

# Introdução à Física de Partículas

Prof. Wagner Carvalho  
DFNAE / IF / UERJ

[wpc@uerj.br](mailto:wpc@uerj.br)  
Sala 3030A

**2019/1**

# Programa

- I. **Conceitos básicos**
- II. Detectores e aceleradores de partículas
- III. Princípios de invariância e leis de conservação
- IV. Interações eletromagnéticas
- V. Interações fracas
- VI. Interações fortes

# Cronograma

	Fev	Mar				Abr				
Ter	26	5	12	19	26	2	9	16	23	30
Qui	28	7	14	21	28	4	11	18	25	1

	Mai					Jun				Jul
Ter	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2
Qui	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4



Conceitos Básicos



Interações Eletromagnéticas



Detectores e Aceleradores



Interações Fracas



Princípios de Invariância e Leis de Conservação



Interações Fortes

# Bibliografia de Apoio

## Disponíveis na biblioteca da Física (CTC/D):

- ◆ **Aitchison, Ian J. R.**, *Gauge theories in particle physics, volume 1 : a practical introduction: From relativistic quantum mechanics to QED (2013)*. Exemplares: 1.
- ◆ **Aitchison, Ian J. R.**, *Gauge theories in particle physics, volume 2 : a practical introduction: From relativistic quantum mechanics to QED (2013)*. Exemplares: 2.
- ◆ **Griffiths, David J.**, *Introduction to elementary particles (2008)*. Exemplares: 2.
- ◆ **Griffiths, David J.**, *Introduction to elementary particles (1987)*. Exemplares: 2.
- ◆ **Perkins, Donald H.**, *Introduction to High Energy Physics (2000)*. Exemplares: 1.
- ◆ **Perkins, Donald H.**, *Introduction to High Energy Physics (1987)*. Exemplares: 3.



# I - 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 ( $\pi$ ) – 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:  $\pi$ ,  $K$ ,  $\eta$ ,  $\Lambda$ ,  $\Delta$ ,  $\Sigma$ ,  $\Omega$ ,  $\Xi$ , ... .
- ▶ 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.

# I - 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>B</b>	Carga <b>Q</b> (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.

# I - 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  $\pi^+$  e  $K^-$ , têm a seguinte composição:

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

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

# I - Conceitos básicos

## Partículas elementares

- ◆ Este modelo simples de quarks não consegue, entretanto, explicar tudo.
- ◆ O bárion  $\Delta^{++}$ , 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**.

# I - 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  $\Delta^{++}$  pode ser entendido como um estado antisimétrico, com todos os quarks em diferentes estados quânticos:

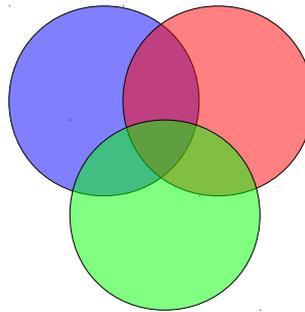
$$\Delta^{++} = u_{\uparrow R} u_{\uparrow G} u_{\uparrow B}$$

- ◆ 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.

# I - Conceitos básicos

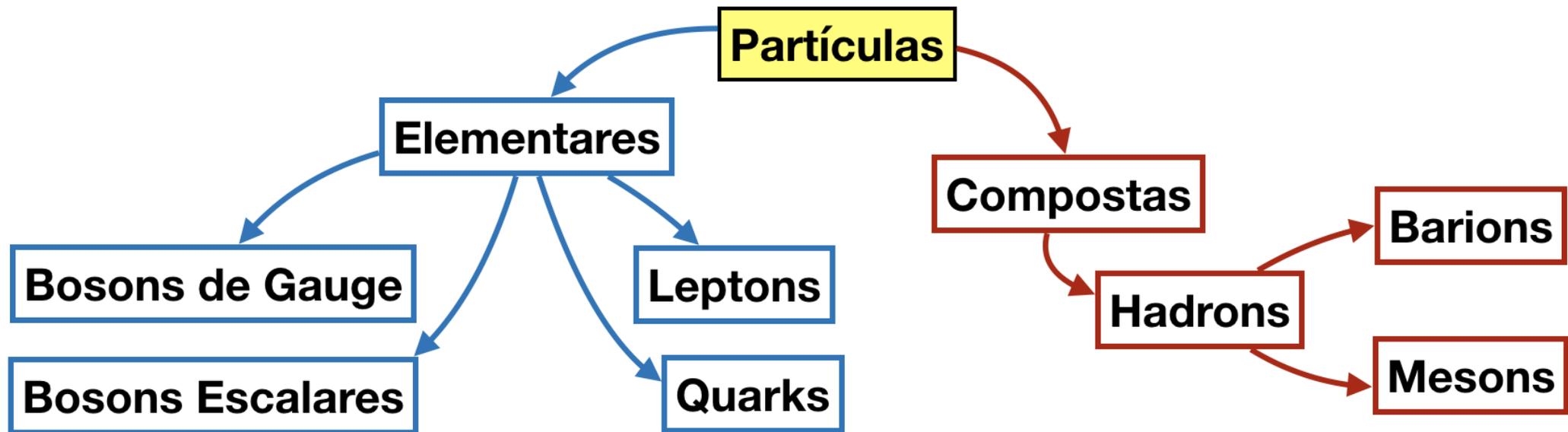
## Partículas elementares

- ◆ 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  $(R\bar{R}$ ,  $G\bar{G}$ ,  $B\bar{B})$



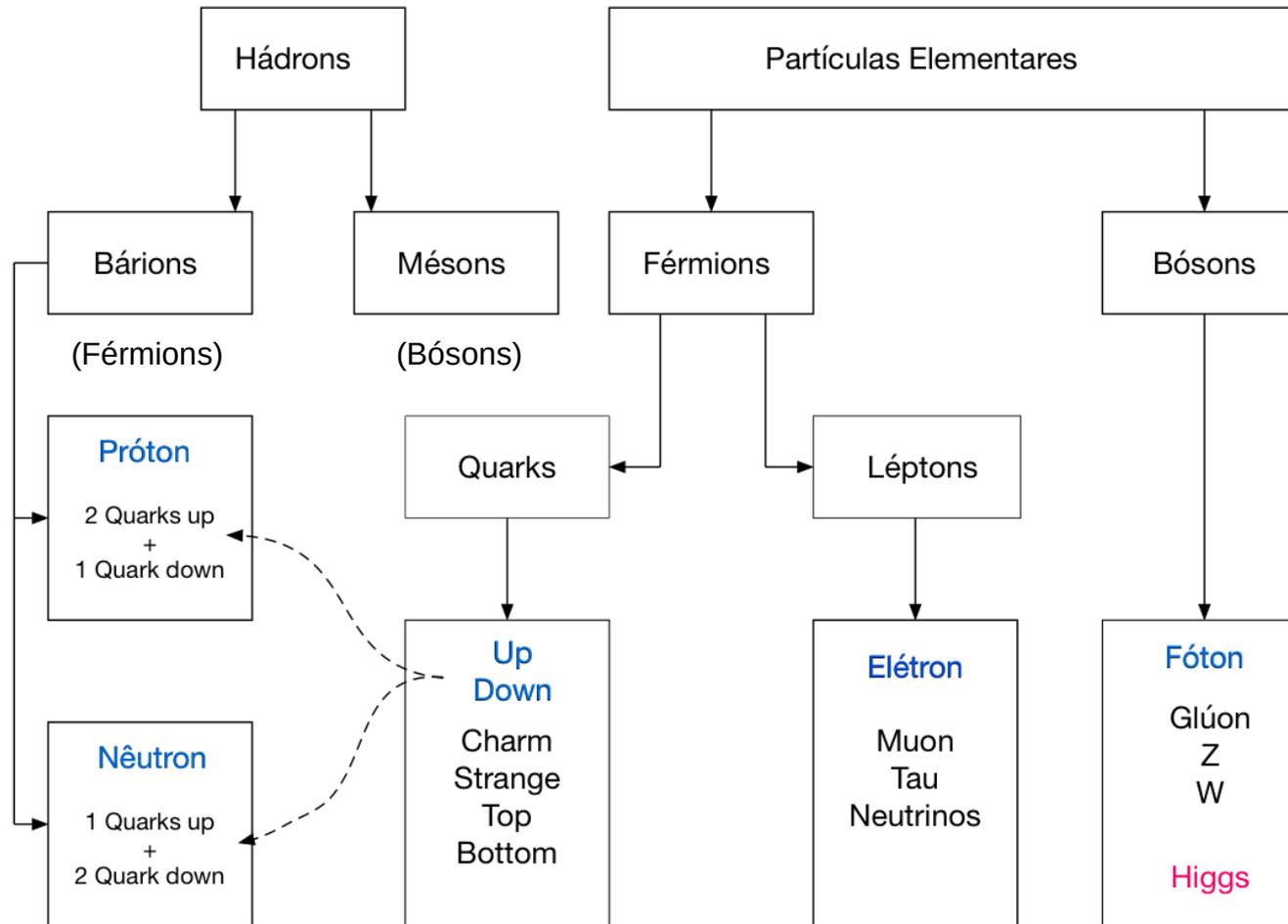
# I - Conceitos básicos

## Esquemas de classificação das partículas



# I - Conceitos básicos

## Esquemas de classificação das partículas



# I - 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.

# I - 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:

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

# I - 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/c<sup>2</sup>**, **MeV/c<sup>2</sup>** ou **GeV/c<sup>2</sup>**.
- ◆ **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**.

# I - Conceitos básicos

## Relações relativísticas

- ◆ Os processos tratados em física de partículas, quase sempre envolvem partículas com velocidades próximas à velocidade da luz ( $v \sim c$ ).
- ◆ Consequentemente, o tratamento relativístico dos fenômenos é indispensável e qualquer teoria para descrevê-los deve obedecer uma simetria fundamental: a invariância sob transformações relativísticas.
- ◆ As equações devem ter a mesma forma em qualquer referencial.
- ◆ Para assegurar que a teoria seja invariante sob transformações relativísticas, suas equações devem ser formuladas em termos de quadri-vetores.

# I - Conceitos básicos

## Relações relativísticas

- ▶ Uma relação relativística básica é a que envolve o vetor momento  $\mathbf{p}$  e a energia  $E$  de uma partícula:

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

ou, em unidades com  $c = 1$ :

$$E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$$

sendo  $p = (E, \mathbf{p})$  o quadrivetor momento-energia.

- ▶ Em um quadrivetor  $(ct, \mathbf{x}) \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv x^\mu$

a quantidade básica  $c^2 t^2 - \mathbf{x}^2$  é invariante sob transformações de Lorentz, as quais relacionam dois referenciais que se movem com velocidade relativa uniforme.

# I - Conceitos básicos

## Relações relativísticas

- ◆ Produto escalar de dois quadrivetores:

$$\begin{aligned}A^\mu &\equiv (A^0, \mathbf{A}) \\ B^\mu &\equiv (B^0, \mathbf{B}) \\ A \cdot B &\equiv A^0 B^0 - \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}\end{aligned}$$

- ◆ Devido ao sinal negativo no segundo termo, é conveniente introduzir um outro vetor

$$A_\mu \equiv (A^0, -\mathbf{A})$$

de tal forma que o produto escalar torna-se:

$$A \cdot B = A_\mu B^\mu = A^\mu B_\mu = g_{\mu\nu} A^\mu B^\nu = g^{\mu\nu} A_\mu B_\nu$$

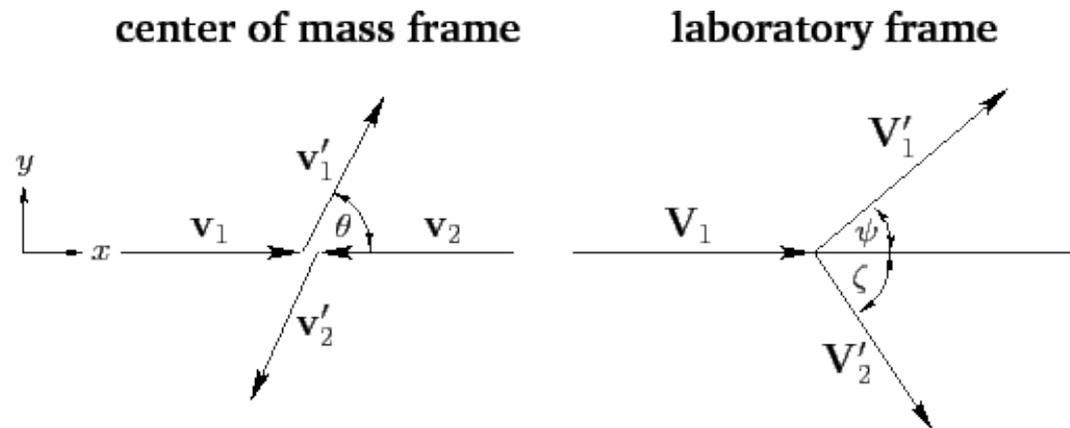
- ◆ sendo  $g_{\mu\nu}$  o tensor métrico:

$$g_{00} = 1 \quad , \quad g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1 \quad , \quad g_{\mu\nu} = 0 \quad \text{para} \quad \mu \neq \nu$$

# I - Conceitos básicos

## Relações relativísticas – Sistemas de referência

- ▶ A colisão entre duas partículas é um problema fundamental na física de partículas e há dois sistemas de referência naturalmente relevantes para sua abordagem.



# I - Conceitos básicos

## Relações relativísticas – Sistemas de referência

- ▶ **Sistema do Centro de Massa (CM):** Neste sistema o momento linear das partículas que colidem têm a mesma direção e o mesmo valor em módulo mas sentido contrário um ao outro.
- ▶ Define-se o invariante de Lorentz  $s$  como:

$$s = (p_1 + p_2)_\mu (p_1 + p_2)^\mu \equiv (p_1 + p_2)^2 = E_{CM}^2$$

- ▶ **Sistema do Laboratório (Lab):** Neste sistema, uma das partículas se encontra em repouso e a outra em movimento.
- ▶ No caso de duas partículas de mesma massa  $m$ , calculando-se o invariante  $s$  neste referencial, pode-se facilmente obter a energia  $E_{lab}$  da partícula em movimento que corresponde à mesma energia  $E_{CM}$  de centro de massa:

$$E_{Lab} = \frac{E_{CM}^2}{2m} - m$$

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Klein-Gordon

- ▶ Partindo da relação relativística para energia e momento:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

e substituindo os operadores  $E$  e  $p$ :

$$E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad , \quad \vec{p} = -i\hbar \nabla = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{r}}$$

obtém-se a [equação de Klein-Gordon](#):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = (\nabla^2 - m^2) \psi$$

fazendo-se  $\hbar = c = 1$ . Sua solução tem a forma:

$$\psi(\vec{r}, t) = N e^{i(\vec{p} \cdot \vec{r} - Et)}$$

A equação de onda de Klein-Gordon é apropriada para descrever bósons de spin 0 (escalares).

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Klein-Gordon

- ▶ A equação de Klein-Gordon tem derivadas de segunda ordem nas coordenadas espaciais e temporal, diferentemente da **equação não-relativística de Schrödinger**, que tem derivada de primeira ordem temporal e de segunda ordem espacial.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \nabla^2 \psi$$

- ▶ Devido a essas propriedades nas derivadas, a equação de Schrödinger não é apropriada para a descrição de processos envolvendo partículas a altas energias.
- ▶ Qualquer equação que vise descrever tais processos deve ser **relativisticamente invariante**, com derivadas espaciais e temporal aparecendo em mesma ordem, como ocorre na equação de Klein-Gordon.

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Klein-Gordon

- ▶ Uma característica notável da equação de Klein-Gordon é a existência de soluções com energia negativa. Para cada solução com momentum  $\mathbf{p}$  e energia  $E$  há também uma solução com momentum  $-\mathbf{p}$  e energia negativa  $-E$ .

$$\psi(\vec{r}, t) = N e^{i(-\vec{p}\cdot\vec{r} + Et)}$$

- ▶ A existência de soluções negativas é uma consequência direta da natureza quadrática da relação massa-energia e não pode ser evitada em uma teoria relativística.

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Dirac

- ◆ No final da década de 1920, Paul Dirac se ocupou do problema de formular uma teoria simétrica em coordenadas de espaço e tempo e que fosse de primeira ordem em ambas as derivadas.
- ◆ Dirac analisou uma equação com a forma:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[ -i\hbar c \left( \alpha_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + \alpha_y \frac{\partial \psi}{\partial y} + \alpha_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \beta mc^2 \right] \psi = (-i\hbar c \vec{\alpha} \cdot \nabla + \beta mc^2) \psi$$

- ◆ Os coeficientes  $\alpha_i$  e  $\beta$  foram determinados exigindo-se que as soluções desta equação fossem também soluções da equação de Klein-Gordon, implicando nas seguintes condições:

$$\begin{aligned} \alpha_i^2 &= 1, \beta^2 = 1 \\ \alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i &= 0 \\ \alpha_i \beta + \beta \alpha_i &= 0 \end{aligned}$$

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Dirac

- ◆ Claramente, os coeficientes  $\alpha_i$  e  $\beta$  não podem ser números, por suas propriedades de anticomutação.
- ◆ A hipótese mais simples, é que sejam matrizes. Matrizes  $4 \times 4$  são as de menor dimensão a satisfazer todas as condições. Uma das representações destas matrizes é a seguinte:

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ \vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \beta = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}$$

- ◆  $I$  é a matriz unitária  $2 \times 2$  e  $\sigma$  são as matrizes de Pauli:

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Dirac

- ▶ Portanto, a equação de Dirac é uma equação matricial e as suas soluções  $\psi$  são vetores coluna com quatro componentes, chamados **espinores**:

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix}$$

- ▶ As quatro componentes do espinor permitem representar os dois estados de spin de partículas de spin 1/2, como o elétron, e também sua **antipartícula**.

# I - Conceitos básicos

## Equações de onda relativísticas: a equação de Dirac

- ◆ No caso particular de uma partícula sem massa, a equação de Dirac se reduz às equações de Weyl (usando  $c = \hbar = 1$ ) :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \pm \left( \sigma_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + \sigma_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} + \sigma_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \pm \vec{\sigma} \cdot \nabla \psi$$

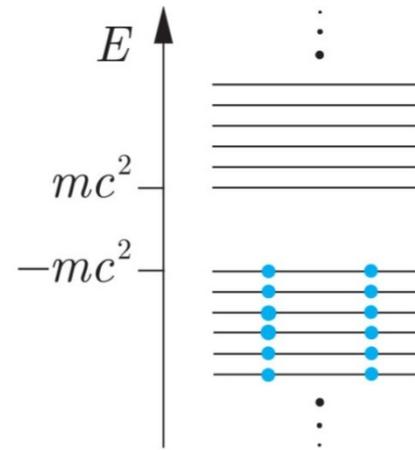
- ◆ Estas equações podem ser reescritas usando os operadores energia e momento (ver slide 22) na forma:

$$\begin{aligned} E \chi &= -\vec{\sigma} \cdot \vec{p} \chi \\ E \phi &= +\vec{\sigma} \cdot \vec{p} \phi \end{aligned}$$

- ◆  $\chi$  e  $\phi$  são espinores de dimensão 2, representando duas soluções separadas das equações de Weyl. Portanto, estas equações têm ao todo 4 soluções, correspondentes a partícula e antipartícula com dois estados de spin cada.

# I - Conceitos básicos

## Teoria de buracos e o pósitron

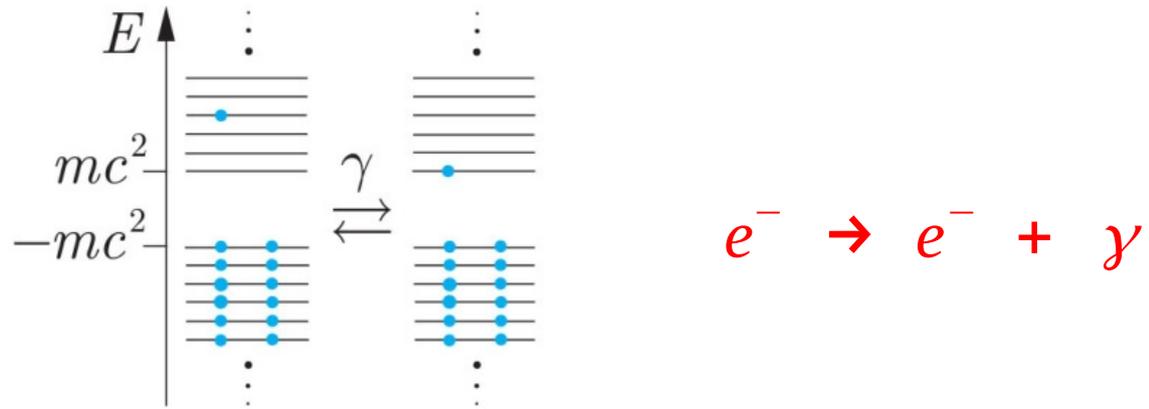


**Figure 1.1** Dirac picture of the vacuum. The sea of negative energy states is totally occupied with two electrons in each level, one with spin 'up' and one with spin 'down'. The positive energy states are all unoccupied.

*Particle Physics*, Fourth Edition. B.R. Martin and G. Shaw.  
© 2017 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd.  
Companion website: [www.wiley.com/go/martin/particlephysics4](http://www.wiley.com/go/martin/particlephysics4)

# I - Conceitos básicos

## Teoria de buracos e o pósitron

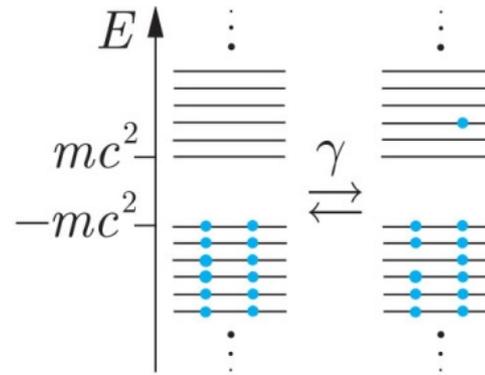


**Figure 1.3** Hole theory representation of the processes  $e^- \leftrightarrow e^- + \gamma$ .

*Particle Physics*, Fourth Edition. B.R. Martin and G. Shaw.  
© 2017 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd.  
Companion website: [www.wiley.com/go/martin/particlephysics4](http://www.wiley.com/go/martin/particlephysics4)

# I - Conceitos básicos

## Teoria de buracos e o pósitron



$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+}$$

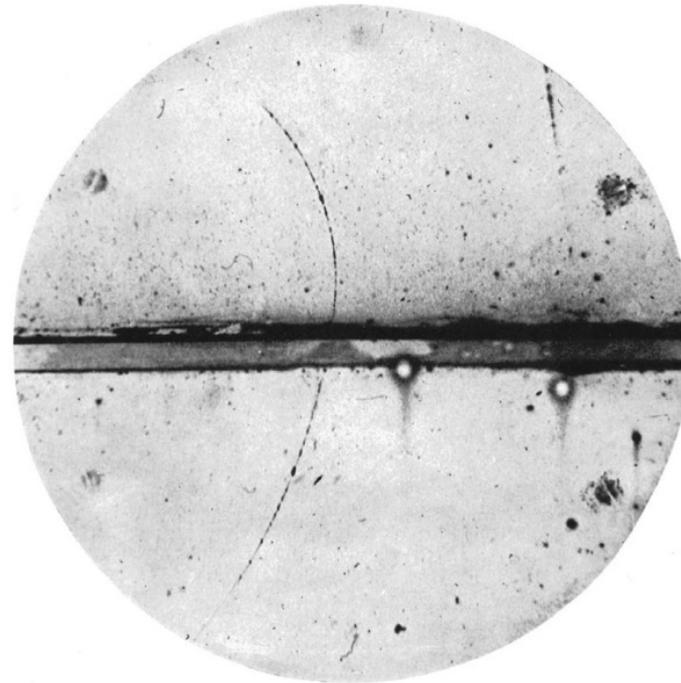
**Figure 1.5** Hole theory representation of the production or annihilation of  $e^{+}e^{-}$  pairs.

*Particle Physics*, Fourth Edition. B.R. Martin and G. Shaw.  
© 2017 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd.  
Companion website: [www.wiley.com/go/martin/particlephysics4](http://www.wiley.com/go/martin/particlephysics4)

# I - Conceitos básicos

## Teoria de buracos e o pósitron

**Figure 1.2** One of the first positron tracks observed by Anderson in a Wilson cloud chamber (see text for details). (Anderson 1933. Reproduced with permission from the American Physical Society.)



*Particle Physics*, Fourth Edition. B.R. Martin and G. Shaw.  
© 2017 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd.  
Companion website: [www.wiley.com/go/martin/particlephysics4](http://www.wiley.com/go/martin/particlephysics4)

# I - 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.

### ◆ 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.

# I - Conceitos básicos

## As interações fundamentais

### ◆ Fraca

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

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

### ◆ Gravitacional

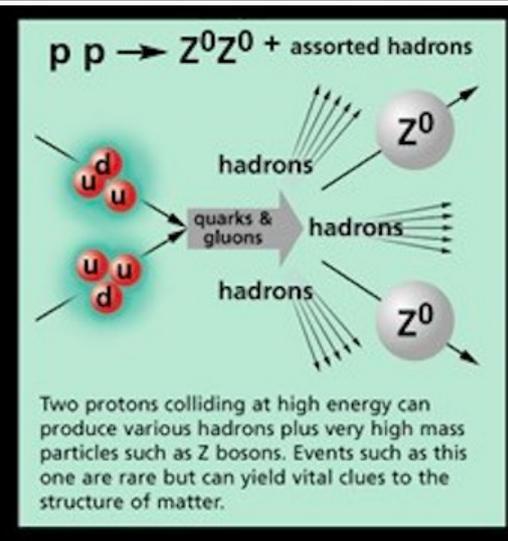
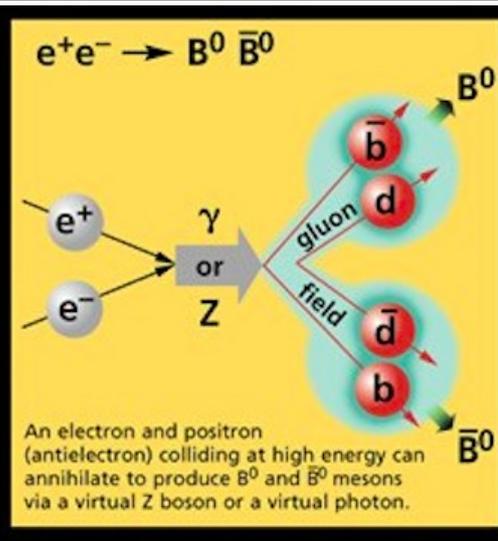
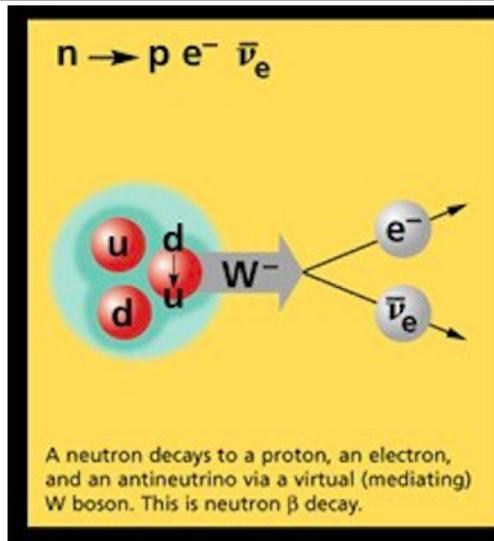
Responsável pela atração entre as partículas, agindo sobre todas elas. Não tem papel relevante nas reações entre partículas por ser extremamente fraca comparada às demais interações, porém é dominante em grandes escalas no Universo.

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

# I - 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)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: $10^{-18}$ m	$10^{-41}$	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus $3 \times 10^{-17}$ m	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	
	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	20

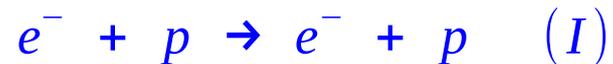


# I - Conceitos básicos

## 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:

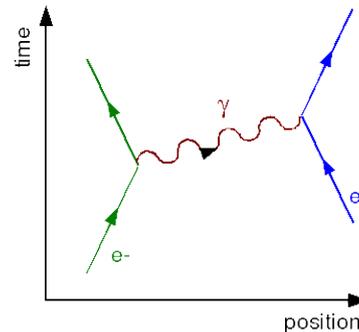


- ◆ A reação I é chamada de **espalhamento elástico**, pois as partículas do estado final são exatamente as mesmas do estado inicial.
- ◆ Os processos II e III são exemplos de **reações inelásticas**.

# I - 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.



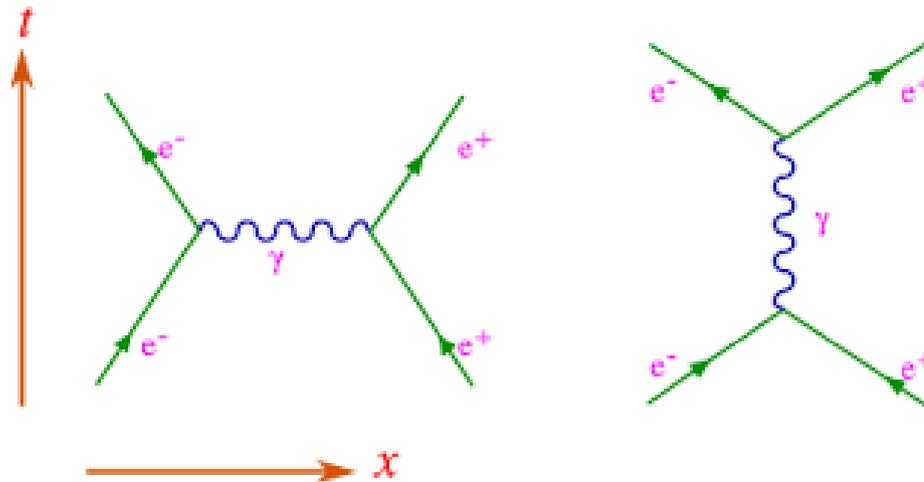
- ◆ Neste processo de troca, em que o *quantum* carrega momento e energia, a conservação de energia-momento pode ser violada por uma quantidade  $\Delta E$  em uma escala de tempo  $\Delta t$  determinada pelo princípio da incerteza. Este *quantum* é classificado como **virtual**.

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

# I - 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.



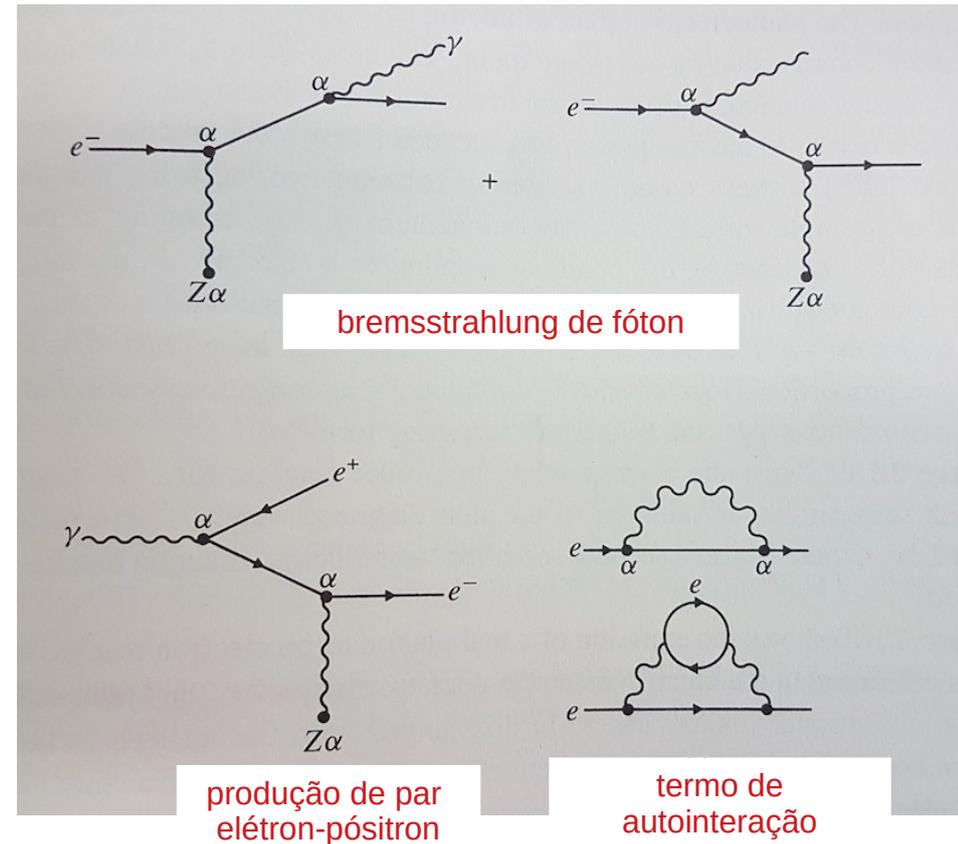
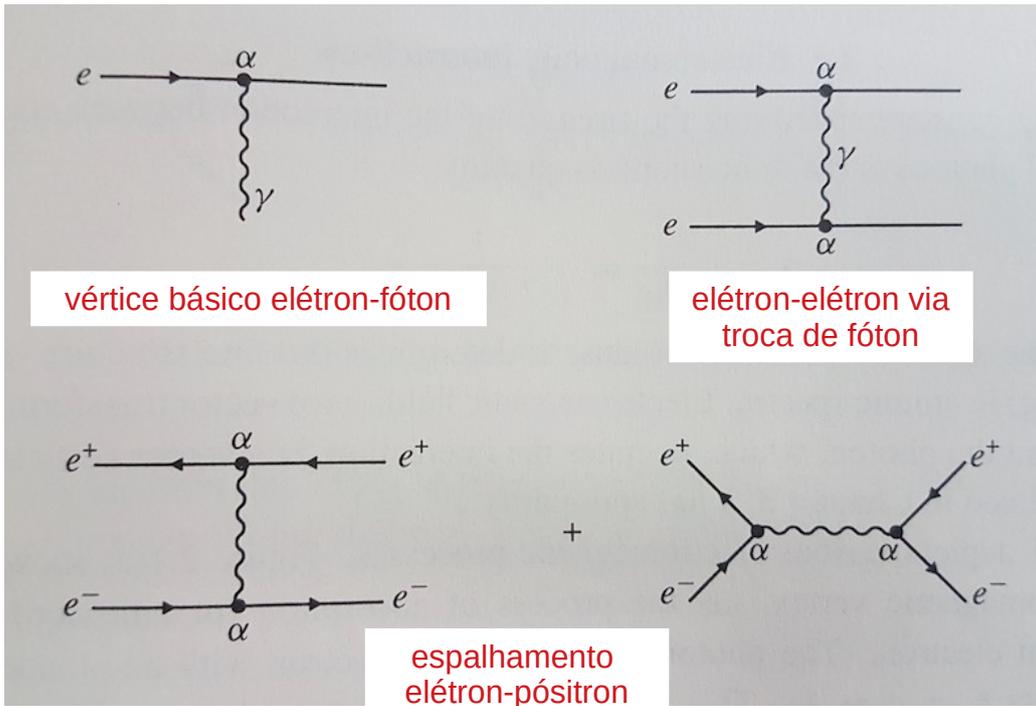
# I - Conceitos básicos

## 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**.

# I - Conceitos básicos

## Diagramas de Feynman - regras



# I - Conceitos básicos

## 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  $r = 0$ .

# I - Conceitos básicos

## 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.

# I - Conceitos básicos

## 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*  $\pi$ , 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.

# I - Conceitos básicos

## Amplitude de espalhamento e propagador

- ◆ Uma reação entre partículas, por exemplo, o espalhamento

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

pode ser calculado aplicando a teoria de perturbação.

- ◆ Em ordem mais baixa (aproximação de Born), a amplitude de probabilidade para uma partícula ser espalhada de um momento inicial  $\mathbf{q}_i$  para um momento final  $\mathbf{q}_f$  por um potencial  $U(\mathbf{r})$  é dada por:

$$M(\vec{q}) = g \int U(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} d^3\vec{r}$$

com  $g$  sendo a intensidade intrínseca do acoplamento da partícula ao potencial e

$$\vec{q} = \vec{q}_f - \vec{q}_i$$

# I - Conceitos básicos

## Amplitude de espalhamento e propagador

- Assumindo o potencial de Yukawa e fazendo a integração (em coordenadas esféricas, por conveniência), obtém-se:

$$M(\vec{q}) = \frac{g g_0}{|\vec{q}|^2 + m^2}$$

- Esta amplitude corresponde à troca de uma única partícula mediadora entre as partículas interagentes.
- O termo  $(|\mathbf{q}|^2 + m^2)^{-1}$  é chamado de **propagador**. A amplitude de espalhamento (ou elemento de matriz) pode ser interpretada como o produto de dois fatores de acoplamento,  $g_0$  e  $g$ , e do propagador relacionado ao bóson trocado.
- Termos perturbativos de ordem superior correspondem à troca de mais do que um bóson mediador entre as partículas.

# I – Conceitos básicos

## 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  $\sigma$ .

# I – Conceitos básicos

## Seção de choque

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

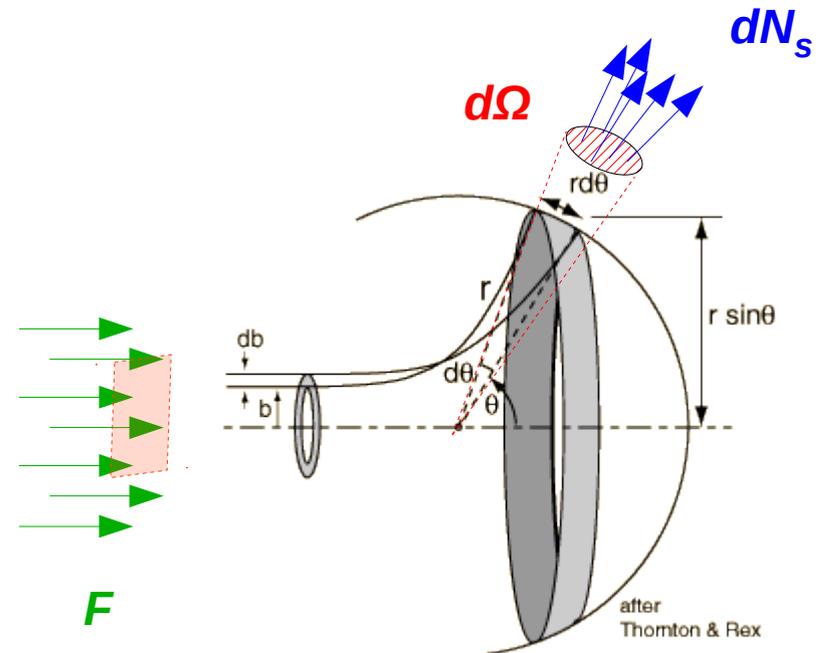
$F$  – Fluxo de partículas incidentes por unidade de área e por unidade de tempo sobre um alvo.

$d\Omega$  – 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.



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