

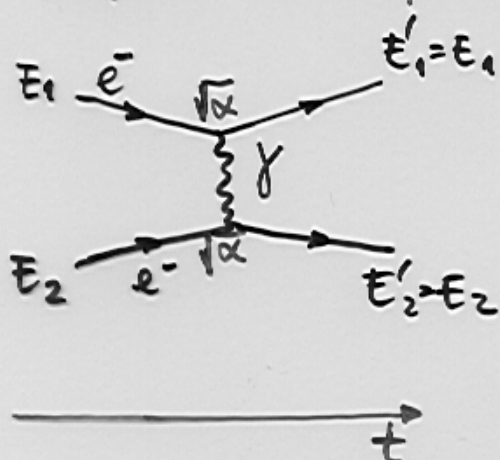
INTERACÇÕES

TEORIA QUÂNTICA DO CAMPO:

As partículas interagem através da troca dos quanta do campo

Interação electrão - electrão:

Diagrama de Feynman



● A interação ocorre por troca de um fóton virtual

● Os vértices são ponderados por um factor $\sqrt{\alpha}$

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

● O valor de α determina a intensidade da interação

● Há violação da conservação de energia durante o intervalo Δt entre a emissão e a absorção do fóton

⇒ processo virtual não observável

permitido pelo princípio de incerteza

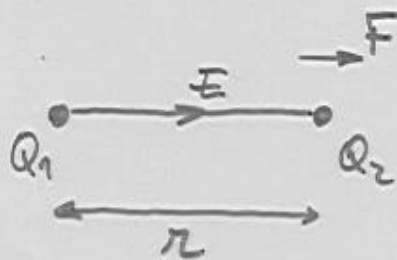
$$\Delta t \Delta E \geq \hbar$$

$$\Delta E = \hbar \omega \text{ (energia do fóton virtual)} \Rightarrow \Delta t \leq 1/\omega$$

$$\text{Donde o alcance da interação } R = c \Delta t \leq \frac{c}{\omega} \text{ infinito } \omega \rightarrow 0$$

As descrições clássica e quântica são equivalentes à escala macroscópica:

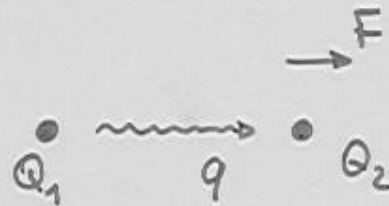
Ex: Força entre duas cargas:



Campo $E(r)$

$$F = E(r)Q_2 =$$

$$= Q_1 Q_2 / r^2$$



Troca de fótons virtuais
de momento q

Princípio incerteza $\Rightarrow q r \approx \hbar$

Tempo de transferência
de impulsão $\rightarrow t = r/c$

Força $F = dq/dt = \hbar c / r^2$

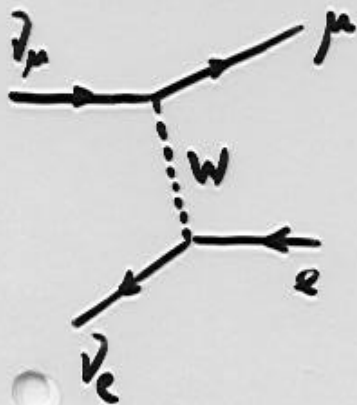
Nº de fótons $\propto Q_1 \cdot Q_2$

$$F = Q_1 Q_2 / r^2$$

TROCA DE PARTÍCULAS MASSIVAS

interacção μe por troca de bosão W

$$\mu e \rightarrow \mu \nu_e$$



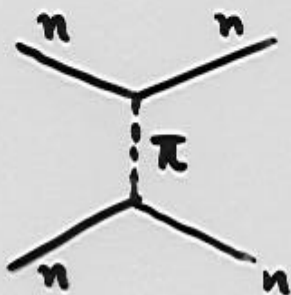
$$\Delta E_W \gg m_W c^2 \rightarrow \Delta T \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \leq \frac{\hbar}{m_W c^2}$$

donde $R \leq \frac{\hbar}{m_W c}$, processo de alcance curto (troca de partícula massiva)

• Alcance da interacção fraca :

$$m_W = 80 \text{ GeV} \rightarrow R \leq \frac{\hbar c}{m_W c^2} = \frac{1.97 \cdot 10^{-11} \text{ MeV cm}}{80000 \text{ MeV}} = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

• Alcance da interacção forte : interacção nucleão-nucleão por troca de mesão π



$$R(\text{interacção forte}) \sim \frac{\hbar}{m_\pi c} = 1.4 \text{ fm}$$

$$m_\pi = 140 \text{ MeV}$$

TEORIA DE YUKAWA :

| Relação entre o potencial da interação e a massa da partícula intermediária |

a) Relação relativista : $E^2 = p^2 + m^2$ $\hbar = c = 1$

b) Operadores energia-impulsão em mecânica quântica:

$$E_{op} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad p_{op} = -i\hbar \nabla = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$$

c) Função de onda de partícula livre (válida p/ partículas de spin 0)

Eq. de Klein-Gordon : $\nabla^2 \psi - m^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$

($m=0 \rightarrow \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$, eq. de propagação do campo electrom.)

d) Interprete-se ψ como o potencial U :

- U independente de t : potencial estático

$$\nabla^2 U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = -m^2 U(r)$$

$$\Rightarrow \boxed{U(r) = \frac{g}{4\pi r} e^{-r/R}, \quad R = \frac{\hbar}{mc}}$$

g : constante de integração;

tem as características de uma carga.

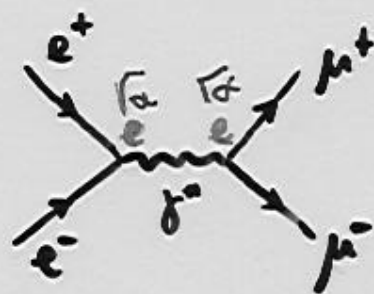
INTERACÇÃO ELECTROMAGNÉTICA :

entre partículas com carga eléctrica

• quantum do campo electromagnético : **fotão**

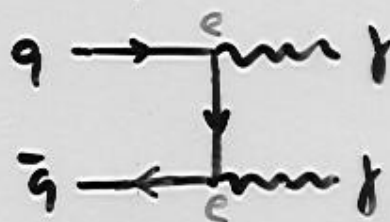
• exemplos de interacções :

$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



• exemplo de desintegração :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$



$$\tau = 10^{-16} \text{ s}$$

• medida adimensional da **força** da interacção elect. :

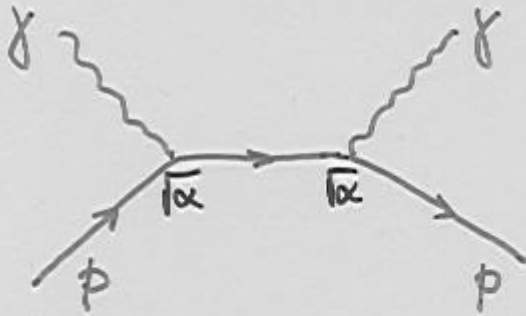
$\alpha = \frac{\text{energia de repulsão electrostática entre electrões afastados uma unidade}}{\text{energia em repouso do electrão}}$

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

α : constante de estrutura fina

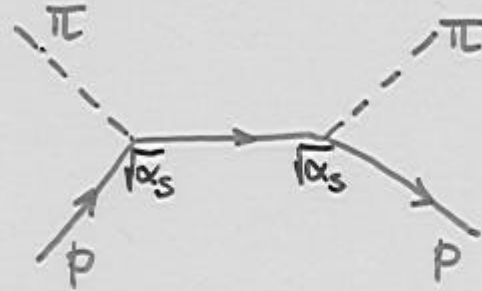
• teoria : **Electrodinâmica Quântica (QED)**

Thomson scattering



$$\sigma_{\text{TH}} = \frac{2}{3} \alpha^2 (4\pi R_p^2)$$

Difusão πp



$$\sigma(\pi p) = \alpha_s^2 (4\pi R_p^2)$$

Resultados experimentais $\Rightarrow \alpha_s \sim 1-10$

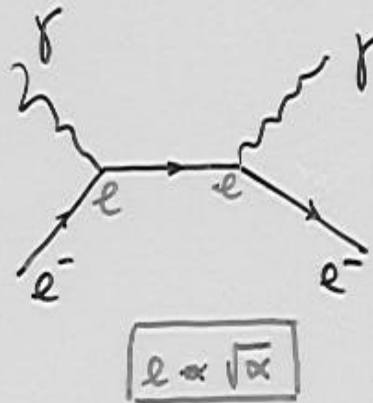
- difusão de Thomson :

$$\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$$

secção eficaz :

$$\sigma_{TH} = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\alpha}{m_e} \right)^2 =$$

$$= \frac{2}{3} \alpha^2 (4\pi R_e^2)$$

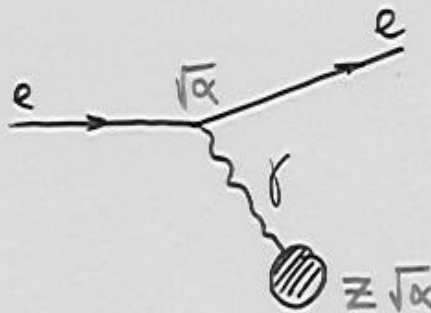


$$R_e = \frac{\hbar}{m_e c} = \frac{1}{m_e} \rightarrow \text{Comprimento de onda de Compton do electrão}$$

- difusão de Rutherford :

$$\bar{e} A \rightarrow \bar{e} A$$

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega} = \frac{Z^2 \alpha^2}{4E^2} \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$



|| Força da interacção \Leftrightarrow Probabilidade de uma carga emitir ou absorber um fóton

INTERACÇÃO FORTE

O problema Δ^{++} :

Δ^{++} , $J = \frac{3}{2}$ = três quarks u ($J = 1/2$) no mesmo estado de spin

→ contradiz o princípio de exclusão de Pauli

Solução: introduz-se um novo número quântico, a cor

→ os quarks podem ter três cores: \bar{E} , V , A

→ os antiquarks têm cores complementares: \bar{E} , \bar{V} , \bar{A}

donde: $\Delta^{++} = u_{\bar{E}} u_V u_A$

Postulado: todas as partículas observadas na natureza são "brancas" (ou invariantes sob rotações no espaço EVA)

. combinações brancas (sem cor) :

$EVA, \bar{E}\bar{V}\bar{A}$ bárions

$E\bar{E}, V\bar{V}, A\bar{A}$ mesões