2}} = \frac{g_w^2}{8M_W^2}$$

$\Rightarrow$ o propagator está implícito na "constante" G !

$\Rightarrow$ A interação fraca é mais fraca que a EM não porque $g_w \ll e$ (elas são da mesma ordem) e sim porque o W é muito massivo

Universalidade e Teoria de Cabibbo

Universalidade de G ?

♣ Ao calcular o decaimento do múon, encontra-se para sua largura de decaimento

$$\Gamma_\mu = \frac{G^2 m_\mu^5}{192\pi^3} = \frac{1}{\tau_\mu}$$

$\Rightarrow$ medindo o tempo de vida do μ obtemos G

♣ Como $\tau_\mu^{\text{exp}} = 2.19703(4) \times 10^{-6} s$

$$G = 1.116637(1) \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$$

♣ Entretanto, cálculos similares para o decaimento β dão

$$G = 1.136 \pm 0.003 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$$

apesar de próximos, não são iguais!!

♣ para transições com $\Delta S = 1$ a diferença é ainda maior

Teoria de Cabibbo

♣ Cabibbo (63)$\Rightarrow$ G deve ser universal para todos os processos fracos

ele sugeriu que as correntes fracas hadrônicas obedecem

$$J^{\mu} = \cos\theta_c J^{\mu}_{\Delta S=0} + \sin\theta_c J^{\mu}_{\Delta S=1}$$

no contexto de quarks isto representa uma mistura d/s

$$d' = d\cos\theta_c + s\sin\theta_c$$

$\Rightarrow$ a interação fraca então age no dubleto

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d\cos\theta_c + s\sin\theta_c \end{pmatrix}$$

Teoria de Cabibbo (cont.)

♣ Desta forma, ele pôde explicar a aparente diferença nos acoplamentos:

$$\begin{aligned} \mathcal{M} &\propto G && \text{processos leptônicos} \\ \mathcal{M} &\propto G\cos\theta_c && \text{processos hadrônicos com } \Delta S = 0 \\ \mathcal{M} &\propto G\sin\theta_c && \text{processos hadrônicos com } \Delta S = 1 \end{aligned}$$

Medidas experimentais:

$$\theta_c = 0.26 \text{ rad} = 13^\circ$$

Como θ_c é pequeno ($\cos\theta_c = 0.974$) chamamos

$\Delta S = 0 \rightarrow$ decaimentos favorecidos por Cabibbo

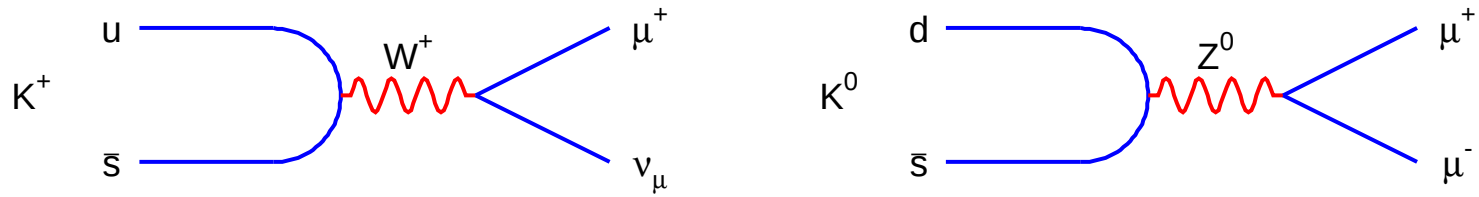
$\Delta S = 1 \rightarrow$ decaimentos suprimidos por Cabibbo

Mecanismo de GIM e matriz de mistura de quarks

Mecanismo de GIM e Predição do Charme

♣ Já era esperado, nos 60', que as correntes fracas formassem um tripleto $J^{\mu+}$, $J^{\mu-}$, $J^{\mu 0}$

O decaimento $K_L^0 \to \mu^+\mu^-$ deveria ocorrer com taxa similar que $K^+ \to \mu^+\nu_\mu$



mas $\mathrm{BR}(K_L \to \mu^+\mu^-) \approx 9 \times 10^{-9} \Rightarrow$ muito suprimido!

♣ 70': Glashow, Ilipoulos & Maiani (GIM) postulam um 4º quark – charme – pela introdução de um novo dubleto

$$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ -d\sin\theta_c + s\cos\theta_c \end{pmatrix}$$

Mecanismo de GIM e Predição do Charme (cont.)

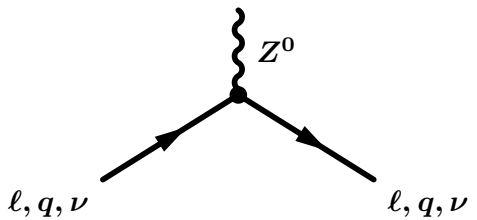
♣ autoestados fracos dos quarks representam uma rotação nos autoestados de massa:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

♣ A introdução de um 4º quark elimina a contribuição de Correntes Ceutras que Trocam Sabor (CNTS) em 1ª ordem e suprime transições de 2ª ordem

♣ De fato, o Modelo Padrão prediz a ausência de CNTS em 1ª ordem

Z^0 se acopla somente a $\bar{u}u$, $\bar{d}d$, etc.



Uma Terceira (última?) Geração

♣ Sabemos agora que existem 3 famílias de quarks ...

[a existência de 3 famílias foi primeiramente sugerida por Kobayashi & Maskawa, antes de GIM proporem o charme, para entender a origem de Violação de CP...]

$\Rightarrow$ 3 dubletos $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$ com

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

♣ **V** é a matriz de mistura de Cabibbo–Kobayashi–Maskawa
unitária e ortogonal $\Rightarrow$ 3 parâmetros reais, 1 fase

voltaremos à matriz de CKM para o estudo de Violação de CP ...