

# Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares

(A text for high school teachers about elementary particles)

Fernanda Ostermann

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física  
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal 15051, 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil*

Recebido em 22 de dezembro, 1998

Este artigo é dirigido a professores de Física do ensino médio com o objetivo de apresentar, de maneira acessível, um importante tópico de Física Contemporânea: partículas elementares. Este trabalho foi produzido a partir da tradução e adaptação de materiais do curso "Topics in Modern Physics" organizado no Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), Estados Unidos.

This work is directed to high school Physics teachers in which we attempt to present, as accessible as possible, an important topic in Contemporary Physics - elementary particles. The text presented here has been produced from a translation and an adaptation of materials from the "Topics in Modern Physics Institute", sponsored by the Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), United States of America.

## I. Átomo: um breve histórico<sup>1</sup>

A fascinante história do desenvolvimento do conceito de átomo praticamente se confunde com a própria história do pensamento científico ocidental e, em particular, com o desenvolvimento da Física.

O entendimento deste conceito causou um grande impacto na história das ciências: na Filosofia Antiga, na Mecânica Newtoniana, na Química, na Teoria Cinética dos Gases, na Eletricidade e Magnetismo, na Mecânica Quântica, no desenvolvimento de novas tecnologias e na descoberta de novas interações fundamentais na natureza.

A idéia de que há uma simplicidade subjacente responsável pela variedade infinita de matéria no mundo é proposta, pela primeira vez, na Filosofia Grega por Tales de Mileto (640-562 a.C.).

Com a Antigüidade Clássica, nasce uma época na qual o homem buscava, em contraposição aos mitos, uma explicação causal e racional da natureza. Esse período da Filosofia é marcado pela busca de uma ordem: é o ideal grego de Cosmos (Mundo em latim). Buscar a ordem pressupõe o reconhecimento de que deve haver um princípio simples, uma unidade que dá conta de tudo.

O conceito de átomo é introduzido por Leucipo, e elaborado por Demócrito (585 a.C.). A palavra **átomo**, de origem grega, significa algo indivisível; a essência última da matéria. Demócrito postulou a existência de

coisas que: a) são muito pequenas para serem observadas; b) estão em movimento contínuo no vazio; c) são impossíveis de serem subdivididas - os átomos, por colisões, unem-se para formar a imensa variedade de coisas que conhecemos.

Na Grécia Clássica, os filósofos se perguntavam: Como o universo funciona? Esta é ainda nossa pergunta em 1999.

Já na Idade Média, o atomismo, enquanto doutrina filosófica, é praticamente abandonado. O pensamento do homem volta-se para questões espirituais, para Deus. É a partir de Copérnico, em 1543, que o homem deixa de estar no centro do mundo, quando então o sistema geocêntrico é substituído pelo sistema heliocêntrico.

Com o início da Renascença Italiana, ressurgiu um crescente interesse do homem com relação à natureza. A Ciência Natural adquire grande impulso nos séculos XVI e XVII com os trabalhos dos modernos como Copérnico (1473-1543), Galileu (1564-1642) e Newton (1642-1727).

Em particular, Newton acreditava que o elemento básico da Física é a **lei universal do movimento** e não a essência dos **corpos** ou **formas geométricas**. Newton aceita o atomismo sem questionar a origem ou a composição do átomo. Ele está preocupado com a **forma da interação** pela qual matéria atrai matéria e não exatamente com sua composição. A Teoria Cinética dos Gases (segunda metade do século XIX),

<sup>1</sup> Esta seção baseia-se na palestra ministrada por Leon Lederman, em 17 de julho de 1995 no Fermilab, Estados Unidos.

sob influência das idéias newtonianas, consegue mostrar que as propriedades físicas dos gases são explicadas supondo-se que um gás seja formado de um número imenso de átomos e moléculas em movimento, interagindo entre si através de forças newtonianas.

Mas até o final do século XIX, os átomos são considerados elementos sem estrutura. Somente com o desenvolvimento de outra área da Física, a Eletricidade, ligada a nomes como Faraday (1791-1862), Coulomb (1736-1806), Ampère (1770-1830), Oersted (1717-1751), será possível concluir que o átomo não é, na verdade, indivisível. Assim, ao longo de 2000 anos, perdura a crença em um mundo construído a partir de um constituinte básico indivisível.

Os alicerces para uma mudança na concepção do átomo como o constituinte último da matéria começam a ser desenvolvidos com o trabalho do químico inglês Dalton (1766-1844), em 1808. Ele observou que uma variedade de substâncias podiam ser formadas combinando-se diferentes quantidades de alguns poucos elementos tais como hidrogênio, carbono, oxigênio, sódio. A maneira como estes elementos unem-se para formar as diversas substâncias poderia ser entendida se cada elemento fosse feito de átomos. A combinação de átomos de vários elementos formam as moléculas das substâncias. Mas ainda Dalton acreditava que a essência última da matéria era indivisível; por isso, homenageando Demócrito (460-370 a.C.), batizou este constituinte último de “átomos”.

No começo do presente século, gradativamente, a idéia de que os átomos não são as entidades fundamentais na natureza começou a ficar clara. A primeira evidência indireta surge por volta de 1869, quando Mendeleev (1839-1907) descobriu que, ao listar os elementos, do mais leve - hidrogênio - até o mais pesado até então conhecido - urânio -, elementos com propriedades similares repetiam-se em intervalos regulares. Se cada elemento fosse realmente independente de todos os outros, então, semelhanças entre eles seriam meramente coincidências e ocorreriam de maneira aleatória. Mas hoje, esta regularidade é entendida a partir do fato de que os átomos não são elementares, mas sim sistemas complexos de elétrons que circundam um núcleo compacto. O núcleo e os elétrons são mantidos pela atração eletromagnética entre cargas opostas - os elétrons são negativamente carregados e o núcleo é positivo. Os experimentos que verificaram esta estrutura atômica foram concebidos por Rutherford (1871-1937), há quase 90 anos. Na realidade, J.J. Thomson (1856-1940), em 1897, obteve a primeira evidência experimental de que elétrons fazem parte do átomo e Rutherford, em 1911, propôs, baseado em resultados experimentais, um átomo neutro, massivo, que contém elétrons carregados e muito leves (2000 vezes mais leves que o átomo de hidrogênio). Ele “descobriu” o núcleo - um trilhonésimo do volume do átomo.

O átomo, formado pelos “elétrons de Thomson” e

pelo “núcleo de Rutherford”, não funcionava. Rutherford havia sugerido que a estrutura atômica é análoga ao sistema solar: os planetas são os elétrons e o Sol é o núcleo, mas a atração é eletromagnética (e não gravitacional, como no sistema solar).

Mas pelas leis da Física, até então conhecidas (Mecânica Newtoniana e Eletromagnetismo), não seria possível conceber a existência de tal átomo: cargas elétricas em órbitas circulares, tais como os elétrons, irradiariam energia continuamente (Eisberg & Resnick, 1983, p. 851) e em movimento espiral colapsariam em direção ao núcleo em uma fração de um segundo. No período de 1915-1930, uma revolução ocorreu na Física. A Física Clássica revela-se inadequada para a descrição de sistemas microscópicos tais como átomos. Surge uma nova teoria dinâmica para a microfísica: a Mecânica Quântica.

Inspirado nas idéias de Planck (1858-1947) em 1900 e Einstein (1879-1955) em 1905 sobre a emissão de luz em “pacotes” (quanta) de energia, Bohr (1885-1962) propõe que as energias dos elétrons nos átomos são também quantizadas: os elétrons nos átomos somente podem ter certos valores de energia bem definidos. Restritos a estes estados de energia permitidos, os elétrons não podem irradiar energia continuamente e espiralar suavemente em direção ao núcleo. Eles só podem “saltar” de um estado de energia a outro e emitir ou absorver energia a fim de manter a energia total constante.

O aprofundamento destas idéias culmina, a partir de 1928, na chamada Teoria Quântica Moderna, desenvolvida por Schrödinger (1887-1961), Heisenberg (1901-1976), De Broglie (1892-1987), entre outros. Mal esta teoria havia sido estabelecida e algumas perguntas relacionadas à estabilidade do núcleo atômico já inquietavam os físicos como, por exemplo: por que o núcleo (carregado positivamente) não “explode” já que a pequenas distâncias a repulsão coulombiana entre os prótons é enorme?

Em 1932, uma das respostas a esta pergunta surge com a proposta e posterior confirmação experimental do **nêutron** por Chadwick (1891-1974) - partícula sem carga que também compõe o núcleo, juntamente com o próton. Além disso, a hipótese da existência de uma nova interação (chamada nuclear ou forte) entre prótons e nêutrons passa a explicar por que o núcleo não “explode” (a força forte, que é atrativa, vence a repulsão coulombiana entre as partículas constituintes do núcleo).

Em 1930, Pauli (1900-1958) postula a existência de uma partícula quase indetectável e Fermi (1901-1954) atribui seu nome - o neutrino - para explicar o comportamento de núcleos radioativos (núcleos instáveis que, espontaneamente, decaem através da emissão de partículas). Esta hipótese foi confirmada em experimentos realizados entre 1930-1955.

Então, na década de 30, são conhecidas as seguintes partículas (o elétron, o próton, o nêutron e o neutrino),

respectivamente:

$$e^-, p, n, \nu$$

O estudo do núcleo atômico tomou impulso a partir do desenvolvimento de novas tecnologias. A técnica consiste em acelerar partículas a energias suficientemente altas ( $\geq 100 \text{ MeV}^2$ ) que, colidindo com o núcleo, possam fragmentá-lo. O objetivo é aprender como os núcleons (prótons e nêutrons) permanecem juntos e qual a natureza das forças interpartículas. O resultado foi surpreendente. Novas partículas foram criadas a partir da fragmentação do núcleo. Em muitos casos, a previsão teórica foi anterior à realização de experimentos.

As novas partículas não “vivem” por muito tempo. Mas um tempo suficientemente longo, na maioria dos casos, para que algumas de suas propriedades sejam determinadas (tais como massa, carga elétrica, spin). Foram batizadas com letras gregas:  $\pi, K, \Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega, \dots$ . Coletivamente, estas partículas, nascidas nas colisões fortes, nucleares, foram chamadas de **hádrons**.

Quando, na década de 60, o número destas chamadas partículas elementares se aproxima do número de elementos químicos da Tabela Periódica, sugere-se que os hádrons têm uma estrutura interna.

Em 1964, Gell-Mann (1929- ) e Zweig propõem a hipótese do **quark**. Três novos objetos são propostos. Através de suas combinações, é possível obter-se todos os hádrons à época conhecidos. Os três quarks foram chamados de:

- up - símbolo **u**
- down - símbolo **d**
- strange - símbolo **s**

As propriedades dos quarks foram estabelecidas de modo a descrever as partículas já conhecidas, podendo-se, então, conhecer a composição dos hádrons. Por exemplo:

- próton = **u u d**
- nêutron = **u d d**
- lambda = **u d s**

Implícita na hipótese dos quarks está a idéia de que estes são primordiais, indivisíveis, isto é, os átomos de Demócrito. Assume-se que eles têm raio nulo, ou seja, são pontos geométricos perfeitos, como os elétrons e outras partículas chamadas **léptons**, dentro do limite de  $10^{-16} \text{ cm}$ .

Há também, nessa época, três outras partículas pontuais já bem conhecidas:

<b>elétron</b>	<b>múon</b>	<b>neutrino</b>
$(e^-)$	$(\mu)$	$(\nu)$

Estas, no entanto, não se combinam para formar os hádrons, pois não experimentam a interação forte. Coletivamente, são chamadas de **léptons**.

Na década de 60, acreditava-se (e ainda hoje acredita-se que assim o seja) que a matéria no universo é feita de **quarks e léptons**.

Mas três quarks não eram suficientes...

Em 1961, o grupo dos léptons foi ampliado. Um novo neutrino ( $\nu_\mu$ ) foi adicionado ao grupo original de três, formado pelo  $e^-, \nu, \mu$ . Um novo padrão emergiu deste pequeno agrupamento:

$$\begin{pmatrix} e & \mu \\ \nu_e & \nu_\mu \end{pmatrix} \text{ onde } \begin{matrix} \nu_e \rightarrow \text{neutrino do elétron} \\ \nu_\mu \rightarrow \text{neutrino do múon} \end{matrix}$$

O neutrino do elétron foi descoberto em 1956; o neutrino do múon, em 1961, no Laboratório Nacional de Brookhaven, nos Estados Unidos.

Mas, se existem quatro léptons, deve haver um quarto quark, por questão de simetria. Em 1975, é descoberto o quark *charm* (**c**), formando então o grupo:

$$\begin{pmatrix} u & c \\ d & s \end{pmatrix}$$

Em 1975, no Acelerador Linear da Universidade de Stanford, Estados Unidos, um quinto lépton é “descoberto” - o tau ( $\tau$ ) e, em 1977/78, um quinto quark *bottom*. Por simetria e pelo padrão dos léptons é sugerida a existência de um outro neutrino:  $\nu_\tau$  (neutrino do tau). Assim, o grupo dos léptons passou a ser:

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Mas se há um quark *bottom* (**b**) deve haver um *top* (**t**). Recentemente, dezessete anos depois da “descoberta” do quark *bottom*, em 1995, o quark *top* foi identificado, no Fermilab, Estados Unidos, por uma equipe da qual fazem parte cientistas brasileiros.

Assim, hoje (1999), são conhecidos seis quarks e seis léptons:

$$\left\{ \begin{matrix} u d & c s & t b & \rightarrow \text{quarks} \\ e \nu_e & \mu \nu_\mu & \tau \nu_\tau & \rightarrow \text{léptons} \end{matrix} \right\}$$

Portanto, acredita-se que os constituintes últimos da matéria sejam seis quarks e seis léptons. Mas há problemas a serem resolvidos e questões em aberto. Este modelo, chamado Modelo Padrão, certamente não é a última palavra...

Para concluir este breve histórico do conceito de átomo, o desenho (fora de escala), a seguir, representa o modelo de estrutura atômica atualmente aceito. Trata-se, apenas, de uma tentativa de visualizar o átomo e seus constituintes, os quais não são exatamente as esferas que aparecem no desenho (Fig. 1).

<sup>2</sup>MeV =  $10^6$  e V, onde 1 e V (1 elétron-volt) é definido como a quantidade de energia adquirida por uma carga elétrica igual à de um elétron, quando acelerada por uma diferença de potencial de 1V.

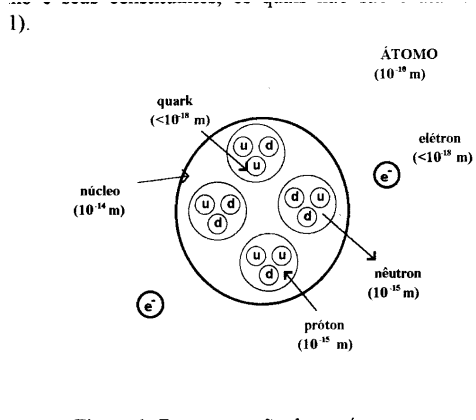


Figura 1: Representação de um átomo.

## I Nos primórdios do século XX

### II.1 A descoberta do núcleo

Por volta de 1911, Rutherford, ao utilizar um tipo de radiação - partículas alfa ( $\alpha$ ) - para bombardear átomos, procurava conhecer sua estrutura interna. Embora, nesta época, não se sabia o que eram as partículas alfa, era possível utilizá-las. O polônio, que é um elemento radioativo, era a fonte de partículas alfa. Essas partículas são emitidas a partir deste elemento em todas as direções, mas a Rutherford só interessava aquelas que se chocavam com um alvo. Um anteparo móvel era utilizado para detectar as partículas alfa que emergiam a partir do alvo. Com este anteparo, Rutherford era capaz de estudar a posição das partículas depois que passavam através do alvo (Fig. 2). No caso, o alvo de Rutherford eram finas folhas de metal.

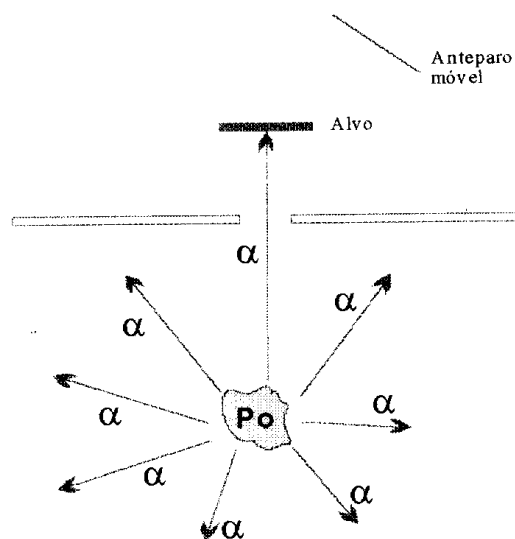


Figura 2: Experiência de Rutherford.

O modelo de átomo aceito até então era o de Thomson - “o pudim de ameixas”. Nesse modelo, o átomo é uma massa de carga positiva, em forma de esfera, na qual os elétrons (carregados negativamente) estão “embebidos”. (Lembre que Thomson, em 1897, obteve a primeira evidência experimental da existência dos elétrons, conforme mencionado na seção I). De acordo com o modelo atômico de “pudim de ameixas”, os resultados dos experimentos de Rutherford deveriam ser similares ao mostrado na Fig. 3.

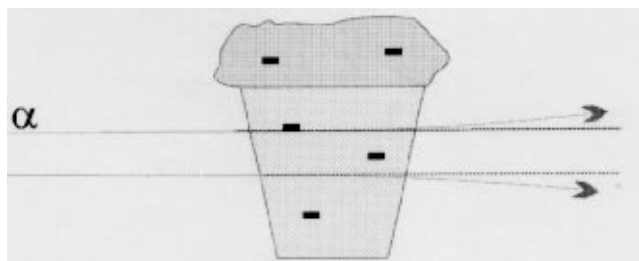


Figura 3: As partículas alfa atravessando o “pudim de ameixas”.

As partículas alfa deveriam passar através do átomo, sendo levemente desviadas de suas trajetórias pelo “pudim” positivo. Mas, surpreendentemente, algumas retrocederam na direção contrária à inicial, como se houvessem colidido com algo muito massivo. Tal fato era inconsistente com o modelo atômico de “pudim de passas”. Entretanto, este resultado está de acordo com um novo modelo (Fig. 4). Neste modelo, o átomo consiste de:

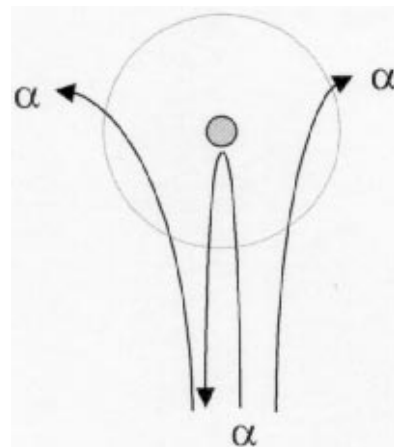


Figura 4: Partículas alfa retrocedem ao colidir com o núcleo atômico.

- um **núcleo sólido** no qual toda a carga elétrica positiva e quase toda a sua massa estão concentradas.
- **elétrons** (leves) em alguma parte da região vazia fora do núcleo. Os elétrons têm carga elétrica negativa para contrabalançar a carga positiva do núcleo.

As partículas alfa colidiram com este núcleo denso. Os elétrons praticamente não afetaram a trajetória das partículas alfa.

Rutherford e Chadwick, para aprender mais sobre o núcleo atômico, continuaram a utilizar partículas alfa. Em uma série de experimentos, eles as faziam colidir com núcleos de nitrogênio e observavam os resultados. Conforme o esperado, partículas alfa eram ejetadas, mas também núcleos de hidrogênio eram ejetados (Fig. 5).



Figura 5: Núcleos de hidrogênio são formados a partir da incidência de partículas alfa em núcleos de nitrogênio.

Se a partir de núcleos de nitrogênio são obtidos núcleos de hidrogênio, então, provavelmente, os primeiros são compostos por estes últimos. De fato, todos os núcleos são compostos por núcleos de hidrogênio.<sup>3</sup>

**Próton** é o nome dado ao núcleo de hidrogênio. Prótons têm uma unidade de carga elétrica, igual e contrária à carga do elétron. Prótons também têm massa, e por simplificação, todas as massas das outras partículas são referidas em termos da massa do próton (1 unidade). Nesta unidade, a massa do elétron é aproximadamente 1/1800.

Estes experimentos mostraram que o núcleo atômico tem um tipo de estrutura interna. Ele também é composto por partes. Ele contém prótons. Quanto mais positiva a carga de um núcleo, maior é o número de prótons que ele contém.

## II.2 Prótons e nêutrons como constituintes do núcleo

Os núcleos atômicos contêm prótons. Mas esta não é a imagem completa. Em 1914, é sugerido um modelo de núcleo composto de prótons e elétrons. A aplicação deste modelo ao núcleo do nitrogênio está representada na Fig. 6.

As propriedades do núcleo de nitrogênio são as seguintes:

- carga: +7
- massa: 14

A única maneira de combinar prótons e elétrons em um núcleo de nitrogênio, para que ele tenha as propriedades acima referidas, é colocando 14 prótons e 7 elétrons no núcleo (carga total 7, massa total 14), e mais 7 elétrons fora do núcleo (o átomo como um todo é neutro).

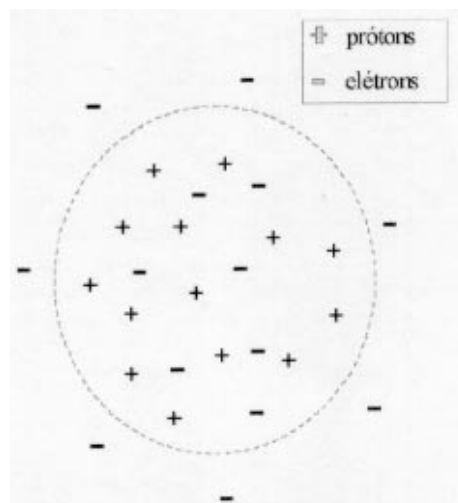


Figura 6: O átomo de nitrogênio conforme o modelo de núcleo proposto em 1914.

Entretanto, há um problema neste modelo (que hoje se sabe) que se refere ao spin do núcleo de nitrogênio. Spin é uma propriedade que uma partícula pode ter, assim como a carga elétrica e a massa. A analogia clássica mais utilizada para spin é a do movimento de rotação da partícula sobre seu próprio eixo.

Pode-se pensar em spin desta maneira, mas elétrons e prótons e todas as outras partículas com spin, na realidade, não giram como um pião. Spin é uma propriedade interna de uma partícula que pode ser calculada ou medida, exatamente como a massa o é. Elétrons e prótons têm spin 1/2 e este pode ser “para cima” ou “para baixo” e estas são as únicas possibilidades. O núcleo de nitrogênio tem spin (medido) inteiro. Não é possível que um número **ímpar** de partículas com spin 1/2 cada uma (14 prótons mais 7 elétrons - no caso do núcleo de nitrogênio) possa combinar-se a fim de produzir um spin inteiro.

Por volta de 1930, muitos físicos perceberam que o modelo de um núcleo constituído por prótons e elétrons era inadequado. Para que o núcleo de nitrogênio tenha spin, carga e massa corretos, então, é necessário que exista um número par de objetos no núcleo. É possível, então, a combinação de 7 (dos 14 prótons) com os 7 elétrons no núcleo, dando origem a 7 objetos neutros com massa semelhante à do próton.

A Fig. 7 ilustra esta combinação. Esta foi a primeira hipótese lançada por Rutherford para interpretar os resultados obtidos a partir da interação das partículas alfa e núcleos de nitrogênio. Trata-se de uma suposição inicial, que, à época, era bastante razoável.

<sup>3</sup>Hoje se sabe que núcleos de hidrogênio são prótons.

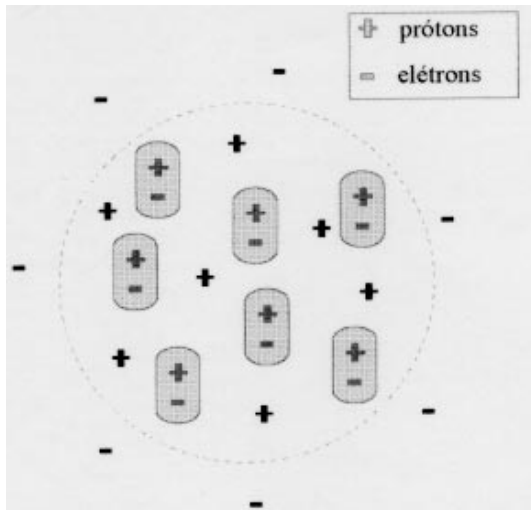


Figura 7: A combinação de 7 prótons com 7 elétrons no núcleo forma 7 objetos neutros.

Por volta de 1920, havia a suspeita de que um objeto neutro (com a mesma massa do próton) fazia também parte do núcleo. Em 1932, o **nêutron** (spin 1/2) foi descoberto por Chadwick (ver seção VIII.2). Assim, 7 prótons e 7 nêutrons compõem o núcleo de nitrogênio (o que fornece massa, carga e spin corretos).

### II.3 Algumas Leis de Conservação

Leis de conservação são importantes na Física e podem ajudar na explicação de por que algumas coisas ocorrem e outras não. Não se conhece nenhum processo físico que viole as seguintes regras e, como consequência, supõe-se que todos os processos físicos devem satisfazê-las. São elas: conservação de energia, conservação de momentum e conservação de carga elétrica.

#### II.3.1 Conservação de Energia

A energia total das partículas antes de um decaimento ou reação deve ser igual à energia total das partículas após este processo. Fala-se em energia total porque a energia envolvida manifesta-se em duas formas: energia cinética ou de movimento, que depende da velocidade da partícula; energia de repouso dada pela famosa equação de Poincaré:  $E = m_0 c^2$ , onde a energia ( $E$ ) é igual ao produto da massa de repouso ( $m_0$ ) da partícula pela velocidade da luz ( $c$ , que é uma constante) ao quadrado<sup>4</sup>. Quanto maior a massa da partícula, maior sua energia de repouso. Para decaimentos, a conservação de energia ocorre se a energia de repouso (ou a massa) da partícula que decai for maior ou igual à soma das massas das partículas finais.

A conservação de energia, para uma partícula A (inicialmente em repouso), que decai em duas partículas B e C, é dada por:

$$\boxed{\text{energia de repouso de A}} = \boxed{\text{energia de repouso de B}} + \boxed{\text{energia cinética de B}} + \boxed{\text{energia de repouso de C}} + \boxed{\text{energia cinética de C}}$$

Como todas as energias são positivas, tem-se que:

$$\boxed{\text{energia de repouso de A}} > \boxed{\text{energia de repouso de B}} + \boxed{\text{energia de repouso de C}}$$

#### II.3.2 Conservação de Momentum

O momentum total de um sistema de partículas deve permanecer o mesmo em qualquer processo físico. Para velocidades com valores muito menores que a velocidade da luz, o momentum de uma partícula é o produto de sua massa por sua velocidade. Em uma reação, se o momentum total inicial (a soma dos momenta das partículas envolvidas) for zero, então, o momentum total final também deve ser nulo. Logo, se uma partícula decai exatamente em duas partículas, estas devem emergir da reação em sentidos exatamente opostos para que o momentum seja conservado, conforme ilustra a Fig. 8.

Nesse exemplo, a massa  $M$  da partícula 2 é maior que a massa  $m$  da partícula 3. Então, o módulo da velocidade  $V$  da partícula 3 deve ser maior que o módulo da velocidade  $v$  da partícula 2, para que o momentum  $Mv$  da partícula 2 seja igual e contrário a  $mV$ , que é o momentum da partícula 3. Portanto, antes e depois do decaimento, o momentum total é zero.

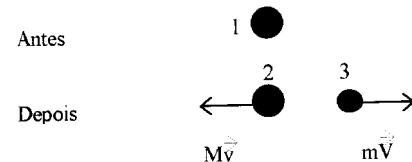
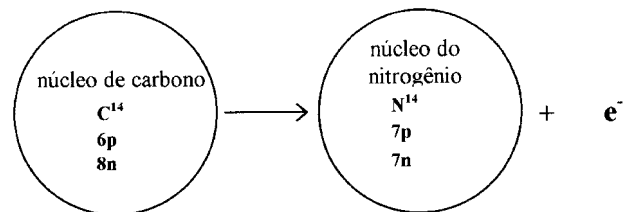


Figura 8: A conservação do momentum no decaimento da partícula 1.

#### II.3.3 Nêutrons

No decaimento beta, ocorre a emissão de um elétron. Mas este elétron não está na periferia do átomo. Sua origem está no próprio núcleo. Um exemplo é o seguinte:



Neste processo (decaimento  $\beta$ ), o número total de prótons não é conservado e, tampouco, o de nêutrons. Ganha-se um próton e perde-se um nêutron. Há um processo subjacente ocorrendo: um nêutron decai em um próton e um elétron.

<sup>4</sup> Assim, a unidade da massa de repouso de uma partícula pode ser dada em MeV/ $c^2$ .

Na década de 20, o decaimento  $\beta$  foi cuidadosamente estudado e houve a suspeita que não ocorria a conservação da energia neste processo. Pauli propôs que uma nova partícula, a qual ainda não podia ser detectada, escapulia com a energia que faltava. Esta partícula não tinha carga elétrica, pequena (ou nenhuma) massa e o mesmo spin dos prótons e elétrons ( $1/2$ ). Fermi chamou esta partícula de neutrino, que significa “um pequeno nêutron” em italiano. A existência desta partícula foi completamente aceita pelos físicos por volta da década de 50. Nessa época, observou-se também que o momentum não era conservado no decaimento  $\beta$ , a menos que o neutrino fizesse parte do processo. A Fig. 9 representa o que deveria ser “visto” se o nêutron decaísse somente em duas partículas e houvesse a conservação de momentum (o próton e o elétron retrocederiam em sentidos contrários).

No entanto, o processo ilustrado na Fig. 9 não foi o que os físicos observaram. Na realidade, os momenta do próton e do elétron se pareciam como ilustra a Fig. 10.

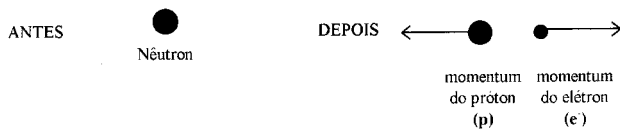


Figura 9: O decaimento  $\beta$  a ser observado sem a presença do neutrino.



Figura 10: Os momenta do próton e do elétron após o decaimento.

A conservação de momentum, neste processo, só será satisfeita ao postular-se a existência do neutrino. Um diagrama do processo é mostrado na Fig. 11, onde o próton ( $p$ ), o elétron ( $e^-$ ), o nêutron ( $n$ ) e o neutrino ( $\nu$ ) participam do decaimento  $\beta$ .

$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$



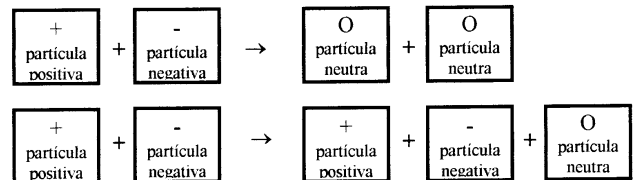
Figura 11: O decaimento  $\beta$ .

<sup>5</sup>Rigorosamente falando, no domínio microscópico, o conceito de força deixa de ter um significado preciso. Conseqüentemente, físicos de partículas preferem falar em interações, ou seja, a ação de partículas sobre outras partículas. Mas, neste texto, utilizaremos o conceito de força e interação indistintamente.

Após aproximadamente 25 anos da proposta de sua existência, em 1956, o neutrino foi descoberto em um reator nuclear (ver seção VIII.3).

### II.3.4 Conservação de carga elétrica

A carga elétrica total deve permanecer constante. Por exemplo, ambos os seguintes processos obedecem ao princípio da conservação da carga. Estas não são as únicas possibilidades, mas dois exemplos de reações.



Em ambos os exemplos, dois objetos carregados, um com carga positiva e o outro com carga negativa, são as partículas iniciais (lado esquerdo da reação). No primeiro caso, as partículas finais (lado direito da reação) têm carga elétrica nula. No segundo caso, resultam três partículas: uma positiva, uma negativa e uma neutra. Nos dois casos, a carga total, ao final, é zero.

## II Interações fundamentais

### III.1 Introdução

Força é o que provoca alteração no estado de movimento de um corpo. Na Física Moderna, as forças são transmitidas pela troca de partículas mediadoras. Quando duas partículas exercem força uma sobre a outra, elas o fazem pela troca de uma partícula mediadora<sup>5</sup>. Uma possível analogia para o entendimento das interações via troca de partículas é o jogo do bumerangue. Um jogador, de costas para o outro, lança o bumerangue o qual, inicialmente, se afasta do segundo jogador (que também está de costas para o primeiro). Em seguida, o bumerangue faz uma curva, atingindo o segundo jogador. Levando-se em conta os recuos de cada um (tanto o que lançou o bumerangue quanto o que o agarrou), o resultado efetivo é uma atração entre os dois jogadores devido à “troca” do bumerangue.

### III.2 Forças fundamentais da natureza

As quatro forças fundamentais da natureza são:

- força gravitacional;
- força eletromagnética;
- força forte;
- força fraca.

### III.2.1 Força gravitacional

Quaisquer corpos que possuem massa atraem-se mutuamente. Esta é a chamada interação gravitacional que diminui de intensidade quanto maior for a distância entre os corpos. Esta é a força que rege todos os movimentos dos corpos celestes no universo. Já no campo da Física de Altas Energias, esta interação não será importante quando a energia cinética da partícula for muito maior que sua energia potencial gravitacional, o que normalmente acontece. Mas, é claro, que todos os objetos com massa experimentam a força gravitacional, mesmo quando esta é muito fraca. A partícula mediadora da força gravitacional é chamada de **gráviton**, mas esta nunca foi detectada experimentalmente. A força gravitacional é uma força atrativa de longo alcance.

### III.2.2 Força Eletromagnética

Na força eletromagnética, está envolvida a carga elétrica que os corpos possuem. Partículas carregadas tais como o elétron e o próton experimentam uma força eletromagnética atrativa pois possuem cargas de sinais contrários. Partículas com cargas de sinais iguais se repelem. Já as partículas neutras (como o nêutron e o neutrino), não interagem eletromagneticamente. É via interação eletromagnética que os elétrons e o núcleo estão unidos formando os átomos. Como no caso da força gravitacional, a força eletromagnética é de longo alcance, proporcional à carga das partículas e torna-se cada vez mais fraca à medida que a distância interpartículas aumenta. Já que o nêutron e o neutrino não têm carga elétrica, eles não são afetados pela força eletromagnética. A partícula mediadora desta interação é o **fóton** ( $\gamma$ ). A primeira evidência experimental de sua “existência” foi em 1905, quando Einstein explicou o efeito fotoelétrico, atribuindo à luz propriedades corpusculares, através da hipótese de que sua energia é armazenada em pequenos pacotes: os fótons.

### III.2.3 Força forte

A força forte é uma força atrativa que age entre os núcleons (o nome coletivo para prótons e nêutrons). É atrativa para todas as combinações de prótons e nêutrons, ou seja, um núcleon atrai outro núcleon.

Não fosse pela força forte, o núcleo não seria estável, pois a força eletromagnética de repulsão entre os prótons causaria seu rompimento. Mais adiante, será discutido que, a rigor, a força forte age sobre os **quarks**, que são os constituintes do próton e do nêutron, mas até lá, pode-se considerar o efeito deste processo subjacente sobre os núcleons (força forte residual). A partícula mediadora da força forte é chamada de **glúon** (**g**) e há evidência experimental de sua existência. Esta força é de curto alcance, pois está restrita a dimensões de  $10^{-15}$  m (dentro do núcleo).

### III.2.4 Força fraca

A força fraca é assim chamada porque é fraca em intensidade se comparada à forte. Esta é a força responsável pelo decaimento  $\beta$ , como visto na seção II. Os **neutrinos** são afetados apenas pela **força fraca**, já que não possuem massa<sup>6</sup> (logo não interagem gravitacionalmente) nem carga (o que exclui a interação eletromagnética). Sempre que um neutrino estiver envolvido em uma reação, é sinal de que esta é governada pela força fraca. As partículas mediadoras desta interação são: **W<sup>+</sup>**, **W<sup>-</sup>** e **Z<sup>0</sup>**. Estes mediadores são muito massivos, ao contrário das outras partículas mediadoras (gráviton, fóton e glúon) que possuem massa de repouso nula, estes têm massa quase cem vezes maior que a massa do próton, o que implica que a força fraca tem um raio de ação limitado, da ordem de  $10^{-17}$  m.

## III Novas partículas no modelo: as descobertas das décadas de 30, 40 e 50

### IV.1 Antipartículas

#### • O Pósitron

Dirac (1902-1984), ao estudar as equações que governam o comportamento dos elétrons em campos elétricos e magnéticos, previu a existência de uma nova partícula similar ao elétron. Esta nova partícula foi chamada de pósitoon ( $e^+$ ), com a mesma massa e o mesmo spin do elétron mas com carga elétrica oposta. Surge, então, a idéia de que para cada partícula (matéria) existe uma antipartícula (antimatéria) associada. É interessante observar que o pósitoon foi descoberto em 1932 por Anderson, num estudo com uma câmara de nuvens, depois que sua existência foi postulada a partir de uma teoria, em 1928.

#### • Antiprótons e antinêutrons

Não há razão para acreditar que o elétron seja a única partícula com uma antipartícula associada. Assim, antipartículas foram propostas para o próton e para o nêutron. Antiprótons, por exemplo, têm mesma massa, mesmo spin e cargas elétricas contrárias ao próton.

<sup>6</sup>Resultados recentes, obtidos no Super Kamiokande (Japão), indicam a possibilidade de se atribuir massa não nula aos neutrinos.



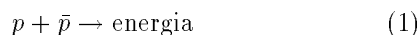
Por volta de 1955, o antipróton e o antinêutron foram descobertos (a partir de colisões de partículas de alta energia foi possível detectá-los, uma vez que são mais massivos que o elétron). Eles não receberam símbolos novos, apenas “barras” em cima dos símbolos do próton e do nêutron ( $\bar{p}$  e  $\bar{n}$ ). E assim foi para todas as demais antipartículas.

#### IV.2 Propriedades das antipartículas

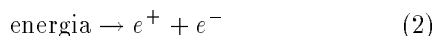
Quando a partícula tem uma propriedade cujo valor possui um oposto (como carga elétrica: positiva ou negativa), então, a antipartícula terá, para esta propriedade, seu valor oposto. Quando uma propriedade não tem valor oposto, então, a partícula e a antipartícula terão o mesmo valor para esta propriedade. Exemplos: massa, carga neutra.

#### IV.3 Processos envolvendo partículas e antipartículas

Quando um par partícula/antipartícula encontra-se em uma reação, ele pode aniquilar-se em forma de energia. Um exemplo é a aniquilação do par próton-antipróton:



Energia pode ser criada a partir de um par partícula-antipartícula. Um exemplo de criação de um par elétron-pósitron a partir de energia é o seguinte:



#### IV.4 Novas partículas

##### IV.4.1 Os píons

A massa de uma partícula mediadora e o alcance da força por ela mediada estão relacionados. Quanto maior o alcance, menor é a massa da partícula mediadora. Portanto, uma força com alcance infinito (o máximo possível) terá como mediadora uma partícula com massa zero (a menor possível).

De fato, é o que ocorre com a força eletromagnética: seu alcance é infinito e o fóton tem massa nula. Na década de 30, Yukawa, conhecendo o alcance da força forte, calculou a massa da partícula mediadora: 1/7 da massa do próton. Previu também que tal partícula se apresentaria com três variedades de carga: positiva, negativa e neutra. Esta partícula foi chamada de **píon** ( $\pi$ ).

Em 1948, os píons carregados foram detectados e, em 1950, os píons neutros, com a massa prevista por Yukawa, também o foram<sup>7</sup>.

Na realidade, hoje se sabe que os píons não são os verdadeiros mediadores da força forte entre prótons e nêutrons (os glúons é que são), mas eles agem no sentido de intermediarem a troca de partículas entre os núcleons. Por isso, atualmente, a força forte é subdividida em fundamental (entre quarks) e residual (entre os prótons e os nêutrons, por exemplo).

Os píons se diferenciam das partículas introduzidas até aqui por serem instáveis. Uma partícula instável “vive” por um curto intervalo de tempo e depois espontaneamente decai em outras partículas. Um nêutron é uma partícula deste tipo já que, no decaimento  $\beta$ , este decai em um próton, um elétron e um neutrino. O tempo médio de duração de uma partícula antes de decair é chamado de tempo de vida da partícula. O tempo de vida do nêutron livre é em torno de 15 minutos, o que é extremamente longo se comparado ao do píon. Os píons com carga +1 e -1 têm um tempo de vida da ordem de  $10^{-8}$  segundos; o do píon neutro é de, aproximadamente,  $10^{-16}$  segundos.

A Tabela 1 sintetiza algumas propriedades dos píons e seus decaimentos mais comuns.

Tabela 1: Os três tipos de píons e seus decaimentos mais comuns.

Símbolo	Carga	Massa (massa p=1 unid)	Tempo de vida (s)	Decaimento
$\pi^+$	+1	1/7	$10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
$\pi^-$	-1	1/7	$10^{-8}$	$\mu^- + \nu$
$\pi^0$	0	1/7	$10^{-16}$	$\gamma + \gamma$

##### IV.4.2 Os múons

Na Tabela 1, vê-se que, no decaimento dos píons  $\pi^+$  e  $\pi^-$ , aparecem novos símbolos. Os símbolos  $\mu^+$  e  $\mu^-$

são para as partículas chamadas de múons. Na procura por píons, os físicos encontraram uma partícula com massa 1/9 da massa do próton. Os múons aparecem em dois tipos ( $\mu^+$  e  $\mu^-$ ) e são “primos” pesados do elétron

<sup>7</sup>O físico brasileiro César Lattes (1924 - ) (em colaboração com outros cientistas) detectou experimentalmente o méson pi (ou píon) (ver seção VIII.5).

e do pósitron (200 vezes mais massivos). Na Tabela 2, estão resumidas algumas propriedades dos múons e

seus decaimentos mais prováveis.

Tabela 2: Os dois tipos de múons e seus decaimentos mais prováveis.

Símbolo	Carga	Massa (massa p=1 unid)	Tempo de vida (s)	Decaimento
$\mu^+$	+1	1/9	$10^{-6}$	$e^+ + \nu + \nu$
$\mu^-$	-1	1/9	$10^{-6}$	$e^- + \nu + \nu$

#### IV.5 Os três tipos de neutrinos e antineutrinos

Os modos de decaimento dos píons mostrados na Tabela 2 não são os únicos possíveis e não estão rigorosamente especificados. Por exemplo, o pión positivo usualmente decai da maneira mostrada na Tabela 2, qual seja:



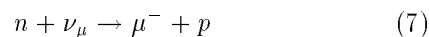
Mas, às vezes, ele pode sofrer o seguinte decaimento:



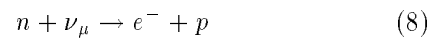
Nas reações (3) e (4), os neutrinos que aparecem não são iguais. O neutrino produzido juntamente com o múon positivo é chamado de **neutrino do múon** ( $\nu_\mu$ ). Já o neutrino produzido em (4) é chamado de **neutrino do elétron** ( $\nu_e$ ). Então, as expressões corretas para os decaimentos (3) e (4) são:



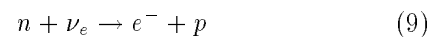
Aparentemente, não é possível saber se, nas reações (5) e (6), os neutrinos que aparecem realmente são diferentes. No entanto, ao observar-se os dois neutrinos nas reações mencionadas, é possível verificar o seguinte. Se um **neutrino do múon** interage com um nêutron, ocorrerá o decaimento (7) que segue:



e nunca,



Mas, agora, se um **neutrino do elétron** interage com um nêutron, ocorrerá o seguinte decaimento:



e nunca,



Em síntese, nos decaimentos, o elétron e o múon e seus respectivos neutrinos (neutrino do elétron e neutrino do múon) não se misturam. Trata-se de uma regra de conservação: o tipo de neutrino segue o tipo de lépton (elétron, múon, tau) envolvido na reação.

Como cada partícula possui sua correspondente antipartícula, os neutrinos também possuem seus antineutrinos associados:

neutrinos	$\nu_e$	$\nu_\mu$
antineutrinos	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$

Adiantando um pouco a cronologia seguida até aqui, pode-se completar a discussão sobre neutrinos introduzindo um “primo” mais pesado do elétron ( $e^-$ ) e do múon ( $\mu$ ). Em 1975, foi descoberta a partícula tau ( $\tau$ ), que pode apresentar-se com carga elétrica positiva ou negativa e cuja massa é duas vezes a do próton. Naturalmente, o tau ( $\nu_\tau$ ) tem um neutrino e um antineutrino associados (respectivamente, o neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ) e o antineutrino do tau ( $\bar{\nu}_\tau$ )). Portanto, ao todo, existem três neutrinos e três antineutrinos.

#### IV.6 Uma classificação das partículas

##### • Léptons

O elétron, o múon, o tau, suas antipartículas correspondentes, os neutrinos e os antineutrinos são classificados como LÉPTONS<sup>8</sup>. Os léptons são partículas com spin 1/2 e não interagem via força forte.

##### • Hádrons

Partículas que interagem via força forte (residual) são chamadas de HÁDRONS<sup>9</sup>. Há dois tipos de hádrons: os **bárions**<sup>10</sup> e os **mésos**<sup>11</sup>. Os bárions são os hádrons com spin fracionário (1/2, 3/2, 5/2...), como o próton e o nêutron. Os mésons são os hádrons com spin inteiro (0, 1, 2, ...) e, até aqui, o único méson apresentado foi o pión ( $\pi$ ).

Até esta seção, é possível organizar a seguinte tabela com as partículas já discutidas (Tabela 3).

<sup>8</sup>A palavra lépton origina-se do grego “leve” ou “pequeno”. Foi, originalmente, o nome de uma pequena moeda grega. Esta nomenclatura foi adotada porque os primeiros léptons descobertos apresentavam pequena massa.

<sup>9</sup>A palavra hádron vem do grego e significa “grosso” ou “pesado”. A idéia é de que se trata de uma “partícula forte” no sentido de participar da interação forte.

<sup>10</sup>“Baros”, em grego, significa pesado.

<sup>11</sup>Do grego “mesos”, que significa intermediário ou médio.

Tabela 3: Classificação das partículas até agora discutidas.

Léptons	Hádrons	
	Bárions	Mésons
elétron ( $e^-$ )	próton ( <b>p</b> )	píon mais ( $\pi^+$ )
múon ( $\mu^-$ )	nêutron ( <b>n</b> )	píon menos ( $\pi^-$ )
tau ( $\tau$ )	antipróton ( $\bar{\mathbf{p}}$ )	píon zero ( $\pi^0$ )
neutrino do elétron ( $\nu_e$ )	antinêutron ( $\bar{\mathbf{n}}$ )	
neutrino do múon ( $\nu_\mu$ )		
neutrino do tau ( $\nu_\tau$ )		
pósitron ( $e^+$ )		
antimúon ( $\mu^+$ )		
antitau ( $\tau^+$ )		
antineutrino do elétron ( $\bar{\nu}_e$ )		
antineutrino do múon ( $\bar{\nu}_\mu$ )		
antineutrino do tau ( $\bar{\nu}_\tau$ )		

## IV Novas leis de conservação e novas partículas

A maior parte das descobertas de partículas apresentadas até aqui foi feita em laboratório sem o uso de aceleradores. A partir da década de 50, no entanto, com o avanço da tecnologia de aceleradores de partículas, várias novas partículas foram descobertas e estudadas. O entendimento de como estas partículas são produzidas e como elas interagem com outras partículas foi de crucial importância para a física na referida década. Os físicos, na tentativa de explicar porque certas reações ocorrem e outras não, propuseram novas propriedades das partículas e definiram suas regras de conservação.

### V.1 Novas regras de conservação

- Regra neutrino/antineutrino
- Regra do número bariônico

- Regra da estranheza

#### V.1.1 Regra neutrino/antineutrino

Para ilustrar esta regra, consideremos o decaimento  $\beta$  do nêutron:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu \tag{11}$$

A reação (11) não está rigorosamente correta. Em primeiro lugar, o neutrino  $\nu$  deve ser o neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), que, na verdade, é um antineutrino. É difícil entender porque se trata de um antineutrino e não de um neutrino, mas os físicos entenderam tal fato a partir de uma nova quantidade que deve ser conservada. Na verdade, são três quantidades: número leptônico do elétron, número leptônico do múon e número leptônico do tau. A Tabela 4 mostra os valores destas quantidades para todos os 6 léptons e os 6 antiléptons. Todas as outras partículas têm número leptônico nulo.

Tabela 4: Propriedades dos Léptons

Lépton	Símbolo	Carga	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	N <sup>o</sup> do		
				Elétron	Múon	Tau
Elétron	$e^-$	-1	.511	1	0	0
Múon	$\mu^-$	-1	107	0	1	0
Tau	$\tau$	-1	1777	0	0	1
Neutrino do elétron	$\nu_e$	0	$\approx 0$	1	0	0
Neutrino do múon	$\nu_\mu$	0	$\approx 0$	0	1	0
Neutrino do tau	$\nu_\tau$	0	< 70	0	0	1
Anti-elétron	$e^+$	1	.511	-1	0	0
Antimúon	$\mu^+$	1	107	0	-1	0
Antitau	$\tau^+$	1	1777	0	0	-1
Antineutrino do elétron	$\bar{\nu}_e$	0	$\approx 0$	-1	0	0
Antineutrino do múon	$\bar{\nu}_\mu$	0	$\approx 0$	0	-1	0
Antineutrino do tau	$\bar{\nu}_\tau$	0	< 70	0	0	-1

Alguns exemplos de reações que podem ocorrer, já que conservam número leptônico:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (12)$$

Em (12), o número leptônico do elétron é conservado uma vez que:

$$0 = 0 + 1 - 1 \quad (13)$$

Ou, então:

$$n + \nu_e \rightarrow p + e^- \quad (14)$$

Onde há conservação, pois:

$$0 + 1 = 0 + 1 \quad (15)$$

Um exemplo que viola a conservação do número leptônico e, portanto, não pode ocorrer é:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma \quad (16)$$

onde não há conservação, uma vez que o número leptônico do elétron ( $0 \neq +1 + 0$ ) e o número leptônico do múon ( $+1 \neq 0 + 0$ ) não se conservam.

### V.1.2 Regra do número bariônico

A segunda nova regra de conservação está relacionada ao número de prótons, nêutrons e outras partículas que pertencem à classe dos bárions. O número total de bárions deve permanecer constante. Como simplificação, os físicos atribuíram a todos os bárions o chamado número bariônico igual a 1 ou -1, e a todos os não bárions (léptons e mésons) um número bariônico nulo. Cada antipartícula tem número bariônico oposto à sua partícula associada. Na Tabela 5, pode-se verificar o número bariônico de alguns bárions.

A fim de determinar se uma reação pode ou não ocorrer, deve-se verificar se há conservação do número bariônico. Por exemplo, consideremos o processo 17:

$$n \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (17)$$

carga	0	+1	-1	$\Rightarrow$ é conservada
n <sup>o</sup> bariônico	1	0	0	$\Rightarrow$ não é conservado

Conclui-se que tal processo não ocorrerá, uma vez que o número bariônico não é conservado. Por outro lado, a seguinte reação poderá acontecer pois o número bariônico é conservado.

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^- \quad (18)$$

carga	-1	+1	+1	-1	$\Rightarrow$ é conservada*
n <sup>o</sup> bariônico	0	1	0	1	$\Rightarrow$ é conservado

\* A Tabela 6 fornece algumas propriedades dos mésons.

A reação 18 de fato ocorre e é observada.

### V.1.3 Regra da estranheza

Seja a seguinte reação

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \Sigma^+ \quad (19)$$

carga	-1	+1	-1	+1	$\Rightarrow$ é conservada
n <sup>o</sup> bariônico	0	1	0	1	$\Rightarrow$ é conservado

A reação (19) deveria ocorrer já que ela obedece a todas as regras de conservação introduzidas até aqui. No entanto (19) nunca foi observada em um experimento. Provavelmente, (19) viola alguma regra de conservação desconhecida. Assim, ao longo da década de 50, os físicos, estudando este tipo de reação, atribuíram às partículas uma nova propriedade, que chamaram de **estranheza**. As partículas possuem esta propriedade assim como possuem carga, massa, spin e número bariônico. **A regra da estranheza deve ser obedecida nas interações forte e eletromagnética.** Se a estranheza não for conservada, então a reação está ocorrendo sob ação da interação fraca. Por exemplo, os neutrinos não são afetados pelas interações forte e eletromagnética, portanto, em reações com neutrinos, pode não haver conservação da estranheza. Os valores de estranheza que uma partícula pode ter são: +3, +2, +1, 0, -1, -2 ou -3 (as Tabelas 5 e 6 mostram na “coluna estranheza” os valores desta propriedade para bárions e mésons, respectivamente). A razão para os valores de estranheza dos hádrons (nome coletivo dos bárions e mésons) será entendida, com maior profundidade, quando for introduzido o conceito de **quark** (próxima seção).

A atribuição de valores para a estranheza das partículas começou com píons, prótons e nêutrons (todos com estranheza igual a zero). Se estas partículas são as únicas presentes no estado inicial da reação, elas devem produzir partículas cuja soma das estranhezas seja zero. Por exemplo:

$$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0 \quad (20)$$

carga	-1	+1	0	0	⇒ é conservada
n <sup>o</sup> bariônico	0	+1	+1	0	⇒ é conservada
estranheza	0	0	0	0	⇒ é conservada

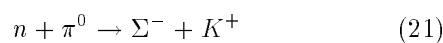
Tabela 5: Propriedades de alguns Bárions

Bárion	Símbolo	Carga	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Estranheza	Spin	N <sup>o</sup> Bariônico
Próton	p	+1	938	0	1/2	+1
Antipróton	$\bar{p}$	-1	938	0	1/2	-1
Nêutron	n	0	940	0	1/2	+1
Antinêutron	$\bar{n}$	0	940	0	1/2	-1
Lambda	$\Lambda^0$	0	1116	-1	1/2	+1
Sigma Mais	$\Sigma^+$	+1	1189	-1	1/2	+1
Sigma Zero	$\Sigma^0$	0	1192	-1	1/2	+1
Antisigma Zero	$\bar{\Sigma}^0$	0	1192	+1	1/2	-1
Sigma Menos	$\Sigma^-$	-1	1197	-1	1/2	+1
Antisigma Mais	$\bar{\Sigma}^+$	+1	1197	+1	1/2	-1
Ksi Zero	$\Xi^0$	0	1315	-2	1/2	+1
Antiksi Zero	$\bar{\Xi}^0$	0	1315	+2	1/2	-1
Ksi Menos	$\Xi^-$	-1	1321	-2	1/2	+1
Antiksi Mais	$\bar{\Xi}^+$	+1	1321	+2	1/2	-1
Ômega Menos	$\Omega^-$	-1	1672	-3	3/2	+1
Ksi Estrela Zero	$\Xi^{*0}$	0	1530	-2	3/2	+1

Tabela 6: Propriedades de alguns Mésons

Mésons	Símbolo	Carga	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Estranheza
Pi Zero	$\pi^0$	0	135	0
Pi Menos	$\pi^-$	-1	140	0
Pi Mais	$\pi^+$	+1	140	0
Ro	$\rho^0$	0	776	0
Eta	$\eta^0$	0	549	0
K Mais	$\mathbf{K}^+$	+1	494	+1
K Menos	$\mathbf{K}^-$	-1	494	-1
D Zero	$\mathbf{D}^-$	0	1865	0
Anti D Zero	$\bar{\mathbf{D}}^0$	0	1865	0
J/Psi	$\mathbf{J}/\Psi$	0	3097	0
Fi	$\Phi$	0	1020	0
Úpsilon	$\Upsilon$	0	9460	0

Por outro lado, para os hádrons com estranheza não nula, os físicos começaram atribuindo alguns valores arbitrários para esta propriedade e observaram quais reações ocorriam. Por exemplo, atribuindo estranheza +1 à partícula  $K^+$  (Tabela 6) é possível “descobrir” a estranheza do  $\Sigma^-$  (a seguinte reação ocorre e se dá via interação forte):



carga	0	0	-1	+1
n <sup>o</sup> bariônico	+1	0	+1	0
estranheza	0	0	?	+1

Portanto, para que haja conservação de estranheza, a partícula  $\Sigma^-$  deve ter esta propriedade igual a -1. É possível prosseguir desta maneira, acabando por determinar a estranheza das partículas.

Vê-se, nas Tabelas 5 e 6, que todas as antipartículas têm valores de estranheza opostos aos de suas partículas correspondentes.

## V Os hádrons são feitos de quarks

Na década de 50, os físicos conheciam um grande número de partículas. No entanto, ainda muitas perguntas os inquietavam. Por exemplo, seriam estas partículas realmente fundamentais ou seriam compostas por partes? Não seria esperada uma simplicidade maior na descrição da natureza (em oposição à imensa “coleção” de partículas existentes)?

### VI.1 Modelo de Quark

Em 1964, Gell-Mann e Zweig, independentemente, propuseram uma teoria que explicaria todos os hádrons (bárions e mésons) discutidos até aqui (ver Tabelas 5 e 6, seção V). Esta teoria está baseada na existência de três constituintes, todos com spin 1/2 e número bariônico igual a 1/3. Gell-Mann chamou estas novas partículas de **quarks**. Os quarks apresentam-se em três tipos (chamados de sabores<sup>12</sup>): *up*, *down* e *strange*. Por convenção, cada quark de sabor *strange* contribui com um valor de estranheza igual a -1, enquanto que cada quark *anti-strange* contribui com +1. A Tabela 7 fornece algumas propriedades dos quarks. Vê-se que os quarks possuem carga elétrica fracionária (frações da carga do próton), o que é pouco usual, já que uma carga fracionária nunca foi detectada experimentalmente em “estado livre”.

### VI.2. Os Mésons são combinações quark/antiquark

Os mésons são constituídos pela combinação de um quark e um antiquark. Todas as possíveis combinações de um quark (**u**, **d**, ou **s**) com um antiquark (**ū**, **d̄** ou **s̄**) fornecem vários dos mésons apresentados na Tabela 6, seção V (não todos, já que o modelo desta seção é o de 1964, ou seja, ainda não está completo). A Tabela 8 e a grade que a segue mostram a composição de alguns mésons. Como cada méson pode conter um quark **s** ou um antiquark **s̄** (ou ambos), os únicos valores possíveis para a estranheza dos mésons são: -1, +1 e 0 (pode-se constatar tal fato na Tabela 6, seção V, na “coluna estranheza”). Vê-se, na Tabela 8, que há três partículas ( $\pi^0, \rho^0, \eta^0$ ) compostas de um quark **u** e um antiquark **ū**. Mas, de fato, não são partículas iguais, uma vez que os quarks apresentam spins orientados diferentemente em cada caso<sup>13</sup>. Desde a década de 60, quando o modelo de quark foi, pela primeira vez, proposto, muitos

mésons foram descobertos e todos eles são compostos de um quark e um antiquark. Nenhum méson, até agora encontrado, deixa de encaixar neste modelo.

Tabela 7: Algumas propriedades dos quarks

Nome	Símbolo	Carga	Estranheza
<i>up</i>	<b>u</b>	+2/3	0
<i>down</i>	<b>d</b>	-1/3	0
<i>strange</i>	<b>s</b>	-1/3	-1
<i>anti-up</i>	<b>ū</b>	-2/3	0
<i>anti-down</i>	<b>d̄</b>	+1/3	0
<i>anti-strange</i>	<b>s̄</b>	+1/3	+1

Tabela 8: Mésons formados por quarks (**u**, **d** ou **s**) e antiquarks (**ū**, **d̄** ou **s̄**).

Mésons	Símbolo	Composição	
		Quark	Antiquark
Pi Zero	$\pi^0$	<b>u/d</b>	<b>ū/d̄</b>
Pi Menos	$\pi^-$	<b>d</b>	<b>ū</b>
Pi Mais	$\pi^+$	<b>u</b>	<b>d̄</b>
Ro	$\rho$	<b>u/d</b>	<b>ū/d̄</b>
Eta	$\eta$	<b>u/d</b>	<b>ū/d̄</b>
K Zero	$K^0$	<b>d</b>	<b>s̄</b>
Anti K Zero	$\bar{K}^0$	<b>s</b>	<b>d̄</b>
K Mais	$K^+$	<b>u</b>	<b>s̄</b>
K Menos	$K^-$	<b>s</b>	<b>ū</b>
Fi	$\Phi$	<b>s</b>	<b>s̄</b>

Por interseção de uma linha com uma coluna é possível obter-se vários mésons, conforme mostra a grade a seguir.

	<b>ū</b>	<b>d̄</b>	<b>s̄</b>
<b>u</b>	$\pi^0$ $\rho^0$ $\eta^0$	$\pi^+$ $\rho^+$	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>d</b>	$\pi^-$ $\rho^-$	$\pi^0$ $\rho^0$ $\eta^0$	<b>K<sup>0</sup></b>
<b>s</b>	<b>K<sup>-</sup></b>	<b>K<sub>0</sub></b>	<b>Φ</b>

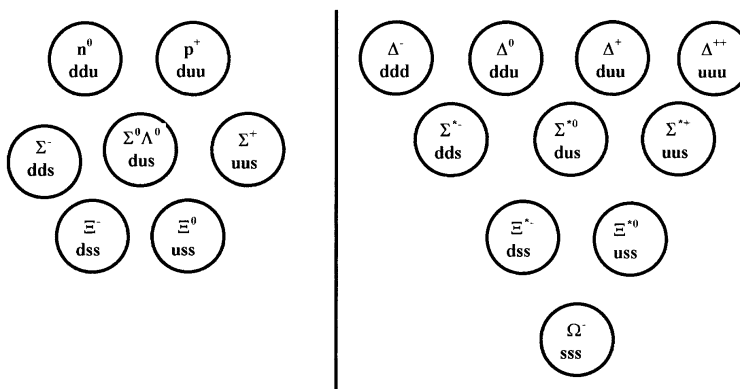
<sup>12</sup>Os léptons também têm sabores, quais sejam: elétron, neutrino do elétron, múon, neutrino do múon, tau e neutrino do tau (Ver Tabela 3, seção IV).

<sup>13</sup>Mais adiante, será discutida a questão do spin.

Tabela 9: A Composição dos Bárions a partir da combinação de três quarks **u**, **d** e **s**

Tabela 9: A Composição dos Bárions a partir da combinação de três quarks **u**, **d** e **s**

BÁRIONS	COMPOSIÇÃO	BÁRIONS	COMPOSIÇÃO
Próton	duu	Ksi Menos	dss
Antipróton	đuu	Antiksi Mais	đss
Nêutron	ddu	Omega Menos	sss
Antinêutron	đđu	Antiômega Mais	sss
Lambda	dus	Delta Zero	ddu
Antilambda	đus	Antidelta Zero	đđu
Sigma Mais	uus	Delta Menos	ddd
Antisigma Menos	uus	Delta Mais	duu
Sigma Zero	dus	Delta Dois Mais	uuu
Antisigma Zero	đus	Sigma Estrela Mais	uus
Sigma Menos	dds	Sigma Estrela Zero	dus
Antisigma Mais	đđs	Sigma Estrela Menos	dds
Ksi Zero	uss	Ksi Estrela Menos	dss
Antiksi Zero	uss	Ksi Estrela Zero	uss



**VI.3 Os bárions são combinações de três quarks**

Os bárions são compostos a partir de três quarks. Tomando-se todas as possíveis combinações dos três quarks **u**, **d**, ou **s**, pode-se obter alguns dos bárions apresentados na Tabela 5, seção V. A Tabela 9 e o esquema que a segue mostram a composição de alguns bárions. Antibárions, como o antipróton, são todos compostos por três antiquarks. Os valores de estranheza que aparecem na Tabela 5 podem ser agora entendidos: já que os bárions podem conter 1, 2 ou 3 quarks **s**, os valores possíveis para sua estranheza são: -1, -2 e -3. Para os antibárions, estes valores são: +1, +2 e +3 (ver Tabela 5, seção V, coluna “estranheza”).

A Fig. 12 mostra um esquema que ilustra a composição dos mésons e dos bárions.

**VI.4. Antipartículas e Considerações sobre Spin**

Uma antipartícula contém os antiquarks que correspondem aos quarks da partícula associada.

Alguns exemplos de pares partícula-antipartícula são os seguintes:

- o próton e o antipróton:  $p = uud; \bar{p} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$

- o nêutron e o antinêutron:  $n = udd; \bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$

Vê-se, neste exemplo, que o nêutron e o antinêutron, embora pareçam a mesma partícula do ponto de vista “externo”, com a mesma massa, carga e spin, são muito diferentes “internamente”.

- o pión positivo e o pión negativo:  $\pi^+ = u\bar{d}; \pi^- = \bar{u}d$

O pión positivo é a antipartícula do pión negativo. Por sua vez, o pión negativo é a antipartícula do pión positivo.

Observando-se a Tabela 9, vê-se que os bárions  $\Sigma^0$  (sigma zero) e o  $\Lambda^0$  (lambda) são formados pelos mesmos três quarks: **u**, **d**, **s**. Mas como se sabe que eles são, de fato, partículas diferentes?

A resposta está em outra propriedade já mencionada: o spin. A Fig. 13 mostra os estados dos spins dos quarks **u**, **d** e **s** nas partículas  $\Lambda^0$  e  $\Sigma^0$ .

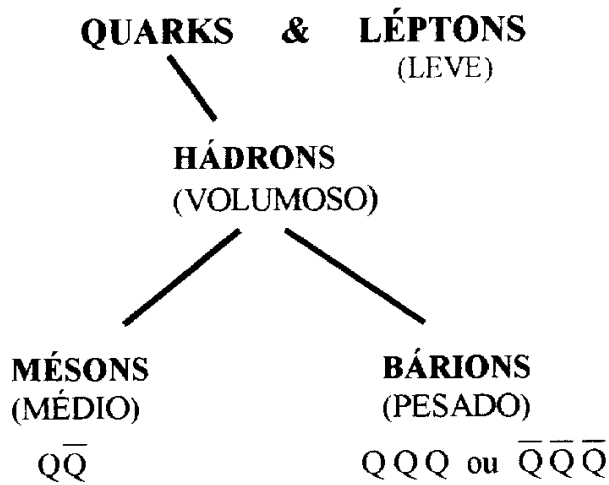


Figura 12: Os hádrons são feitos de quarks.

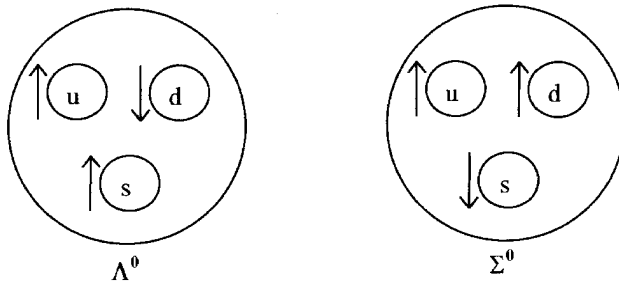


Figura 13: Os spins dos quarks  $u$ ,  $d$ ,  $s$  nas partículas  $\Lambda^0$  e  $\Sigma^0$ .

A partícula  $\Lambda^0$  tem os quarks  $u$  e  $d$  com spin opostos; o spin total é ainda  $1/2$ . Já  $\Sigma^0$  tem os quarks  $u$  e  $d$  com spins iguais. Assim, por suas diferentes configurações de spin de seus quarks,  $\Lambda^0$  e  $\Sigma^0$  são, de fato, partículas distintas.

### VI.5 Evidências experimentais sobre a existência de quarks

O modelo de quarks proposto por Gell-Mann e Zweig funciona teoricamente, mas, é claro, que os físicos também se perguntaram se essas partículas existem de fato.

Na década de 70, elétrons e neutrinos foram utilizados para o estudo da estrutura do próton, tal como as partículas alfa foram usadas nas experiências que procuravam entender o átomo e o núcleo no início deste século.

Os resultados obtidos foram análogos aos de Rutherford: os elétrons emergem da reação em ângulos consistentes com o modelo de quark.

Versões posteriores deste mesmo tipo de experimento também forneceram evidência da existência de

glúons dentro do próton, dando sustentação à teoria de que eles são as partículas mediadoras da força forte.

A teoria vigente sustenta a existência de quarks, mas como objetos permanentemente confinados dentro dos hádrons (nunca foi detectada carga elétrica fracionária), isto é, acredita-se que nunca será observado um quark livre.

Esse confinamento é coerente com a hipótese de que a carga do elétron é o quantum de carga. Os quarks têm carga fracionária, mas não existem livres, de modo que a menor carga livre continua sendo a do elétron.

## VI O Modelo padrão

O modelo de quarks discutido na seção anterior não é a última palavra. Este modelo (da década de 60) foi apenas um começo. Nesta seção, será apresentada sua evolução (até os dias de hoje), ocorrida a partir das descobertas das décadas de 70 e 80, até o modelo padrão de quarks e léptons atualmente aceito. Esta teoria permitirá uma distinção mais clara entre as forças forte e fraca, bem como completar o modelo, que, atualmente, consiste de **seis quarks** e **seis léptons**.

### VII.1. Uma propriedade adicional dos quarks: cor

Partículas com spin fracionário ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ...) <sup>14</sup> obedecem ao chamado Princípio de Exclusão de Pauli. Este princípio proíbe que duas partículas iguais ocupem o mesmo estado de energia e spin. Um exemplo familiar da aplicação deste princípio é o átomo: dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado de energia. Isto acaba por gerar o padrão periódico dos elementos químicos (a tabela periódica). Os quarks têm spin  $1/2$  e, portanto, o princípio de exclusão aplica-se a eles também: dois ou mais quarks não podem ocupar o mesmo estado se possuem sabores <sup>15</sup> idênticos. Com isso, por exemplo, o bárion  $\Omega^-$  (Tabela 9, seção VI), formado por três quarks  $s$ , não poderia existir. No entanto, havia forte evidência de sua existência. A Fig. 14 ilustra o problema.

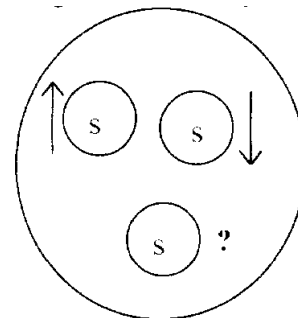


Figura 14: O problema dos spins dos três quarks  $s$  no bárion  $\Omega^-$ .

<sup>14</sup> Uma macro-classificação de partículas elementares pode ser a seguinte: férmions (com spin fracionário) e bósons (com spin inteiro).

<sup>15</sup> Como dito anteriormente, os sabores de quarks, até agora apresentados, são:  $u$ ,  $d$  e  $s$ .



Vê-se, na Fig. 14, que o terceiro quark  $s$  não pode ter spin  $\downarrow$  ou  $\uparrow$ , já que estes estados já estão ocupados pelos dois anteriores.

Para resolver este problema, o físico Greenberg sugeriu que os quarks possuem uma propriedade nova chamada “**cor**”, que é apenas um novo nome que, assim como “sabor”, nada tem a ver com seu significado cotidiano. A “**cor**” é similar à carga elétrica, exceto pelo fato de que pode ocorrer em **três variedades: vermelho (VM), verde (VD) e azul (AZ)** (estas cargas-cor são chamadas coletivamente de cargas coloridas). Quarks carregam cargas coloridas positivas, enquanto que antiquarks carregam as correspondentes cargas coloridas negativas. Assim, no bárion  $\Omega^-$ , os três quarks  $s$  aparecem em três cores diferentes (representadas pelos subíndices):  $s_{VM}$ ,  $s_{VD}$ , e  $s_{AZ}$ .

### VII.2. Cor e força forte

Os quarks e os hádrons (que contêm quarks) experimentam a força forte, enquanto que os elétrons e os neutrinos não. À medida que foi proposta a carga-cor para os quarks, uma propriedade não apresentada por neutrinos e elétrons, surgiu a idéia de que a cor pode ser a **fonte** da força que atua entre os quarks<sup>16</sup>. Se tal suposição está correta, então pode-se explicar porque elétrons e neutrinos não interagem via força forte.

A analogia das cores com as cargas elétricas levou a uma conclusão imediata: cores iguais se repelem; cores opostas se atraem. Assim, dois quarks vermelhos se repelem, enquanto que um quark vermelho e um antiquark “antivermelho” se atraem. Similarmente, azul atrai anti-azul e verde atrai antiverde. Isto pode explicar a existência dos mésons: assim como cargas elétricas positivas e negativas se unem para formar um átomo neutro, cores positivas e negativas, carregadas por **quarks e antiquarks**, atraem-se para formar **hádrons sem cor**, como os mésons  $q\bar{q}$  (Fig. 15).

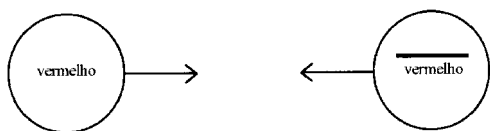


Figura 15: Um méson ( $q\bar{q}$ ) é formado por quarks de cores opostas (que se atraem).

Quanto à cor, dois quarks vermelhos têm mesma cor e, portanto, se repelem. Mas, o que dizer sobre um quark vermelho e um quark azul?

Foi proposto que estas duas cores diferentes podem atrair-se com uma intensidade menor que a atração entre cores opostas de um quark e um antiquark. Assim, um quark vermelho e um quark azul podem atrair-se, mas a atração é maximizada ao agruparem-se com um quark verde. Vermelho e verde, vermelho e azul, azul e verde atraem-se todos uns aos outros e assim o faz o aglomerado de três quarks que constitui os bárions.

Os **bárions** formados dessa maneira necessariamente contêm **três quarks de cores diferentes** (Fig. 16).

A interação forte, cuja fonte é a cor, mostra que os aglomerados - quark e antiquark de cores opostas ou três quarks de cores diferentes - são as duas possibilidades que permitem a formação dos hádrons “sem cor”. Sistemas livres só aparecem de forma “descolorida”. Na natureza, a cor parece estar confinada em aglomerados (os mésons e os bárions) com cor resultante total nula, ou seja, considerados como um todo tais aglomerados não têm cor, são os chamados “sistemas brancos”.

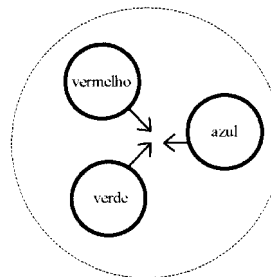


Figura 16: Um bárion ( $q_{VM} q_{AZ} q_{VD}$ ) é formado de três quarks de cores diferentes.

### VII.3 Os Glúons

Viu-se, anteriormente, de que maneira a atração entre os quarks ocorre devido à sua cor. Esta interação ocorre mediada por uma partícula chamada **glúon**. Na realidade, a interação entre quarks no interior dos hádrons ocorre porque estes estão constantemente intercambiando suas cores via troca de glúons. A Fig. 17 mostra um quark vermelho transformando-se em um azul através da emissão de um glúon cuja cor é “vermelho menos azul”. Portanto, o próprio glúon possui cor.

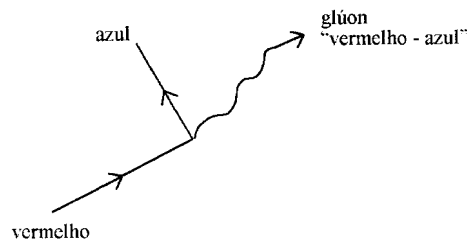


Figura 17: A interação entre quarks via troca de um glúon.

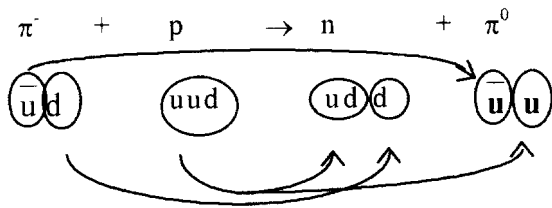
### VII.4 Como os quarks interagem via força forte e força fraca.

#### VII.4.1 Interação via força forte

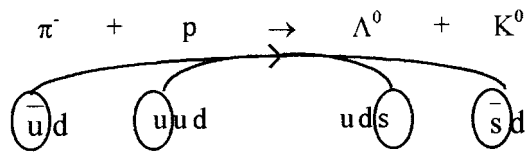
A força forte rearranja quarks ou cria um par quark/antiquark a partir de outro. Ela **não pode mudar o sabor dos quarks**.

Um exemplo de um processo governado pela força forte seria o seguinte:

<sup>16</sup>Por analogia com a carga elétrica como fonte da força eletromagnética e a massa da gravitacional.

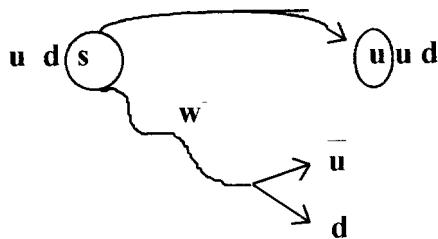
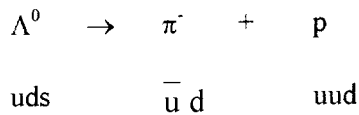


Um exemplo de aniquilação de um par quark/antiquark e a posterior criação de um novo par é o que segue:



**VII.4.2 Interação via força fraca**

A **força fraca**, por outro lado, **pode mudar o sabor dos quarks**. Por exemplo, na reação abaixo, o quark *s* do bário  $\Lambda^0$  torna-se um quark *u* emitindo um  $W^-$  (uma das partículas mediadoras da força fraca). A partícula  $W^-$ , por sua vez, transforma-se em um quark *d* e um quark  $\bar{u}$ .



**VII.5 O Modelo Padrão atual**

Por volta de 1970, as partículas elementares conhecidas formavam o seguinte esquema:

u	d	s
$\nu_e$	$e^-$	$\mu^-$

Figura 18: O Modelo Padrão em 1970.

Naquela época, alguns físicos se inquietavam em relação à falta de simetria no esquema acima. Três quarks (*u*, *d* e *s*) e quatro léptons ( $\nu_e$ ,  $e^-$ ,  $\nu_\mu$  e  $\mu^-$ ) não parecem formar o modelo certo. Esta falta de simetria levou físicos teóricos à previsão da existência de um novo quark - o quark *charm* (*c*). Posteriormente, em 1974, ele foi descoberto. O quark *c* não foi detectado em estado livre mas ligado a um quark *anticharm*

formando o méson chamado *J/Ψ*. A partir do estudo deste méson, as propriedades do quark *charm* foram determinadas: tem uma massa 1,5 vezes a massa do próton e uma carga igual a  $+2/3$ .

Os quarks *u* e *d*, juntos com os léptons  $e^-$  e  $\nu_e$ , formam o grupo chamado de primeira geração das partículas fundamentais.

Os quarks *c* e *s*, juntamente com os léptons  $\mu$  e  $\nu_\mu$ , formam o grupo chamado de **segunda geração** das partículas fundamentais.

Mas esta não é a imagem completa de quarks e léptons. Como dito anteriormente, em 1975, o lépton  $\tau$  foi descoberto e, algum tempo mais tarde, seu neutrino correspondente foi inferido. Com isso, aumentou o número de partículas fundamentais para quatro quarks e seis léptons. No entanto, ainda havia uma situação assimétrica, conforme mostra o esquema abaixo:

u	d	c	s		
$\nu_e$	$e^-$	$\nu_\mu$	$\mu^-$	$\nu_\tau$	$\tau^-$

Figura 19: O Modelo Padrão em 1975.

É possível inferir que mais dois quarks deveriam ser propostos para completar a figura. Estes foram chamados de *top* ou *truth* (*t*) e *bottom* ou *beauty* (*b*). Portanto, agora, temos seis sabores de quarks. O quark *b* foi descoberto, no final da década de 70, também ligado a um antiquark no interior de um méson, contendo uma massa 5 vezes maior que a do próton e carga igual a  $-1/3$ . Muito recentemente, em 1995, o quark *top* foi observado experimentalmente (ver seção VIII.4). Sua carga elétrica é igual a  $+2/3$  e sua massa é, aproximadamente, 200 vezes a massa do próton.

Finalmente, chega-se ao modelo padrão como hoje ele é conhecido: seis quarks (*u*, *d*, *c*, *s*, *t*, *b*) e seis léptons ( $\nu_e$ ,  $e^-$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_\tau$  e  $\tau^-$ ) e as partículas mediadoras (o fóton, o gráviton, os glúons, os *W* e o *Z*). Destaque-se, novamente, que o gráviton, a partícula mediadora de força gravitacional, ainda não foi detectada.

A Fig. 20 relaciona os “objetos” às “forças” envolvidas no modelo padrão.

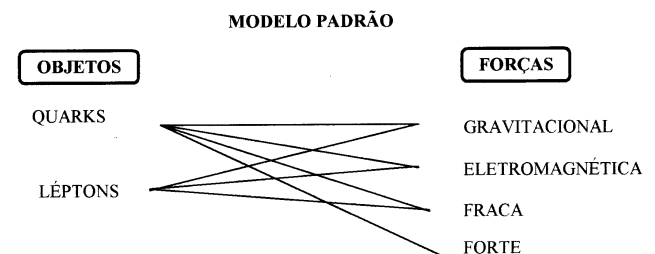


Figura 20: Objetos e forças no Modelo Padrão. (Fermilab, 1987.)

A Fig. 21 mostra os “objetos”, as “forças” e as partículas mediadoras no modelo padrão.

A Tabela 10 resume o modelo padrão das partículas elementares.

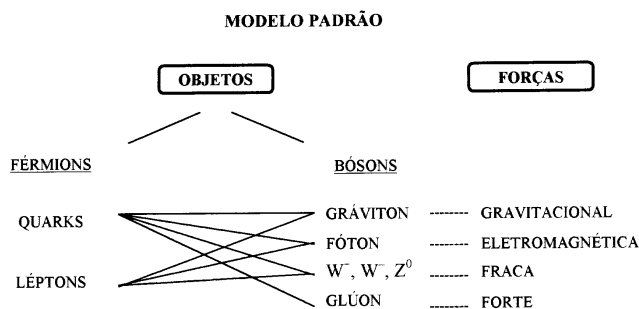


Figura 21: Objetos (férmions e bósons), forças e partículas mediadoras. (Fermilab, 1987.)

## VII Detecção experimental de algumas partículas

### VIII.1 Os grandes esforços envolvidos na descoberta das partículas

Existe um vínculo muito estreito entre pesquisas científicas e avanços tecnológicos. Físicos teóricos e experimentais trabalham em cooperação para que a previsão de existência de uma partícula possa ser confirmada experimentalmente. A cada época, muitas dificuldades técnicas tiveram de ser transpostas para que partículas elementares fossem detectadas. A superação destas dificuldades será ilustrada a partir de alguns exemplos do trabalho árduo de cientistas que culminou em descobertas extraordinárias.

### VIII.2 Descoberta do nêutron

Apesar de Rutherford ter previsto a existência do nêutron em 1920, foram necessários doze anos de esforços para que Chadwick o detectasse experimentalmente. Ele colocou um pedaço de Berílio em uma câmara de vácuo onde havia uma certa quantidade de Polônio. Este elemento emite radiação alfa, que por sua vez atingia os átomos de Berílio. Ao ser atingido, o Berílio emitia algo na época chamado de “radiação neutra” (alguns cientistas a consideravam raios X). No caminho desta radiação, Chadwick colocou um alvo de parafina de onde eram arrancados prótons, mostrando que a “radiação neutra” não era raios X, e sim uma partícula neutra com massa quase igual à do próton, que foi determinada por Chadwick através do conhecimento das massas das outras partículas envolvidas na colisão.

### VIII.3 Descoberta do neutrino

Assim como o nêutron, o neutrino não possui carga elétrica, dificultando a sua detecção. Porém, o nêutron possui uma massa apreciável, interagindo fortemente com a matéria e deixa rastros por onde passa. O neutrino tem uma massa muito menor do que a do nêutron e interage muito pouco com a matéria. Quantitativamente, isto é verificado através de seu livre caminho médio (distância média que ele percorre entre duas “colisões” sucessivas), que é da ordem de 14 milhões de vezes maior do que o raio do Sol. É de se esperar portanto, que a detecção de um neutrino seja uma tarefa bastante árdua. Porém, essa tarefa foi realizada pela primeira vez em 1956, no reator nuclear de Savannah River, Estados Unidos. Mais de  $10^{12}$  neutrinos emergiram a cada segundo por centímetro quadrado, criados por decaimentos radioativos provenientes do material do reator. Essa enorme concentração de neutrinos possibilitou que, se algumas toneladas de uma solução de cádmio fosse colocada ao longo do seu caminho, eventualmente algum neutrino poderia interagir com ela. A probabilidade de um dado neutrino interagir com a matéria é extremamente baixa, sendo então necessário um número imenso de neutrinos para tornar viável a detecção de alguns poucos. Ainda assim, não são detectáveis diretamente, mas sim é inferida a sua existência através de produtos oriundos dessa interação. Posteriormente se soube que o neutrino observado nesta experiência foi o neutrino do elétron.

O primeiro experimento com o objetivo de detectar neutrinos provenientes do sol foi feito em Homestake, Estados Unidos. Um tanque com 400000 litros de percloroetileno<sup>17</sup> foi colocado a 1500 metros de profundidade do solo em uma mina de ouro abandonada. Era previsto que um neutrino de alta energia interagindo com  $^{37}_{17}\text{Cl}$  produziria um átomo de argônio  $^{37}_{18}\text{Ar}$  e um elétron. A presença do argônio pôde ser detectada. De cada  $10^{21}$  neutrinos emitidos em média pelo Sol por dia, apenas dois foram detectados nesse período.

O mais moderno detector de neutrinos no mundo - o Super Kamiokande - começou a operar em 1996. Trata-se de um tanque de 50000 toneladas de água 1 quilômetro abaixo do solo. A água serve tanto como alvo para os neutrinos como um meio de detecção para os produtos oriundos da interação dos neutrinos com ela. As paredes internas do tanque são totalmente revestidas com detectores que transmitem os dados diretamente a computadores. Em 1998, experimentos neste detector evidenciaram a possibilidade do neutrino possuir massa de repouso não nula, resultado importantíssimo não somente para a área da física de partículas como também para a cosmologia.

<sup>17</sup>O percloroetileno é um detergente cuja fórmula química é  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ .

### VIII.4 Descoberta do quark top

Houve uma longa procura pelo quark top que ocupou os cientistas em laboratórios de todo o mundo até se chegar em sua descoberta em fevereiro de 1995. O quark top foi observado em dois experimentos de colisão próton-antipróton no Tevatron do Fermilab (Estados Unidos), o mais poderoso acelerador de partículas do mundo.

Da colisão de um próton e um antipróton emergem várias partículas subatômicas. Uma colisão acontece tão rapidamente em altíssimas energias, que jamais se poderia vê-la acontecer. Entretanto, antes de desaparecerem, a maioria das partículas produzidas em uma colisão deixa sua “assinatura eletrônica” em um detector. Para aprender o que aconteceu na colisão, físicos usam computadores para examinar estas “assinaturas”. A partir delas, determinam quais partículas estavam presentes. Na maioria das vezes são partículas já conhecidas, as quais os computadores são programados para ignorar. Muito menos freqüentemente, uma vez em um milhão, uma “assinatura” interessante aparece e o computador a registra. Pode ser a marca de uma entre tantas partículas instigantes. Uma vez em alguns bilhões, foi encontrada a “assinatura” do quark top.

Encontrar o quark top representou um teste crítico do conhecimento construído ao longo de duas décadas. Experimentos desse tipo, que envolvem energias extremamente altas e, portanto, investimentos também muito altos, são empreendimentos que requerem colaboração internacional. No Fermilab, há a participação de mais de 900 cientistas de diferentes países do mundo, entre eles o Brasil, principalmente do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, os quais participaram ativamente da detecção do quark top.

### VIII.5 Descoberta do Píon

O píon foi descoberto pelos físicos Powell, Occhialini e Lattes do chamado grupo de Bristol da Inglaterra. Lattes (1924- ), italiano naturalizado brasileiro, estudava os raios cósmicos a partir de emulsões fotográficas - chapas semelhantes a filmes fotográficos mas com uma composição diferente e sensibilidade especial. Essas chapas eram expostas a grandes altitudes para a identificação das partículas constituintes da radiação cósmica. Em 1946, Lattes chegava à montanha de Chacaltaya, nos Andes bolivianos, com as primeiras chapas que seriam expostas a 5200 metros de altitude. Estas chapas, utilizando emulsões nucleares recém desenvolvidas, identificaram pela primeira vez o decaimento do

píon. No ano seguinte, Lattes passou a trabalhar no Laboratório de Radiações de Berkeley, onde estava em funcionamento um acelerador de partículas capaz de acelerar prótons à energia de 330 MeV. Com exposição das placas de emulsões nucleares aos fragmentos produzidos pelas colisões das partículas alfa aceleradas no ciclotron contra alvos de carbono, Lattes, juntamente com o físico americano Gardner, descobriu os primeiros píons neutros. Essa descoberta teve uma grande repercussão, pois inaugurou a era dos grandes aceleradores, que vieram na procura de novas partículas a ocupar o lugar das pesquisas em raios cósmicos.

## VIII Conclusão

Este texto destina-se a professores, com a intenção de familiarizá-los com o tópico Partículas Elementares, mostrando-lhes que tópicos de Física Contemporânea não são necessariamente complicados. Mais ainda, parece ser viável abordar alguns desses tópicos na Física do ensino médio. Cabe salientar que deve ser evitado, no ensino deste conteúdo, que os alunos simplesmente memorizem nomes e classificações de partículas. A simples memorização é o oposto de uma aprendizagem significativa.

Uma grande potencialidade deste tema é a oportunidade que este oferece para a compreensão do processo de produção do conhecimento científico. Os vários episódios históricos envolvendo o avanço desta área de pesquisa mostram o quanto físicos teóricos e experimentais uniram esforços na busca de uma compreensão maior da natureza da matéria. Foram necessários grandes investimentos tecnológicos para que se chegasse ao modelo padrão atual. O caráter construtivo, inventivo e não definitivo do conhecimento também pode ser ilustrado, a partir de uma leitura histórica dessa fascinante área da Física.

### Agradecimentos

Às Professoras Doutoras Eliane Veit e Maria Helena Steffani que, na condição de especialistas na área, proporcionaram aprendizagens valiosas através da revisão crítica deste trabalho. Ao Professor Doutor Marco Antonio Moreira que, com sua leitura criteriosa, em muito contribuiu para melhorar a transposição didática do tema. Aos colegas Cláudio J. H. Cavalcanti e Letícia M. Ferreira, pelas excelentes sugestões apresentadas para enriquecer este texto.

Tabela 10: Resumo do Modelo Padrão das Partículas Elementares

Matéria							Antimatéria						
I		II		III			I		II		III		
<b>Quarks</b>							<b>Antiquarks</b>						
<i>Up</i>	$+2/3$ VM, VD, AZ -5	<i>Charm</i>	$+2/3$ VM, VD, AZ -1500	<i>Top/Truth</i>	$+2/3$ VM, VD, AZ ~174000	<i>Anti Up</i>	$-2/3$ VM, VD, AZ ~5	<i>Anti Charm</i>	$-2/3$ VM, VD, AZ -1500	<i>Anti Top/Truth</i>	$-2/3$ VM, VD, AZ ~174000		
<i>Down</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ ~10	<i>Strange</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ -150	<i>Bottom/Beauty</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ ~4700	<i>Anti Down</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ -10	<i>Anti Strange</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ -150	<i>Anti Bottom/Beauty</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ ~4700		
<i>d</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ ~10	<i>s</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ -150	<i>b</i>	$-1/3$ VM, VD, AZ ~4700	<i>anti d</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ -10	<i>anti s</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ -150	<i>anti b</i>	$+1/3$ VM, VD, AZ ~4700		
<i>Elektron</i>	-1 511	<i>Míon</i>	-1 ~107	<i>Tau</i>	-1 ~1777	<i>Posítron</i>	+1 511	<i>Anti Míon</i>	+1 ~107	<i>Anti Tau</i>	+1 ~1777		
<i>Neutrino do Elektron</i>	0	<i>Neutrino do Míon</i>	0	<i>Neutrino do Tau</i>	0	<i>Anti Neutrino do Elektron</i>	0	<i>Anti Neutrino do Míon</i>	0	<i>Anti Neutrino do Tau</i>	0		
<i>Ve</i>	~0	<i>V<sub>μ</sub></i>	~0	<i>V<sub>τ</sub></i>	<70	<i>V<sub>e</sub><sup>+</sup></i>	~0	<i>V<sub>μ</sub><sup>+</sup></i>	~0	<i>V<sub>τ</sub><sup>+</sup></i>	<70		
<b>Léptons</b>							<b>Antiléptons</b>						
<b>Bósons</b>							<b>Legenda</b>						
Força	Partícula Mediadora	Massa de Repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga	Spin	Intensidade Relativa	Alcance (m)	Cor	Cores					
Força Forte	Gíglons	0	0	1	1	<10 <sup>-15</sup>	Sim	VM = Vermelho	VD = Verde	AZ = Azul	VM, VD, AZ = Antivermelho	VD = Antiverde	AZ = Anti-azul
Força Fraca	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup>	80220 80220 91187	+1 -1 0	1 1 1	~10 <sup>-12</sup> 1 1	<10 <sup>-18</sup>	Cor Neutra						
Eletromagnética	Fótons	0	0	1	~10 <sup>-2</sup>	Infinito	Cor Neutra						
Gravitacional	Gráviton	0	0	2	~10 <sup>-40</sup>	Infinito	Cor Neutra						
							Nome		I Geração				
							Símbolo		<i>Up</i> $+2/3$ VM, VD, AZ -5				
									<i>u</i>				

## References

- [1] BASSALO, J.M.F. César Lattes: um dos descobridores do então méson pi. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, **7**(2), 133-149, 1990.
- [2] CARUSO, F; SANTORO, A. *Do átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*. Rio de Janeiro: AIAFEX, 1994. 301p.
- [3] CLOSE, F. *The Cosmic Onion*. Quarks and the nature of the universe. Londres: Heinemann Educational Books, 1983. 181p.
- [4] EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1983. 928p.
- [5] <http://www.cbpf.br/meson/meson.html> Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Brasil.
- [6] <http://www.fing.edu.uy/if/particulas/queparticulas.html> Universidad de la República, Uruguai.
- [7] <http://www.fnal.gov/> Fermilab, Estados Unidos.
- [8] <http://www-pdg.lbl.gov/cpep.html> Contemporary Physics Education Project, Estados Unidos.
- [9] <http://www.pparc.ac.uk/> Particle Physics Group, Inglaterra.
- [10] LEDERMAN, L. *The Standard Model*. Batavia, Estados Unidos. Fermi National Accelerator Laboratory, 17 jul. 1995. Palestra ministrada a professores de Física.
- [11] SCHWARZ, C. *A Tour of the Subatomic Zoo*. A guide to particle physics. New York: American Institute of Physics, 1992. 112p.
- [12] SEGRÉ, E. *Dos raios X aos quarks* (Físicos modernos e suas descobertas) Brasília: Universidade de Brasília. 1987.
- [13] TOPICS IN MODERN PHYSICS - Teacher Resource Materials - Batavia: Fermi National Accelerator Laboratory, v. 1, 2 e 3, 1990. 388p.