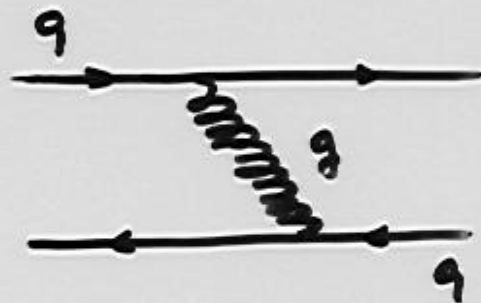


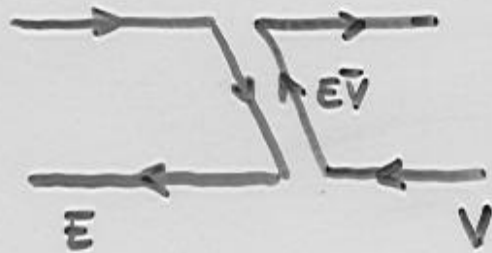
COR : A CARGA DA INTERACÇÃO FORTE

- Quantum do campo da cor : glúons



- Os quarks interagem trocando de cor :

→ glúons bicoloridos



9 combinações $E\bar{E}, E\bar{V}, E\bar{A}, V\bar{V}, V\bar{E}, V\bar{A}, A\bar{A}, A\bar{E}, A\bar{V}$

1 singlete de cor $E\bar{E} + V\bar{V} + A\bar{A}$

} → 8 glúons

- os glúons coloridos podem interagir entre si :

Cromodinâmica Quântica:
(QCD)

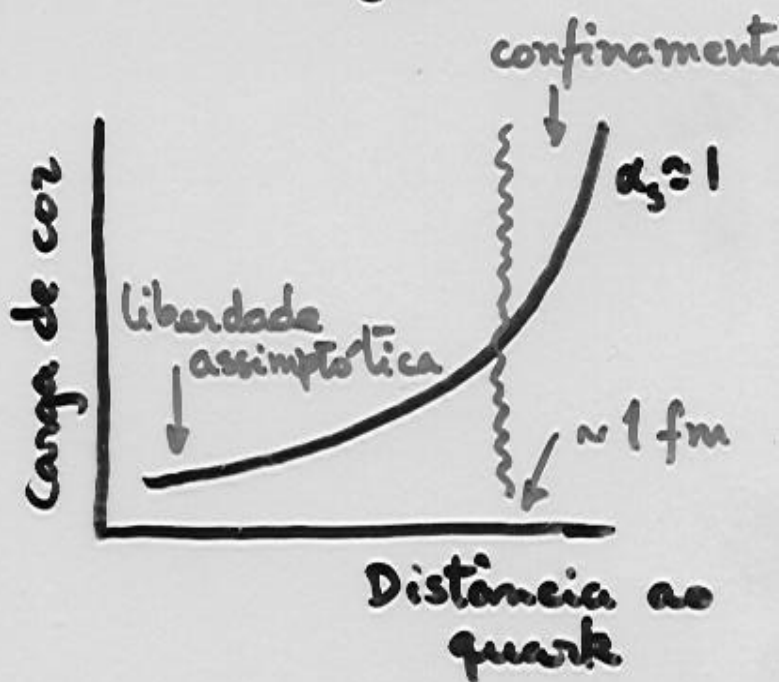
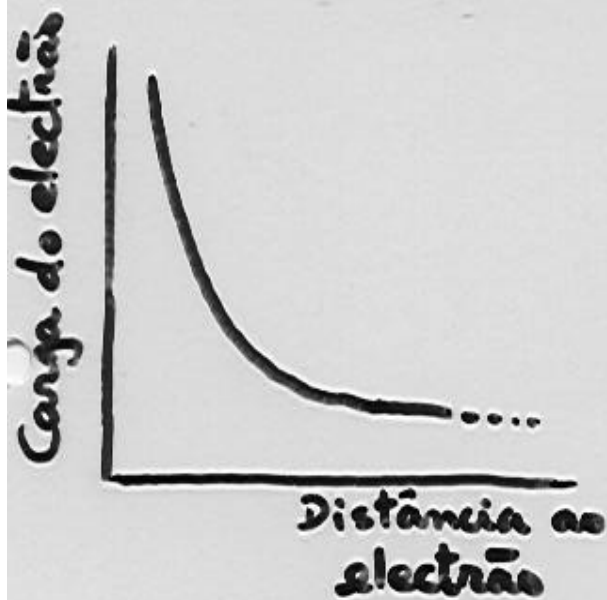
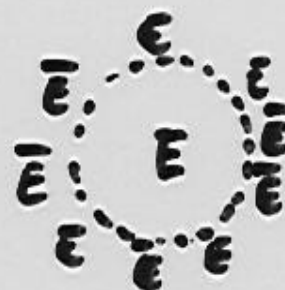
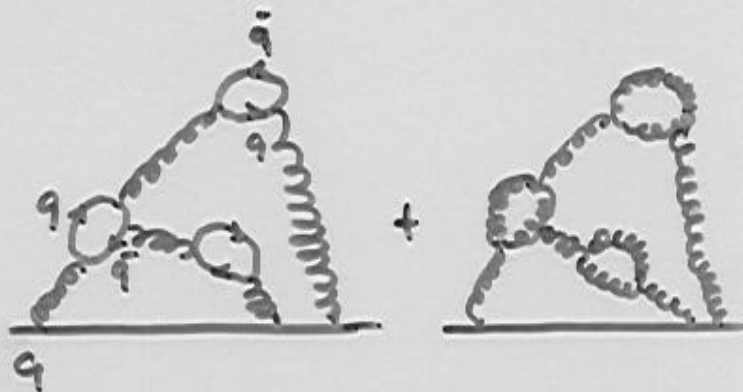
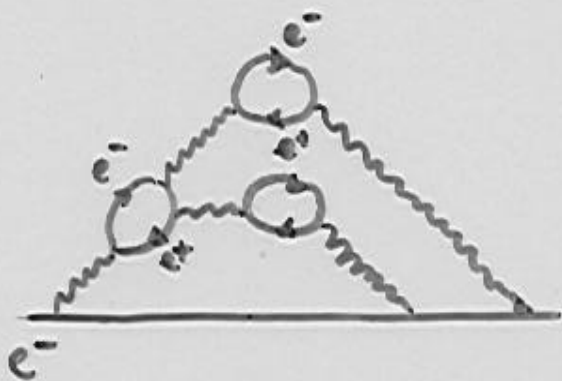
teoria não-Abeliana



DIFERENÇA FUNDAMENTAL ENTRE QED e QCD :

Electrodinâmica Quântica QED

Cromodinâmica Quântica QCD



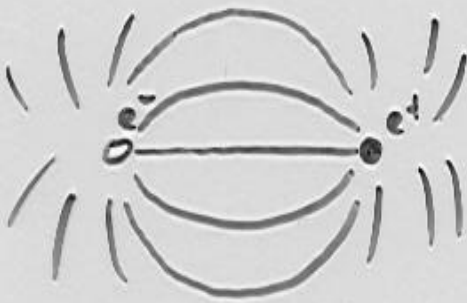
vácuo é um meio polarizável
 → charge screening

A interação entre glúons
 implica um efeito contrário:
 antiscreening → confinamento

QED

Campo de Coulomb

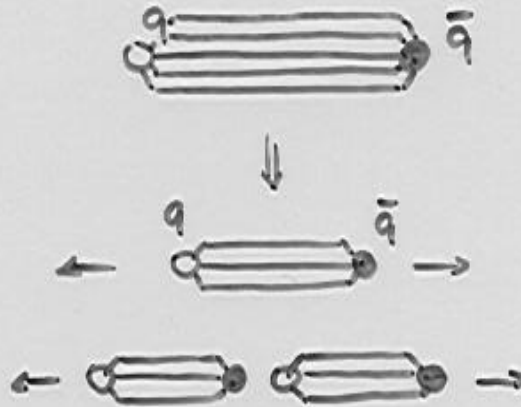
$$V(r) \sim \frac{1}{r}$$



QCD

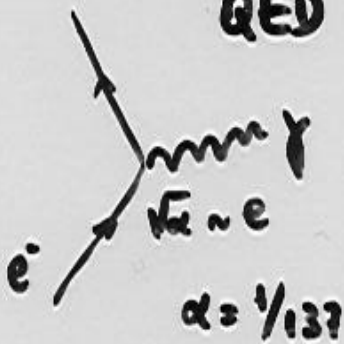
Campo de cor

$$V(r) \sim r$$

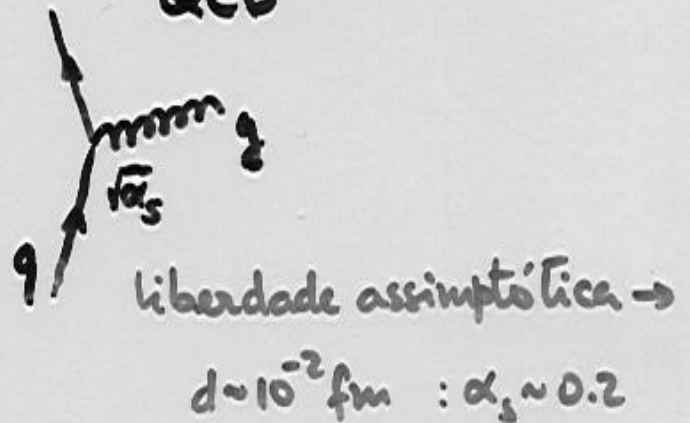


- Força das interações forte e electromagnética :

QED



QCD



- Interações entre átomos (QED) \equiv Interações entre núcleões (QCD)

INTERACÇÃO FRACA

Motivações :

$$\Gamma \approx 120 \text{ MeV}$$

→ Tempo de vida do Δ^{++} : $\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$ $\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p$

$$\tau = \frac{R}{c} \quad R : \text{alcance da interacção forte } 1 \text{ fm}$$

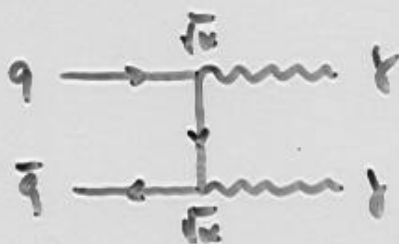
$$= \frac{10^{-13} \text{ cm}}{10^{10} \text{ cm s}^{-1}} = 10^{-23} \text{ s}$$



$$\tau_s \sim \frac{1}{\alpha_s^2}$$

probabilidade $\sim (\text{amplitude})^2 \sim \alpha_s^2 \rightarrow \tau_s \sim 1/\alpha_s^2$

→ Decaimento $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$: $\tau = 10^{-16} \text{ s}$



$$\tau_e \sim \frac{1}{\alpha^2}$$

$$\rightarrow \frac{\tau_{\text{elet}}}{\tau_{\text{forte}}} \approx \left(\frac{\alpha_s}{\alpha} \right)^2 = 10^4 - 10^6$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$$

Outros decaimentos :

$$\cdot \pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu} \quad \tau = 10^{-12} \text{ s}$$

$$\cdot \Sigma^+ \rightarrow n \pi^+ \quad \tau = 10^{-10} \text{ s}$$

$(m_{\Sigma^+} = 1,19 \text{ GeV})$

$$\cdot \Delta^+ \rightarrow n \pi^+ \quad \tau = 10^{-23} \text{ s}$$

$(M_{\Delta} = 1,23 \text{ GeV})$

→ introduz-se uma nova escala (α_w) e uma nova interação, a interação fraca

$$\frac{\tau(\Delta \rightarrow n\pi)}{\tau(\Sigma \rightarrow n\pi)} = \frac{10^{-23}}{10^{-10}} \approx \left(\frac{\alpha_w}{\alpha_s}\right)^2 \rightarrow \alpha_w \approx 10^{-6}$$

○ Observações:

1) A conservação de estranheza impede o decaimento $\Sigma \rightarrow n\pi$ por interação forte

2) Decaimento do neutrão:

$\tau(n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}) = 15 \text{ mn}$: espaço de fases reduzido

Energia cinética disponível :

$$m_n - (m_p + m_{e^-}) = 939.57 - (938.28 + 0.51) \\ = 0.78 \text{ MeV}$$

Bosões intermediários da interacção fraca

Correntes carregadas : W^+, W^-

Correntes neutras : Z^0

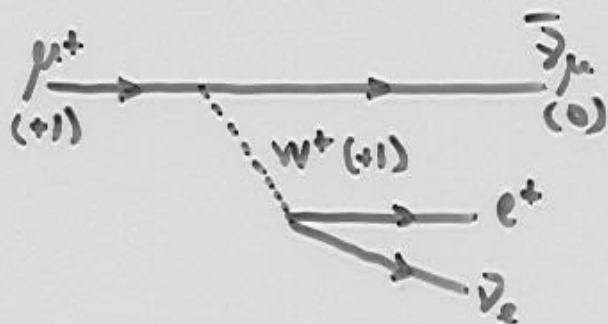
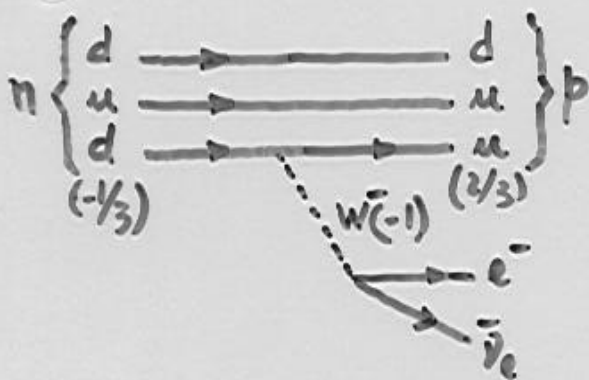
$$t = \left(\frac{p_1 - p_3}{2} \right)^2 \approx -\frac{q^2}{2}$$

$$\frac{\alpha_W}{q^2 + M_W^2} \approx G_F$$

Exemplos de correntes carregadas:

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

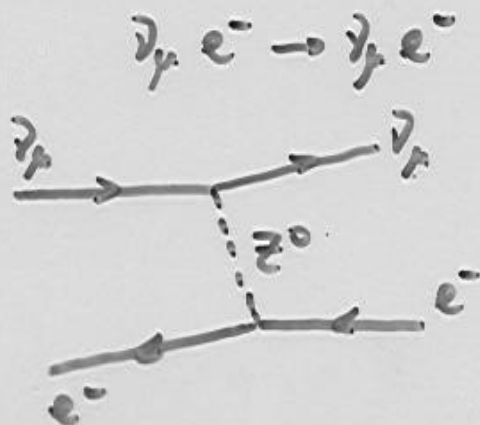
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$



Características dos bosões
carregados W^+, W^-

- Acoplam a quarks e leptões
- Provocam transições de sabor
- Têm carga eléctrica

Exemplo de corrente neutra:



O Z^0 acopla a quarks e leptões.

REINTERPRETAÇÃO DA INTERACÇÃO FRACA :
UNIFICAÇÃO ELECTROFRACA

→ Introdução de uma nova escala de massa (energia),
em lugar de uma nova carga



A probabilidade de emissão de um W é menor
porque o W tem massa :

$$\alpha_w = \frac{\alpha}{(M_w/m_p)^2} \approx 10^{-6} \rightarrow M_w = 10^2 m_p$$

OUTRO EXEMPLO DE UNIFICAÇÃO :

Electromagnetismo
de Maxwell

: unificação da electricidade e do
magnetismo

$$\vec{F} = e \vec{E} + e_m \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{unificação: } e = e_m$$

Velocidade da luz c : escala que governa a força relativa
das duas interações

$$v \ll c \quad F_e \gg F_m$$

$$v \sim c \quad F_e \sim F_m$$

TABELA RESUMO DAS INTERAÇÕES

Interação	Alcance	Tempo de vida típico (sec)	Seções eficazes típicas (mb)*	Acoplamento típico
FORTE	1 F	10^{-23} (ex $\Delta \rightarrow \pi p$)	10 (ex $\pi p \rightarrow \pi p$)	1
ELECTROMAGNÉTICA	∞	10^{-20} a 10^{-16} (ex $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma$)	10^{-3} (ex $\gamma p \rightarrow p\pi^0$)	10^{-2} *
FRACA	10^{-3} F	$> 10^{-12}$ (ex $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$ $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$)	10^{-11} (ex $\nu p \rightarrow \nu p$ $\gamma p \rightarrow \mu^+ p \pi^+$)	10^{-6}

$$* \alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$$

unidade $\sigma = \text{barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

p: $\sigma \approx 40 \text{ mb} = 4 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 \approx \pi \cdot (10^{-13} \text{ cm})^2$

INTERACÇÃO GRAVITACIONAL

Gravidade

$$F_g = \frac{KM^2}{r^2}$$

↓

$$\alpha_g = \frac{KM^2}{4\pi\hbar c} = 4.6 \cdot 10^{-40} \ll \ll$$

Electromagnetismo

$$F_e = \frac{e^2}{r^2}$$

↓

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = 1/137$$

Em que condições serão importantes os efeitos quânticos gravitacionais?

Distância l tal que:

energia gravitacional = energia de massa

$$\frac{KM^2}{l} = Mc^2$$

$$\rightarrow l = \frac{KM}{c^2} \quad (\text{próton: } l = \frac{K m_p}{c^2} = 10^{-54} \text{ m} \\ l = 10^{-30} r_p)$$

Efeitos gravitacionais importantes quando:

$l \sim$ comprimento de onda de Compton (\hbar/Mc)

$$\text{donde: } l = \frac{KM}{c^2} = \frac{\hbar}{Mc} \rightarrow Mc^2 = 10^{19} \text{ GeV} \\ \text{massa de Planck}$$