

# 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	2

	Mai					Jun				Jul
Ter	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2 Prova
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.

# IV – Interações eletromagnéticas

## 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.

# IV – Interações eletromagnéticas

## 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

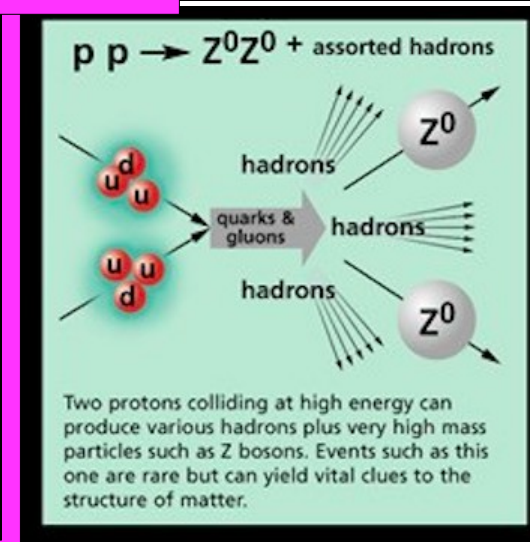
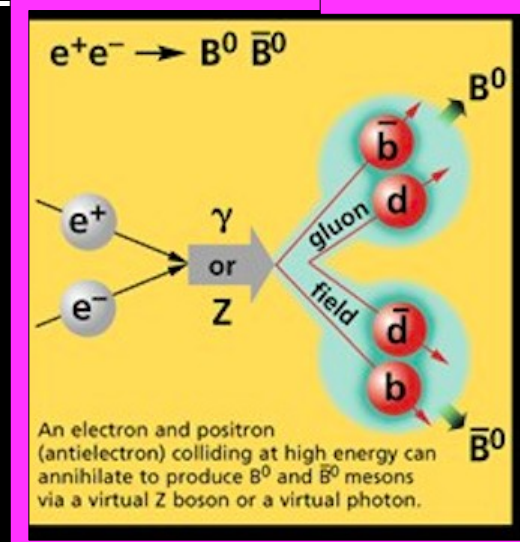
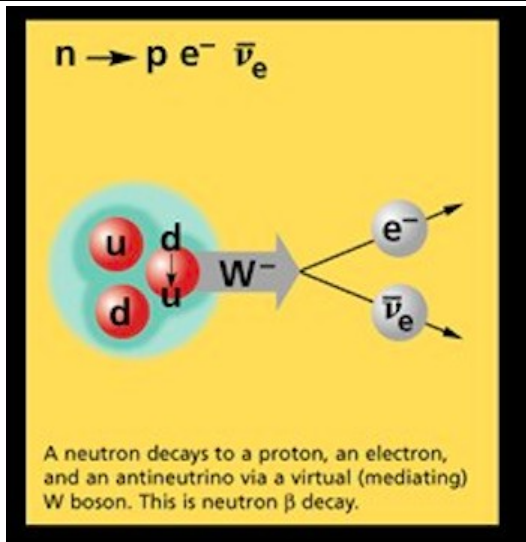
Responsável pela atração entre as partículas, agindo sobre todas elas. Não tem papel relevante nas reações entre partículas por ser extremamente fraca comparada às demais interações, porém é dominante em grandes escalas no Universo.

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

# IV – Interações eletromagnéticas

## As interações fundamentais

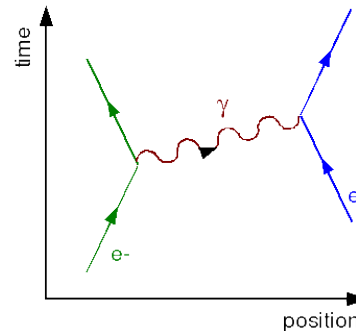
Property \ Interaction	Gravitational		Weak (Electroweak)		Electromagnetic		Strong	
	Fundamental	Residual	Fundamental	Residual	Fundamental	Residual	Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy		Flavor		Electric Charge		Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All		Quarks, 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:	$10^{-41}$		0.8		1		25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	$10^{-41}$		$10^{-4}$		1		60	
	$10^{-36}$		$10^{-7}$		1		Not applicable to hadrons	20



# IV – Interações eletromagnéticas

## 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**.

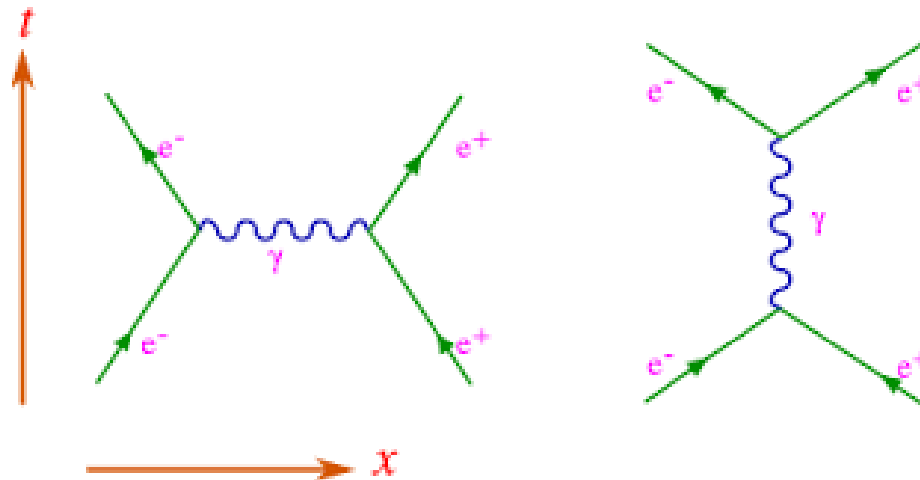
$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar$$



# IV – Interações eletromagnéticas

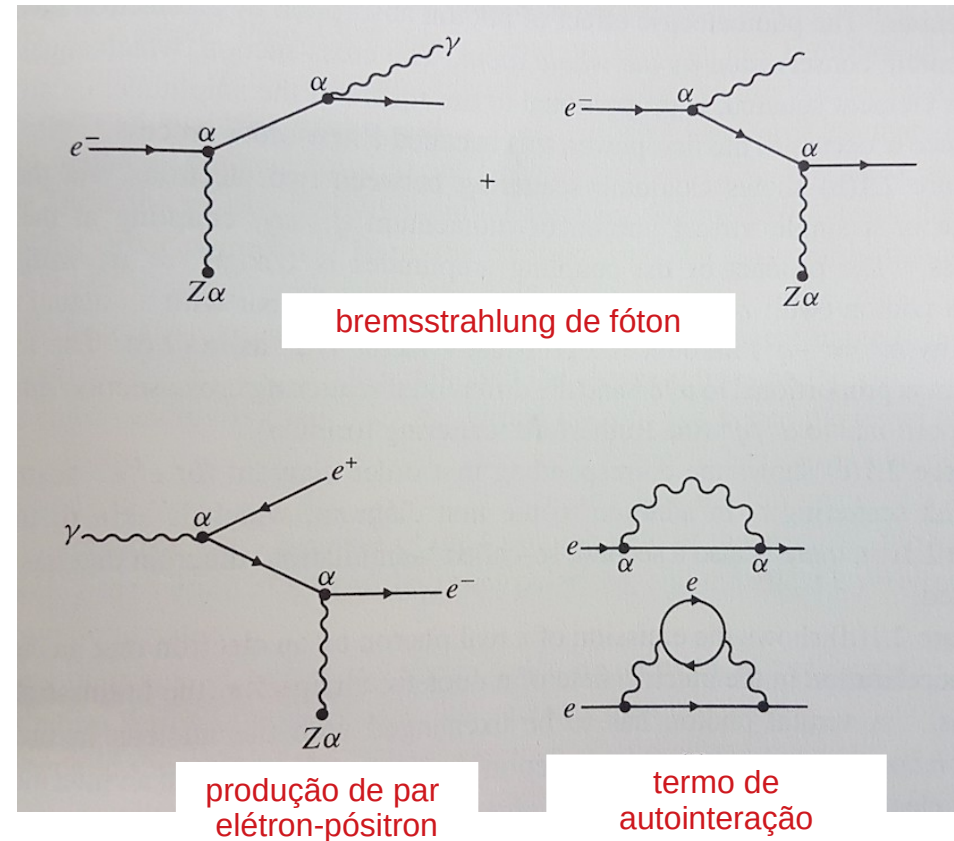
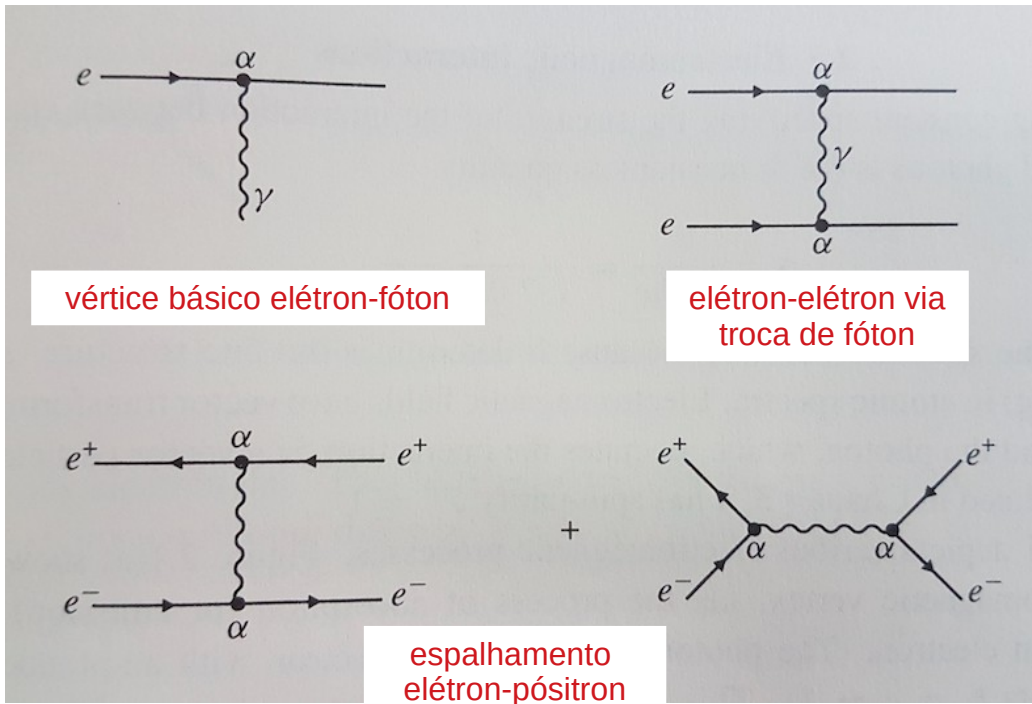
## Diagramas de Feynman

- ◆ 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**.
- ◆ Um exemplo de diagrama de Feynman é dado abaixo.



# IV – Interações eletromagnéticas

## Alguns diagramas de Feynman para interações eletromagnéticas



# IV – Interações eletromagnéticas

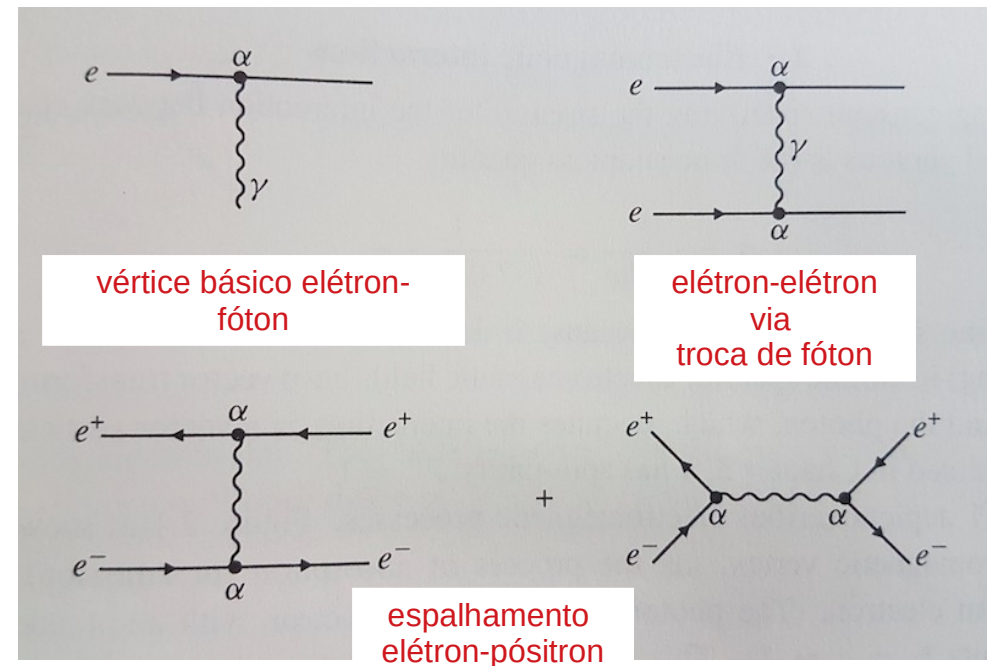
## Processos eletromagnéticos

- ◆ A constante de acoplamento que especifica a intensidade da interação entre partículas carregadas e o fóton é a quantidade adimensional:

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

denominada constante de estrutura fina.

- ◆ O fóton é uma partícula vetorial com  $J^P = 1^-$ .
- ◆ Ao lado, alguns processos eletromagnéticos básicos



## IV – Interações eletromagnéticas

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

- ◆ A seguir, serão apresentados (não deduzidos) alguns resultados que podem ser obtidos com cálculos em primeira ordem em perturbação para processos eletromagnéticos.
- ◆ Para contextualizar a discussão é apresentada abaixo a expressão para a taxa de ocorrência de uma reação dada pela Mecânica Quântica:

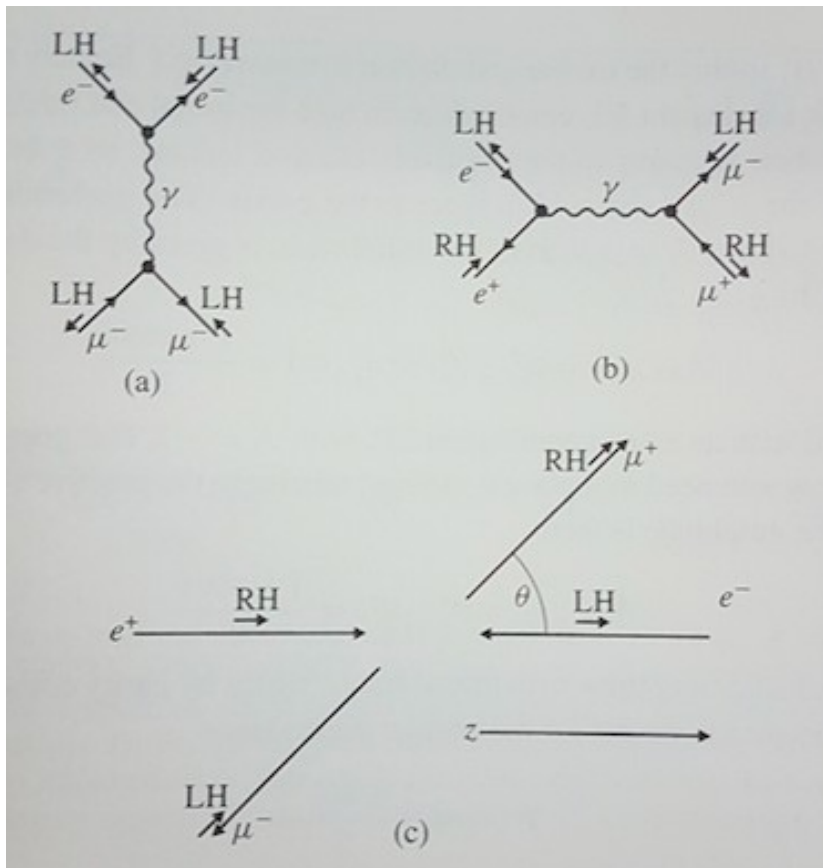
$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \rho_f$$

- ◆  $M_{if}$  é o elemento de matriz entre o estado inicial e o estado final e  $\rho_f$  é a densidade de estados  $dN/dE$  disponíveis para as partículas produzidas no estado final.

# IV – Interações eletromagnéticas

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

- ◆ O processo de aniquilação é uma interação eletromagnética mediada pela troca de um fóton.



- ◆ Desprezando efeitos de spin, o elemento de matriz correspondente, é dado pelo propagador do fóton:

$$M_{if} = \frac{e^2}{q^2} = \frac{4\pi\alpha}{q^2}$$

- ◆ A quantidade  $q^2 = -s$  é o quadrado do quadrimomento transferido do fóton virtual e  $s$  é o quadrado da energia de centro de massa.

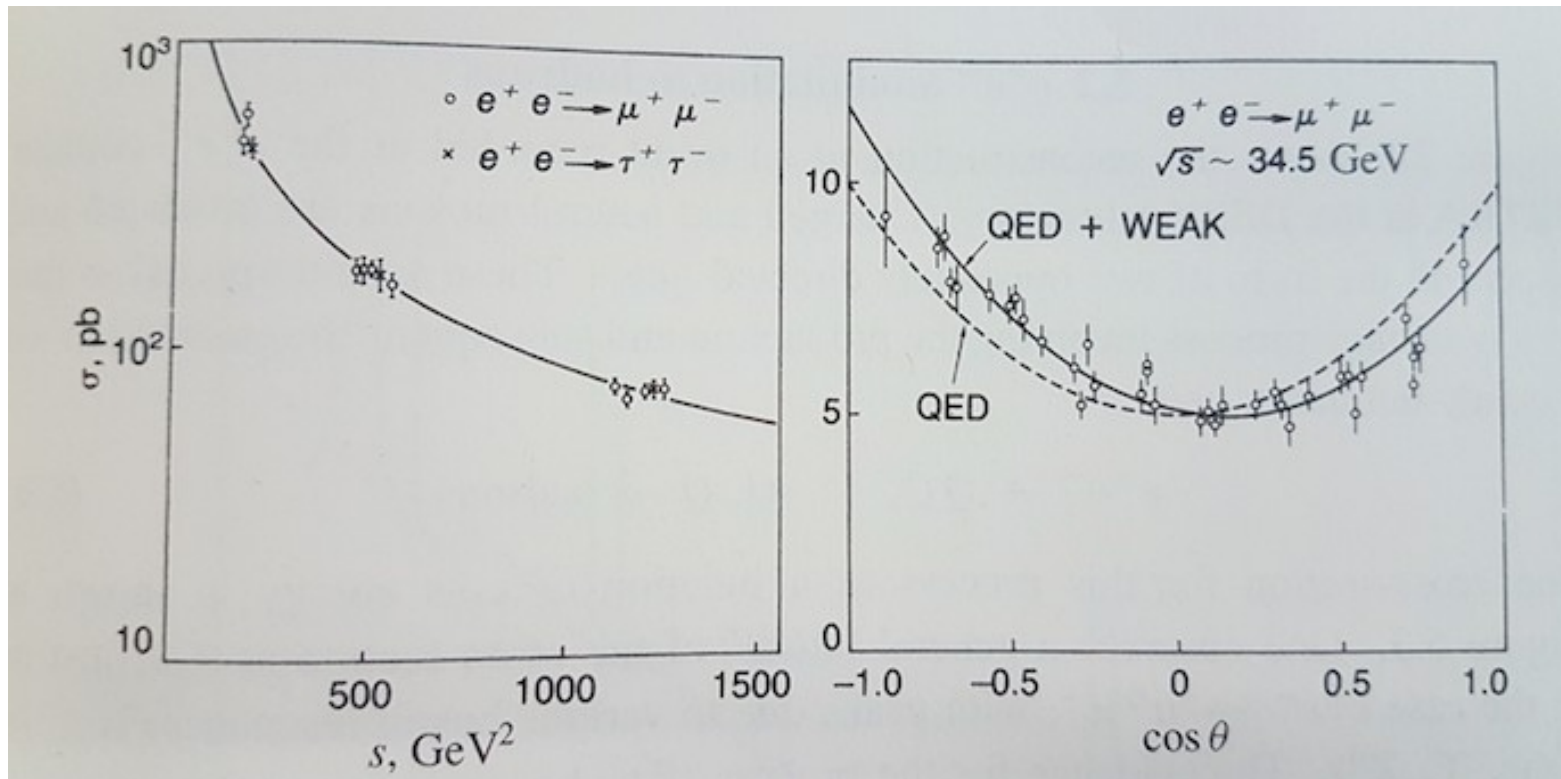
- ◆ Cálculos apropriados fornecem:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s}$$

## IV – Interações eletromagnéticas

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

- ▶ Gráficos da seção de choque total e diferencial



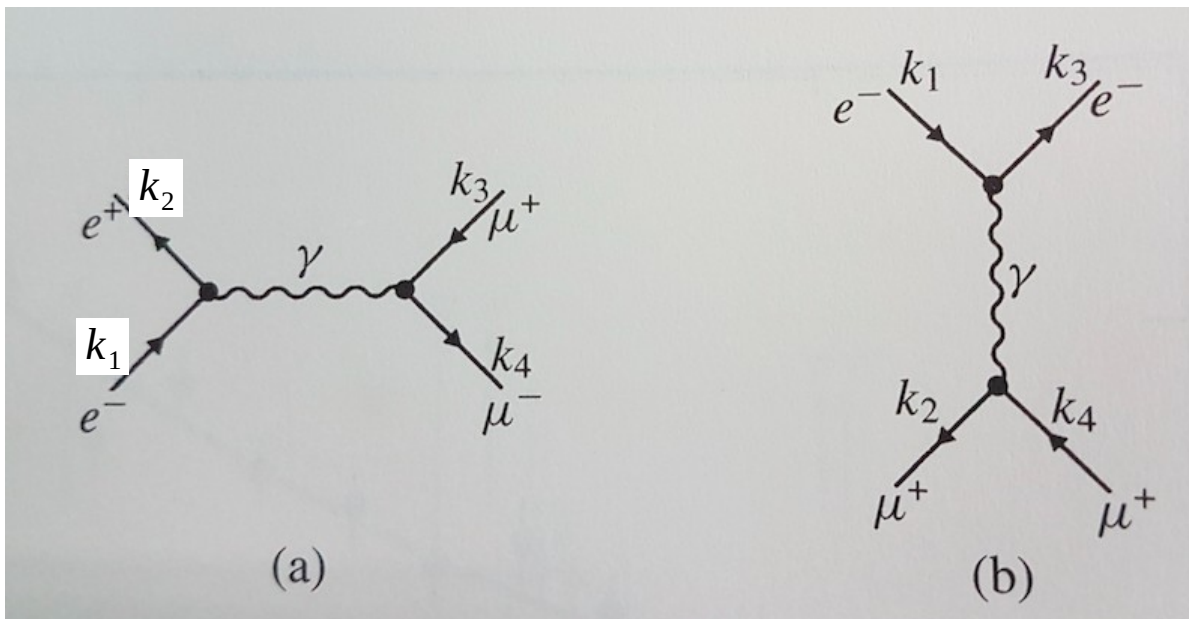
$$\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{\alpha^2}{4s}(1 + \cos^2 \theta)$$

## IV – Interações eletromagnéticas

### Espalhamento elétron-múon $e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+$

- ▶ Há uma simetria de “cruzamento” (*crossing*) entre este processo e o processo anteriormente estudado de aniquilação do par elétron-pósitron com a consequente produção de um par múon-antimúon.



$$\begin{array}{cc} (a) & (b) \\ e^+ (k_2) & \rightarrow e^- (k_3) \\ \mu^- (k_4) & \rightarrow \mu^+ (k_2) \end{array}$$

## IV – Interações eletromagnéticas

### Espalhamento elétron-múon $e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+$

- ▶ A seção de choque pode ser expressa em termos dos invariantes relativísticos conhecidos como variáveis de Mandelstam:

$$\begin{aligned} s &= -(k_1+k_2)^2 = -(k_3+k_4)^2 = -2k_1k_2 = -2k_3k_4 \\ t &= q^2 = (k_1-k_3)^2 = (k_2-k_4)^2 = -2k_1k_3 = -2k_2k_4 \\ u &= (k_2-k_3)^2 = (k_1-k_4)^2 = -2k_2k_3 = -2k_1k_4 \\ s-t-u &= \sum m^2 \end{aligned}$$

s = quadrado da energia do centro de massa

t = quadrado do quadrimomento transferido

u = quadrado do momento cruzado transferido



## IV – Interações eletromagnéticas

Espalhamento elétron-múon  $e^- \mu^+ \rightarrow e^- \mu^+$

- ◆ A seção de choque  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  expressa com variáveis de Mandelstam:

$$\begin{aligned} s &= 4p^2 \\ t &= q^2 = 2p^2(1 - \cos \theta) = 4p^2 \sin^2(\theta/2) \\ u &= 2p^2(1 + \cos \theta) = 4p^2 \cos^2(\theta/2) \end{aligned}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\alpha^2}{8p^2} \left( \frac{t^2 + u^2}{s^2} \right)$$