

Tópicos de Física Moderna

LEI – 2011 / 2012 – 2º semestre

Teresa Viseu (regente)



Richard Feynman
(1918-1988)
Nobel em 1965

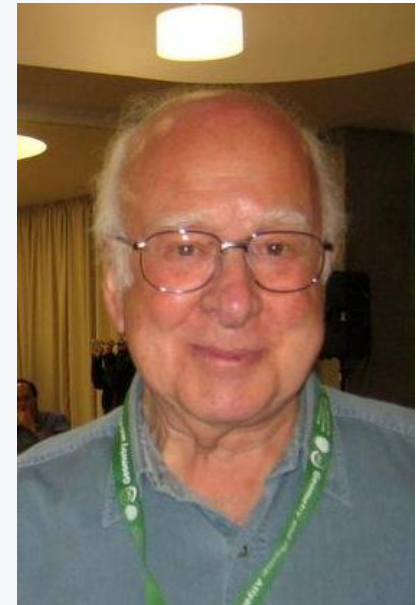
Murray Gell-Mann
(1929-20)

Nobel em 1969
*"for his contributions and discoveries
concerning the classification of elementary
particles and their interactions".*



Descobriu os quarks em 1964

Peter Higgs
(1929-20)



6. *Partículas elementares e suas interações*

- *6.1. Introdução*
- *6.2. Os quarks*
- *6.3. Partículas elementares e compostas*
- *6.4. Interações fundamentais e partículas elementares*

6.1. Introdução

Na teoria atômica da matéria de Dalton (1908) o **átomo** era considerado **indivisível** - partícula elementar.

Em 1897 J. J. Thomson descobre o **eletrão** - o átomo deixa de ser uma partícula elementar (modelo atômico de Thomson).

Rutherford (1911), Bohr (1913) - **modelos atômicos com núcleo**, baseados na interação eletromagnética.

Em 1932 Chadwick descobre o **neutrão**. Pensou-se então, durante algum tempo, que existissem quatro partículas elementares, o eletrão, o próton, o neutrão e o fóton.

Mas, com o desenvolvimento dos grandes aceleradores de partículas, a partir de 1950, começaram rapidamente a ser detetadas muitas outras... algumas centenas...

O esforço hoje em dia vai no sentido de as organizar pelas suas propriedades e relacioná-las com a formação e organização da matéria.

Sabe-se hoje que, **quer o próton quer o neutrão, não são partículas elementares**. Têm uma estrutura bem definida. São formadas por três partículas mais elementares, três **quarks**.

6.1. Introdução

Large Hadron Collider (LHC) no CERN em Genebra

O anel central tem um perímetro de 27 km



6.2. Os quarks

Sabe-se hoje que o *protão* é formado por dois quarks *up* e um *down* enquanto que o *neutrão* é formado por dois *down* e um *up*, $p: (uud)$; $n: (udd)$

Mas existem mais quarks. Eles agrupam-se em duas famílias (dois sabores), a dos semelhantes aos *up*, que engloba os quarks *charm* (c) e *top* (t) e a dos semelhantes ao *down*, englobando os *strange* (s) e os *bottom* (b).

Sabe-se que a família dos quarks tipo *up* têm carga $+\frac{2}{3}e$ e a família dos quarks tipo *down* têm carga $-\frac{1}{3}e$.

A teoria prevê a existência de uma antipartícula para cada partícula e elas têm sido efetivamente detetadas. O *eletrão* e o *positrão*, o *neutrino* e o *antineutrino*, o *protão* e o *antiprotão*, mas também os quarks e os antiquarks.

As antipartículas são semelhantes às partículas diferindo apenas na carga, que é de sinal contrário, e em alguns números quânticos, mas têm a mesma massa e o mesmo spin das correspondentes partículas.

6.2. Os quarks

Propriedades dos quarks				
nome	família	spin	carga	massa. c^2 (MeV)
up (u)	tipo up	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	1.5-4
charm (c)	tipo up	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	1150-1350
top (t)	tipo up	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	172700 ± 2900
down (d)	tipo down	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	4-8
strange (s)	tipo down	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	80-130
bottom (b)	tipo down	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	4100-4400

Para comparação:

$$m_e.c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$m_p.c^2 = 938 \text{ MeV.}$$

Somando as massas dos quarks *up* e *down* que formam o neutrão e o próton facilmente se verifica que quer a massa do neutrão quer a do próton são muito superiores! Verifica-se assim que, **quer a massa do próton quer a do neutrão, são quase só devidas à energia associada à interação entre os quarks constituintes.**

$$m_p.c^2 = 2 \times m_u.c^2 + m_d.c^2 + E_{\text{interação}}$$

$$m_n.c^2 = m_u.c^2 + 2 \times m_d.c^2 + E_{\text{interação}}$$

6.3. *Partículas elementares e compostas*

Com a descoberta dos quarks pode-se pôr a questão do princípio da quantização da carga elétrica - segundo este princípio a carga de qualquer "material" é um número inteiro de cargas elementares, e .

Mas os quarks não têm carga inteira! Os quarks do tipo *up* têm carga $+\frac{2}{3}e$ e os do tipo *down* têm carga $-\frac{1}{3}e$.

Só que os quarks não existem isolados e só se agrupam de forma a dar origem a partículas compostas com cargas inteiras.

Usando as cargas dos quarks *up* e *down* que formam o neutrão e o próton facilmente se verifica que a carga do neutrão é 0 e a do próton é $+1e$.

As **partículas compostas** formadas por quarks designam-se genericamente por **hadrões** e são de dois tipos os **bariões**, formados por um conjunto de três quarks e os **mesões** formados por um quark e um anti-quark. Os hadrões mais estáveis são o próton e o neutrão.

Todos os quarks têm spin $\frac{1}{2}$ e por essa razão são designados de **fermiões**, em oposição às partículas de spin inteiro, designadas de **bosões**.

6.3. *Partículas elementares e compostas*

Para além do neutrão e do próton conhecem-se outros bariões

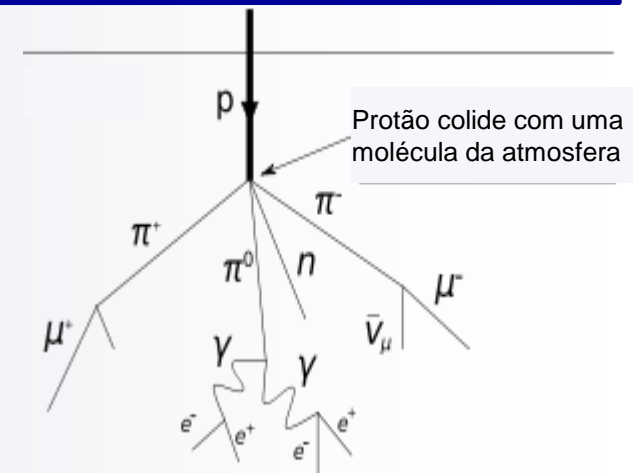
Exemplos de bariões:

Neutrão - (udd) Protão - (uud)
Sigma - Σ^+ - (uus); Σ^- - (dds); Σ^0 - (uds);
Lambda - Λ^0 - (uds)
Xi - Ξ^0 - (uss); Ξ^- - (dss)

Exemplos de mesões:

Pião - π^+ - (u \bar{d}); π^- - ($\bar{u}d$);
Kaão - K^+ - (u \bar{s}); K^- - ($\bar{u}s$); K^0 - (d \bar{s})

Os raios cósmicos vêm do espaço e são formados por partículas de elevadíssima energia (90% são prótons, 9% partículas α e 1% eletrões) que, ao chegarem à atmosfera, colidem com átomos desta. Na figura representa-se a colisão de um próton dum raio cósmico formando um chuveiro de partículas mais simples, piões, muões, neutrinos...



6.3. *Partículas elementares e compostas*

Num chuveiro de partículas gerado por raios cósmicos aparecem partículas ainda não referidas, como por exemplo os muões, μ .

Verificou-se que os **muões** não são semelhantes aos quarks. Têm antes mais semelhanças com os **eletrões**. Foram então incluídos no mesmo grupo destes, **o grupo dos leptões que se caracteriza por ter carga inteira**.

O grupo dos **leptões** inclui ainda, para além do **eletrão** e do **muão**, o **taão**, τ , todos com carga $-1e$ e as **respetivas antipartículas**, e^+ , μ^+ , τ^+ . A cada um destes leptões corresponde um **neutrino**, ν_e , ν_μ , ν_τ , de carga nula e massa muito pequena.

Ainda só nos referimos às partículas que constituem a matéria, de acordo com o **modelo padrão**, desenvolvido entre 1970 e 1973.

Este modelo prevê, para além das partículas elementares que constituem a matéria, os fermiões (quarks e leptões), ainda um conjunto de partículas que medeiam (transportam) as interações entre elas e que são os bosões.

6.3. *Partículas elementares e compostas*

Partículas		
Partículas elementares	fermiões ($s = \frac{1}{2}$)	Quarks u, d, c, s, t, b (a carga não é inteira)
		Leptões $e^-, e^+, \mu^-, \mu^+, \tau^-, \tau^+, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ (carga inteira ou nula)
	bosões (spin 0 ou inteiro)	Incluem-se aqui os mediadores das interações – fótons, bosões vetoriais, glúons e, se existirem, o gravitão e o bosão de Higgs
Partículas compostas	hadrões (compostos por quarks)	Bariões (3 quarks) - $n, p,$
		Mesões (1 quark e 1 anti-quark)
	Outras	Núcleo atómico, Átomos, Superátomos, Moléculas

Genericamente podemos dizer que **os fermiões são as partículas que constituem a matéria e os bosões são as partículas que transmitem ou medeiam as interações.**

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Como já se referiu no capítulo anterior todas as forças que se manifestam na natureza podem ser descritas, numa forma mais ou menos complexa, apenas por quatro interações fundamentais que ocorrem entre as partículas elementares.

Por ordem decrescente da sua força temos:

- Interação nuclear forte
- Interação eletromagnética
- Interação fraca
- Interação gravítica

AS FORÇAS NA NATUREZA			
TIPO	INTENSIDADE RELATIVA	PARTÍCULA INTERMEDIADORA	EXEMPLOS
FORÇA NUCLEAR FORTE	1	GLUÕES (SEM MASSA)	NÚCLEOS ATÓMICOS
FORÇA ELECTROMAGNÉTICA	$\sim \frac{1}{1000}$	FOTÕES (SEM MASSA)	ÁTOMOS ELECTRICIDADE
FORÇA NUCLEAR FRACA	$\sim \frac{1}{100000}$	BOSÕES Z^0, W^+, W^- (PESADOS)	DECAIMENTO BETA
GRAVITAÇÃO	$\sim 10^{-38}$?	CORPOS COM MASSA

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Todas as **interações atômicas e moleculares** e por isso também todas as forças observadas entre corpos macroscópicos no nosso dia-a-dia são manifestações da **interação eletromagnética**.

A **interação gravítica** existe entre todas as **partículas com massa** mas é tão fraca comparada com todas as outras que, desde que exista mais alguma interação esta é desprezável. Portanto, a nível das partícula elementares ela é totalmente desprezável.

A **interação fraca** descreve a **interação entre eletrões (ou positrões) e nucleões** levando ao decaimento β .

A **interação nuclear forte** descreve a força que **permite manter unidos os nucleões que formam os núcleos atômicos**.

As partículas elementares são classificadas de acordo com as suas propriedades mas também de acordo com as interações fundamentais em que estão envolvidas.

Por exemplo **apenas os hadrões (formados por quarks) "sentem" a interação nuclear forte, os leptões não**.

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Pensa-se, hoje em dia, que todas as interações são "mediadas" por uma partícula.

Significa isto que, por exemplo, para um eletrão "saber" que está um protão perto a puxar por ele, deve haver uma partícula a transmitir-lhe essa informação...

No caso das interações eletromagnéticas o "mediador" é o fóton, partícula sem massa.

Em relação à interação nuclear forte, as partículas que a sentem são, como já se disse, os hádrões - partículas formadas por quarks. Os "mediadores" desta interação são os glúons.

A interação nuclear forte não tem origem nas cargas elétricas mas sim noutra tipo de "carga", denominado de cor. Esta característica, a cor, apenas existe nos quarks e nos glúons, ou seja nas partículas envolvidas na interação nuclear forte, isto de acordo com a teoria da cromodinâmica quântica (CDQ). De acordo ainda com esta teoria os quarks estão constantemente a trocar de cor entre si e esta troca é feita através dos glúons.

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

A interação eletromagnética só se faz sentir entre partículas com carga elétrica.

A interação nuclear forte só se faz sentir entre partículas com cor, os quarks.

As partículas que não têm carga nem cor, como os neutrinos, só interagem através da interação fraca. Todas as partículas interagem através desta interação mas ela só é importante se as outras interações não predominarem. É de ainda mais curto alcance do que a interação forte.

Os mediadores desta interação, são os chamados **bosões vetoriais**, que têm massa, contrariamente aos mediadores da interação eletromagnética e forte.

O mediador da interação gravítica nunca foi detetado embora seja previsto pelo modelo padrão das interações. Mas como a interação gravítica é muitíssimo fraca ao pé de todas as outras, o campo criado por este hipotético bosão será sempre muito difícil de ser detetado.

O modelo padrão prevê ainda a existência de um outro bosão, o bosão de Higgs, conhecido em linguagem não científica pela "partícula de Deus".

6.4. *Interações fundamentais e partículas elementares*

A existência do bóson de Higgs foi postulada na década de 1960 pelo físico britânico Peter Higgs e é uma peça fundamental no modelo padrão que pretende explicar a formação da matéria a partir das partículas elementares e das suas interações. Enquanto esta “partícula” não for detetada, os cientistas não conseguem explicar completamente, por este modelo, a existência da própria matéria.

In Jornal Público de 13 de dezembro de 2011: Se existir, o bóson de Higgs vai provavelmente ser descoberto em 2012, diz o CERN

... os responsáveis por duas experiências que estão a decorrer no LHC, o gigantesco acelerador de partículas do Laboratório Europeu de Física das Partículas (CERN), apresentaram os seus mais recentes resultados na procura da famosa “partícula de Deus” ou, mais cientificamente falando, do bóson de Higgs.

“Sejam prudentes”, disse ... Rolf Heuer, director-geral do CERN, ... “Ainda não o encontramos. Mas fiquem atentos para o ano.”

... Fabiola Gianotti, porta-voz da experiência ATLAS, e Guido Tonelli, porta-voz da experiência CMS, explicaram que, “dado o excepcional desempenho do LHC este ano, (...) podemos esperar resolver o enigma em 2012”.

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Características dos mediadores das interações				
Interação	mediador	spin	massa.c ² (MeV)	alcance (m)
eletromagnética	γ (fotão)	1	0	∞
nuclear forte	g (gluão)	1	0	10^{-15}
interação fraca	W^+, W^-	1	80 420	10^{-18}
	Z	1	91 190	
gravítica	gravitão	2	0	∞
todas	higgs	0	> 115 000 ???	

Algumas características desta tabela são apenas resultantes de cálculo já que nem o gravitão nem o bóson de Higgs foram ainda detetados.

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Tabela periódica das partículas elementares

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

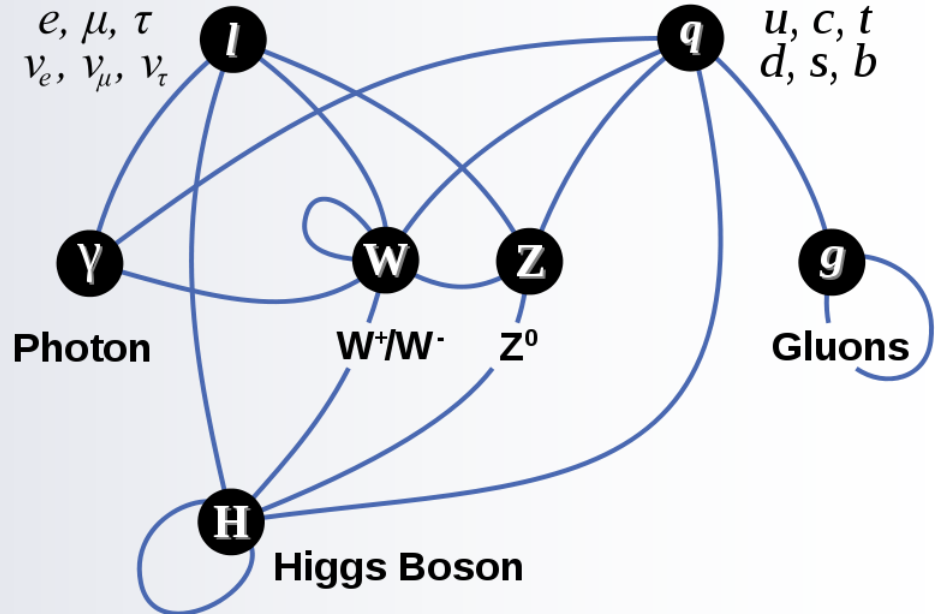
Gauge Bosons

Leptons

e, μ, τ
 ν_e, ν_μ, ν_τ

Quarks

u, c, t
 d, s, b



Resumo das interações entre partículas elementares como previsto no modelo padrão

6.4. Interações fundamentais e partículas elementares

Partículas		
Partículas elementares	fermiões ($s = \frac{1}{2}$)	Quarks u, d, c, s, t, b (a carga não é inteira)
		Leptões $e^-, e^+, \mu^-, \mu^+, \tau^-, \tau^+, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ (carga inteira ou nula)
	bosões (spin 0 ou inteiro)	Incluem-se aqui os mediadores das interações – fótons, bosões vetoriais, glúons e, se existirem, o gravitão e o bosão de Higgs
Partículas compostas	hadrões (compostos por quarks)	Bariões (3 quarks) - $n, p,$
		Mesões (1 quark e 1 anti-quark)
	Outras	Núcleo atómico, Átomos, Superátomos, Moléculas

Genericamente podemos dizer que os fermiões são as partículas que constituem a matéria e os bosões são as partículas que transmitem ou medeiam as interações.