



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **Partículas elementares no ensino médio** (texto para o professor)

José Lages da Silva Neto

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de José Lages da Silva Neto, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro  
2011

## *Apresentação*

Este texto pretende servir como proposta didática de apoio ao professor para o ensino de partículas elementares no ensino médio. Ele parte de conteúdos pertencentes ao nível médio e desenvolve-se para que as novas interpretações sobre interações sejam construídas.

Apresentaremos uma evolução gradativa da interpretação de interações para chegar ao modelo de emissão e absorção de partículas mediadoras virtuais. Assim introduziremos os bósons, que explicarão a interação forte, critério que usamos para classificar as partículas.

Utilizaremos os conceitos de conservação do momento linear, para mostrar as dificuldades da interpretação da interação como ação à distância. Em seguida, o conceito de campo é criado, para que estas dificuldades sejam superadas. Adiante, a falta de um meio material de transmissão de força promove a interpretação da interação como troca de partículas.

A constante de Planck surge para possibilitar uma partícula emitir ou absorver outra. Esta constante representará como o grau de violação da conservação de energia, que entra em nosso modelo para permitir a troca de partículas.

# Sumário

Apresentação.....	2
A interação como Ação à Distância.....	4
A Interação como Campo.....	6
A interação como troca de partículas.....	10
A Violação da conservação de energia e do momento.....	11
Princípio da Incerteza.....	14
As Quatro Forças.....	15
Partículas Elementares.....	16
Quarks.....	16
Antipartículas.....	17
Léptons.....	18
Modelo Padrão.....	19
Referências Bibliográficas.....	21

## Interação como ação à distância

Em 1693, Isaac Newton publicou sua monumental obra, *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, na qual são formuladas as leis da Mecânica, as famosas leis de Newton, e a lei da gravitação universal.

Newton demonstrou que a força responsável pela queda livre dos corpos próximos à superfície da Terra é a mesma que mantém a Lua em sua órbita e os planetas girando em torno do Sol. É a interação gravitacional.

A ação à distância surge como uma forma de descrever interação gravitacional. No âmbito da mecânica newtoniana, as interações à distância somente são compatíveis com os teoremas da conservação da quantidade de movimento linear e da energia de um sistema de partículas se essas interações forem instantâneas.

Podemos demonstrar este fato sugerindo uma interação não-instantânea entre as partículas do sistema. Para simplificar suponhamos que o sistema isolado seja formado por apenas duas partículas A e B. As partículas A e B movem-se sob a ação da interação entre elas com momentos designados por  $\vec{p}_A$  e  $\vec{p}_B$ , respectivamente, conforme a figura:



O momento total do sistema constituído pelas duas partículas é a soma dos momentos individuais. Assim, em um instante  $t$ , o momento total do sistema é:

$$\vec{p}_T(t) = \vec{p}_A(t) + \vec{p}_B(t) \quad (6)$$

Agora, suponha que em um instante posterior  $t + \Delta t$  os momentos das partículas A e B sejam, devido à interação, alterados para  $\vec{p}_A + \Delta\vec{p}_A$  e  $\vec{p}_B + \Delta\vec{p}_B$  respectivamente. O momento total do sistema no instante  $t + \Delta t$  é, então:

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) = \vec{p}_A(t) + \Delta\vec{p}_A + \vec{p}_B(t) + \Delta\vec{p}_B \quad (7)$$

Reorganizando:

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) = \vec{p}_A(t) + \vec{p}_B(t) + \Delta\vec{p}_A + \Delta\vec{p}_B \quad (8)$$

Sendo que, como em (6):

$$\vec{p}_A(t) + \vec{p}_B(t) = \vec{p}_T(t) \quad (6)$$

Substituindo (6) em (8):

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) = \vec{p}_T(t) + \Delta\vec{p}_A + \Delta\vec{p}_B \quad (9)$$

Reorganizando:

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) - \vec{p}_T(t) = \Delta\vec{p}_A + \Delta\vec{p}_B \quad (10)$$

Partindo da premissa que o momento total do sistema é conservado, ou seja:

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) = \vec{p}_T(t) \quad (11)$$

Reorganizando:

$$\vec{p}_T(t + \Delta t) - \vec{p}_T(t) = 0 \quad (12)$$

Substituindo (12) em (10), obtemos:

$$\Delta\vec{p}_A + \Delta\vec{p}_B = 0$$

Isso significa que se a interação causa uma variação de momento na partícula A ( $\Delta\vec{p}_A$ ) no intervalo de tempo  $\Delta t$ , então, nesse mesmo intervalo de tempo, deve causar uma variação correspondente de momento na partícula B ( $\Delta\vec{p}_B$ ) que compense a variação inicial ocorrida na partícula A.

Isto é, para haver compatibilidade entre a interação à distância e as leis de conservações de momento (e energia) é necessário que a partícula B reaja ao mesmo tempo à mudança do momento de A, modificando seu próprio momento.

Entretanto, se o intervalo de tempo  $\Delta t$  for menor que o tempo gasto pela interação para se propagar de A para B, ou seja:

$$\Delta t < \frac{r}{v}$$

Onde  $r$  é a distância entre as partículas e  $v$  é a velocidade da interação, tal compensação é impossível. Para haver compatibilidade entre a interação à distância e as leis de conservações de momento e energia é necessário que a partícula B reaja imediatamente à mudança do momento de A, modificando seu próprio.

Portanto, ao invés da hipótese anterior, vamos supor que a velocidade da interação seja infinita. Nesse caso o tempo gasto pela interação para se propagar da partícula A para a partícula B é sempre nulo, de modo que a condição  $\Delta t < \frac{r}{v}$  nunca é satisfeita. Assim, a lei de conservação do momento é possível.

O problema da interpretação de interação como ação à distância é justamente a velocidade em que ocorre, ou o requisito da instantaneamente. É difícil imaginar algo que possa transmitir a força com velocidade infinita. Portanto, não há nenhum meio capaz de fazer a transmissão da interação. Não há como explicar como a partícula “sente” ou “sabe” que há outra fazendo efeito sobre ela. Esta é uma grande dificuldade conceitual.

Apesar disso, a utilização da gravitação desta forma, com velocidade infinita, se justifica, pois permitiu calcular corretamente as órbitas dos planetas através de suas equações e levou a resultados compatíveis com as observações astronômicas.

### *Interação como campo*

Semelhantemente à interação gravitacional a interação eletromagnética é bastante familiar. Os efeitos que decorrem dessa interação são abundantes e diversificados na nossa experiência diária. Os fenômenos magnéticos e elétricos sequer eram vistos como a manifestação de uma mesma interação. O trabalho para unificar a interação elétrica com a interação magnética em uma única interação eletromagnética só foi concluído por Maxwell.

Há uma diferença radical entre as leis da gravitação newtoniana e a lei da interação coulombiana: o fato de se ter reconhecido que a interação eletromagnética tem velocidade finita. Isso significa que a quantidade de movimento total e a energia total de um sistema de partículas não podem ser conservadas.

A interação não-instantânea entre as partículas, como a instantânea, também faz com que qualquer alteração no estado de uma partícula se propague até a outra estado. No entanto, essa modificação demanda algum tempo. Como vimos, a interação eletromagnética tem velocidade finita. Desta maneira uma lei de conservação do momento da forma

$$\overrightarrow{p}_{\text{antes}} = \overrightarrow{p}_{\text{depois}}$$

que inclua somente os momentos das partículas não pode ser verdadeira.

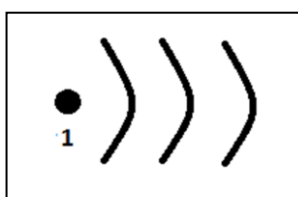
Para superar as dificuldades da interpretação das interações como ação à distância, com velocidade finita, surge algo intermediário, que divide a interação em duas etapas, numa visão mais abrangente.

A solução consolidada por James Maxwell (1831 – 1879) exigiu uma nova concepção de interação. A ação à distancia foi substituída pela ação mediada por campos. No caso da interação eletromagnética a teoria de Maxwell eliminou as inadequadas e desconexas noções de interação elétrica e interação magnética, unificando-as em uma única noção de interação eletromagnética mediada pelo campo eletromagnético.

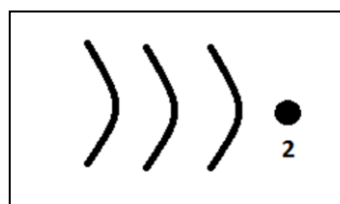
No conceito de campo, cada carga não interage diretamente com a outra, mas com o campo criado. A primeira carga estabelece o campo. A segunda carga interage com esse campo no ponto onde está localizada. O campo tem função de intermediário entre as duas cargas. A força é exercida pelo campo na posição da segunda carga, e não pela primeira carga, que é responsável “apenas” pela criação do referido campo, que transporta o momento.

Assim, este campo descreve uma propriedade do espaço, de modo que uma carga do mesmo tipo (que seja sensível a este campo) colocada nesta região sofre seus efeitos. Se o corpo não possuir carga compatível, o campo não é percebido.

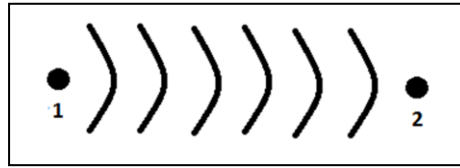
A interação, que antes era vista como à distância, agora é local. A segunda carga interage com o campo na posição do espaço onde se encontra, localmente.



[Figura 9] A carga 1 cria o campo



[Figura 10] A carga 2 sente este campo no ponto onde está localizada



[Figura 11] A interação através do campo

Podemos demonstrar este fato sugerindo uma interação eletromagnética entre duas partículas A e B separadas por certa distância.



Para termos a possibilidade de conservar o momento do sistema devemos também considerar também a contribuição do momento do campo ao momento total.

$$\vec{p}_{total} = \vec{p}_A + \vec{p}_B + \vec{p}_{CAMPO} \quad (13)$$

Entretanto, a simples introdução do momento linear do campo não é suficiente para garantir a conservação do momento total do sistema. Visto que a terceira lei de Newton deixa de ser válida para partículas submetidas a uma interação não-instantânea, é necessário que essa interação satisfaça a uma outra propriedade que nos leve à lei de conservação do momento.

Inicialmente, voltemos à situação de interação instantânea. O momento total do sistema é dado pela equação (6):

$$\vec{p}_T(t) = \vec{p}_A(t) + \vec{p}_B(t) \quad (6)$$

Derivando em relação ao tempo e aplicando a segunda lei de Newton às partículas A e B obtemos:

$$\frac{d\vec{p}_T}{dt} = F_A + F_B$$



O momento total será constante se e somente se:

$$F_A + F_B = 0$$

Isto é, se a terceira lei de Newton for válida.

Vejamos agora o caso em que a interação não é instantânea. Vimos que é necessário introduzir o momento do campo, de modo que o momento total do sistema é:

$$\vec{p}_{total} = \vec{p}_A + \vec{p}_B + \vec{p}_{CAMPO} \quad (13)$$

Derivando em relação ao tempo obtemos:

$$\frac{d\vec{p}_T}{dt} = \frac{d\vec{p}_A}{dt} + \frac{d\vec{p}_B}{dt} + \frac{d\vec{p}_{CAMPO}}{dt}$$

e aplicando a segunda lei às partículas, obtemos:

$$\frac{d\vec{p}_T}{dt} = F_A + F_B + \frac{d\vec{p}_{CAMPO}}{dt}$$

Vemos agora que a terceira lei de Newton não garante a conservação do momento linear total e deve ser substituída por uma outra lei que permita anular o termo:

$$F_A + F_B + \frac{d\vec{p}_{CAMPO}}{dt}$$

E assim garantir a conservação do momento linear total do sistema. No caso da teoria eletromagnética pode-se demonstrar que a inclusão do momento do campo garante a conservação do momento linear total do sistema. Essa condição é consequência das equações de Maxwell, ou seja:

$$F_A + F_B + \frac{d\vec{p}_{CAMPO}}{dt} = 0$$

Razão porque o momento linear total é conservado.

### *Interação como troca de partículas*

Nesta nova visão de interação, as interações fundamentais ocorreriam como se as partículas que interagem trocassem uma partícula intermediária entre elas. Diferentemente da interação via campo, não falta um “meio material” para transmitir a interação.

Podemos fazer a analogia macroscópica na qual há uma interação entre duas partículas resultante da troca de uma terceira partícula clássica. Então, devido à conservação do momento, na ação de atirar e pegar a bola, cada jogador receberá um impulso que tende a retrocedê-lo em relação ao seu parceiro. Há uma aparente repulsão entre os jogadores embora não haja uma interação direta entre eles.

Pode-se converter esta situação para uma atração, substituindo a bola por um bumerangue, mas agora os jogadores estão de costas um para o outro. Um deles atira o bumerangue que, inicialmente, se afasta do outro. Em seguida, o bumerangue faz uma curva (como mostra a [Figura 13]) sendo agarrado pelo segundo jogador. Levando-se em conta os recuos de cada jogador (tanto o que lançou bumerangue quanto o que agarrou), o resultado efetivo é uma atração entre os dois jogadores devido à troca do bumerangue.



**[Figura 13]** Analogia clássica de atração com um bumerangue [Ostermann, 1998]

Estas analogias clássicas são frequentemente utilizadas para justificar a interação. Entretanto, não são satisfatórias pelas seguintes razões: primeiramente, como veremos na seção a seguir, a emissão ou a absorção de uma partícula intermediária não é compatível com as leis de conservação; e em segundo lugar, a introdução de um meio

adicional (o ar) para permitir o movimento do bumerangue não é compatível com o fato das partículas interagirem no vácuo.

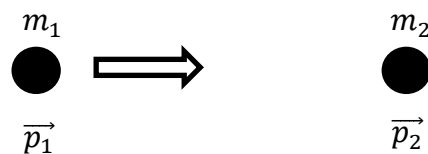
Esta é uma boa oportunidade para provocar uma mudança de paradigma. A dificuldade de encontrar uma boa analogia clássica para a emissão e absorção de partículas reside no fato de que temos que abandonar o quadro puramente clássico e introduzir o princípio da incerteza, envolvendo a energia e o tempo.

Será necessário também procurar novas interpretações. A substituição da troca de partículas clássicas pela emissão e a absorção de uma partícula mediadora virtual pode resolver esse problema, como será visto a seguir.

### *A violação da conservação de energia e momento*

Vamos supor duas partículas, 1 e 2. A partícula 1 está indo em direção a partícula 2, que a absorverá, numa colisão inelástica. Este seria um modelo para a absorção de uma partícula mediadora.

A partícula 1 possui momento  $\vec{p}_1$  e massa  $m_1$ ; enquanto a partícula 2 possui momento  $\vec{p}_2$  e massa  $m_2$ .



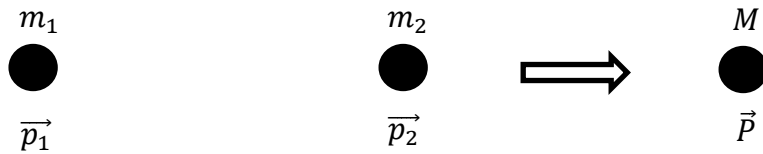
Portanto, antes da colisão o momento é dado por:

$$\vec{P}_{antes} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

E a energia dada por:

$$E_{antes} = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} \quad (14)$$

Com a colisão, a partícula 1 é absorvida pela partícula 2, conforme vimos no modelo de partículas mediadoras da interação:



Assim, o momento final fica:

$$\overrightarrow{P_{depois}} = \vec{P}$$

E a energia:

Onde 
$$E_{depois} = \frac{P^2}{2M} \quad M(\neq) m_1 + m_2$$

Supondo que haja conservação da energia, podemos dizer que:

$$E_{antes} = E_{depois} \quad (16)$$

Dessa forma, substituimos (14) e (15) em (16) e a conservação da energia fica:

$$\frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} = \frac{P^2}{2M}$$

Porém, no referencial do centro de massa:

$$\frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} = 0$$

Isto significa que não há conservação da energia. No referencial do centro de massa, a energia inicial do sistema é nula e a final não. Para obtermos este resultado supusemos que as partículas antes e depois são idênticas. Se, entretanto, as partículas puderem sofrer modificações que alterem seus estados internos a emissão ou a absorção tornam-se compatíveis com as leis de conservação.

Como a colisão é inelástica, devemos introduzir a energia interna, pois esta dará conta da variação de energia cinética. Assim, a conservação da energia fica sendo:

$$\frac{p_1^2}{2m_1} + U_1 + \frac{p_2^2}{2m_2} + U_2 = \frac{P^2}{2M} + U \quad (17)$$

Onde  $U_1$  e  $U_2$  são as energias internas iniciais e  $U$  a energia interna final.

Segue que no referencial do centro de massa, a velocidade após a colisão é nula:

$$\frac{P^2}{2M} = 0$$

Excluindo este termo de (17):

$$\frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} + U_1 + U_2 = U$$

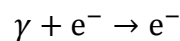
No centro de massa:  $p_1 = -p_2$

$$p_1^2 \left( \frac{1}{2m_1} + \frac{1}{2m_2} \right) + U_1 + U_2 = U$$

Ou seja, a variação de energia cinética é explicada pela variação da energia interna. Neste tipo de colisão, as deformações dos corpos dão conta da perda de energia cinética. Esta é a solução dada pela física clássica para uma colisão inelástica entre partículas.

Porém, isto supõe que a energia interna final do sistema unido é  $U$ , diferente das iniciais,  $U_1$  e  $U_2$ . E este é o problema do modelo, no caso das partículas elementares, existe um postulado fundamental de que uma partícula é sempre a mesma, isto é, não existem dois tipos da mesma partícula. As mesmas partículas são sempre idênticas. Portanto, uma mesma partícula elementar não pode ter duas energias internas diferentes.

Por exemplo, uma absorção de um fóton ( $\gamma$ ) por um elétron ( $e^-$ ):



É análoga à descrição anterior. O senão fica por conta do elétron final ser idêntico ao inicial. Ele possui as mesmas características do inicial, inclusive energia interna.

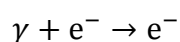
Isto significa que o modelo de troca de partículas é insubstancial? Lembre-se que o pión mediador da força forte foi detectado. Portanto, este impasse significa que devemos buscar uma solução para o descrito.

### *Princípio da Incerteza*

Portanto, o Princípio da Incerteza surge como a hipótese que permitirá a emissão da partícula mediadora. Segundo este princípio, não é possível ter simultaneamente a certeza da posição e da velocidade de uma partícula. Assim, quanto maior for a precisão com que se conhece uma delas, menor será a precisão com que se pode conhecer a outra.

A solução encontrada para descrever a emissão e absorção de uma partícula é deixar a conservação de energia ser violada por um pequeno tempo, mas não para sempre ( $\Delta t \cong 0$ ). Por um pequeno intervalo de tempo ocorre a violação da energia, apenas para a partícula mediadora poder viajar e interagir. Afinal, a partícula é quântica.

A ideia básica é a de que uma partícula emite outra. Como dissemos, um elétron pode emitir (ou absorver) um fóton:



Mas de onde vem a energia para criar fótons? O Princípio da Incerteza permite que haja essa “energia a mais” por um pequeno tempo. Utilizamos o Princípio da Incerteza como uma proporcionalidade inversa:

$$\Delta E \propto \frac{1}{\Delta t}$$

A violação deve ocorrer por um tempo curto. Se a distância for pequena, pode haver uma grande variação, pois o tempo é pequeno. Agora, se a distância for grande, a incerteza deve ser pequena, pois dura mais tempo.

Desta maneira, a energia se conserva, a não ser que seja por um tempo pequeno em que não posso medi-lo [Ostermann, 2001a]. Mas afinal quanto tempo? Do mesmo princípio, a constante de Planck ( $\hbar$ ) surge como uma constante de proporcionalidade que representa o grau desta violação:

$$\Delta E \propto \frac{1}{\Delta t}$$

Transformando o denominador:

$$\Delta E \cdot \Delta t \propto \hbar$$

Se  $\hbar = 0$ , não há violação. Se  $\hbar$  for grande, há muita violação. Assim:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

Esta incerteza permite a criação de um fóton com energia  $\Delta E$  desde que sua vida não seja maior do que indicado na equação ( $\Delta t$ ). Como a constante  $\hbar$  é da ordem de grandeza  $10^{-34}$ , são possíveis grandes violações apenas em tempos muito reduzidos.

Cada interação fundamental possui sua própria “partícula mediadora”, que transmitirá a força. Assim, elimina-se a dificuldade da falta de um “meio material” pelo qual as partículas interajam.

### *As quatro forças*

A ampla maioria das partículas conhecidas é instável e decai, transformando-se espontaneamente em outras partículas. Partículas de todos os tipos podem ser criadas ou destruídas através de interações que envolvem a troca de bósons virtuais regidas pelo Princípio da Incerteza.

O mundo das partículas, aparentemente um caos, traz simplificações através de alguns resultados. Existem apenas quatro interações fundamentais, com quatro cargas associadas. Embora haja quatro cargas e quatro interações, nem todas as partículas possuem as quatro cargas e sofrem as quatro interações.

Todas as interações serão descritas pela troca de partículas mediadoras (bósons). Já discutimos as interações gravitacional e eletromagnética, que, nesta interpretação, são mediadas pelo gráviton (que ainda não foi detectado) e fóton, respectivamente.

Há, ainda, a interação responsável pela radiatividade. É descrita como as demais, com alcance quase nulo ( $10^{-17}$  m), de modo que seu bóson seja muito pesado na escala das partículas (100 vezes mais pesado que o próton).

A força forte explica como o núcleo atômico continua unido apesar da mútua repulsão eletromagnética dos prótons. Agindo no núcleo, ela embarca não só os prótons, mas também os nêutrons. Ela é a responsável, portanto, pela coesão do núcleo atômico. A interação forte corre entre quarks (como será visto à frente) e é mediada pelos chamados glúons. A interação forte também é responsável pela produção de píons e outras colisões de energias elevadas.

Essa descrição das interações fundamentais da matéria permite realizar uma classificação adequada dos componentes da matéria. Não apenas deve ser fundamental, sem estrutura interna, como uma partícula elementar deve se encaixar – com suas devidas cargas – nas interações.

Deste modo, uma adequada classificação de partículas deve englobar a interação a que se sujeita, bem como ajudar a identificar suas propriedades. Partindo deste princípio, utilizaremos a força forte entre quarks (que constituem os prótons e nêutrons) para classificar as partículas elementares.

### *Partículas Elementares*

Tudo que se sabe sobre interações de partículas elementares foi compilado no chamado Modelo Padrão, que é uma reunião de várias teorias correlatas. Excetua-se, no entanto, a gravidade, que é muito fraca para desempenhar papel relevante nos processos comuns de partículas.

### *Quarks*

Os físicos Murray Gell-Mann (1929 – ) e George Zweig (1937 – ) propuseram, independentemente em 1964, que as propriedades de partículas como prótons e nêutrons (hádrons) poderiam ser explicadas por tratá-los como uma trinca de outras partículas.

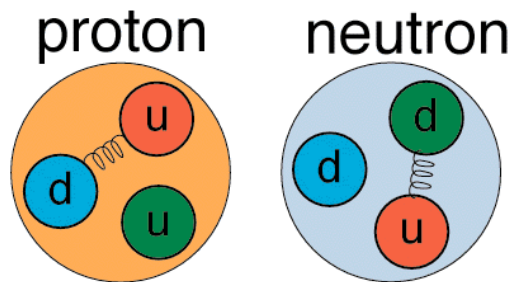


Assim, as centenas de partículas conhecidas na época poderiam ser explicadas como combinações de apenas três partículas fundamentais. Este modelo despertou um grande interesse por parte dos físicos experimentais que passaram, então, a idealizar experiências para encontrar estas partículas, denominadas quarks. Assim, acabou por se confirmar a existência dos quarks (u, d, s). Mostrou-se, pela primeira vez que prótons e nêutrons possuíam estrutura interna, pois eram formados de quarks.

Ao invés de estudarmos a interação entre dois prótons como sendo uma interação entre duas partículas, vemos que, considerando suas partes, os quarks, a interação se dá pela troca de glúons entre seus quarks.

Os quarks não são observados livres. Eles só existem combinados, seja num bárioon (três quarks) ou em um méson (um quark e um antiquark). A esta propriedade chamamos confinamento.

Assim, os prótons e nêutrons não são as partículas fundamentais, são formados de quarks, e a atração entre nucleons é efeito residual do que ocorre dentro deles, fazendo os quarks ficarem unidos.



[Figura 17] Desenho mostrando os quarks ligados pela troca de glúons

### *Antipartículas*

Paul Dirac (1902 – 1984) descobriu que a equação que descreve a energia de elétrons livres:

$$E^2 - pc^2 = m^2c^4$$

admite uma solução positiva:

$$E = +\sqrt{pc^2 + m^2c^4}$$

E também admite uma solução negativa:

$$E = -\sqrt{pc^2 + m^2c^4}$$

Dirac compreendeu que estes estados de energia negativa não poderiam ser desconsiderados, mesmo porque se isto fosse feito haveria problemas com a estrutura matemática da teoria [Griffiths, 1987]. O dualismo da equação de Dirac é uma característica mais profunda e universal. Cada partícula específica possui sua correspondente antipartícula, de mesma massa, mas carga oposta.

Cada partícula específica possui sua correspondente antipartícula, de mesma massa, mas carga oposta. Algumas partículas são suas próprias antipartículas, caso do fóton, e outras diferem nos números quânticos.

### *Léptons*

Nas inúmeras experiências que já foram feitas, nunca se achou um comportamento que levasse a crer em estrutura interna de elétrons. Isto nos leva a supor que seja ele próprio uma partícula elementar.

Na verdade, das incontáveis partículas descobertas e previstas, muitas partilhavam características com os elétrons. Não interagiam fortemente. Novamente, a interação dá as indicações acerca da estrutura da matéria.

Podemos, portanto, resumir a constituição da matéria em três tipos: As partículas que transmitem as interações, os bósons; as partículas que interagem fortemente, os quarks; e uma outra classe, que não interage fortemente, os léptons.

Os léptons são partículas sem estrutura interna que, diferentemente dos quarks, (que existem confinados), existem livres. Os físicos têm observado que alguns tipos de decaimentos de léptons são possíveis e outros não. Para explicar esse fato, eles os dividiram em três famílias de léptons: o elétron e seu neutrino, o múon e seu neutrino e o tau e seu neutrino.

Podemos, então, fazer a divisão dos léptons em três famílias, cada uma composta por uma partícula (elétron, múon ou tau), o neutrino associado e as antipartículas correspondentes. Tabela das três famílias de léptons:

Família	Partícula	Símbolo
<b>Elétron</b>	Elétron	$e^{-}$
	Neutrino do Elétron	$\nu_e$
<b>Múon</b>	Múon	$\mu^{-}$
	Neutrino do Múon	$\nu_{\mu}$
<b>Tau</b>	Tau	$\tau^{-}$
	Neutrino do Tau	$\nu_{\tau}$

### *Modelo Padrão*

À medida que a tecnologia de aceleração de partículas foi se desenvolvendo novas descobertas foram feitas a partir das colisões de altíssima energia envolvendo núcleos, prótons, elétrons, enfim, diversas partículas e suas correspondentes antipartículas.

Desta forma, apesar de termos uma infinidade de partículas, seus constituintes básicos podem ser reunidos no chamado Modelo Padrão. De tal sorte, que podemos reconhecer os verdadeiros átomos, as partes indivisíveis da matéria.

Tudo que existe desde galáxias até montanhas e moléculas é feito de quarks e léptons. Mas precisamente de quarks  $u$  e  $d$  e elétrons. Os outros tipos de quarks e léptons existem por pouco tempo ou em condições de altas energias. Os bósons explicam as interações da matéria.

Então, podemos resumir tudo que vimos num quadro em que estão as partículas elementares constituintes da matéria: Quarks, léptons e bósons mediadores das interações.

Quarks		Léptons		Bósons	
Interagem fortemente		Não interagem fortemente		Mediadores das interações	
Up	Down	Elétron	Neutrino do Elétron	Fóton	Gráviton
Charm	Strange	Múon	Neutrino do Múon		
Top	Bottom	Tau	Neutrino do Tau	Glúons	W e Z

Resumindo: há 6 léptons e suas antipartículas, totalizando 12; 6 quarks distribuídos em 3 cores e suas antipartículas, totalizando 36; 8 glúons,  $W^\pm, Z^0$  e  $\gamma$ , cujas antipartículas são os próprios, totalizando 12 mediadoras. Assim, terminamos o quadro com 60 partículas elementares.

No início do universo, os bósons não tinham massa e havia o campo eletrofraco. Após algum tempo, este campo separou-se em dois: eletromagnético e fraco. O bóson de Higgs foi o responsável por atribuir massa ao  $W^\pm$ , ao  $W^\pm$  e ao  $Z^0$  e ao  $\gamma$  não. Este bóson ainda não foi verificado e é objeto de estudo pelo LHC (Large Hadron Colider, ou Grande Colisor de Hádrons).

## *Referências Bibliográficas*

[Griffiths, 1987] GRIFFITHS, D. J. *Introduction to Elementary Particles*. New York: Wiley, 1987.

[Ostermann, 1998] OSTERMANN, F. et al. “Tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio: um Texto para Professores sobre Supercondutividade”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 20, no. 3, 1998.

[Ostermann, 2001a] OSTERMANN, F; CAVALCANTI, C. J. de H. “Um poster para ensinar física de partículas na escola”, *Física na Escola*, v. 2, n. 1, 2001.