

Partículas Elementares e Campos

O. L. G. Peres¹

¹Instituto de Física Gleb Wataghin
UNICAMP

1 de Agosto de 2013

Plano do curso

1 Ementa da Disciplina

Ementa de Partículas Elementares e Campos

- A página do curso está em <http://www.ifi.unicamp.br/~orlando/f885/>

Aula do dia 8 de agosto

Aula do dia 8 de agosto

Recapitulação da aula passada

- Quantidades conservadas como número leptônico do elétron: L_e , número leptônico do múon: L_μ , número bariônico B, estranheza S foram definidas para explicar porque certas reações não ocorrem.
- Os hádrons (qqq) e mésons ($q\bar{q}$) podem ser explicados como combinações de quarks e antiquarks. Quarks: partículas de spin 1/2 com carga fracionária: d,u,s,c,b,t.
- Lépton: elétron,múon e tau e os respectivos neutrinos.
- Espectro de massas bem diferente entre quarks e leptons.

Modelo das partículas elementares

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
I II III The Generations of Matter			

Podemos classificar as partículas em gerações: Primeira, segunda e terceira geração. A segunda geração é uma cópia da primeira geração: massas são diferentes.

Introdução da carga de cor

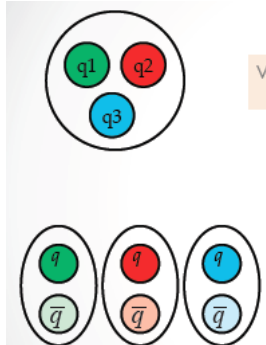
- No modelo a quarks, podemos ter estados como o Δ^{++} , Δ^{-} , Σ^{-} . Estes estados são compostos de três quarks idênticos, por exemplo $\Sigma^{-} = sss$ (Procure exemplos de outros com esta característica!)
- Este estado, o $\Sigma^{-} = sss$ são compostos de três partículas idênticas de spin $1/2$. O chamado Princípio de exclusão de Pauli, que diz que partículas idênticas não podem ocupar o mesmo estado. Para resolver este dilema, Greenberg introduziu o conceito de carga de cor: cor seria um atributo dos quarks de tal forma que $\Sigma^{-} = s\bar{s}s$, i. e. cada um dos estados s terá uma cor diferente, exigindo no mínimo três cores.

Introdução da carga de cor II

- Podemos observar a diferença entre diferentes partículas coloridas? Por exemplo, o próton (uud) : o estado $u u d$ se comporta diferente do estado $u u d$? **Nunca foi visto duas partículas diferentes com a mesma massa**: então o que chamamos de próton, deve ser uma soma de todas as cores (carga de cores): $p = u u d + u u d +$ todas as outras possíveis combinações. **Em analogia com as cores, dizemos que o próton e todas as outras partículas são estados brancos: sem cor!!!**
- Veremos depois que algumas propriedades são sensíveis a quantas cores são somadas: o número de cor é mensurável.

Introdução da carga de cor II

Mésons ($q\bar{q}$) e hádrons (qqq) são estados incolores.

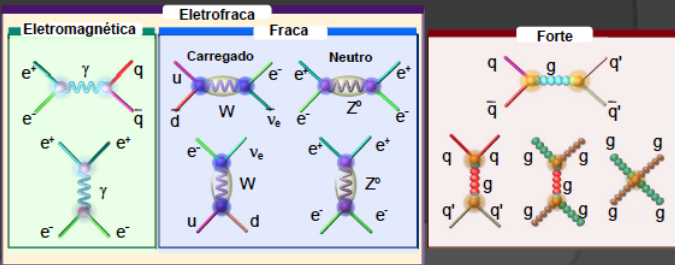


As interações fundamentais

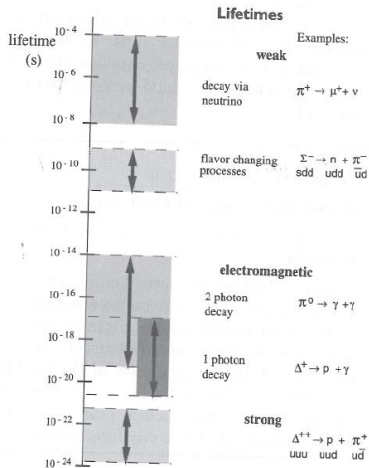
As interações conhecidas são:

Propriedades	Gravitacional	Fraca	Eletromagnética	Forte
Atua em	Massa e Energia	Sabor	Carga Elétrica	Carga de Cor
Partículas que sentem	Todas	Quarks e Léptons	Partículas Carregadas	Quarks e Glúons
Partículas Intermediárias	Gráviton (?)	W^+ Z^0 W^-	γ	Glúons
Intensidade a $\sim 10^{-17}$ m	10^{-41}	10^{-4}	1	60
Alcance	Infinito	10^{-18} m	Infinito	10^{-15} m

INTERAÇÕES



Características das Interações da natureza



Interações da natureza

- As quatro forças fundamentais envolvem a troca de uma ou mais partículas (bósons de gauge) chamadas partículas mediadoras.
- O alcance máximo das forças é ditado pelo princípio da incerteza.
- Uma partícula de massa m e energia de repouso $E=mc^2$

$$\Delta E \Delta t \sim mc^2 \Delta t > \frac{\hbar}{2}$$

- Δt representa o máximo tempo de vida da partícula que está sendo trocada (partícula virtual)
- A partícula trocada não pode exceder a velocidade c , portanto a distância máxima, o alcance da força, é $R = \Delta x = c \Delta t \sim \frac{\hbar c}{2mc^2}$.

Exemplos: Eletromagnetismo, γ : $m_\gamma = 0$ $R_\gamma = \infty$; Fraca: Bóson W:
 $M_W = 80 \text{ GeV}/c^2$, $R_W \sim 1.2 \times 10^{-18} \text{ m}$; Forte: glúons:
 $m_g = 0$ $R_g \rightarrow \infty(??)$

- Força forte confina os quarks (Não existe quark isolados): colocamos como partícula mediadora $m_\pi \sim 139 \text{ MeV}/c^2$ $R_\pi \sim 1 \text{ fm}$.

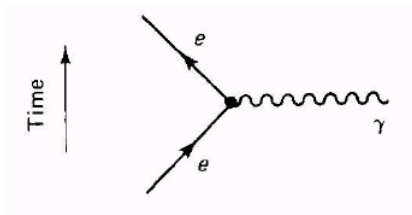
Interações da natureza

Mediadores e cargas

- Força eletromagnética \rightarrow fóton (γ : carga eletromagnética);
- Força fraca \rightarrow W^+ , W^- e Z^0 (detectados em 1983): sabor ;
- Força forte \rightarrow glúons, g : carga de cor;

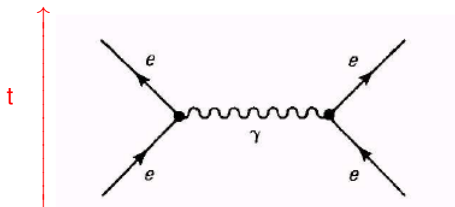
Eletrodinâmica Quântica

- Força eletromagnética : versão clássica são as equações de Maxwell,
- 1940: Versão quântica por Tomonaga, Feynman e Schwinger.
- Toda interação eletromagnética está descrita pelo diagrama elementar abaixo: um elétron com dada energia e momento inicial emite um fóton, que carrega energia e momento, e o elétron muda o seu momento e energia .



Eletrodinâmica Quântica II

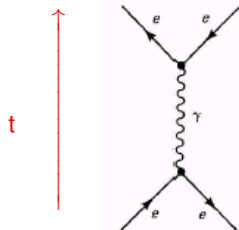
- Quaisquer outros processo podem ser feitos usando este bloco fundamental (como um pedaço de Lego) e construir diferentes processos. **No exemplo abaixo, espalhamento elétron-elétron mediado por um fóton.**



Esta representação da interação é chamado diagrama de Feynman.
Esta não é um representação espacial do evento.

Eletrodinâmica Quântica II

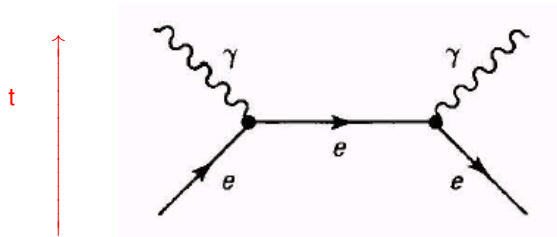
- Se girarmos a figura anterior temos



Neste diagrama temos partículas andando para o passado, interpretamos como antipartículas. Este processo é $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$. Usando **simetria de crossing**, podemos criar vários outros processos (veja aula anterior)

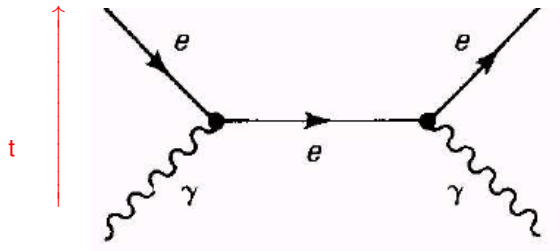
Eletrodinâmica Quântica III

$$\bullet e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$



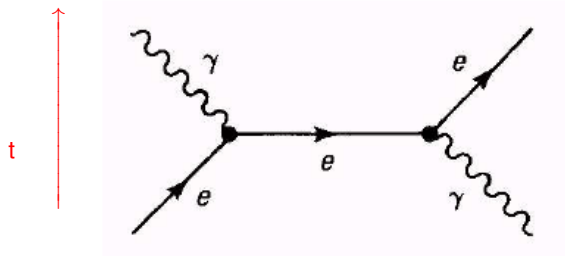
Eletrodinâmica Quântica IV

$$\bullet \gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$



Eletrodinâmica Quântica V

$$\bullet e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$

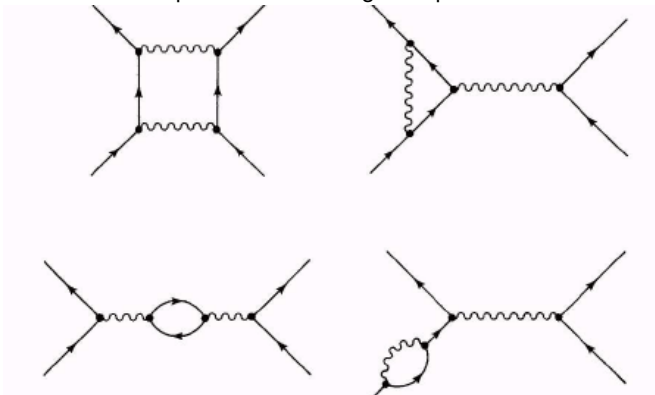


Eletrodinâmica Quântica VI

- Regras seguidas nestes diagramas: conservação de momento e energia em cada ponto do diagrama.
- Número leptônico conservado: não existe linha de elétron (ou positron) descontínua.
- No processo $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$, os elétrons são chamadas de partículas reais. Em outras palavras satisfazem a relação de energia-momento: $E^2 = (pc)^2 + m^2c^4$. Já o fóton é a partícula mediadora e é chamado de um partícula virtual, que não satisfaz : $E^2 \neq (pc)^2 + m^2c^4$.
- No processo de espalhamento Compton, qual é a partícula virtual e quais são as reais?

Eletrodinâmica Quântica VI

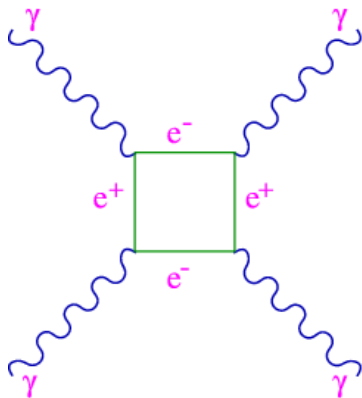
- Não existe limite de quantos diagramas primitivos você pode usar, todos os casos citados até agora usa duas vezes o diagrama primitivo. Se usassemos quatro vezes o diagrama primitivo teríamos



Eletrodinâmica Quântica VI

- Você pode desenhar uma diagrama do processo $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, usando (a) duas vezes o diagrama primitivo (b) quatro vezes o diagrama primitivo ?

Eletrodinâmica Quântica VI



Eletrodinâmica Quântica VI

- As linhas externas correspondem a partículas reais e as linhas internas correspondem a interação do processo.
- A soma de todos os diagramas de Feynman com as linhas externas fixas representam o processo físico.
- Cada vértice introduz um fator, chamado de constante de estrutura fina, $\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \sim \frac{1}{137}$. Diagramas com mais vértices tem menos ao resultado final.

Seção de choque

- O resultado de uma colisão é quantificada pela **seção de choque**. Seja um feixe colimado, de partículas mono-energéticas incidindo num material de área normal A e espessura d . O material tem n alvos, a densidade de alvos é $\mathcal{N} = \frac{n}{Ad}$. Se a espessura é pequena, não existe superposição de alvos e apenas um colisão por partícula incidente. A área efetiva de um dado alvo chamamos de σ , então a probabilidade da colisão é $P \equiv \frac{n\sigma}{A} = \mathcal{N}\sigma d$.
- A taxa da reação R é dada por $R = PN = N\mathcal{N}\sigma d$, onde N é o número de partículas incidente por segundo. Podemos expressar a **seção de choque** por

$$\sigma = \frac{R}{N\mathcal{N}n/A} = \frac{\text{reações por segundo}}{\text{part. inci/segundo}/(\text{número de alvos/cm}^2)} \quad (1)$$

$$1 \text{ mb} \equiv 10^{-27} \text{ cm}^2.$$

Seção de choque

Interação	σ (mb)	α
Forte	10	1
Fraca	10^{-11}	10^{-5}
Eletromagnética	10^{-3}	10^{-2}

Tabela : Seção de choque das diferentes interações.

Seção de choque

Unidades naturais :

$$1 \text{ V} \equiv \frac{1 \text{ J}}{\text{C}} \text{ ou } 1 \text{ J} = 1 \text{ V} \times 1 \text{ C} \frac{e}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}. \text{ Com isto } 1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

A constante de Planck, $\hbar \equiv \frac{h}{2\pi} = 1.0545 \times 10^{-27} \text{ erg/s}$ e $c = 2999792458 \text{ m s}^{-1}$.

A fórmula dimensional destas constantes é $[\hbar] = \text{ML}^2\text{T}^{-1}$ e $[c] = \text{LT}^{-1}$. No SI temos as dimensões fundamentais como $[x] = \text{L}$, $[t] = \text{T}$ e $[m] = \text{M}$, podemos usar novas dimensões fundamentais: $[\hbar] = \text{S}$, $[c] = \text{C}$ e $[m] = \text{M}$.

Então temos $L = \frac{\text{S}}{\text{CM}}$ e $T = \frac{\text{S}}{\text{MC}^2}$ em outras palavras neste **novo sistemas** temos $\hbar = c = 1$. Por exemplo

Parâmetro	SI	unidades naturais
massa	m	m
momento	mc	m
comprimento	L	$\frac{1}{m} \frac{\hbar c}{c^2}$
tempo	t	$\frac{1}{m} \frac{\hbar}{c^2}$
energia	mc ²	m

Seção de choque

Neste sistema de unidades naturais temos

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$\hbar c = 1.973 \times 10^{-11} \text{ MeV cm} = 197.328 \text{ MeV fm} = 1.973 \times 10^{-16} \text{ GeV m}$$

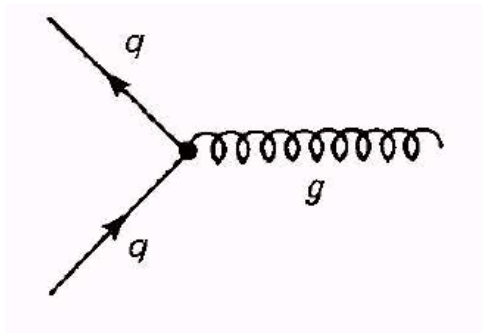
$$1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm} = 5.07 \text{ GeV}^{-1}$$

$$1 \text{ s} = 1.52 \times 10^{-24} \text{ GeV}^{-1}$$

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

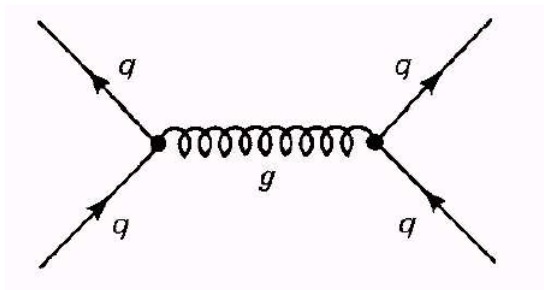
$$1 \text{ GeV}^{-2} = 0.389 \text{ mb}$$

Cromodinâmica Quântica



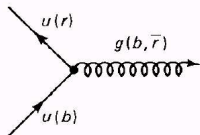
A interação dos quarks se faz pela cor.

Cromodinâmica Quântica



Espalhamento quark-quark pela cromodinâmica.

Cromodinâmica Quântica

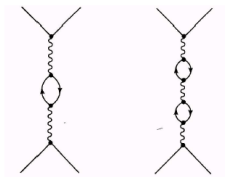


Quarks aparecem em três cores. Quarks podem mudar de cor na interação.

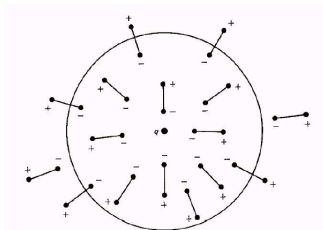


Gluons carregam cor.

Cromodinâmica Quântica



Running coupling constant: Efeitos com mais vértices alteram a carga efetiva



O vácuo é um meio dielétrico para a eletrodinâmica.