
Partículas Elementares

META:

Apresentar classificação das partículas elementares.

Discutir léptons e suas características.

Discutir hádrons e suas características.

Discutir leis de conservação na transformação de partículas elementares.

Apresentar modelo de quarks de hádrons.

OBJETIVOS:

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Determinar tipo de partícula elementar.

Aplicar leis de conservação na transformação de partículas elementares.

Determinar composição de hádrons quarks.

PRÉ-REQUISITOS

Não tem.

8.1 Classificação de Partículas Elementares

Partícula elementar é um termo aplicado para objetos sub-nucleares que não podem ser separados por partes. Mas podem transformar-se em outras partículas elementares. Partículas elementares são classificadas por tipo de interação em que elas participam. Na visão atual na Natureza existem quatro tipos de interações. Elas são *eletromagnética, forte, fraca, gravitacional*. Interação gravitacional é importante nas interações de objetos de massas suficiente grandes, portanto pode ser desprezada na consideração de partículas elementares. Tal que interações que governam comportamento de partículas elementares são *eletromagnética, forte e fraca*. Em termos da teoria quântica de campos qualquer interação é realizada por meio de troca de quanta de interação por partículas. Esquemáticamente é mostrado na Fig. 8.1. Quanta de interações chamam-se *bósons de calibre* (ou *bósons de gauge*). Quantum de interação eletromagnética é bem conhecido fóton γ . Interação fraca é realizada por meio de três tipos de quanta que chamam-se *bósons vetoriais* Z^0, W^+, W^- . Segundo a notação Z^0 é neutro, W^+ é positivo, W^- é negativo. Interação forte é realizada por meio de oito tipos de quanta que chamam-se *glúons* g . Então, primeira grande divisão de todas as partículas elementares é por *quanta de interações* e *partículas de matéria*. Partículas de

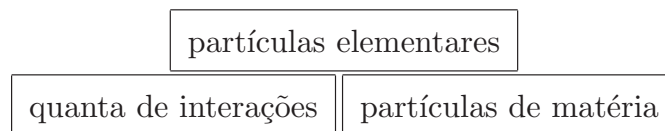


Tabela 8.1:

matéria dividem-se em dois grupos: *léptons* e *hádrons*. Interação

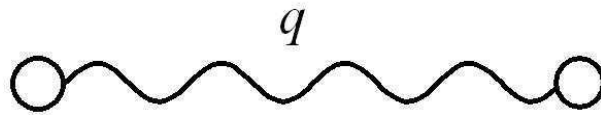


Figura 8.1: Esquema de interação de partículas por troca de quanta de interação.

fraca governa transformações de partículas elementares com participação de léptons, interação forte governa transformações de hádrons.

partículas de matéria	
léptons	hádrons

Tabela 8.2:

8.2 Léptons

Descrevemos léptons. Léptons são partículas elementares cuja transformação é governada por interação fraca. Todos léptons são férmions com spin $1/2$. Léptons são agrupados em três gerações. Lépton mais conhecido é *elétron*, e^- . Elétron é partícula estável, massa de elétron $m_e = 0,511$ MeV. Na classificação de léptons elétron é incluído na primeira geração. Junto com elétron na primeira geração é incluído *nêutrino eletrônico* ν_e . Nêutrino eletrônico ν_e é partícula nêutra com massa não nula, $m_{\nu_e} \neq 0$. Então, na primeira geração de léptons estão duas partículas: elétron e^- e nêutrino eletrônico ν_e . Na segunda geração de léptons também são incluídas duas partículas: partícula que chama-se *múon* μ^- e

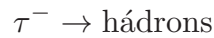
nêutrino de múon ν_μ . Múon possui carga negativa como elétron, massa de múon $m_\mu = 105,658$ MeV. Múon é partícula instável com vida média $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Múons foram descobertos em raios cósmicos em 1936. *Nêutrino de múon* ν_μ é partícula nêutra com massa não nula, $m_{\nu_\mu} \neq 0$, e $m_{\nu_\mu} > m_{\nu_e}$. Esquema principal de decaimento de μ^- é¹⁷



Na terceira geração de léptons são incluídas partículas: *lépton tau* τ^- e *neutrino de lépton tau* ν_τ . Lépton tau tem carga negativa e massa $m_\tau = 1,777$ GeV. Como múon, lépton tau é instável, meia vida dele é $\tau = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s. Lépton tau foi descoberto em 1975 em laboratório na reação de colisão de elétrons e pósitrons¹⁸



Neutrino de lépton tau ν_τ é partícula nêutra com massa não nula, $m_{\nu_\tau} \neq 0$, e $m_{\nu_\tau} > m_{\nu_\mu}$. Esquemas principais de decaimento de τ^- são



Esquema de divisão de léptons por gerações é apresentada na Tabela 8.3. Estimacão mais recente de 2010 de massas de nêutrinos é seguinte¹⁹: $m_{\nu_e} + m_{\nu_\mu} + m_{\nu_\tau} < 0,28$ eV.

¹⁷Na Eq. (8.248) barra acima de símbolo de partícula designa anti-partícula

¹⁸Na Eq. (8.249) por τ^+ é designado anti-lépton tau, anti-partícula de τ^-

¹⁹Artigo: Upper Bound of 0.28 eV on Neutrino Masses from the Largest Photometric Redshift Survey, Phys. Rev. Lett. 105, 031301 (2010).

geração I	geração II	geração III
e^-	μ^-	τ^-
ν_e	ν_μ	ν_τ
$L_e = +1$ $L_\mu = L_\tau = 0$	$L_\mu = +1$ $L_e = L_\tau = 0$	$L_\tau = +1$ $L_e = L_\mu = 0$

Tabela 8.3: Léptons

Como já sabemos todas partículas possuem anti-partículas²⁰. Léptons também possuem anti-partículas. Anti-partícula de elétron é pósitron e^+ , anti-partícula de múon é anti-múon μ^+ , anti-partícula de lépton tau é anti-lépton tau τ^+ . Anti-partículas de nêutrons são anti-nêutrons: anti-nêutrino eletrônico $\bar{\nu}_e$, anti-nêutrino de múon $\bar{\nu}_\mu$, anti-nêutrino de lépton tau $\bar{\nu}_\tau$. Anti-léptons são divididos analogamente por três gerações (ver Tabela 8.4). Para distinguir de outros

geração I	geração II	geração III
e^+	μ^+	τ^+
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$
$L_e = -1$ $L_\mu = L_\tau = 0$	$L_\mu = -1$ $L_e = L_\tau = 0$	$L_\tau = -1$ $L_e = L_\mu = 0$

Tabela 8.4: Anti-léptons

tipos de partículas para léptons é introduzida uma característica chamada *carga leptônica*. Cada geração é caracterizada por sua carga leptônica. Léptons da primeira geração são caracterizados

²⁰Lembramos, que anti-partícula possui massa mesma da partícula. Números quânticos (valores de cargas) que caracterizam anti-partícula são opostos daqueles da partícula.

por carga leptônica eletrônica L_e , léptons da segunda geração são caracterizados por carga leptônica de múon L_μ , léptons da terceira geração são caracterizados por carga leptônica de tau L_τ . Para léptons de cada geração são prescritos valores $+1$, para anti-léptons -1 (mostrado na última linha nas Tabelas 8.3, 8.4). Para não léptons são prescritas cargas leptônicas nulas. Nas reações de transformação de partículas cargas leptônicas são conservadas.

8.2.1 Exemplos

1. Consideraremos a reação de decaimento β de nêutron

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Justificaremos conservação de carga elétrica Q e carga leptônica eletrônica L_e (para essa reação é innecessário verificar outras cargas leptônicas L_μ , L_τ , pois na reação não participam léptons de 2da e 3ra geração)

$$Q : 0 = +1 - 1 + 0$$

$$L_e : 0 = 0 + 1 - 1$$

2. Decaimento de múon

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Nessa reação é necessário verificar conservação como de carga leptônica eletrônica L_e tanto de carga leptônica de múon L_μ (innecessário verificar carga leptônica L_τ , pois na reação não participam léptons de 3ra geração)

$$Q : -1 = -1 + 0 + 0$$

$$L_e : 0 = +1 - 1 + 0$$

$$L_\mu : +1 = 0 + 0 + 1$$

3. Decaimento de lépton tau

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$Q : -1 = -1 + 0 + 0$$

$$L_e : 0 = +1 - 1 + 0$$

$$L_\tau : +1 = 0 + 0 + 1$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

$$Q : -1 = -1 + 0 + 0$$

$$L_\mu : 0 = +1 - 1 + 0$$

$$L_\tau : +1 = 0 + 0 + 1$$

8.3 Hádrons

Agora descrevemos hádrons. Hádrons são partículas elementares que são governadas pela interação forte e cuja transformação pode ser governada por interação fraca (se na transformação são criados léptons). Número de hádrons estáveis é estimado atualmente na cerca de 400. Então classificação de hádrons é questão mais complicada de que a de léptons. Hádrons podem ter spin tanto inteiro 0, 1, 2, ... quanto semi-inteiro 1/2, 3/2, 5/2, Portanto hádrons podem ser tanto bósons (spin inteiro) quanto férmions (spin semi-inteiro). Pela essa característica hádrons são divididos em dois grupos: *mésons* e *bárions*. Mésons são hádrons com spin inteiro, bárions são hádrons com spin semi-inteiro (ver Tabela 8.5). Mésons mais leves são π^- , π^+ , π^0 , K^- , K^+ , K^0 , η , φ . Eles são apresentados na Tabela 8.6. Índice superior "+" indica partícula

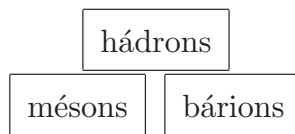


Tabela 8.5: Hádrons

partícula/anti-partícula	m , MeV	estranheza, S
π^+ / π^-	139,6	0
π^0 / π^0	135,0	0
K^+ / K^-	493,8	+1 / -1
K^0 / \bar{K}^0	498,0	+1 / -1
η / η	548,8	0
φ / φ	1019	0

Tabela 8.6: Mésons mais leves

positiva, "--- partícula negativa, "0-- partícula é nêutra. Bárions mais leves são p , n , Λ^0 , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , Ξ^- , Ω^- . Eles são apresentados na Tabela 8.7.

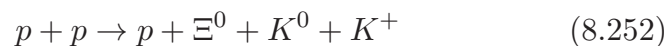
Em fim de distinguir de outros tipos de partículas (léptons, mésons, bósons de calibre) para bárions foi introduzida uma característica chamada *carga bariónica* B . Valor de B prescrito para bárions $B = +1$, para anti-bárions $B = -1$, para partículas que são não bárions $B = 0$. Carga bariónica é conservada nas reações governadas por interações eletromagnética e forte, tal que $\Delta B = B' - B = 0$, onde B é carga bariónica de partículas antes de reação, B' é carga bariónica de partículas depois de reação. Nas reações governadas por interação fraca $\Delta B = \pm 1$.

partícula/anti-partícula	m , MeV	estranheza, S
p / \bar{p}	938,26	0
n / \bar{n}	939,55	0
$\Lambda^0 / \bar{\Lambda}^0$	1115,4	-1 / +1
$\Sigma^+ / \bar{\Sigma}^-$	1189,4	-1 / +1
$\Sigma^- / \bar{\Sigma}^+$	1197	-1 / +1
$\Sigma^0 / \bar{\Sigma}^0$	2292	-1 / +1
$\Xi^- / \bar{\Xi}^+$	1321	-2 / +2
$\Xi^0 / \bar{\Xi}^0$	1314	-2 / +2
$\Omega^- / \bar{\Omega}^+$	1675	-3 / +3

Tabela 8.7: Bárions mais leves

8.3.1 Números Quânticos: Estranheza, Charme, Beleza

Nas experiências de colisão de hádrons foi observado comportamento específico deles. Por exemplo na colisão de prótons de altas energias foi observada transformação



Nessa reação na saída não aparecem partículas e anti-partículas como podia esperar. Em vez disso, aparecem partículas diferentes mas de tipo bem determinado. Partículas que demonstram tal comportamento, isto é aparecem não junto com sua anti-partícula, mas junto com outras partículas, foram chamadas *partículas estranhas*. Para explicar propriedade específica de partículas estranhas foi proposta hipótese que comportamento deles é governado por uma lei de conservação. Uma característica que descreve tal propriedade recebeu nome *estranheza*. Designada como S . A

cada partícula estranha é prescrito valor de estranheza $S = +1$ ou $S = -1$. Estranheza de anti-partículas tem valor oposto. Estranheza de partículas não estranhas é nula $S = 0$. Valores de estranheza são indicados na Tabela 8.6 para mésons mais leves e na Tabela 8.7 para bárions mais leves. Estranheza é conservada nas reações governadas por interações eletromagnética e forte, $\Delta S = S' - S = 0$. Nas reações governadas por interação fraca $\Delta S = \pm 1$.

Nas décadas de 60 e 70 foram realizadas várias reações de transformação de partículas elementares em fim de busca de partículas novas. Em 1974 foi descoberto um méson J/ψ com massa de 3,096 GeV. Comportamento dessa partícula nas reações de decaimento e transformação apontou na existência de uma nova lei de conservação. Para descrever essa nova propriedade foi introduzida nova característica de hádrons que foi chamada *charme*. Partículas que possuem essa propriedade são chamadas *partículas de charme* (por analogia com partículas estranhas). Charme de partículas é designado por C . A cada partícula de charme é prescrito valor de charme $C = +1$, a cada anti-partícula de charme é prescrito valor de charme $C = -1$. Se partícula não é partícula de charme, seu valor de charme é nulo $C = 0$. Além de méson J/ψ foram descobertos outros mésons de charme. Alguns deles são apresentados na Tabela 8.8. Mais tarde foram descobertos também bárions de charme. Charme é conservado nas reações governadas por interações eletromagnética e forte, $\Delta C = C' - C = 0$. Nas reações governadas por interação fraca $\Delta C = \pm 1$.

Em 1977 na experiência de bombardeamento de alvo de chumbo e cobre por prótons com energia 400 MeV foi descoberto méson

partícula	anti-partícula	massa, GeV
D^+	D^-	1,869
D^0	\bar{D}^0	1,865
F^+	F^-	2,021

Tabela 8.8: Mésons de charme.

Υ . Essa partícula manifestou propriedade semelhante mas diferente de estranheza e charme. Para descrever essa propriedade de méson Υ foi introduzida característica chamada *beleza*. Beleza é designada por b^{21} . Partículas que possuem essa propriedade são chamadas *partículas de beleza*. A cada partícula de beleza é prescrito valor de beleza $b = -1$, a cada anti-partícula de charme é prescrito valor de charme $b = +1$. Se partícula não é partícula de beleza, seu valor de beleza é nulo $b = 0$. Mesmo como é para estranheza e charme, beleza é conservada nas reações governadas por interações eletromagnética e forte, $\Delta b = b' - b = 0$. Nas reações governadas por interação fraca $\Delta b = \pm 1$.

Busca de partículas novas está continuando. Uma das últimas partículas descobertas²² até junho de 2012 é bárion Ξ_b .

Nas reações de transformação de partículas elementares são satisfeitas as leis de conservação seguintes. Nas interações de todos tipos são conservadas carga elétrica Q e cargas leptônicas L_e, L_μ, L_τ . Carga bariônica B , estranheza S , charme C , beleza b , paridade P são conservadas nas interações eletromagnética e forte e

²¹Não confundir com carga bariônica, que é designada por letra maiúscula B .

²²Artigo: Observation of a New Ξ_b Baryon, Phys. Rev. Lett. 108, 252002 (2012).

não conservadas na interação fraca. Essas leis de conservação devem ser justificadas cada vez quando é considerada uma reação de transformação.

8.4 Modelo de Quarks de Hádrons

Apesar de grande quantidade de hádrons, propriedades deles podem ser descritas por um modelo bastante simples. Tal modelo foi proposto em 1964 por M. Gell-Mann e independentemente por G. Zweig. Segundo a esse modelo hádrons são compostos por

geração	geração	geração	carga	carga
I	II	III	elétrica, Q	bariônica, B
u	c	t	+2/3	1/3
d	s	b	-1/3	1/3

Tabela 8.9: Quarks

geração	geração	geração	carga	carga
I	II	III	elétrica, Q	bariônica, B
\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	-2/3	-1/3
\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	+1/3	-1/3

Tabela 8.10: Anti-quarks

partículas fundamentais que são chamadas *quarks*. Por analogia com léptons quarks são divididos por três gerações (ver Tabela 8.9). Na primeira geração são incluídos quarks u e d. Origem de seus nomes de palavras inglesas up (para quark u) e down (para quark d). Na segunda geração são incluídos quarks

s e c. Origem de seus nomes de palavras inglesas *strange* para quark s e *charm* para quark c. Um hádron é estranho se ele possui na sua estrutura quark s. Um hádron é de charme, se ele possui na sua estrutura quark c. Na terceira geração são incluídos quarks b e t. Origem de seus nomes de palavras inglesas *beauty* (ou *bottom*) para quark b e *top* (ou *true*) para quark t. Um hádron é de beleza se ele possui na sua estrutura quark b. Quarks possuem carga elétrica fracionária. Quarks u, c, t têm carga positiva com valor de $+2/3$ da carga elementar, quarks d, s, b têm carga negativa com valor de $-1/3$ da carga elementar. Para cada quark existe anti-quark. Anti-quarks são designados por barra (ver Tabela 8.10) e possuem carga elétrica com sinal oposto dos quarks. Além disso, a cada quark é prescrita carga bariônica $B = +1/3$. A cada anti-quark é prescrita carga bariônica $B = -1/3$. Todos quarks são férmions.

Presença na estrutura de um hádron de quark s fornece aquele hádron valor de estranheza -1 . Presença na estrutura de um hádron de quark c fornece aquele hádron valor de charme $+1$. Presença na estrutura de um hádron de quark b fornece aquele hádron valor de beleza -1 . Correspondência de valores de estranheza, charme, beleza a presença de quark determinado na estrutura de um hádron é apresentada na Tabela ??.

Segundo ao modelo de quarks, bárions são compostos por três quarks. Estrutura de bárions esquematicamente designa-se por $q_1q_2q_3$, onde q_1, q_2, q_3 são um dos 6 quarks da Tabela 8.9. Carga bariônica de hádron composto por três quarks é

$$B = +\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = +1$$

propriedade\quarque	d	u	s	c	b	t
carga elétrica, Q	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
estranheza, S	0	0	-1	0	0	0
charme, C	0	0	0	+1	0	0
beleza, b	0	0	0	0	-1	0
top, T	0	0	0	0	0	+1

Tabela 8.11: Quarques e características deles.

Anti-bárions são compostos por três anti-quarques. Estrutura de anti-bárions esquematicamente designa-se por $\bar{q}_1\bar{q}_2\bar{q}_3$, onde $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$ são um dos 6 anti-quarques da Tabela 8.10. Carga bariônica de hádron composto por três anti-quarques é

$$B = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = -1$$

Mésons são compostos por um quarque e um anti-quarque. Estrutura de mésons esquematicamente designaremos por $q_1\bar{q}_2$. Carga bariônica de mésons sempre é nula, pois carga bariônica de quarque é $+1/3$, carga bariônica de anti-quarque é $-1/3$

$$B = +\frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Por exemplo, determinaremos estrutura de quarques de próton p . Próton não possui nem estranheza, nem charme, nem beleza. Portanto ele é composto por quarques da primeira geração u e d . Próton é bárion, portanto ele é composto por três quarques. Próton tem carga elétrica positiva $+1$. Como quarque u tem carga $+2/3$, e quarque d tem carga $-1/3$, única combinação de três quarques u, d que dá carga total $+1$ é uud , pois

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

Então, estrutura de quarks de próton é

$$p = uud$$

Estrutura de nêutron n construímos por mesma maneira. Nêutron é barion e não possui nem estranheza, nem charme, nem beleza, portanto ele também é composto por três quarks da primeira geração u e d . Tal que ele é nêutron, combinação de quarks u , d que dá carga nula é udd , pois

$$Q = +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Então, estrutura de quarks de nêutron é

$$n = udd$$

Aplicando mesmo raciocínio determinamos estrutura de anti-próton \bar{p} , que é composto por três anti-quarks

$$\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$$

com carga elétrica $Q = -1$

$$Q = -\frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = -1$$

Para estrutura de anti-nêutron \bar{n} temos

$$\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$$

com carga elétrica $Q = 0$

$$Q = -\frac{2}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$$

Apresentamos também estrutura de alguns mésons. Por exemplo, estrutura de méson π^+ . Méson π^+ não possui nem estranheza,

nem charme, nem beleza, portanto ele também é composto por um quark e um anti-quark da primeira geração u e \bar{d} ou \bar{u} e d . Méson π^+ tem carga elétrica $+1$, que dá combinação $u\bar{d}$, pois

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$$

Então, estrutura de méson π^+ é

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

Mesmo raciocínio permite receber estrutura de méson π^-

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

com carga elétrica $Q = -1$

$$Q = -\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$$

Estudo de estrutura de vários bárions leva a conclusão que alguns deles devem ser compostos de quarks de mesmo tipo: por exemplo, ddd , uuu ou sss . Mas tal estrutura está em contradição com princípio de exclusão de Pauli, pois quarks são férmions. Para explicar existência de bárions compostos de quarks de mesmo tipo na teoria foi introduzida mais uma característica de quarks – *cor*. Cor no modelo de quarks é um número quântico que indica estado de quark. Cor pode tomar três valores: vermelho, verde, azul²³. Tal que no modelo de quarks foi aceita terminologia de cores, teoria que descreve propriedades de hádrons, suas interações e transformações foi chamada *cromodinâmica*. Na cromodinâmica características de hádrons S , C , b são consideradas como números quânticos que especificam um hádron determinado.

²³Característica de quarks "cor" não deve ser entendida como cor usual de objetos macroscópicos. Significado de "cor" no modelo de quarks é somente um número quântico.

Dados experimentais confirmaram que cromodinâmica descreve corretamente propriedades de hádrons. Entretanto, tentativas de extrair quarks de hádrons não sucederam. Esse efeito foi chamado *confinamento* de quarks. Então, quarks existem somente dentro de hádrons e não existem quarks livres.

8.5 Conclusão

Nesta aula discutimos classificação das partículas elementares. Conhecemos características de léptons e hádrons. Discutimos as leis de conservação na transformação de partículas elementares.

RESUMO



No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foi apresentada classificação de partículas elementares. Partícula elementar é um termo aplicado para objetos sub-nucleares que não podem ser separados por partes. Interações que governam comportamento de partículas elementares são eletromagnética, forte e fraca. Partículas elementares são divididas por quanta de interações (bósons de calibre) e partículas de matéria. Partículas de matéria são divididos por dois grupos: léptons e hádrons. Existem 3 gerações de léptons: elétron e neutrino eletrônico, múon e neutrino de múon, lépton tau e neutrino de lépton tau. Mais 3 gerações de anti-partículas correspondentes. Léptons possuem uma característica – carga leptônica. A cada geração de léptons é prescrita carga correspondente: carga leptônica eletrônica, carga leptônica

de múon, carga leptónica de lépton tau. Carga leptónica é conservada nas reações de transformação de partículas. Propriedades de léptons são governadas principalmente pela interação fraca.

Grupo de hádrons contem mais de 400 partículas. Hádrons são divididos por dois grupos: mesons e bárions em correspondência de spin de partículas. Mésons têm spin inteiro, bárions têm spin semi-inteiro. As bárions prescrite característica, chamada carga bariónica B . Propriedades de hádrons são governadas principalmente pela interação forte. Além disso hádrons possuem características específicas: estranheza S , charme C , beleza b . Carga bariónica B , estranheza S , charme C , beleza b são conservados nas reações governadas por interações eletromagnética e forte e não conservadas no caso de interação fraca.

Foi descrito o Modelo de Quarks de Hádrons. Segundo a esse modelo hádrons são compostos por partículas fundamentais – quarks. Existem 3 gerações de quarks: u e d , c e s , t e b . Mais 2 gerações de anti-quarks correspondentes. Mésons contêm na sua estrutura 1 quark e 1 anti-quark, bárions contêm na sua estrutura 3 quarks. Cargas elétricas e características de carga bariónica B , estranheza S , charme C , beleza b são apresentadas nas Tabelas do Capítulo.



PRÓXIMA AULA

Em nossa próxima aula discutiremos conceitos importantes de Relatividade Especial e determinaremos limiar de reação para o

caso de velocidades relativísticas de partículas elementares.



ATIVIDADES

ATIV. 8.1. Quais das reações são proibidas: a) $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$; b) $n + p \rightarrow \Sigma^+ + \Lambda^0$; c) $\pi^- \rightarrow \mu^- + e^- + e^+$; d) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$; e) $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$? Explicar porque.

ATIV. 8.2. Quais das reações são proibidas: a) $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$; b) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+$; c) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$; d) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$; e) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$; f) $\pi^- \rightarrow K^- + K^+ + n$; g) $\Sigma^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$; h) $\pi^- + p \rightarrow K^- + K^+$; i) $K^- + n \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$; j) $\nu_\mu + p \rightarrow n + e^+$? Explicar porque.

ATIV. 8.3. Determinar estrutura de quarks mesons K^+ , K^- e híperon Ω^- .

ATIV. 8.4. Determinar estrutura de quarks, carga elétrica e bariônica de partículas que possuem características: a) spin = 0, estranheza $S=-1$, beleza $b=+1$; b) spin = 1/2, estranheza $S=0$, charme $C=+1$, beleza $b=0$; c) spin = 1/2, charme $C=0$, estranheza $S=0$, beleza $b=-1$.

ATIV. 8.5. Determinar carga elétrica e bariônica de hádrons que possuem números quânticos: a) estranheza $S = -1$, charme $C = -1$; b) estranheza $S = -1$, beleza $b = -1$.



LEITURA COMPLEMENTAR

ALONSO, M., FINN, E. J. - Física. Vol. III. Fundo Educativo Interamericano, 1971.

MENEZES, D. P. - Introdução à física nuclear e de partículas elementares. Florianópolis, Editora da UFSC, 2002.

SHELLARD, R. C. - Introdução a física das partículas elementares. São Paulo, Instituto de Física Teórica, 1982.