

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

IF - Instituto de Física

MPEF - Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física

INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS.

Denise Borges Sias

Jalves Sampaio

Luiz André Mützenber

Prof. Marco Antônio Moreira

Resumo.

Neste texto apresentamos as menores estruturas (léptons e quarks) que os físicos já conceberam, algumas das quais já foram detectadas nos modernos laboratórios enquanto outras só existem nas teorias. Também são analisadas as interações que ocorrem entre quarks para formar o próton e o nêutron, os constituintes do núcleo atômico, e as interações entre o núcleo atômico e os elétrons que mantém estável o átomo, constituinte fundamental da matéria de que nós somos. As interações serão analisadas sob o enfoque da Mecânica Quântica, considerando a troca de partículas mediadoras de força e as leis de conservação.

Introdução.

A palavra "partícula" está muito presente no nosso dia a dia e também no vocabulário da Física. Em virtude desse uso já consagrado, talvez fosse prático inventar um novo nome para o objeto de estudo dos "Físicos de Partículas", mas isto também traria muitas dificuldades, pois tal termo é muito usado por estes físicos, por isso vamos citar algumas características que normalmente associamos às partículas, mas que não podem ser associados aos objetos de estudo dos Físicos de Partículas.

Ainda no Ensino Fundamental lhe ensinaram, que partículas são corpos muito pequenos. Por corpo entendemos: objeto sólido de forma definida que ocupa um lugar definido no espaço e que o lugar ocupado por um corpo não pode ser ocupado ao mesmo tempo por nenhum outro corpo. Os objetos analisados em Física de Partículas não têm forma definida e não ocupam uma posição definida, podendo ocupar simultaneamente o mesmo espaço, portanto, nunca pense em uma partícula elementar como sendo um corpo muito, muitíssimo pequeno.

Partícula elementar é um conceito que muda de uma área de pesquisa para outra. Para um Químico o átomo é uma partícula elementar, ele não precisa estudar a estrutura do átomo para saber quais reações químicas são possíveis. No século XIX, alguns Físicos e Químicos acreditavam na existência do átomo, como sendo uma porção de matéria indivisível, outros consideravam esta idéia absurda, imaginavam que uma minúscula porção de um material poderia sempre ser dividida sem que mudasse suas propriedades químicas. A explicação do movimento browniano, feita por Albert Einstein em 1905, foi importante para consolidar o conceito de átomo, naquela época, imaginado como sendo uma minúscula esfera com diâmetro de aproximadamente 1×10^{-10} m.

No ano de 1911 Ernest Rutherford realizou experimentos que evidenciaram que o átomo não é uma pequena esfera sólida e homogênea, mas que ele tem uma estrutura interna, um núcleo, com diâmetro 100.000 vezes menor que o diâmetro do átomo, ao redor do qual orbitam os elétrons. Assim, para a Física Atômica, as partículas elementares são os elétrons e o núcleo atômico. Com este modelo, os Físicos puderam descrever a estrutura do átomo e compreender o porquê das reações químicas, mas para eles surgiu uma nova dúvida. Como os prótons, todos com carga positiva, podem ficar juntos para formar um núcleo tão compacto?

Becquerel descobriu a radioatividade em 1896, mas somente em 1928 Gamow, Gurney e Condon explicaram a radiação α como sendo a emissão de uma partícula com dois prótons e

dois nêutrons. Em 1932 o nêutron foi detectado por Chadwick. e foi realizada a primeira reação nuclear usando partículas aceleradas, por este motivo, podemos considerar que 1932 é o ano do início de Física Nuclear (TIPLER, 1981, p.313). Esta não encara mais o núcleo como uma partícula elementar, ela está preocupada em descrever como prótons e nêutrons estão organizados no interior do núcleo. Para a Física Nuclear as partículas elementares são os núcleons (prótons e nêutrons).

Considerando a detecção do pósitron e do nêutron em 1932, podemos dizer que no ano em que iniciou a Física Nuclear, somente quatro partículas elementares (elétron, próton, nêutron e pósitron) eram conhecidas. A teoria de Paul Dirac já previa a existência do neutrino que foi detectado em 1956, mas neste intervalo de tempo muitas partículas foram descobertas (mésons^a, bárions^b e léptons^c ...). No início da década de 1960 um verdadeiro "zoo" de partículas era conhecido, principalmente hádrons. O modelo que teve maior sucesso em organizar estas partículas foi proposto por Gell-Mann e Y. Ne'eman em 1961, cuja teoria é baseada na existência dos quarks. (TIPLER, 1981, p.393). Os primeiros indícios de que os quarks poderiam ser observados durante o aniquilamento de elétrons e pósitrons surgiram em 1975, finalmente, em 1978, com a construção de aceleradores de partículas suficientemente poderosos os quarks puderam ser observados indiretamente. (FRITZSCH, 1983, p190).

A detecção dos quarks foi um marco importante na consolidação da teoria, mas há partículas como o gráviton e o bóson de Higgs, previstas pelo Modelo Padrão, que devem ser detectadas pelos físicos experimentais para que a teoria dos quarks permaneça como a melhor alternativa para explicar a microestrutura da matéria. Nas próximas páginas procuramos apresentar as principais características do Modelo Padrão.

Um Panorama do Modelo Padrão.

Um panorama da classificação das partículas elementares, segundo a Física de Partículas, pode ser organizado por um Mapa Conceitual (Figura 1) em que são apresentados

^a A palavra méson tem origem no grego "mesos" que significa intermediário ou médio, foi por esse motivo usada para identificar partículas com massa mediana.

^b A palavra bárion tem origem no grego "baros" que significa pesado, foi por esse motivo usada para identificar as partículas maiores.

^c A palavra lépton tem origem no grego "lepton" que significa leve ou pequeno, foi por esse motivo usada para identificar as partículas menores.

os conceitos e as relações mais importantes para compreender como a Física de partículas explica a constituição do átomo.

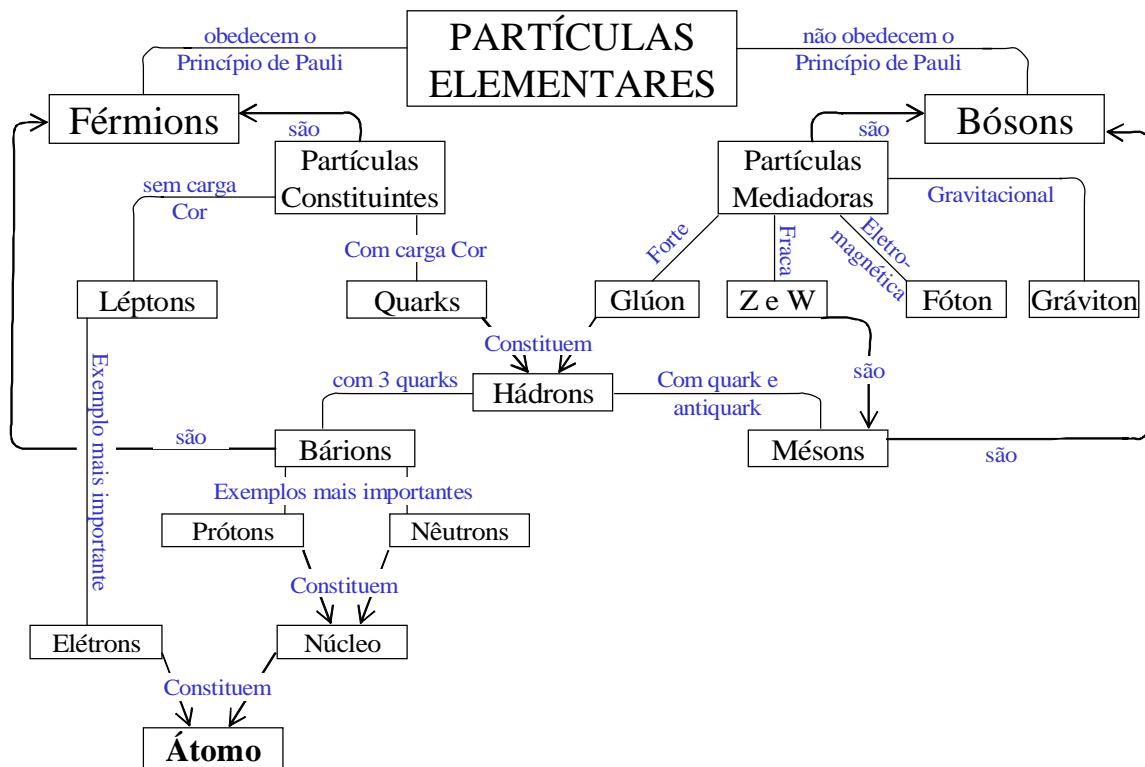


Figura 1: Mapa Conceitual sobre partículas elementares.

Todas as partículas podem ser classificadas em Bósons e Férmions. Bósons possuem spin^d inteiro (... -2; -1; 0; 1; 2; ...), isto faz com que não obedeçam o Princípio de Exclusão de Pauli, já os Férmions são partículas com spin semi-inteiro (... - $\frac{3}{2}$; - $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{2}$; ...) e que por isso obedecem o Princípio de Exclusão de Pauli. As partículas elementares, aquelas que até o momento parecem ser indivisíveis, podem ser divididas em duas classes, as partículas

^d Há 50 anos os Físicos descobriram que, além de girar ao redor do próton, o elétron gira ao redor do seu próprio eixo, isto é, o elétron possui um momentum angular intrínseco. Imaginando o elétron como uma minúscula esfera é fácil supor que ele pode assumir qualquer valor de momentum angular, mas este não é o fato. Na Mecânica Quântica o momentum angular é quantizado e só pode assumir os valores $+\frac{1}{2}\hbar$ e $-\frac{1}{2}\hbar$. Ou seja, o momentum angular intrínseco do elétron é metade do menor momentum angular orbital diferente de zero que o elétron pode assumir em seu movimento em torno do núcleo no átomo de hidrogênio, o sinal (positivo ou negativo) aparece porque o momentum angular é uma grandeza vetorial e pode ter sentido para cima ou para baixo. Como todos os spin das partículas são múltiplos inteiros ou semi-inteiros de \hbar é comum suprimir \hbar e escreve simplesmente que o spin é $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$. (FRITZSCH, 1981, p.23-24)

constituintes, que são os blocos básicos de constituição da matéria, e as partículas mediadoras, que transmitem as interações entre as partículas constituintes. Uma das características que permite diferenciar estas classes de partículas é justamente o spin. As partículas constituintes são férmions e as partículas mediadoras são bósons.

Há duas classificações para as partículas constituintes, os léptons e os quarks. Os léptons são o elétron, o múon e o tau, seus respectivos neutrinos e suas anti-partículas. Léptons não tem carga cor, possuem carga elétrica inteira e podem existir livremente. Os quarks são up, charm, top, down, strange e bottom e as suas respectivas anti-partículas. Quarks tem carga cor, isto é, sentem a interação forte, tem carga elétrica fracional ($-\frac{1}{3}$; $-\frac{2}{3}$; $+\frac{2}{3}$; $+\frac{1}{3}$) e só existem confinadas dentro de outras partículas, os hádrons.

Hádrons são combinações de quarks que permanecem juntos por causa da interação forte (troca de glúons). Em princípio podemos imaginar qualquer combinação de quarks, mas, até hoje, nenhuma partícula livre com carga fracional foi observada, e este fato experimental levou os cientistas a concluir que somente duas formas de combinar quarks são válidas.

Combinando um quark com um anti-quark se obtêm mésons. Como a soma dos spins de um quark e um anti-quark pode resultar em -1; 0; ou +1, os mésons também são bósons.

Combinando dois quarks de carga $+\frac{2}{3}$ com um quark de carga $-\frac{1}{3}$ se obtêm um bárion de carga positiva, como exemplo podemos citar o próton. A combinação de dois quarks de carga $-\frac{1}{3}$ com um quark de carga $+\frac{2}{3}$ resulta em um bárion neutro, como exemplo podemos citar o nêutron. Como a soma dos spins de três quarks vai resultar em $-\frac{3}{2}$; $-\frac{1}{2}$; $+\frac{1}{2}$; $+\frac{3}{2}$ ou $+\frac{5}{2}$ os bárions também são férmions.

Nêutrons e Prótons interagem pela força forte, intermediando glúons, para formar os núcleos atômicos, os quais interagem com os elétrons através da força eletromagnética, trocando fótons virtuais. Da interação entre o núcleo atômico e os elétrons surgem os átomos que constituem a matéria macroscópica.

As forças fundamentais conhecidas na natureza são quatro, força nuclear forte, força fraca, força eletromagnética e força gravitacional. Vale lembrar que um dos grandes sonhos da Física é a Teoria Unificada, que explica todos os fenômenos em termos de uma única interação fundamental, um passo neste sentido foi dado pela teoria da unificação das interações eletromagnética e fraca na interação eletrofraca. A força forte, que atua somente em distâncias muito pequenas, menores que o raio do núcleo atômico, é intermediada por glúons. A força fraca, que também está limitada ao núcleo atômico é responsável pelos decaimentos β e é intermediada pelas partículas Z , W , W^+ que são mésons. A força

eletromagnética, que pode atuar em qualquer distância, é a responsável pela maioria das forças que sentimos no nosso dia a dia (atrito, força muscular, forças de contato ...) é intermediada por fótons virtuais. E a força gravitacional, (seu peso é um bom exemplo de força gravitacional) é intermediada por grávitons. Os grávitons estão previstos pelo Modelo Padrão, muito esforço experimental já foi realizado mas até hoje estas partículas não foram detectadas.

Agora que você já tem uma idéia geral do "zoológico de partículas" com que lida a Física de Partículas vamos começar um estudo um pouco mais detalhado dos grupos de partículas constituintes, quarks e léptons e de como elas interagem através das partículas mediadoras.

Quarks.

De acordo com o que já foi comentado anteriormente, a teoria de que todos os hádrons são formados por partículas mais fundamentais chamadas quarks surgiu em no início da década de 1960 e foi confirmada na década de 1970 com o advento dos grandes aceleradores de partículas.

Hoje se tem conhecimento da existência de seis sabores (ou tipos) de quarks, cada um possuindo spin semi-inteiro. Nota-se que para cada sabor de quark existe um anti-sabor ou anti-quark. Os antiquarks, assim como qualquer antipartícula, possuem as mesmas propriedades de suas partículas correspondentes com exceção das propriedades que podem possuir valor oposto (carga elétrica e carga cor). Para tais propriedades a antipartícula tem sempre valor oposto ao da partícula correspondente. A tabela 1 apresenta os seis sabores e antisabores de quarks, assim como algumas de suas propriedades importantes como energia de repouso (E_0), spin carga elétrica (Q.E.), número bariônico (N.B.) e número leptônico (N.L.). Note que as antipartículas são representadas com os mesmos símbolos de suas correspondentes partículas, porém com um til em cima do símbolo.

Tabela 1: Algumas propriedades dos quarks e dos antiquarks.

Nome	Símbolo	E_0 (Mev)	Spin	Q. E.	N.B.	N.L.
<i>Up</i>	u	5	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Up</i>	\bar{u}	5	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
<i>Down</i>	d	7	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Down</i>	\bar{d}	7	$\pm \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
<i>Charm</i>	c	1360	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Charm</i>	\bar{c}	1360	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
<i>Strange</i>	s	150	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Strange</i>	\bar{s}	150	$\pm \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
<i>Botton</i>	b	56000	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Botton</i>	\bar{b}	56000	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
<i>Top</i>	t	20000	$\pm \frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0
<i>Anti-Top</i>	\bar{t}	20000	$\pm \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0

Os quarks juntamente com os léptons (que serão apresentados mais tarde) são as menores partículas constituintes da matéria. Observa-se porém, uma diferença muito curiosa entre elas: os léptons são facilmente encontrados livres enquanto que quarks sofrem uma espécie de confinamento que impede a sua existência isolada. Esta é uma questão bem interessante e ao longo do texto faremos várias referências a ela. Observa-se, por exemplo, que quando um quark recebe energia através da colisão de um elétron ele dissipa esta energia formando pares quark-antiquark ao invés de ser ejetado do núcleo como uma partícula livre. Dessa forma, temos que quarks estão sempre presentes dentro de hádrons.

Os hádrons dividem-se em dois grupos: bárions e mésons. Estes, dessa forma, são compostos da união de quarks e/ou antiquarks. A seguir faremos uma breve descrição de cada um deles, mostrando alguns exemplos, bem como algumas de suas principais características.

Começaremos pelos mésons, os quais são compostos de um quark e um antiquark, são classificados como bósons, pois seu spin é sempre inteiro e, portanto, não são obrigados a obedecer o princípio da exclusão de Pauli.

Na tabela 2 temos alguns exemplos de mésons com algumas de suas propriedades, símbolo, composição, energia de repouso (E_0), spin, carga elétrica (Q.E.), número bariônico (N.B.) e número leptônico (N.L.).

Tabela 2: Alguns mésons e algumas de suas propriedades

Nome	Símbolo	Composição	E_0 (MeV)	Spin	Q.E.	NB.	NL.
Pi mais	π^+	$u \bar{d}$	140	0	+1	0	0
Pi zero	π^0	$u \bar{u}/d \bar{d}$	135	0	0	0	0
Pi menos	π^-	$d \bar{u}$	140	0	-1	0	0
Ka mais	K^+	$u \bar{s}$	494	0	+1	0	0
Ka menos	K^-	$s \bar{u}$	494	0	-1	0	0
Rho mais	ρ^+	$u \bar{d}$	770	1	+1	0	0
Rho menos	ρ^-	$d \bar{u}$	770	1	-1	0	0
W mais	W^+	$u \bar{d}$	80400	1	+1	0	0
Zê	Z^0	$u \bar{u}/d \bar{d}$	91187	1	0	0	0
W menos	W^-	$d \bar{u}$	80400	1	-1	0	0

Através da análise destes exemplos de mésons podemos verificar que existem alguns pares de mésons com a mesma composição, se analisarmos uma tabela de mésons completa veremos que esse número pode ser maior. Isto não quer dizer, no entanto, que esses mésons são iguais. Analisemos o exemplo dos mésons π^+ (pi mais) e ρ^+ (rho mais). Os quarks que compõem o méson pi, possuem spins com sentidos opostos, portanto o spin resultante é nulo e a energia de repouso é menor, pois estes quarks se atraem como ímãs com orientações opostas. Já os quarks que compõem o méson rho possuem os spins de mesmo sentido, portanto o spin resultante é 1, e a sua energia de repouso é maior pois estes quarks se repelem como dois ímãs orientados com pólos iguais para o mesmo lado. Conseqüentemente o trabalho realizado para aproximar estes quarks é acumulado e vai compor a energia de repouso do méson rho.

Agora vamos, resumidamente, descrever os bárions e suas antipartículas que são constituídos por um conjunto de três quarks ou três antiquarks, respectivamente.

Verifique, na tabela 3, que o valor da carga elétrica destas partículas é sempre inteiro da mesma forma que nos mésons (até o momento não é possível uma partícula com carga fracionária) e que o spin é sempre semi-inteiro, por isso todos os bárions são férmions.

Tabela 3: Alguns Bárions e algumas de suas propriedades.

Nome	Símbolo	Composição	E_0 (MeV)	Spin	Q. E.	N. B.	N. L.
Próton	p^+	$d u u$	938	$\pm 1/2$	+1	+1	0
Antipróton	\bar{p}^-	$\bar{d} \bar{u} \bar{u}$	938	$\pm 1/2$	-1	-1	0
Nêutron	n	$d d u$	940	$\pm 1/2$	0	+1	0
Antinêutron	\bar{n}	$\bar{d} \bar{d} \bar{u}$	940	$\pm 1/2$	0	-1	0
Lambda	L^0	$d u s$	1116	$\pm 1/2$	0	+1	0
Antilambda	$\bar{\Lambda}^0$	$\bar{d} \bar{u} \bar{s}$	1116	$\pm 1/2$	0	-1	0
Ômega Menos	W^-	$s s s$	1672	$\pm 1/2$	-1	+1	0
Anti-ômega menos	$\bar{\Omega}^-$	$\bar{s} \bar{s} \bar{s}$	1672	$\pm 1/2$	+1	-1	0

Um problema neste modelo parece surgir quando tentamos explicar o bárion Ω^- . Conforme foi mencionado os quarks possuem spin semi-inteiro e, portanto, devem obedecer ao princípio da exclusão de Pauli, ou seja, não podemos ter dois quarks de mesmo sabor com o mesmo spin. Dessa forma o bárion Ω^- não poderia existir, já que é formado por 3 quarks de mesmo sabor sss. Neste caso se o primeiro quark tiver spin \uparrow e o segundo, spin \downarrow , o terceiro quark fica sem alternativa.

Devido à fortes evidências da existência do bárion W^- foi sugerido, então, que quarks possuíam além do sabor uma nova propriedade chamada cor. A cor possui algumas características semelhantes à carga elétrica e por isso esta propriedade é conhecida como carga cor, mas difere pelo fato de possuir três variedades (vermelho, verde e azul). As cores dos antiquarks são, anti-vermelho, anti-verde e anti-azul. Dessa forma cada quark listado anteriormente não é um, mas três. Assim o número total de quarks não é seis, mas dezoito. Ao todo quarks e antiquarks somam trinta e seis.

Vamos agora voltar nossa atenção, por alguns instantes, para partículas conhecidas como núcleons. Os núcleons (prótons e nêutrons) são os bárions mais leves. Comparando suas energias de repouso com as dos quarks (tabela 1) percebe-se que a soma da massa de 3 quarks correspondentes a um determinado núcleon é cerca de 100 vezes menor que a massa deste núcleon. A explicação para este fato é de que núcleons não são formados apenas por quarks soltos, mas por quarks envoltos em glúons. Veremos, a seguir, que glúons possuem uma relação direta com a carga cor citada no parágrafo anterior. Para isso usaremos algumas

comparações com a eletrodinâmica, já estudada por você, tentando dessa forma, levá-lo ao entendimento das novas idéias ao mesmo tempo que algumas distinções estarão sendo feitas.

A eletrodinâmica quântica é a teoria que estuda a interação entre fótons e elétrons, enquanto que a teoria referente à interação entre glúons e quarks é cromodinâmica quântica.

Assim como na eletrostática cargas iguais repelem-se e cargas opostas se atraem, na cromodinâmica quântica cores semelhantes se repelem e cores opostas se atraem. Por exemplo, dois quarks vermelhos se repelem enquanto um quark vermelho e um antiquark anti-vermelho se atraem. Isto explica a formação dos mésons, ou seja, da mesma maneira que partículas com cargas elétricas de sinais opostos se unem para formar átomos neutros, quarks com carga cor diferente, se unem para formar hádrons sem carga cor. Quarks possuem carga cor positiva e antiquarks possuem carga cor negativa, assim um méson, formado por um quark e um antiquark não possui cor. Na formação dos bárions, três quarks de cores diferentes (azul, verde e vermelho) unem-se formando tal partícula sem cor. Dessa forma, até o momento, temos permitida apenas a existência de sistemas livres (bárions, mésons) sem carga cor, esta é uma propriedade que permanece confinada a grupos em que a carga cor total se anula.

Da mesma forma que cargas elétricas produzem e sentem campos eletromagnéticos, quarks e antiquarks, através de sua carga cor, produzem e sentem a ação de um campo. Enquanto cargas elétricas interagem através do campo eletromagnético cuja partícula mediadora é o fóton, quarks e suas antipartículas sofrem a ação da interação forte dentro do núcleo. A partícula mediadora dessa interação é o glúon; e portanto, esse campo de interação é também chamado campo gluônico.

A principal diferença entre glúons e fótons é que fótons não possuem carga elétrica, enquanto glúons possuem uma carga cor. Devido ao fato do fóton não possuir carga elétrica ele não emite fótons, já os glúons possuem carga cor, dessa forma, podem emitir glúons. Para uma partícula carregada, quanto menor sua massa mais fácil é para ela emitir radiação. Como os glúons não possuem massa imagine que a emissão de glúons por glúons, se estivessem livres, seria uma catástrofe. No entanto isto não acontece pois, as interações fortes entre glúons acarretam um confinamento tanto de glúons quanto de quarks. Esta forte interação entre cargas coloridas a distâncias de cerca de 10^{-15} m tornam-se tão fortes que a carga cor individual não pode se quebrar e atingir longas distâncias.

Poderíamos agora abordar detalhes ainda maiores sobre os quarks, como por exemplo, o rearranjo destes pela interação forte e pela interação fraca. Mas pensamos que estas

análises deixariam o texto muito “pesado” e preferimos, de outra forma, que este trabalho sirva apenas como uma introdução a este assunto.

Léptons.

Vamos agora abordar um pouco a respeito dos léptons. Lembramos que estas partículas, juntamente com os quarks, são conhecidas como partículas elementares.

Os Léptons são em número de seis e suas respectivas antipartículas somam doze, sendo o principal deles o elétron. A tabela 4 ilustra os léptons e suas propriedades. Lembramo-nos que para cada lépton existe seu antilépton; partícula com as mesmas características e carga oposta. Assim como os quarks, os léptons também são organizados em três gerações, cada geração possui duas partículas e as respectivas antipartículas. Para perceber a semelhança da organização de léptons e quarks, compare a tabela 4 com a tabela 1.

Tabela 4: Algumas propriedades dos léptons e dos antiléptons.

Nome	Símbolo	E_0 (MeV)	Spin	Q. Elétrica	Nº Bariônico	Nº Leptônico
Elétron	e^-	0,511	$\pm \frac{1}{2}$	-1	0	+1
Pósitron	e^+	0,511	$\pm \frac{1}{2}$	+1	0	-1
Neutrino do elétron	ν_e	<0,030	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	+1
Anti neutrino do elétron	$\bar{\nu}_e$	<0,030	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	-1
Múon	μ^-	107	$\pm \frac{1}{2}$	-1	0	+1
Anti-muon	μ^+	107	$\pm \frac{1}{2}$	+1	0	-1
Neutrino do muon	ν_μ	<0,250	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	+1
Anti-Neutrino do múon	$\bar{\nu}_\mu$	<0,250	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	-1
Tau	t^-	1784	$\pm \frac{1}{2}$	-1	0	+1
Anti-Tau	t^+	1784	$\pm \frac{1}{2}$	+1	0	-1
Neutrino de Tau	ν_t	<0,500	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	+1
Anti-neutrino de Tau	$\bar{\nu}_t$	<0,500	$\pm \frac{1}{2}$	0	0	-1

Uma característica importante dos léptons é que estes não possuem carga cor e por este motivo não participam da interação forte. Como já foi mencionado, as partículas que interagem por meio da força nuclear são os quarks, através da troca de glúons que transportam a carga cor.

Diferentemente dos quarks, os léptons podem ser observados isoladamente. Estas partículas são estáveis, com exceção do Múon que possui vida média de $2,20 \times 10^{-6}$ s e do Tau que possui vida média de $2,96 \times 10^{-13}$ s.

Assim como os quarks, os leptons são partículas constituintes e possuem spin $\frac{1}{2}$.

Nosso conhecimento sobre essas partículas e suas propriedades surge ao estudar suas interações e leis de conservação. Além das leis de conservação clássicas como: conservação da carga elétrica, conservação da energia e conservação dos momenta linear e angular, existe a lei da conservação dos números leptônico e bariônico.

Em 1930, Wolfgang Pauli, aplicou as regras de conservação de momentum, energia e carga elétrica no estudo da radiação beta, e fez a previsão do antineutrino. Um núcleo de trítio (H^3), se transforma em um núcleo de hélio, mais um elétron, e^- , e um antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$). Esta foi a maneira que Pauli encontrou para explicar como um dos nêutrons do núcleo de trítio, que tem spin $\frac{1}{2}$ pode dar origem a um próton e um elétron, ambos com spin $\frac{1}{2}$ se os dois spins são de mesmo sentido o spin resultante será 1, isto é, momentum angular naquele sentido aumentou, e se as duas partículas tiverem spins postos o spin resultante será nulo e o momentum angular no sentido do momentum angular o nêutron original terá diminuído. Pauli confiou na regra da conservação do momentum angular e afirmou que durante o decaimento do nêutron, uma terceira partícula, que não pode ser detectada, é produzida com spin de sentido contrário ao spin do elétron. O neutrino foi detectado 26 anos mais tarde. Os neutrinos tem um papel importante no modelo cosmológico, com sua contribuição na matéria escura do universo.

Carl Anderson, em 1936, (na introdução diz que o pósitron foi descoberto em 1932) estudando a trajetória de partículas no espalhamento dos raios cósmicos, descobriu o pósitron. Anderson, observou que estes, na presença de um campo magnético desviavam-se em sentido oposto aos dos elétrons. O múon também foi descoberto no estudo do espalhamento dos raios cósmicos, através do decaimento do pion .

Leis de Conservação

Como já foi mencionado no tópico anterior, partículas elementares participam de processos de criação e aniquilação transformando-se umas nas outras como resultado de suas interações. Em todos estes processos são verificadas as seguintes leis de conservação: conservação da quantidade de movimento, conservação do momentum angular conservação da energia e conservação da carga elétrica. Estas leis acabam restringindo tais processos. Como exemplo temos o elétron e o pósitron que são estáveis porque não há outras partículas carregadas em que possam desintegrar sem que a conservação da carga seja violada.

No entanto, existem vários processos permitidos por essas leis de conservação que não acontecem. Como exemplo temos:

$$p^+ \rightarrow p^+ + u$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p^- + p^+$$

Com o objetivo de explicar este fato foram criadas novas leis de conservação. Abordaremos aqui duas delas: a conservação do número leptônico e a conservação do número bariônico. Descrever os decaimento. Colocar nº leptônico e Bariônico nas tabelas.

A lei de conservação do número leptônico diz que “em qualquer processo, o número leptônico total deve permanecer constante”. Para expressar esta lei atribui-se o número quântico leptônico 1 (um) para partículas leptônicas, -1 (menos um) para antipartículas leptônicas, e 0 (zero) para partículas não leptônicas.

De maneira semelhante a lei de conservação do número bariônico diz que “em qualquer processo, o número bariônico total deve permanecer constante”. Dessa forma atribui-se o número quântico bariônico igual a 1 (um) para partículas bariônicas, -1 (menos um) para antipartículas bariônicas, e 0 (zero) para partículas não bariônicas..

Tabela 5: Alguns exemplos de desintegração de partículas.

Partículas		Modo de Desintegração
Léptons	Múon	$m^- \rightarrow e^- + n_m + \bar{\nu}_e$
	Tauí	$t^- \rightarrow e^- + n_t + \bar{\nu}_e$
Bárions:	Nêutron	$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
	Lambda	$\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$

A tabela 5 ilustra alguns exemplos de possíveis desintegrações de léptons e bárions, que são significativas para compreender a conservação do número leptônico NL e do número bariônico NB.

Como exemplo de desintegração de léptons temos a desintegração de um múon, que possui NL=1 e NB=0. Na desintegração dessa partícula são criados um elétron (NL=1 e NB=0); um neutrino do múon (NL=1 e NB=0) e um antineutrino do elétron (NL=-1 e NB=0), portanto, somando ao números leptônicos antes e depois da desintegração encontramos NL=1, e somando os números bariônicos antes e depois da desintegração encontramos NB=0, o que demonstra a conservação destas características das partículas. Fica como desafio para você demonstrar as conservações de NB e de NL para a desintegração da partícula Tau.

Como exemplo de desintegração de bárions temos a desintegração de um nêutron (decaimento b), que possui NL=0 e NB=1. Na desintegração dessa partícula são criados um

próton ($NL=1$ e $NB=0$); um elétron ($NL=1$ e $NB=0$) e um antineutrino do elétron ($NL=-1$ e $NB=0$), portanto, somando ao números leptônicos antes e depois da desintegração encontramos $NL=0$, e somando os números bariônicos antes e depois da desintegração encontramos $NB=1$, o que demonstra a conservação destas características das partículas. Fica como desafio para você demonstrar as conservações de NB e de NL para a desintegração da partícula lambda.

Partículas Mediadoras.

Com exceção da força peso, que resulta da interação gravitacional com a Terra, todas as forças que podemos sentir no dia a dia, empurrões, puxões e atrito entre outras, resultam de interações eletromagnéticas. Além destas duas importantes interações fundamentais, há mais duas, a força forte e a força fraca, mas não há nenhum fenômeno onde possamos sentir diretamente a ação destas forças, o que não diminui a sua importância.

A força forte só atua em distâncias menores que o diâmetro do núcleo atômico, ela é responsável por manter unidos e estáveis os núcleos atômicos. A força fraca atua entre férmions. Como exemplo de ação da força fraca podemos citar a radioatividade β e o espalhamento de neutrinos por prótons.

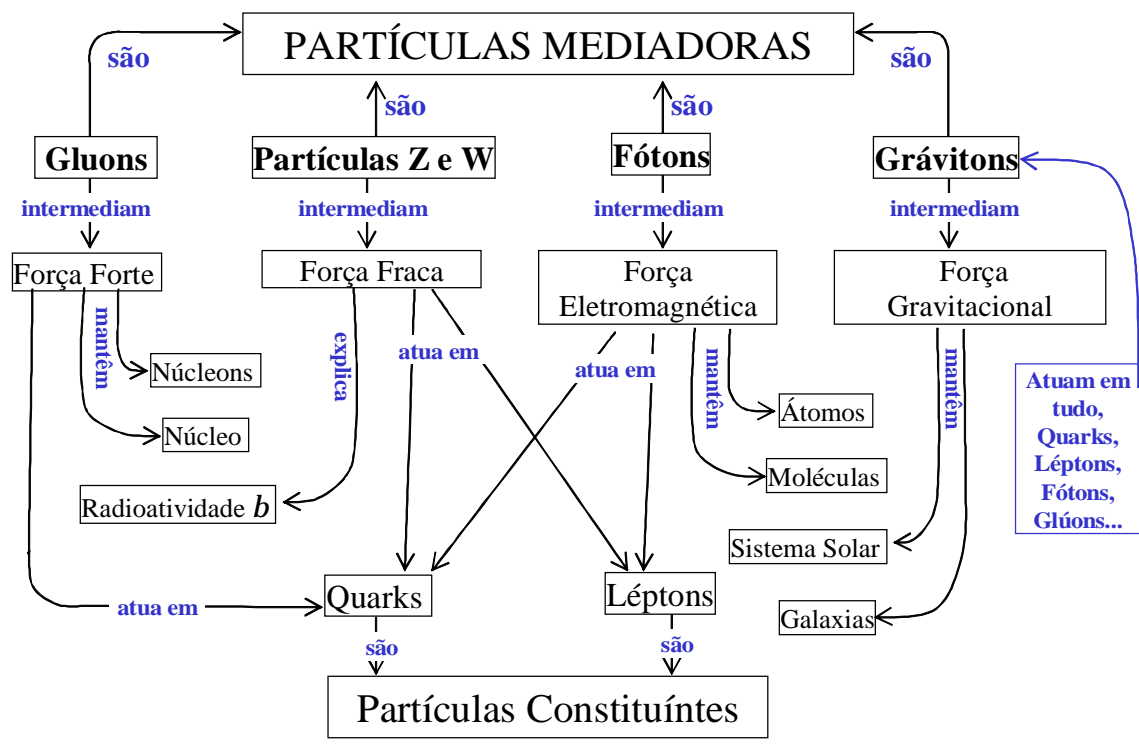


Figura 2: Mapa Conceitual sobre Interações Fundamentais.

A organização das partículas mediadoras e suas interações com as partículas constituintes, conforme a Física de Partículas, é apresentada no Mapa Conceitual de Partículas Mediadoras (Figura 2), onde você pode visualizar as interações fundamentais da natureza, as estruturas em que estas interações são predominantes e as partículas responsáveis pela mediação destas interações.

A interação entre quarks, força forte, é descrita pela cromodinâmica quântica, abreviadamente CDQ. A teoria CDQ é baseada na eletrodinâmica quântica^e, abreviadamente EDQ. Na tabela 6 é feita uma comparação entre os elementos correspondentes nas duas teorias (FRITZSCH, 1981, p.142) . A tabela está incompleta, ela tem a finalidade de mostrar que existem grandezas que se correspondem nas duas teorias.

Tabela 6: Comparação entre a Eletrodinâmica Quântica e a Cromodinâmica Quântica para alguns conceitos

EDQ: EletroDinâmica Quântica	CDQ: CromoDinâmica Quântica
Elétron (e^-)	Quark up (u)
Neutrino do elétron (n_e)	Quark down (d)
Carga elétrica	Carga cor
Fóton	Gluon
Átomos	Hádrons

Mas há diferenças importantes entre as duas teorias que não podem deixar de ser mencionadas, principalmente no que se refere as propriedades de fótons e gluons e as características da carga elétrica e da carga cor.

Há somente um tipo de carga elétrica (a carga do elétron) e o seu oposto, a carga do pósitron (anti-elétron) mas há três tipos de carga cor (vermelho, verde e azul) possíveis para cada quark, e os respectivos opostos de cada carga cor (anti-vermelho, anti-verde e anti-azul).

Uma diferença muito importante entre fótons e gluons é que o fóton não transporta carga elétrica, e por isso não pode emitir outros fótons mas pode percorrer grandes distâncias (infinitas), já os glúons transportam a carga cor, portanto são capazes de emitir gluons e interagir com outros gluons, mas isto os impede de percorrer distâncias maiores que o diâmetro do núcleo atômico.

^e A eletrodinâmica Quântica é uma correção da teoria eletromagnética de Maxwell considerando os aspectos quânticos que não podem ser desprezados quando as dimensões são muito pequenas, de mesma ordem de grandeza que o diâmetro do átomo ou menores.

Como o fóton não transporta carga elétrica, portanto só há um tipo de fóton, mas como os gluons transportam carga cor, há oito possibilidades de glúons. Como o fóton não transporta carga elétrica, o elétron continua sendo elétron com carga elétrica -1 depois de emitir um fóton, mas o gluon transporta carga cor, assim um quark muda a sua carga cor depois de emitir um gluon.

A força fraca é intermediada pelas partículas W^+ , W^- e Z , mas estas partículas são mésons, formados por pares de quark e antiquark. Hoje os Físicos consideram que as interações básicas são três, forte, gravitacional e eletrofraca. Mesmo que seja possível reunir as interações eletromagnética e fraca em uma única interação, isto não reduz a importância da interação fraca pois a quebra de simetria, como por exemplo, um próton, formado por quarks, pode gerar léptons durante o decaimento beta. As interações forte e eletromagnética só conseguem explicar a formação e decaimento de partículas mediante a formação de pares e o aniquilamento de pares.

A eletrodinâmica de Maxwell descreve muito bem o comportamento de partículas eletricamente carregadas se as distâncias entre as partículas são maiores que 10^{-11} cm, (FRITZSCH, 1981, p.147) para distâncias menores que este valor é preciso aplicar a teoria eletrodinâmica quântica. Como o raio atômico é aproximadamente 100 vezes maior que este valor, os físicos do início do século XX tiveram êxito em explicar a estrutura do átomo de hidrogênio, mas a teoria eletromagnética clássica não pode ser aplicada para descrever as forças de interação eletromagnética entre os prótons do núcleo atômico. Neste caso é preciso recorrer a emissão de e absorção de fótons virtuais para obter resultados mais precisos.

Para os Físicos o vácuo sempre representou a ausência de matéria, para os Físicos de partículas o vácuo é uma estrutura muito complexa, onde pares de partícula e anti-partícula são incessantemente criados e aniquilados. Neste vácuo o elétron é uma carga negativa, que atrai os pósitrons a sua volta, polarizando o vácuo, assim para estes a aparência do elétron é a de uma nuvem de polarização do vácuo.

O modelo padrão prevê a existência do gráviton, mas as interações gravitacionais entre as partículas elementares são de pouca intensidade e pouco afetam o comportamento das partículas elementares, porém a detecção do gráviton seria uma forte corroboração do modelo padrão.

Conclusão.

Acreditamos ter apresentado os principais aspectos da Física de Partículas. Depois de ler este texto esperamos que você tenha se conscientizado de como a Física evolui, através da construção de modelos (teorias) que posteriormente são corroboradas pelos experimentos, e que os resultados experimentais, quando confirmam uma teoria, ou quando mostram os seus erros abrem espaço para a re-elaboração das teorias existentes ou para o surgimento de novas teorias.

Um dos aspectos mais intrigantes da Física de Partículas é que as menores dimensões da matéria só puderam ser estudadas depois da construção de enormes aceleradores de partículas, a confirmação de alguns aspectos da teoria depende da construção de aceleradores ainda maiores.

Bibliografia.

ALONSO, Marcelo. *Física*. Harlow: Addison-Wesley, 1999.

CLOSE, Frank. *The Cosmic Onion, Quarks and the nature of the universe*. USA: American Institute of Physics. 1983.

FRITZSCH, Harald. *Quarks, The Stuff of Matter*. USA: Basic Books. 1981.

MOREIRA, Marco Antônio. Um Mapa Conceitual sobre Partículas Elementares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo. v.11 n.3 p.114-129. dez/1989

OKUN, Lev Borisovich. *A Primer in Particle Physics*. UK: Harwood Academic Publishers. 1987.

OSTERMANN, Fernanda. *Partículas Elementares e Interações Fundamentais*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS. 2001.

SERWAY, Raimond A. *Física Moderna*. São Paulo: LTC – Livros Técnicos e Científicos. 1992.

TIPLER, Paul A. *Física Moderna*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 1981.