

# Partículas Elementares e Campos

O. L. G. Peres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física Gleb Wataghin  
UNICAMP

5 de agosto de 2015

# Plano do curso

## 1 Ementa da Disciplina

- A página do curso está em <http://sites.ifi.unicamp.br/orlando/ensino/fisica-de-particulas-fi140>

# Ementa de Partículas Elementares e Campos

- A página do curso está em <http://sites.ifi.unicamp.br/orlando/ensino/fisica-de-particulas-fi140>

# Aula do dia 3de agosto

## Aula do dia 3 de agosto

# Recapitulação da aula passada

- Quantidades conservadas como número leptônico do elétron:  $L_e$ , número leptônico do múon:  $L_\mu$ , 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	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>I</span> <span>II</span> <span>III</span> </div> <p>The Generations of Matter</p>			

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  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{-}$ ,  $\Sigma^{-}$ . 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.

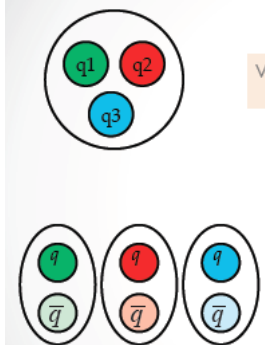


# Introdução da carga de cor II

- 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.

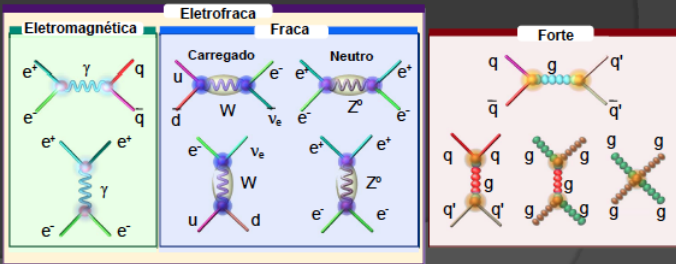


# As interações fundamentais

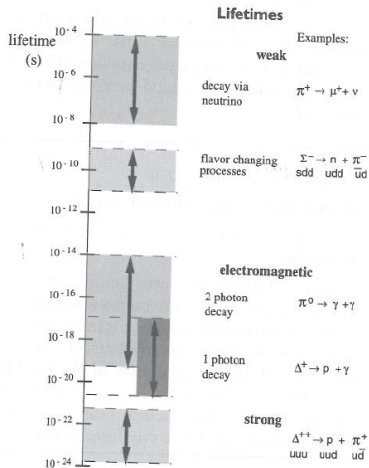
As interações conhecidas são:

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 (?)	$W^+$ $Z^0$ $W^-$	$\gamma$	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  $E=mc^2$

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

- $\Delta t$  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,  $\gamma$ :  $m_\gamma = 0$   $R_\gamma = \infty$ ; 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  $m_\pi \sim 139 \text{ MeV}/c^2$   $R_\pi \sim 1 \text{ fm}$ .

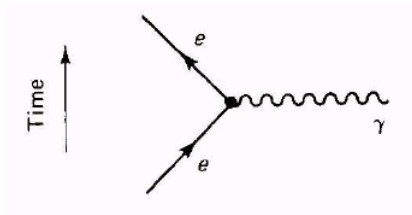
# Interações da natureza

## Mediadores e cargas

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

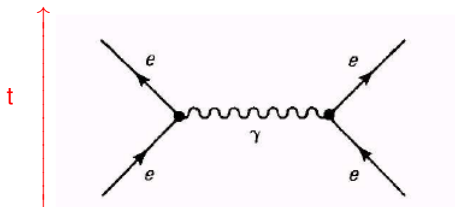
# Eletrodinâmica Quântica

- 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.**

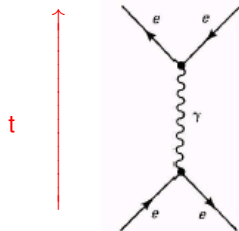


Esta representação da interação é chamado diagrama de Feynman.  
**Esta não é um representação espacial do evento.**



# Eletrodinâmica Quântica II

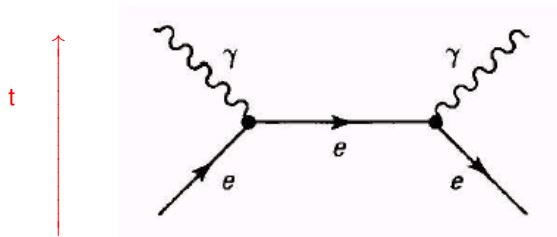
- Se girarmos a figura anterior temos



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)

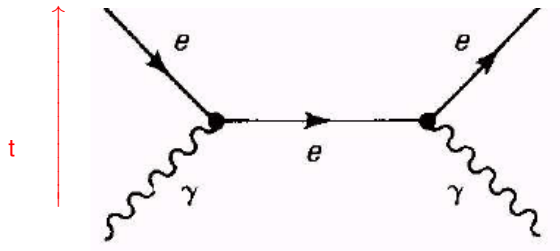
## Eletrodinâmica Quântica III

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



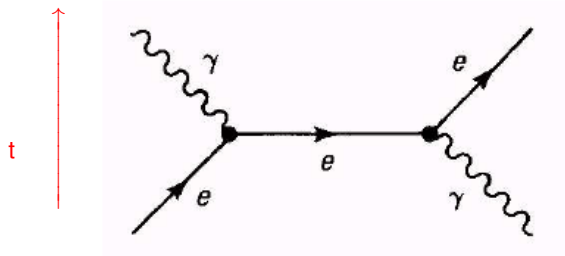
## Eletrodinâmica Quântica IV

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



## Eletrodinâmica Quântica V

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

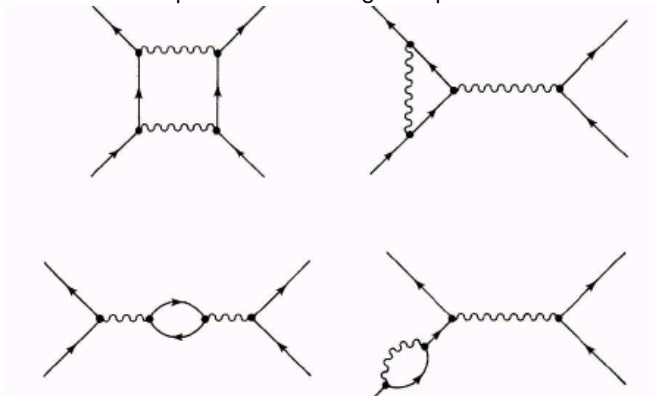


# Eletrodinâmica Quântica VI

- 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

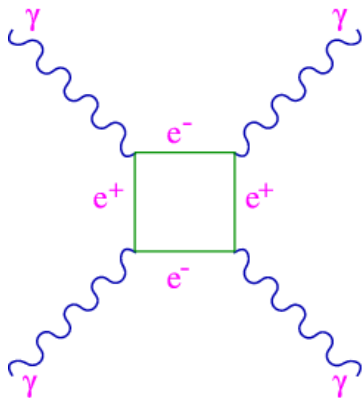
- Não existe limite de quantos diagramas primitivos você pode usar, todos os casos citados até agora usa duas vezes o diagrama primitivo. Se usassemos quatro vezes o diagrama primitivo teríamos



# 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  $\sigma$ , 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	$\sigma$ (mb)	$\alpha$
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 <sup>2</sup>	m

# Seção de choque

Neste sistema de unidades naturais temos

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

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

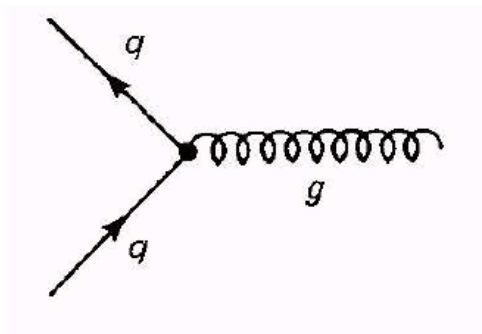
$$1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm} = 5.07 \text{ GeV}^{-1}$$

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

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

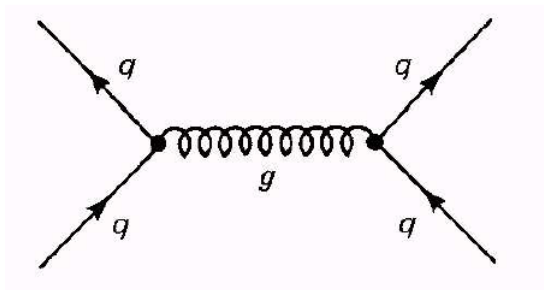
$$1 \text{ GeV}^{-2} = 0.389 \text{ mb}$$

# Cromodinâmica Quântica



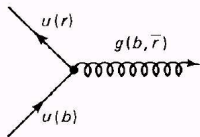
A interação dos quarks se faz pela cor.

# Cromodinâmica Quântica



Espalhamento quark-quark pela cromodinâmica.

# Cromodinâmica Quântica



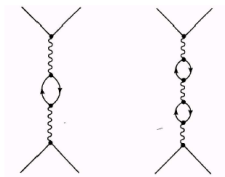
Quarks aparecem em três cores. Quarks podem mudar de cor na interação.



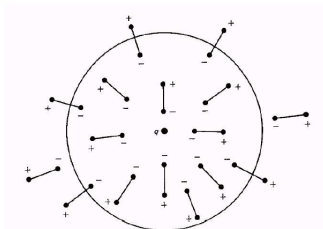
Gluons carregam cor.



# Cromodinâmica Quântica



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



O vácuo é um meio dielétrico para a eletrodinâmica.