

Estrutura da Matéria III

Física de Partículas

Prof. Wagner Carvalho
DFNAE / IF / UERJ

wpc@uerj.br
Sala 3030A

2019/2

Conceitos básicos

Partículas elementares

◆ A ideia de partícula elementar, da qual toda a matéria seria composta, surgiu na Grécia antiga, onde foi cunhado o termo átomo (a-tomo = sem divisão).

◆ São consideradas elementares, aquelas partículas sem estrutura interna (indivisíveis, portanto).

◆ À luz do conhecimento atual, pertencem a esta categoria as partículas denominadas **léptons** ($e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$), **quarks** (d, u, s, c, b, t) e **bósons de Gauge** (γ, W, Z, g), além do **bóson escalar de Higgs** (H).

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	e/p	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	e/p	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	e/p	0
Name	u up	c charm	t top	q e/p-Quant	H Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W^\pm W Boson	Eichbosonen

Conceitos básicos

Partículas elementares

- ▶ Entretanto, o termo partícula elementar ou, simplesmente, partícula, é frequentemente empregado para designar partículas subatômicas como o próton (p), o nêutron (n), os mésons pi (π) – ou píons – e outras, que hoje sabemos serem compostas de quarks.
- ▶ Nas décadas de 1950 e 1960, os experimentos com raios cósmicos e aceleradores de partículas revelaram a existência de uma miríade de novas partículas: π , K , η , Λ , Δ , Σ , Ω , Ξ ,
- ▶ Em meados da década de 60 já eram conhecidas dezenas dessas “partículas elementares”, a maioria **hádrons**.
- ▶ Hádrons são as partículas que experimentam a ação da força ou **interação forte**. Já os léptons não são afetados por esta interação fundamental.

Conceitos básicos

Partículas elementares

- ◆ No que diz respeito às suas propriedades estatísticas, os **hádrons** se manifestam em dois tipos:
 - **férmions** (spin semi-inteiro), que são denominados **bárions**
 - **bósons** (spin inteiro), que são denominados **mésons**
- ◆ O modelo de quarks, proposto em 1964 por Murray Gell-Mann e George Zweig, independentemente, permitiu organizar e explicar as propriedades dos hádrons a partir de combinações de 3 tipos de quarks e suas antipartículas correspondentes, os antiquarks. Aos quarks são atribuídos os seguintes números quânticos:

Quark	Spin (\hbar)	Nº bariônico B	Carga Q (e)
u	1/2	1/3	+2/3
d	1/2	1/3	-1/3
s	1/2	1/3	-1/3

- ◆ Os antiquarks têm os números quânticos **B** e **Q** com carga oposta aos dos quarks.

Conceitos básicos

Partículas elementares

- ▶ À luz do modelo de quarks, bárions são estados ligados de 3 quarks: qqq
- ▶ e mésons, estados ligados de 1 quark e 1 antiquark: $q\bar{q}$
- ▶ Por exemplo, o próton e o nêutron têm o seguinte conteúdo quarkônico:

$$p = uud$$

$$n = udd$$

- ▶ Já os mésons π^+ e K^- , têm a seguinte composição:

$$\pi^+ = u\bar{d}$$

$$K^- = \bar{u}s$$

Conceitos básicos

Partículas elementares

- ◆ Este modelo simples de quarks não consegue, entretanto, explicar tudo.
- ◆ O bárion Δ^{++} , um estado ressonante que decai no canal $\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p$, e com spin $J=3/2$, é obtido combinando-se 3 quarks u, todos com mesmo estado de spin:

$$\Delta^{++} = u\uparrow u\uparrow u\uparrow$$

- ◆ Entretanto, tal estado é proibido pela estatística de Fermi.
- ◆ O modelo não esclarece também porque não são observados na Natureza estados como qq , \overline{qq} , com módulo da carga elétrica 1/3, 2/3 e 4/3. Ou mesmo, quarks solitários.
- ◆ Estas limitações do modelo são resolvidas com a introdução de um novo número quântico, denominado **cor**.

Conceitos básicos

Partículas elementares

- ◆ O novo número quântico cor, pode assumir 3 valores, que representaremos como **R**, **G** e **B**, em analogia com as 3 cores básicas da teoria da luz.
- ◆ Com este número quântico adicional, o bárion Δ^{++} pode ser entendido como um estado antisimétrico, com todos os quarks em diferentes estados quânticos:

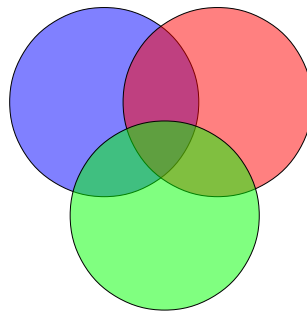
$$\Delta^{++} = u_{\uparrow R} u_{\uparrow G} u_{\uparrow B}$$

- ◆ Usando este esquema, poderíamos, por exemplo, ter vários candidatos a próton: $u_{\uparrow R} u_{\uparrow G} d_{\uparrow B}$, $u_{\uparrow R} u_{\uparrow B} d_{\uparrow B}$, $u_{\uparrow R} u_{\uparrow G} d_{\uparrow G}$, etc.
- ◆ O número quântico cor deve ser incorporado sem provocar uma proliferação de estados, já que há apenas um próton.

Conceitos básicos

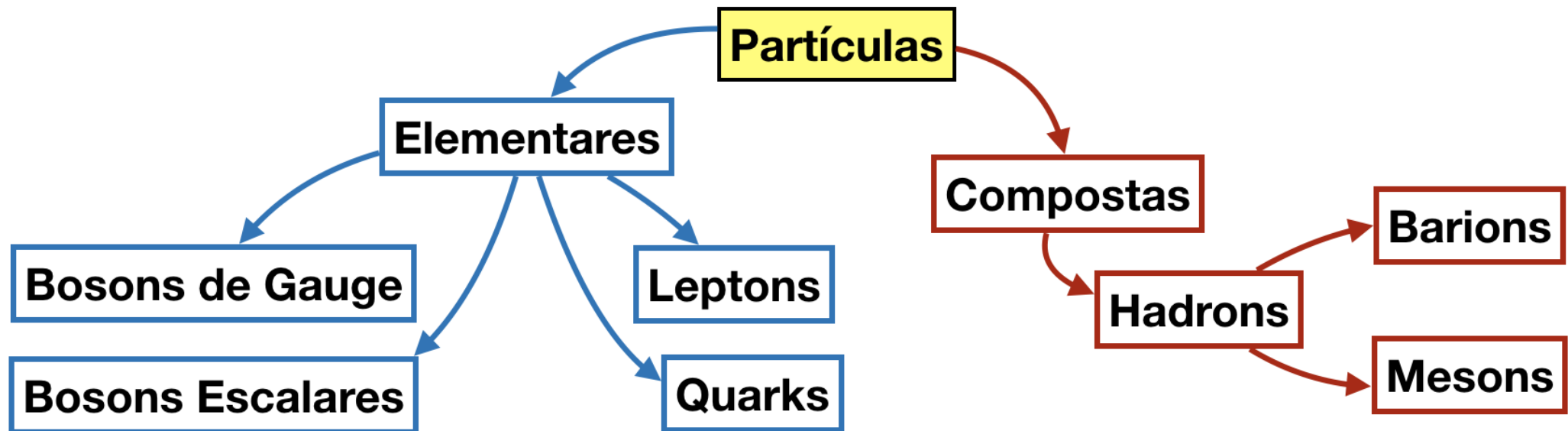
Partículas elementares

- ◆ A solução é assumir que apenas estados ligados “neutros” podem existir na Natureza. Isto é, estados com combinações RGB ou $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$, em que a carga líquida de cor é nula.
- ◆ Com estes preceitos, apenas os seguintes estados “neutros” (ou “sem cor”) de 2 ou 3 quarks/antiquarks são possíveis:
 - Igual mistura de vermelho, verde e azul: (RGB)
 - Igual mistura de ciano (antivermelho), magenta (antiverde) e amarelo (antiazul): $(\bar{R}\bar{G}\bar{B})$
 - Igual mistura de uma cor e sua cor complementar $(R\bar{R}, G\bar{G}, B\bar{B})$



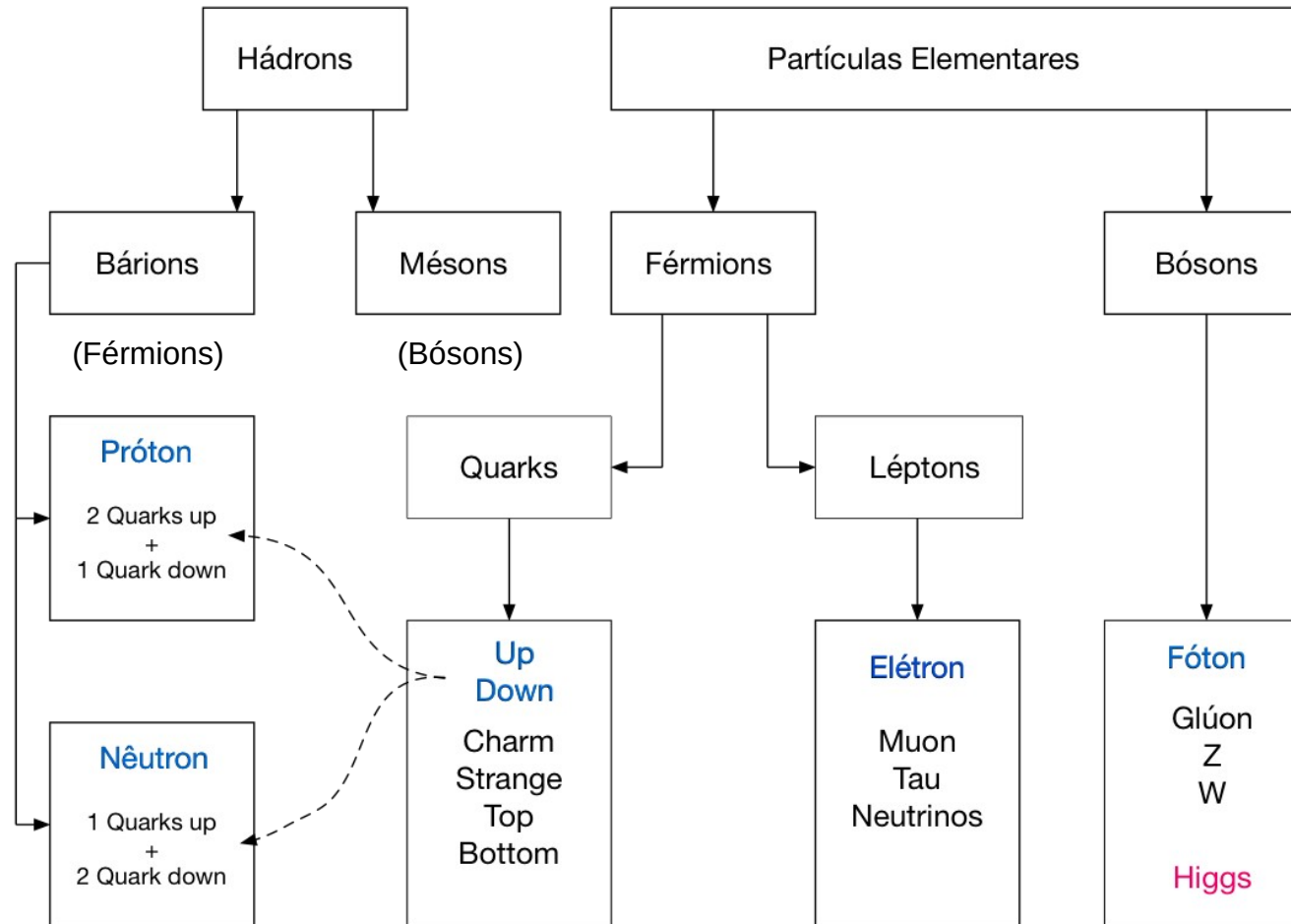
Conceitos básicos

Esquemas de classificação das partículas



Conceitos básicos

Esquemas de classificação das partículas



Conceitos básicos

Unidades de medida

- ◆ As unidades de medida de espaço, massa e energia comumente utilizadas para tratar fenômenos do mundo macroscópico são inapropriadas para a descrição dos fenômenos na escala atômica e subatômica.
- ◆ Por exemplo, a massa de um próton equivale a aproximadamente **$1,67 \times 10^{-27}$ kg** na unidade do Sistema Internacional de Medidas (SI). Da mesma forma, o equivalente em energia de sua massa, que é obtido via a famosa fórmula $E=mc^2$ da Relatividade Restrita de Einstein, corresponde a **$1,51 \times 10^{-10}$ J**.
- ◆ Note-se os expoentes 10^{-27} e 10^{-10} que tornam árduos os cálculos.
- ◆ Assim, no universo peculiar da Física Nuclear e da Física de Partículas são usualmente empregadas outras unidades de medida, mais apropriadas para essas escalas.

Conceitos básicos

Unidades de medida

- ◆ **Comprimento** – Duas unidades se destacam para se medir a dimensão espacial, o **angstrom (Å)** e o **fermi (f)**:

$$1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (\text{escala de tamanho de um átomo})$$

$$1 \text{ f} = 1 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (\text{escala de tamanho de um núcleon – próton ou nêutron})$$

Além dessas, são utilizadas com frequência submúltiplos do metro como o **micrômetro (μm)** e o **nanômetro (nm)**.

- ◆ **Energia** – O **eletronvolt** (e seus múltiplos) é a unidade de medida empregada no mundo subatômico. Definido como a energia adquirida por uma carga elétrica de módulo igual à do elétron (carga elementar e) submetida à uma diferença de potencial elétrico de 1 V, apresenta a seguinte relação de equivalência com a unidade do SI:

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Conceitos básicos

Unidades de medida

- ◆ **Massa** – Na Física Nuclear e, principalmente, na Física de Partículas é comum utilizar-se um sistema de unidades em que $c=\hbar=1$. Neste sistema, a massa das partículas é expressa em termos dos múltiplos do eV: **keV**, **MeV** ou **GeV**. É frequente também expressar a massa em **keV/c²**, **MeV/c²** ou **GeV/c²**.
- ◆ **Momentum** – Similarmente à massa, o momentum pode ser expresso nas unidades **keV**, **MeV** ou **GeV**, usando-se o sistema de unidades em que $c=\hbar=1$, ou em **keV/c**, **MeV/c** ou **GeV/c**.

Conceitos básicos

As interações fundamentais

◆ Forte

Responsável por manter os quarks ligados em estados hadrônicos, como o próton e o nêutron. Também responsável pela coesão dos núcleos atômicos, formados por estes nucleons.

Partícula mediadora: glúon.

Alcance: $\sim 10^{-15}$ m.

◆ Eletromagnética

Responsável por essencialmente todos os fenômenos além da escala nuclear, como, por exemplo, os estados ligados de elétrons e núcleos em átomos e moléculas e as forças intermoleculares.

Partícula mediadora: fóton.

Alcance: ∞ .

Conceitos básicos

As interações fundamentais

◆ Fraca

Responsável, dentre outros, pelo processo de transmutação nuclear chamado decaimento- β , no qual ocorre a emissão de um elétron e um neutrino por um núcleo radioativo.

Partícula mediadora: bósons W^\pm e Z^0 .

Alcance: $\sim 10^{-18}$ m.

◆ Gravitacional

Responsável pela atração entre as partículas, agindo sobre todas elas. Não tem papel relevante nas reações entre partículas por ser extremamente fraca comparada às demais interações, porém é dominante em grandes escalas no Universo.

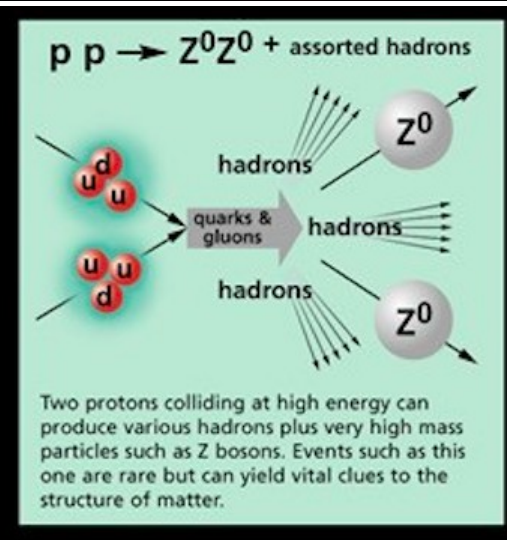
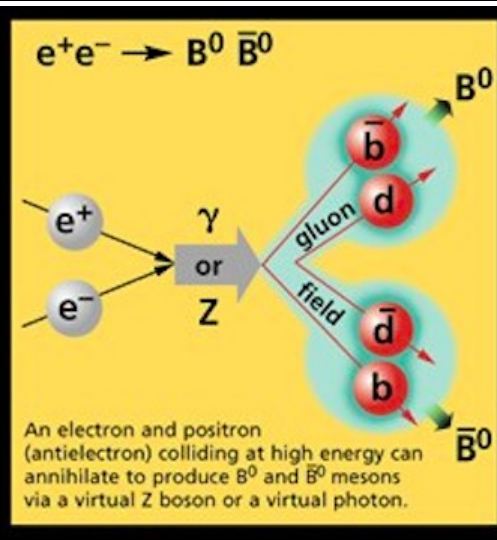
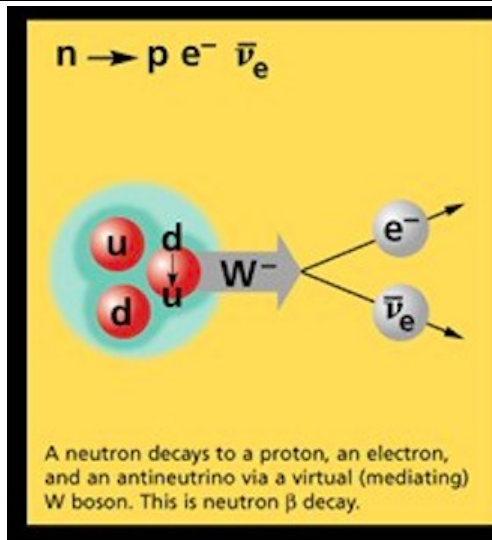
Partícula mediadora: gráviton (hipotética, ainda não detectada).

Alcance: ∞ .

Conceitos básicos

As interações fundamentais

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	

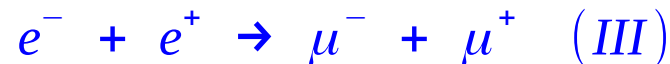
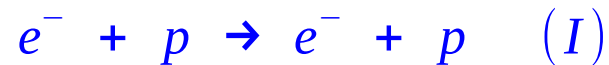


Conceitos básicos

Interações entre partículas

- ◆ Em analogia com a Química, as interações entre partículas elementares e/ou hádrons são representadas por equações em que as diversas partículas são representadas por símbolos.

- ◆ Exemplos:



- ◆ A reação I é chamada de **espalhamento elástico**, pois as partículas do estado final são exatamente as mesmas do estado inicial.
- ◆ Os processos II e III são exemplos de **reações inelásticas**.

Conceitos básicos

Leis de conservação

- ◆ Leis de conservação são familiares à Física e, geralmente, estão associadas a simetrias da Natureza. Por exemplo, a conservação do momento linear está associada à simetria ou invariância de um sistema com relação a translações.
- ◆ Além das leis de conservação “clássicas”, como momento e energia, outras surgem nos processos envolvendo partículas elementares. As principais são:
 - Conservação da **carga elétrica**
 - Conservação do **número bariônico**
 - Conservação do **número leptônico**
- ◆ Estas grandezas são conservadas em toda reação, independentemente da interação envolvida no processo.
- ◆ Há, por outro lado, grandezas que não são conservadas em reações envolvendo a interação fraca. Exemplos são a paridade e conjugação de carga. Mas, não as abordaremos aqui.

Conceitos básicos

Leis de conservação

- ◆ Conservação da carga elétrica:

$$e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+ \quad (\textit{permitida})$$

$$p + n \rightarrow p + p \quad (\textit{proibida})$$

- ◆ Número bariônico é um número quântico atribuído a bárions (B=+1) e antibárions (B=-1). A mésons e léptons, atribui-se B=0. Pelo princípio de conservação deste número quântico, têm-se:

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p \quad (\textit{permitida})$$

$$n \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\textit{proibida})$$

Conceitos básicos

Leis de conservação

- ▶ Número leptônico é um número quântico atribuído a léptons ($L=+1$) e antiléptons ($L=-1$). Há um número leptônico específico para cada família de léptons, L_e , L_μ e L_τ , sendo que um lépton (antilépton) de uma dada família tem o número leptônico desta família igual a 1 (-1) e o das demais famílias igual a 0. Como exemplo, o μ^+ tem $L_e=0$, $L_\mu=-1$ e $L_\tau=0$. Aos hádrons, atribui-se $L=0$. Pelo princípio de conservação deste número quântico, têm-se:

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p \quad (\textit{permitida})$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu \quad (\textit{proibida})$$

$$e^- + e^+ \rightarrow \tau + \bar{\tau} \quad (\textit{permitida})$$

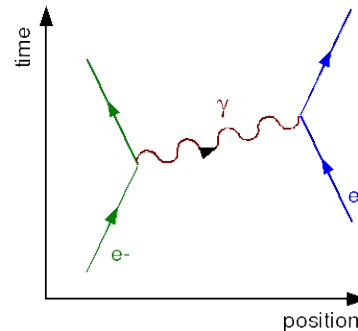
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (\textit{permitida})$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\tau \quad (\textit{proibida})$$

Conceitos básicos

Visão clássica × quântica das interações

- ◆ Classicamente, a interação à distância entre duas partículas é descrita por meio de um potencial ou campo criado por uma delas e que age sobre a outra.
- ◆ Na teoria quântica, a interação à distância é interpretada como uma **interação de troca**, por meio da qual um **quantum** (campo) é trocado.



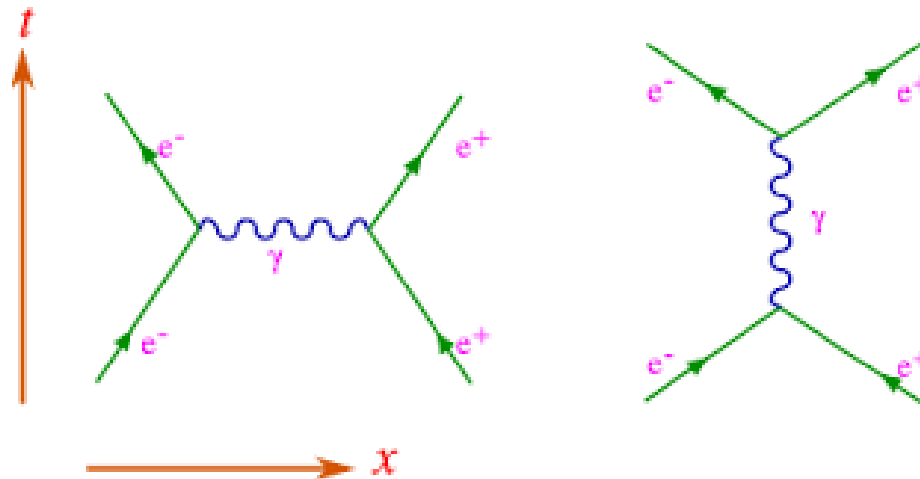
- ◆ Neste processo de troca, em que o *quantum* carrega momento e energia, a conservação de energia-momento pode ser violada por uma quantidade ΔE em uma escala de tempo Δt determinada pelo princípio da incerteza. Este *quantum* é classificado como **virtual**.

$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar$$

Conceitos básicos

Diagramas de Feynman

- ◆ Na década de 1940, Richard Feynman desenvolveu uma técnica pictorial para representar as interações entre partículas e auxiliar nos cálculos relacionados.
- ◆ Feynman tomou como base as **interações eletromagnéticas** envolvendo elétrons, pósitrons e outras partículas carregadas e o **fóton** como **bóson mediador da interação**.
- ◆ Exemplos de diagramas de Feynman são dados abaixo.



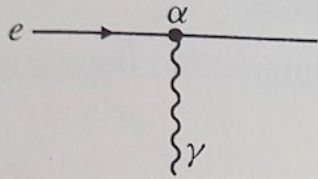
Conceitos básicos

Diagramas de Feynman - regras

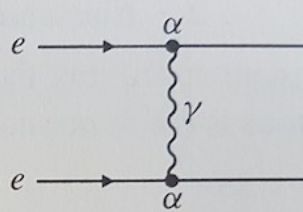
- ◆ Linhas sólidas representam **férmions**.
- ◆ Linhas onduladas, aneladas (como uma mola) ou tracejadas representam **bósons**.
- ◆ Setas sobre as linhas indicam o **sentido do tempo**. Uma seta indicando o movimento de uma partícula para trás (reverso no tempo) é equivalente à sua antipartícula movendo-se no sentido positivo no tempo.
- ◆ Linhas representando férmions e bósons conectam-se em **vértices**, nos quais carga, energia e momento são conservados. A **intensidade da interação** neste vértice é determinada pela **constante de acoplamento**.
- ◆ Linhas entrando e saindo dos limites do diagrama representam **partículas livres** (reais) enquanto **linhas que conectam vértices** representam **partículas virtuais**.

Conceitos básicos

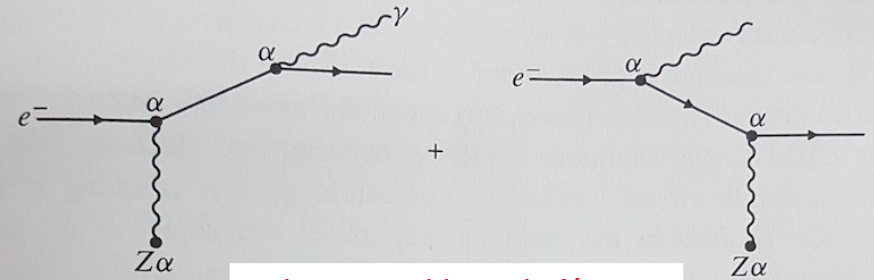
Diagramas de Feynman - regras



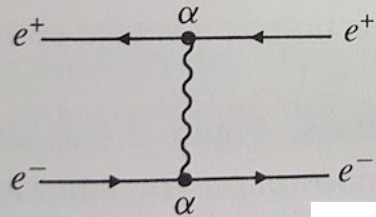
vértice básico elétron-fóton



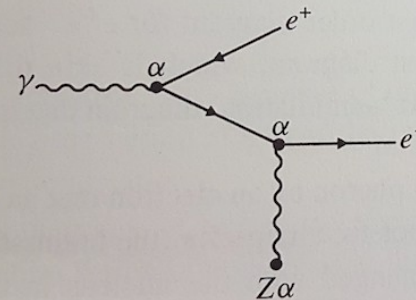
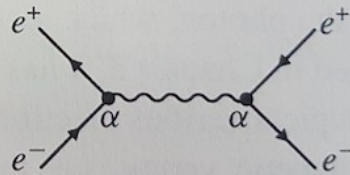
elétron-elétron via troca de fóton



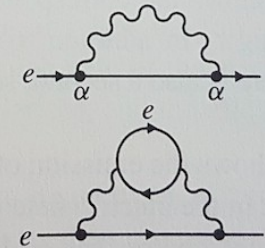
bremsstrahlung de fóton



espalhamento elétron-pósitron



produção de par elétron-pósitron



termo de autointeração

Tópicos Extra

A teoria de Yukawa para a troca de campos

- ◆ Em 1935, Hideki Yukawa buscava descrever a interação de curto alcance entre prótons e nêutrons, que seria responsável por mantê-los coesos no núcleo atômico.
- ◆ Yukawa postulou, então, que tal interação seria devida à troca de uma partícula massiva, o *quantum* da interação.
- ◆ Partindo da equação de Klein-Gordon,

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$$

assumindo um potencial estático e usando coordenadas esféricas, a equação anterior se torna

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

para $r > 0$ e uma fonte pontual em $r = 0$.

Tópicos Extra

A teoria de Yukawa para a troca de campos

- ▶ A solução da equação anterior é:

$$U(r) = \frac{g_0}{4\pi r} e^{-r/R}$$

com

$$R = \frac{\hbar}{mc}$$

- ▶ Fazendo analogia com o eletromagnetismo, a solução da equação

$$\nabla^2 U(r) = 0$$

é:

$$U(r) = \frac{Q}{4\pi r}$$

para $r > 0$, sendo Q , a carga na origem $r = 0$.

- ▶ Desta forma, g_0 pode ser interpretada como a carga nuclear forte.

Tópicos Extra

A teoria de Yukawa para a troca de campos

- ◆ Assumindo um alcance $R \approx 1 \text{ F} = 10^{-15} \text{ m}$ para a força nuclear, a hipótese de Yukawa prediz um *quantum* de spin 0 com massa:

$$mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \sim 100 \text{ MeV}$$

- ◆ O pión, ou *méson* π , descoberto em raios cósmicos em 1947 pelo grupo de Bristol (Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell), usando emulsões fotográficas, tem massa 140 MeV, spin 0 e interage fortemente.
- ◆ Tem, portanto, as propriedades básicas do *quantum* predito por Yukawa.

Seção de choque

- ◆ Usada para caracterizar a colisão ou interação entre duas partículas ou estados mais complexos, como núcleos ou átomos.
- ◆ A seção de choque é uma quantidade que exprime a probabilidade de que uma reação ocorra.
- ◆ Pode ser calculada quando as interações básicas entre as partículas interagentes são conhecidas.
- ◆ Usualmente, representada pelo símbolo σ .

Tópicos Extra

Seção de choque

- ▶ A seção de choque é definida em função dos seguintes parâmetros:

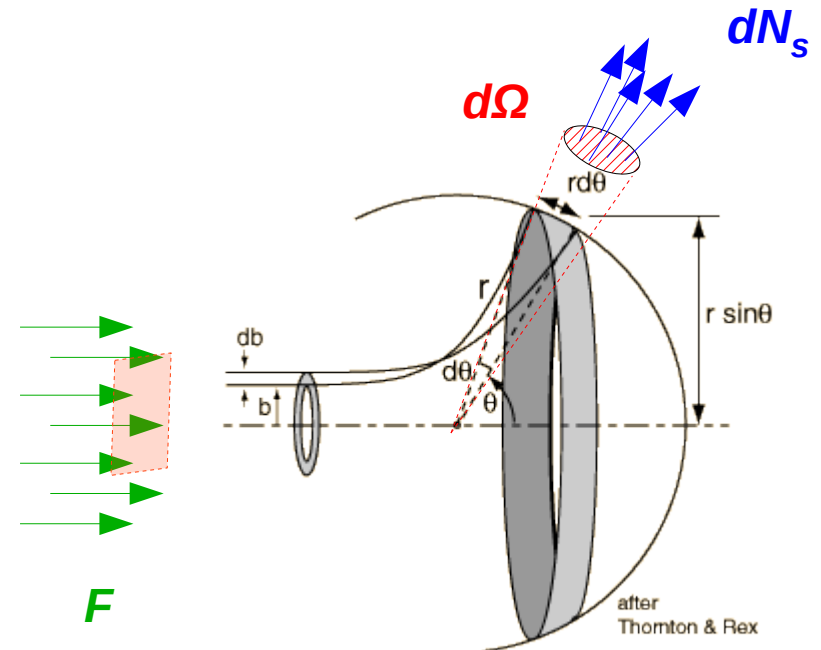
F – Fluxo de partículas incidentes por unidade de área e por unidade de tempo sobre um alvo.

$d\Omega$ – Intervalo de ângulo sólido.

dN_s – Número médio de partículas espalhadas por unidade de tempo.

- ▶ A figura ao lado ilustra o conceito de seção de choque diferencial para um alvo pontual, cuja expressão formal é dada logo abaixo.

- ▶ A seção de choque tem dimensão de área.



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega}$$