



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

José Lages da Silva Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Filadelfo Cardoso Santos

Rio de Janeiro
Novembro de 2011

PARTÍCULAS ELEMENTARES NO ENSINO MÉDIO

José Lages da Silva Neto

Orientador: Filadelfo Cardoso Santos

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Filadelfo Cardoso Santos (Presidente)

Prof. Marcus Venicius Cougo Pinto

Prof. Paulo de Faria Borges

Rio de Janeiro
Novembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

S586p Silva Neto, José Lages da
Partículas Elementares no Ensino Médio / José Lages da
Silva Neto - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2011.
xi, 95 f.: il.;30cm.
Orientador: Filadelfo Cardoso Santos
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física /
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2011.
Referências Bibliográficas: f. 95.
1. Ensino de Física. 2. Física Moderna. 3. Partículas
Elementares. I. Cardoso, Filadelfo. II. Universidade Federal do Rio de
Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino
de Física. III. Partículas Elementares no Ensino Médio.

Dedico esta dissertação aos meus pais Serafim e Vera.

Agradecimentos

À minha família pelo apoio constante.

Ao professor Carlos Eduardo pelas conversas animadoras.

Ao professor Filadelfo pela insistência salvadora.

RESUMO

PARTÍCULAS ELEMENTARES NO ENSINO MÉDIO

José Lages da Silva Neto

Orientador: Filadelfo Cardoso Santos

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A física moderna tem se tornado importante item presente não só nos livros didáticos de Ensino Médio como nos vestibulares do País. Além disso, há um enfoque meramente descritivo, não suscitando desenvolvimento teórico, muito menos raciocínio. É difícil acreditar que, neste quadro, haja aproveitamento do processo de ensino-aprendizagem, particularmente neste item. O presente trabalho visa apresentar as Partículas Elementares como os constituintes básicos da matéria. Mostramos que é possível realizar a Transposição Didática para o Ensino Médio. Fazemos uma breve recapitulação histórica, sempre invocando o raciocínio utilizado para chegar às conclusões, fugindo à simples explanação. Em seguida, as interações são apresentadas em seus diversos níveis de compreensão, desde ação à distância, interação via campos e trocas de partículas, sempre fundamentando, mostrando os limites da Física Clássica e adaptando ao nível de Ensino Médio. Desta maneira, as Partículas Elementares, bem como as interações, surgem de desenvolvimentos teóricos e não apenas em apresentações rasas, sem fundamento em evidências. Ainda são apresentados métodos para classificar as numerosas partículas, fugindo a complicados recursos gráficos e analogias superadas.

Palavras-chave: Ensino de Física, Física Moderna, Partículas Elementares.

Rio de Janeiro
Novembro de 2011

ABSTRACT

ELEMENTARY PARTICLES IN HIGH SCHOOL

José Lages da Silva Neto

Supervisor: Filadelfo Cardoso Santos

Abstract of master's thesis submitted to the Post Graduation Program in Physics Teaching - Institute of Physics, Federal University of Rio de Janeiro, as part of the requirements needed for the acquisition of a Master degree in the teaching of Physics.

Modern physics has become an important item not only in textbooks for high school but also at university entrance exams in the country. In addition, there is a purely descriptive approach, requiring no theoretical development; let alone reasoning. It's hard to believe that, in this picture, we can take advantage of the teaching-learning process, particularly in this item. This current paper aims at presenting the elementary particles as basic building blocks of the subject, showing that it is possible to make adjustments for High School level. Through a historic introduction, we reflect on the findings, always invoking the reasoning used to reach conclusions, getting rid of the simple explanations. In this way, the interactions are presented in its different levels of understanding, from distant action, interaction via fields and exchange of particles, showing Classic Physics limits, adapting to high school level. In this way, Elementary Particles, as well as interactions, arise out of theoretical developments and not out of shallow presentations, with no evident foundation. Here we also present methods to classify the numerous particles, getting rid of graphics and outdated and complicated analogies

Keywords: Physics education, Modern Physics, Particle Physics.

Rio de Janeiro
November, 2011

Sumário

Capítulo 1 -	Introdução	13
	Justificativa.....	13
	Transposição Didática.....	14
	Metodologia.....	15
Capítulo 2 -	A busca pelo átomo.....	17
2.1	A ideia de Átomo.....	18
2.2	Modelos Atômicos.....	18
	Dalton.....	19
	Descoberta do elétron.....	23
	Rutherford.....	25
	Bohr.....	27
2.3	Necessidade de Novos Átomos.....	28
	Descoberta do Nêutron.....	28
	Fóton.....	30
2.4	Classes de Partículas.....	33
Capítulo 3 -	Interações.....	34
3.1	A interação como Ação à Distância.....	34
	Interação Gravitacional.....	34
3.2	A Interação via Campo.....	39
	Interação Eletromagnética.....	39
	Exemplo Gravitacional.....	44
	Exemplo Elétrico.....	45
	Exemplo Magnético.....	46
3.3	A interação Via Troca de Bósons.....	46
	A interação Forte.....	47
	Méson pi.....	49
	Troca de Partículas.....	51
	A Violação do Momento e Energia.....	52
	Princípio da Incerteza.....	55
	Partículas Virtuais.....	57
	Atração e Repulsão.....	58
	Alcance.....	60
3.4	O Vértice de Interação.....	62
	As Quatro Forças.....	64
Capítulo 4 -	Partículas Elementares.....	66
	Quarks.....	66
	Antipartículas.....	68
	Léptons.....	69

	Modelo Padrão.....	71
Capítulo 5 -	Conclusão.....	73
Capítulo 6 -	Referências Bibliográficas.....	75
Apêndice -	Produto Didático.....	78

Capítulo 1

Introdução

Nesta introdução, mostraremos a importância da presença da Física Moderna e Contemporânea (doravante FMC) no Ensino Médio. O tópico específico, Física de Partículas, insere-se neste contexto. Mostraremos ainda que é possível fazer uma Transposição Didática do conhecimento científico para o conhecimento escolar. Então, revisitando trabalhos anteriores, apresentaremos nossa proposta para implementá-la.

Justificativa

Os professores de Física, em geral, atribuem papel relevante à introdução da Física Moderna (doravante FM) no Ensino Médio. Contudo, assumem, às vezes até subconscientemente, que a teoria base é incompreensível [Monteiro, 2009].

Stannard (2009) (como mencionado em [Monteiro, 2009]) mostrou que o estudo de Tópicos como Partículas Elementares, Relatividade, Física Quântica e Astrofísica são os que mais influenciaram estudantes de graduação a cursarem Física. A omissão destes tópicos dificultará a aprendizagem subsequente em relação aos conceitos atinentes à FM.

Neste mesmo estudo, constatou-se que crianças de 12 anos já possuem noções sobre buracos negros e Big Bang. O ensino de Física Moderna incentiva o interesse pela ciência e sintoniza o estudo com interesse e curiosidade, evita obscurantismos pós-modernos [Monteiro, 2009].

A introdução da Física Moderna no Ensino Médio, além de fornecer uma visão mais coerente de toda a Física, dá oportunidade aos alunos de desenvolverem um entusiasmo mais duradouro pela ciência. E ainda contribui para uma visão mais adequada da natureza do trabalho científico, superando o ponto de vista de que o desenvolvimento da ciência seja linear e cumulativo. Conhecer sua construção pode evidenciar os limites de validade da Física Clássica e explicar que alguns de seus problemas em dada época desencadearam a gênese da Física Moderna.

É inquestionável a influência da FM na sociedade, quer em aplicações tecnológicas, quer na estrutura de pensamento e educação. Assim, a ausência da FM limita a imaginação pedagógica dos participantes do contexto social. Mesmo para

aqueles que não tenham intenção de optar por profissões científicas, a FM deve fazer parte de seu arcabouço cultural.

A FM deve fazer parte da formação geral do cidadão contemporâneo. De maneira que é fundamental que seja vista como importante elemento cultural de uma maior quantidade de pessoas, caso contrário, a relevância da física na escola será reduzida [Monteiro, 2009].

Constata-se, entretanto, que a introdução da FM no Ensino Médio não tem ocorrido com a mesma prioridade sugerida pelos pesquisadores. Acreditamos que a FM deve ser incluída no planejamento de todo professor, e não numa abordagem esporádica. Ainda que seja difícil a transposição de nível.

Os motivos para a introdução da Física Moderna no Ensino Médio são claros, numerosos e urgentes. Porém, será possível fazê-la?

Transposição Didática

A transposição didática analisa as transformações ocorridas no saber desde a sua origem até as salas de aula. Não é uma mera simplificação, mas um processo no qual um conteúdo do saber sofre um conjunto de transformações adaptativas que o levam à escola [Siqueira, 2006].

Inicialmente, o novo conhecimento é construído no interior da comunidade científica. Ele se inicia na busca, pelo cientista, de uma resposta, uma solução a um problema. Este saber é sujeito à revisões e controvérsias, visando atender às normas científicas, até tornar-se público. Isto é feito em jornais e revistas especializados voltados para a área.

A primeira transformação ocorre depois. Materializa-se na produção de livros didáticos voltados para a esfera acadêmica, como alunos universitários e professores do Ensino Médio. O conhecimento é reestruturado para uma linguagem mais simples, se adequando e se reorganizando de uma maneira lógica.

Há vários trabalhos publicados neste estágio, como: [Moreira, 2009], [Moreira, 2004], [Ostermann, 2001a], [Ostermann, 1999], [Berg, 2006], [ParticleAdventure.org], [Abdalla, 2005] e é aqui que este também se insere. O importante a se notar é que esta etapa é dinâmica, sujeita à alterações com a evolução da sociedade e tecnologia.

Os conteúdos podem se tornar obsoletos no contexto escolar ou banalizados no contexto sociocultural, fazendo com que sejam descartados [Siqueira, 2006]. Alguns

dos conteúdos correntes do currículo de Ensino Médio deviam ser revistos face às novas exigências, notadamente da Física Moderna.

Por fim, há uma segunda transformação visando o sequenciamento das aulas, em que o professor é ator principal. Ele deve adequar o conhecimento trazido do livro didático para aquele que efetivamente chega aos alunos [Siqueira, 2006]. Como o novo saber não pode estar fora da realidade discente, o professor deve levar em consideração seu cotidiano.

É importante ressaltar que para uma Transposição Didática ser bem-sucedida, ela deve satisfazer regras de sobrevivência. Por exemplo, o saber deve ser consensual, isto é, não deve haver dúvidas sobre seu status de verdade (ainda que momentâneo) [Siqueira, 2006]; deve ter importância reconhecida para a sociedade; deve ser operacional, com capacidade de gerar atividades entre outras.

A Física Moderna já percorreu os estágios necessários a uma Transposição Didática de sucesso. Desta maneira, Siqueira e Pietrocola [Siqueira, 2006] mostram que a FM preenche estes requisitos, comprovando que a introdução desta “nova” Física é possível e premente, pois atende às necessidades acadêmicas sociais e didáticas.

Metodologia

Como ensina Monteiro [Monteiro, 2009], há um grande grupo de pesquisadores que usam uma metodologia a partir da evolução histórica dos conceitos. A ideia é abordar os limites da Física Clássica, que irá guiar a busca por soluções que expliquem os fenômenos observados ou teorias apresentadas. A ausência de referências às dificuldades da Física Clássica pode favorecer o surgimento de erros conceituais na interpretação da Ciência Moderna

O estudo das partículas elementares ilustra também a interação entre o pensar e o fazer, ou entre a teoria e a metodologia, em Física. Por exemplo, muitas previsões teóricas da existência de partículas anteciparam resultados de experimentos, ou seja, confirmaram a crença filosófica contemporânea na inseparabilidade entre pressupostos teóricos e experimentos [Ostermann, 2001b].

Mostraremos, portanto, de maneira breve, um resumo histórico centrado na busca pelos átomos, ou seja, pelas partículas fundamentais da matéria. Adiante, centraremos a discussão na evolução do conceito de interação entre corpos, que acreditamos ser um caminho simplificador na classificação das Partículas Elementares.

Este caminho deve sempre partir de uma racionalização. Ou seja, deve suplantar uma dificuldade encontrada pela Física Clássica. Explorando essa fronteira, há ganho não só de processo como de conteúdo.

A preocupação central deste trabalho é apresentar um motivo para a nova interpretação de um fenômeno. Pretendemos mostrar que uma nova teoria surge para resolver os problemas da anterior.

Alguns trabalhos anteriores apresentam a Física de Partículas de maneira mais descritiva. Ao longo dos artigos pesquisados, porém, nota-se que estão presentes os raciocínios que ensejaram as descobertas ou proposições de novas teorias. Porém, estes se encontram espalhados.

Com base nesta bibliografia (notadamente: [Moreira, 2009], [Moreira, 2004], [Ostermann, 2001a], [Ostermann, 1999], [Berg, 2006], [ParticleAdventure.org], [Abdalla, 2005]) agrupamos o que nos interessou dentro desta proposta, que é o ponto de vista das interações, para classificar as partículas.

Capítulo 2

A busca pelo átomo

“O papel de “esclarecer a verdade” que cabe à física não implica na formulação de respostas finais, únicas e absolutas.”

Epicuro [Perozzo, 2008]

Há muito tempo, o homem se pergunta: “Do que são feitas as coisas?” [Ostermann, 2001b] Ou, “Por que a ciência moderna diz que a matéria é desta forma?”. Não se pode dar uma resposta definitiva, mas será apresentado o estágio atual do nosso conhecimento, que é resultado de um longo caminho percorrido pela ciência.

A visão atual de partículas elementares foi atingida por um processo de acumulação de conhecimento apoiada em teorias matemáticas embasadas por resultados experimentais extremamente precisos.

No entanto, seu conceito é antigo, já sendo registrado há pelo menos, 2400 anos. O filósofo grego Leucipo já falava em átomo (do grego átomo – sem partes) – uma unidade básica, fundamental e indivisível. Se fôssemos cortando um objeto em partes cada vez menores, chegaríamos a um limite, no qual os pequenos pedaços não poderiam mais serem divididos. O objeto seria formado pelo agrupamento destes “pedaços indivisíveis” [Freitas, 2008].

Esta ideia é basicamente a mesma que temos hoje acerca das partículas elementares. São as partículas (não no sentido de bolinhas) que não podem ser divididas – um verdadeiro átomo (modernamente, diz-se que não têm estrutura interna). No entanto, a partícula que recebe o “status” de átomo (que não possui partes) vem se modificando com o tempo. O elemento químico já foi considerado indivisível, até que se descobriu que era formado por prótons, nêutrons e elétrons. Ou seja, se pode ser dividido, se há partes mais fundamentais, não pode ser átomo.

Portanto, este átomo, no sentido dado por Leucipo, não pode possuir estrutura interna; ele é básico. As outras partículas é que devem estruturar-se dele. Apesar de o vocábulo átomo permanecer, por razões históricas, designando o elemento químico, a busca pelas verdadeiras partes indivisíveis, levou às partículas elementares.

Porém, é conveniente lembrar que as novas teorias da Física já vislumbram um novo cenário mais básico com “átomos” ainda mais fundamentais. Longe de esgotar o assunto, queremos apresentar o estado atual sob a luz das interações.

2.1 A ideia de átomo

O conceito atômico retoma 400 a. C. O filósofo Leucipo inaugura a ideia de que há uma parte muito pequena da matéria que é mínima e básica. Esta noção de átomos dos gregos é uma decorrência de sua filosofia.

As observações de Epicuro mostraram que a maior parte dos objetos da natureza está sujeita a mudanças. Por outro lado, para manter uma ordem, “algo” permanente deveria estar associado a estes materiais. Então, a natureza se modifica, mas mantém determinada ordem [Perozzo, 2008].

Este conflito de ideias foi resolvido sugerindo-se a existência de diminutos átomos “invisíveis e inalteráveis”. Toda a matéria seria constituída desses átomos que seriam as unidades básicas e do vazio. Haveria diversos tipos de diferentes “geometrias”, que definiriam o tipo de átomo.

Esta ideia confere permanência à matéria e explica as mudanças em termos de movimentos e rearranjos destes átomos. Desenvolvendo e expandindo esta teoria, pode-se dar conta das propriedades observáveis da matéria [Perozzo, 2008].

Assim, as mudanças observadas na natureza obedeceriam à regularidade proporcionada pelas leis físicas. O atomismo visa “garantir aos homens que os fenômenos celestes e da natureza em geral não estão à mercê dos caprichos dos deuses.”

"Nada acontece ao acaso (maten), mas tudo a partir de razão (logou ek), e por necessidade." Leucipo

No entanto, este atomismo não era aceito por todos, pois ao mesmo tempo em que explica certos fenômenos, apresenta dificuldades para explicar outros. Alguns destes questionamentos, ainda hoje não possuem explicações completas, mesmo com todos os recursos modernos.

2.2 Modelos Atômicos

Longe de refazer os passos históricos nas pesquisas sobre o assunto, veremos algumas tentativas de compreender o átomo. Por exemplo, Dalton utilizou dados coletados de pesquisas anteriores; Rutherford realizou experiências próprias e Bohr fez uma descrição teórica. Estes diversos caminhos levaram cientistas a propor teorias para existência dos átomos [Langford, 1995]. Como vimos, estas teorias atomistas são antigas e remetem a filósofos gregos. Porém, a partir do inglês John Dalton estas propostas começaram a se basear em evidências empíricas mais elaboradas.

Dalton

A teoria atômica da matéria é atribuída ao químico John Dalton ((1766-1844) que a publicou em 1807, sendo reconhecido por muitos como o pai da moderna Teoria Atômico-molecular. Saliente-se que grandes cientistas como Boyle e Newton acreditavam em uma teoria deste tipo, mas foi Dalton, que propôs uma teoria conexa com os dados experimentais (por exemplo, de Proust e Berthollet) [Griffiths, 1987].

Um mesmo corpo pode apresentar três estados, sólido líquido e gasoso. Um corpo pode passar de um estado a outro e depois retornar ao estado inicial. Então, podemos comparar duas amostras com quantidades iguais da mesma substância: uma é levada a um estado e depois retornada ao estado inicial; a outra permanece no mesmo estado pelo tempo em que a outra amostra sofreu suas transformações. Repararemos ao fim que as duas quantidades possuem as mesmas características e propriedades.

Podemos fazer o mesmo com reações químicas sucessivas em que determinado composto retorna à forma inicial. Ele também permanece com suas características e propriedades inalterados. Estas observações sugerem, entre outras coisas, que um elemento fundamental mantém sua individualidade em reações químicas e físicas.

A partir das leis que regem as reações químicas e das observações de Dalton podemos sugerir que todos os elementos são formados por uma quantidade básica. Uma massa mínima que constituiria todos os elementos – os átomos.

Dalton tomou alguns dados que sugeriram sua Teoria Atômica. Em experiências com oxigênio e nitrogênio chegou às conclusões [Langford, 1995]:

- a) Certo volume fixo de oxigênio só se combina com 36 ou 72 medidas de nitrogênio (o dobro), de acordo certas variações no modo de condução do experimento;
- b) Um peso fixo de hidrogênio se combina com determinado peso de carbono para formar o metano (CH_4). O mesmo peso de hidrogênio se combina com o dobro do peso de carbono para formar o etileno (C_2H_4) .

A razão de número inteiro, nos dois casos 1:2 (o dobro) já é um indício de que a matéria deve ser formada por átomos.

Por muito tempo (anterior aos trabalhos de Dalton) os dados de pesos relativos (proporção de massa da substância pura na massa total do composto) estavam

disponíveis [Idhe, 1984], mas a evidência do atomismo não era óbvia. Apenas com o olhar atento à razão entre as quantidades do mesmo elemento em duas substâncias diferentes pode revelar este fato.

Vamos calcular a razão entre a massa do elemento oxigênio no dióxido de carbono [$m_{\text{oxigênio}}(CO_2)$] e massa deste mesmo elemento no monóxido de carbono (CO):

$$k = \frac{[m_{\text{oxigênio}}(CO_2)]}{[m_{\text{oxigênio}}(CO)]}$$

Utilizando dados da época [Idhe, 1984] temos que o dióxido de carbono possui uma proporção de 28% de carbono e 72% de oxigênio. Já para o monóxido de carbono os valores são 44% e 56%, respectivamente.

Desta forma, como apresentado, a razão k não está clara. Para revelá-la, temos que fixar o peso do carbono e encontrar os pesos relativos do elemento oxigênio:

Dióxido de Carbono:
28% C e 72% O

Monóxido de Carbono:
44% C e 56% O

1g de C 28%
xg de O 72%

1g de C 44%
yg de O 56%

$$x = \frac{72}{28}$$

$$y = \frac{56}{44}$$

$$x = 2,57g \quad (1)$$

$$y = 1,27g \quad (2)$$

(Massa de oxigênio no CO_2)

(Massa de oxigênio no CO)

Agora, retomamos à razão k entre as massas do elemento oxigênio no dióxido (2,57 g) e no monóxido (1,27 g) teremos a proporção:

$$k = \frac{[m_{\text{oxigênio}}(CO_2)]}{[m_{\text{oxigênio}}(CO)]}$$

Substituindo os valores encontrados em (1) e (2):

$$k = \frac{2,57}{1,27} \cong 2,02$$

Ou seja, a proporção relativa entre as massas (k) é de 2:1 (com dados atuais). Há o dobro da quantidade do elemento oxigênio no dióxido do que no monóxido. Assim, a proporção de um mesmo elemento em dois compostos distintos é uma razão de números inteiros. De fato, sabemos o dióxido de carbono (prefixo “di” indicando “dois”) possui dois átomos de oxigênio (CO_2), enquanto o monóxido (prefixo “mono” indicando “um”) possui apenas um (CO), o que corrobora uma Teoria Atômica [Idhe, 1984].

Ainda assim, qualquer quantidade de carbono pode combinar-se com as referidas quantidades de oxigênio. Não haveria uma quantidade mínima definida. Porém, notamos que, se o carbono for formado de átomos, podemos supor que o oxigênio também o será, pois a proporção de combinação será inteira. Não é difícil, portanto, estender este raciocínio a outras combinações de outros elementos, levando à suposição de que todos os elementos são formados de átomos.

Analisemos, por exemplo, a reação $C + O_2 \rightarrow CO_2$. A experiência mostra que a reação é completa, sem sobras dos reagentes, se a proporção entre as massas estiver na razão 1::8/3, ou seja, se a massa de oxigênio (O_2) for 8/3 da massa do carbono:

$$m_{O_2} = \frac{8}{3} m_C \quad (3)$$

Analisando outra reação, $2H_2 + O_2 = 2H_2O$, ela ocorre de maneira completa, sem sobras, se a proporção entre as massas estiver na razão 1:8, ou seja, se a massa de oxigênio (O_2) for 8 vezes a massa de hidrogênio (H_2):

$$m_{O_2} = 8m_{H_2} \quad (4)$$

Desta forma, a quantidade de oxigênio em (4) está escrita em função da quantidade de hidrogênio. Podemos fazer o mesmo na proporção (3):

$$\text{Equação (3):} \quad m_{O_2} = \frac{8}{3}m_C$$

$$\text{Equação (4):} \quad m_{O_2} = 8m_{H_2}$$

Substituindo o primeiro membro de (3) pelo segundo membro de (4):

$$8m_{H_2} = \frac{8}{3}m_C$$

Fazendo a multiplicação cruzada:

$$3m_{H_2} = m_C$$

Invertendo os lados:

$$m_C = 3m_{H_2} \quad (5)$$

Agora, também a quantidade de carbono está escrita em função da quantidade de hidrogênio (5). Portanto, verificamos que, comparando as diversas reações, é possível expressar as massas das substâncias que reagem completamente com a massa do hidrogênio.

Essas proporções são naturalmente justificadas se supusermos que o hidrogênio é formado por átomos que têm a menor massa e que os demais elementos são formados por átomos de massa igual a um múltiplo inteiro da massa do hidrogênio

A conclusão a que chegamos, é que para não haver sobras, as proporções entre os reagentes devem ser tais que tenham a mesma quantidade relativa de hidrogênio. Se propusermos que o hidrogênio tem a menor massa possível, chegamos à ideia de átomo.

Apenas múltiplos de uma mínima quantidade são possíveis. Isto sugere uma matéria discreta, compatível com uma teoria atômica. Assim, Dalton chega à conclusão

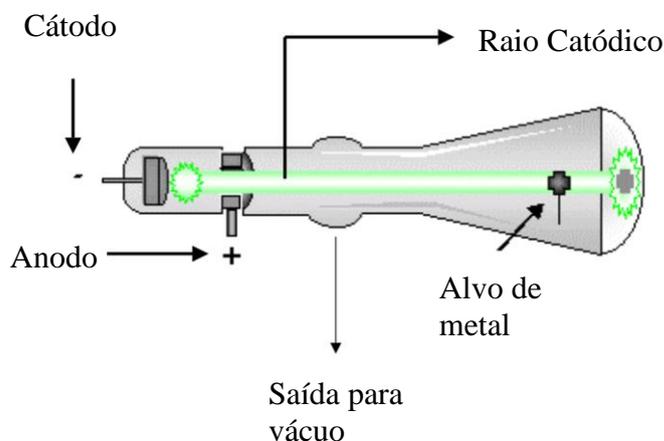
de que todos os corpos são constituídos de uma vasta quantidade de partículas muito pequenas, ou átomos de matéria. Eles seriam mantidos unidos por uma força de atração que previne sua separação, conforme o estado em que se encontra.

Resumindo-se sua Teoria [Langford, 1995]:

- 1) Toda a matéria é composta de minúsculas partículas indivisíveis e indestrutíveis (Átomos);
- 2) Há vários tipos de diferentes átomos característicos dos vários elementos;
- 3) Todos os átomos de um elemento têm o mesmo peso⁽¹⁾;
- 4) Átomos de diferentes elementos têm pesos diferentes⁽²⁾.
- 5) Os átomos se combinam em proporções variadas de números inteiros, formando compostos.

Descoberta do elétron

Em 1897, J. J. Thomson (1856 – 1940) descobriu o elétron numa experiência com raios catódicos na Ampola de Crookes, flagrando a divisibilidade do átomo [Freitas, 2008]. Um feixe observado passa primeiro por um campo elétrico, acelerando-se (figura 1).

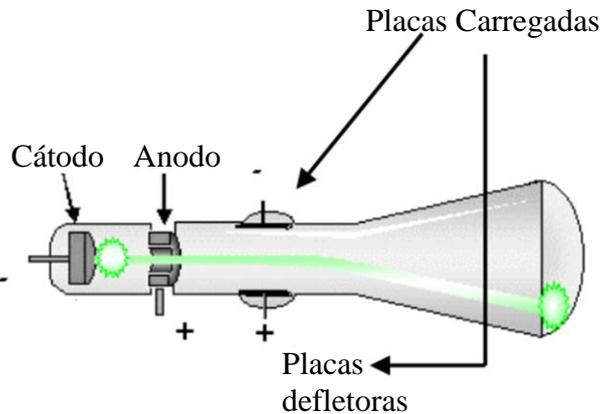


[Figura 1] Um feixe de raios catódicos na Ampola de Crookes [Azzellini]

(1) Leva à Lei de Proust das proporções definidas;

(2) Modernamente, modifica-se este postulado por causa dos isótopos. Substitui-se a expressão “peso” por “número atômico”.

Depois, passa por um campo magnético, que curva sua trajetória (figura 2).



[Figura 2] O feixe de raios catódicos é desviado na Ampola de Crooks [Azzellini]

Thomson observou apenas um pequeno ponto no bulbo da ampola, e pelas características da curva, certificou-se que era uma partícula. Utilizando os dados dos campos elétrico e magnético, foi possível determinar sua velocidade e relação carga-massa. Como esta última era muito grande, e, apoiado em outras evidências, concluiu que sua massa era muito pequena [Freitas, 2008]. Inicialmente, o nome elétron foi à essa partícula.

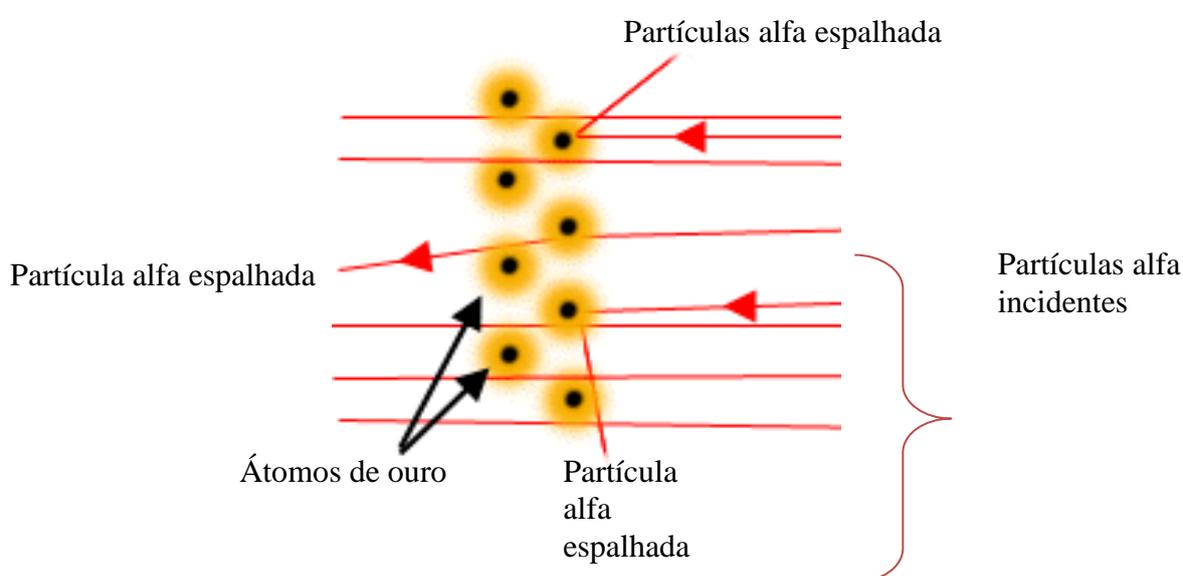
As observações por deflexões magnéticas resultaram no valor $\frac{e}{m} = 1,7 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$. Esse valor era bem menor do que o valor conhecido para a razão entre a carga e a massa do hidrogênio. Este valor era aproximadamente 1000 vezes menor que o menor átomo conhecido.

Assim, havia uma partícula menor que a menor parte conhecida até então – o átomo de hidrogênio. Isto não significa necessariamente que o átomo é divisível e perde seu *status* de partícula elementar, mas fica claro que há mais coisas, e menores, a serem desvendadas.

Portanto, o modelo atômico precisa ser revisto. E surgem novas considerações sobre a constituição da matéria.

Rutherford

A experiência de Rutherford consistia em bombardear uma folha de ouro com partículas alfa para observar sua deflexão. Os resultados mostraram que poucos raios se desviavam, muitos indo, inclusive, para trás, num ângulo traseiro. Isto levou Rutherford a supor que o átomo possui um núcleo muito pequeno que concentra sua massa e um grande “vazio” (eletrosfera) e propôs um modelo conhecido como “modelo planetário” atômico [Nisenbaum] [Figura 3].

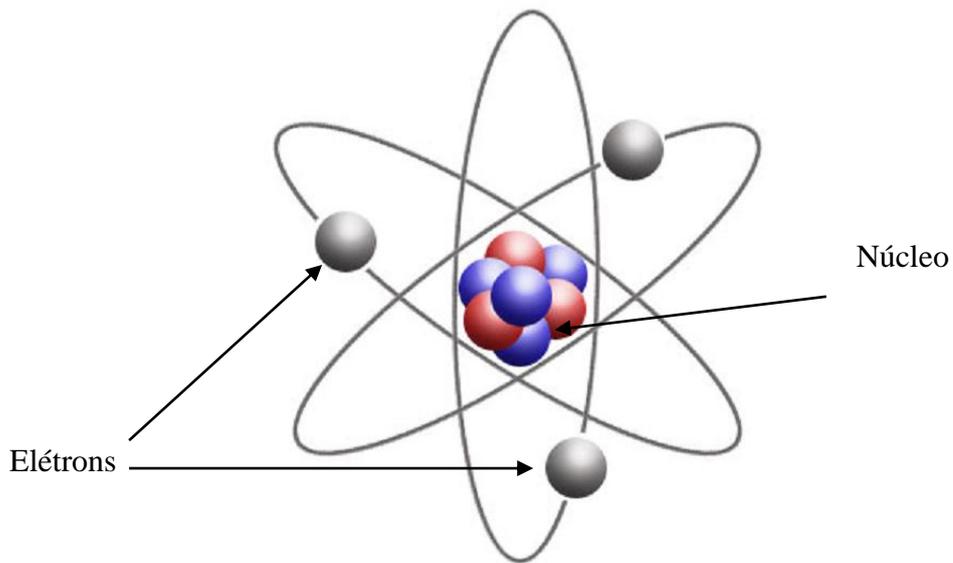


[Figura 3] Imagem ilustrativa (fora de escala) do experimento de Rutherford.

[Desenho adaptado de <<http://www.dfn.if.usp.br/~munhoz/WWW/historia.htm>> , acesso em 28 jan 2012]

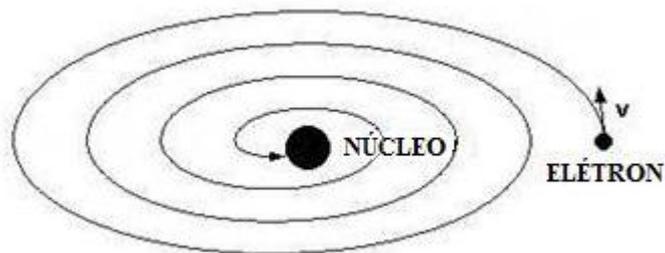
O desvio das partículas alfa (positiva) devia-se à interação eletromagnética com o núcleo que deveria ser também positivo. Ao núcleo do átomo mais leve deu o nome de próton (primeiro).

A comparação do número de partículas alfa que atravessavam a lâmina com o número de partículas alfa que se desviavam levou Rutherford a concluir que o raio do átomo é 10 mil vezes maior que o raio do núcleo [Nisenbaum]. A partir dessas conclusões, Rutherford propôs um novo modelo atômico, semelhante ao sistema solar.



[Figura 4] Imagem ilustrativa (fora de escala) do modelo atômico de Rutherford [Nisenbaum]

O átomo de Rutherford explicava os resultados de sua experiência, no entanto, uma vez que uma partícula negativa orbitando uma positiva deve irradiar energia, sua órbita não poderia ser estável. Seu raio diminuiria progressivamente até colidir com o núcleo, em uma espiral.



[Figura 5] O elétron faz uma órbita espiral até o núcleo.

[Desenho adaptado de, <http://pt.wikipedia.org/wiki/atomo_de_Bohr>, acesso em 28 jan 2012]

Bohr

Niels Bohr propôs que, em certas órbitas, os elétrons não irradiariam, de modo que pudessem manter sua energia e não espiralar. Desta maneira, solucionaria o problema do átomo de Rutherford [Azzellini]. São os chamados estados estacionários.

O elétron irradiaria quando “saltasse” de uma órbita para a outra, sendo a energia do fóton de luz (que falaremos mais à frente) a exata diferença de energia entre as órbitas estacionárias. Essas ideias baseavam-se nos trabalhos de Einstein e Planck.



[Figura 6] O elétron emite um fóton quando salta entre as órbitas permitidas.

[Desenho adaptado de, <http://pt.wikipedia.org/wiki/átomo_de_Bohr>, acesso em 28 jan 2012]

Este modelo ainda explicava as linhas espectrais, que eram os registros dos fótons emitidos e são característicos de cada elemento. Este modelo explicava bem o átomo de hidrogênio, porém, elementos mais pesados não seguiam essa lógica. Então, como explicar os elementos mais pesados? A matéria seria mesmo constituída pelo próton e pelo elétron em órbitas estacionárias?

A grande questão é que este modelo rompia com a física clássica, de modo que inaugura novas ideias, reforçando a quantização da energia. Nesse novo estado de coisas, determinar as minúcias da matéria estaria ligado à nova física, à física moderna. Os conceitos deveriam mudar.

É claro que, em determinado nível de ensino e com determinado objetivo, a estrutura da matéria pode ser explicada nestes termos. Existe o exemplo da química, que omite a quantização em alguns modelos atômicos, notadamente no Ensino Médio.

Entretanto, o que queremos encontrar são as partículas elementares que constituem a matéria. Queremos a explicação mais simples possível que seja compatível com as partículas que, de fato, não possuem estrutura interna.

2.3 Necessidade de novos “átomos”

A explicação mais convincente para a estrutura atômica que coincide com a existência dos elétrons, os experimentos de Rutherford e a existência de linhas espectrais é o átomo de Bohr. No entanto, este modelo só funciona bem para o hidrogênio e para o hélio ionizado [Azzellini]. Há alguma dificuldade maior que impede a formulação de um modelo atômico mais geral.

Estes impedimentos estão exatamente no conceito de átomo. Já se sabe que o átomo tem, pelo menos, uma parte – o elétron. Porém, a hipótese de núcleo unicamente composto pela carga positiva inviabiliza o modelo de Bohr de maneira mais ampla, o que inviabiliza seu modelo para elementos mais pesados.

O número de elétrons é igual ao número de prótons para garantir a neutralidade do átomo. Assim, a massa de um átomo seria igual ao número de elétrons vezes a massa do átomo de hidrogênio (próton). A experiência, contudo, mostra que a massa dos átomos é, aproximadamente, maior que o dobro daquele valor.

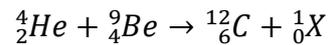
Descoberta do Nêutron

James Chadwick (1891 – 1974) conduziu experimentos de colisões de partículas que revelaram um novo participante do núcleo atômico – o nêutron. Com a descoberta do nêutron, a estrutura atômica estava descrita com a existência de elétrons, prótons e nêutrons.

De uma maneira simples, podemos ter uma ideia de como ocorreu a identificação do nêutron. Quando alguns elementos como Berílio (*Be*), Boro (*B*) ou Lítio (*Li*) eram bombardeados por uma partícula α (${}^4_2\text{He}$), o material do alvo emitia outra radiação, mais penetrante que as partículas α originais.

Logo, deveria ser uma partícula diferente. Estas novas partículas emitidas eram neutras e com massa da ordem da massa do próton. Portanto, definitivamente, não poderia ser a partícula α .

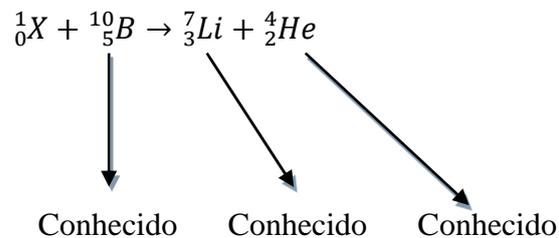
Vamos utilizar um exemplo de reação que mostrará o aparecimento do nêutron: a partícula α (${}^4_2\text{He}$) colide com o Berílio (Be), e produz Carbono (C) e outra partícula desconhecidas, digamos, X , que, como descrevemos, não poderia ser a partícula α (${}^4_2\text{He}$) original:



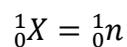
Mas se a partícula ${}^1_0\text{X}$ não possui carga elétrica como pode ser detectada? A solução é produzir outra reação em que ela tome parte. Vamos utilizar como exemplo a reação entre essa nova partícula e o Boro (B), colide com o Berílio (Be), que resulta em Lítio (Li) e uma partícula alfa (${}^4_2\text{He}$):



O Boro, o Lítio e a partícula α eram conhecidos e detectáveis.



Portanto, para equacionar a reação, fica claro que a partícula ${}^1_0\text{X}$ não possui carga elétrica e tem massa da ordem da massa do próton. Recebeu o nome de nêutron justamente por não possuir carga elétrica.



As consequências desta descoberta nos levam a novos passos na busca pelas partículas elementares. O papel deste nêutron deve ser avaliado e estudado. O núcleo atômico possui estrutura interna e inicialmente pensou-se que com essas poucas partículas fosse possível elaborar uma teoria completa da matéria.

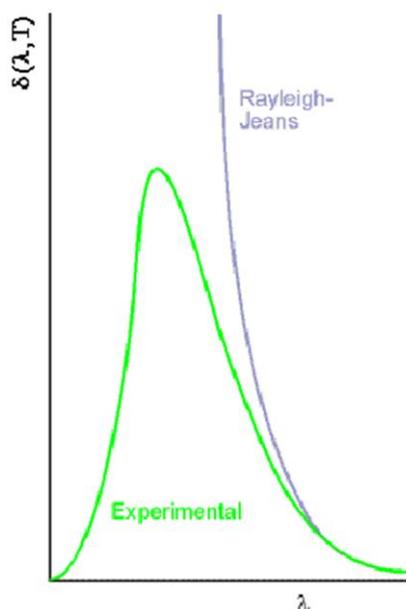
Supreendentemente, porém, surgiram muitas novas partículas e não é difícil imaginar que, reduzindo-se a escala, poderíamos identificar partes também no próprio próton, nêutron ou mesmo no elétron. Ficou claro que seria muito difícil incluir todas em uma teoria que contivesse o próton e o nêutron como partículas elementares. .

Portanto, o que se pensava básico, o núcleo, possui estrutura interna. Então, a busca pelos blocos fundamentais de construção da matéria permanece. Devemos encontrar aquilo que, sem possuir estrutura interna, e interagindo entre si, formam todas as outras coisas.

Fóton

Todos os corpos a nossa volta estão constantemente emitindo e absorvendo radiação térmica, que é a radiação emitida por um corpo em função da temperatura. Um corpo negro é um objeto teórico que, mantendo a temperatura constante, absorve 100% da radiação eletromagnética incidente. Em seguida, sendo capaz de absorver todos os comprimentos de onda, também os irradia [Camargo]. Um corpo negro é um absorvedor e emissor ideal de radiação, isto é, toda a radiação incidente é absorvida e, em seguida, é emitida

Uma explicação clássica de emissão de um corpo negro é conhecida como Modelo de Rayleigh - Jeans. Este modelo, oriundo de conceitos bem estabelecidos da termodinâmica, apresentava a possibilidade de uma densidade de energia infinita no corpo negro e mostrava que mesmo os corpos em baixas temperaturas são capazes de emitir radiações em altas frequências, o que, de acordo com a física clássica, não permitiria haver escuridão [Camargo]. Além disso, os resultados experimentais não coadunavam com a equação obtida por Rayleigh – Jeans [Figura 7].



[Figura 7] Gráfico que compara a previsão teórica (Rayleigh-Jeans) com os resultados experimentais [Camargo]

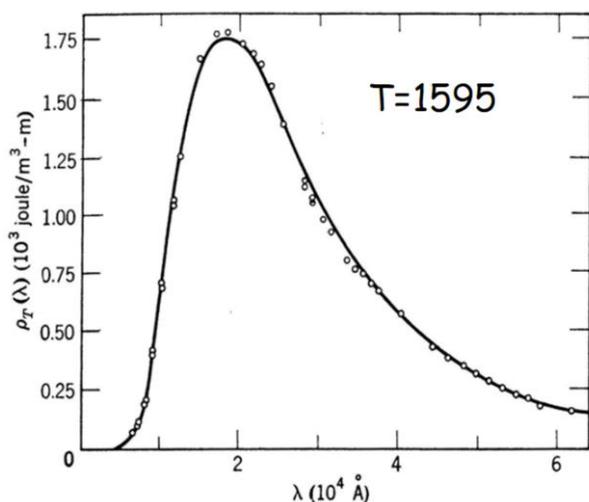
A figura 7 é um gráfico mostrando a distribuição da densidade de energia $\delta(\lambda, T)$ em função do comprimento de onda $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (onde c é a velocidade da luz, ν a frequência). Comparando-se o modelo de Rayleigh – Jeans com os dados experimentais: para valores altos de λ o modelo coincide; para valores baixos de λ , não. Isto ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta” [Camargo].

Se os modos vibracionais das partículas das paredes da cavidade pode ter qualquer valor de energia, desde zero até infinito, então não existe motivo lógico para a fórmula de Rayleigh - Jeans apresentar valores discordantes com os resultados experimentais para valores altos de frequência.

Max Planck, resolvendo esta discordância, supôs o que a energia das oscilações (E) não poderia assumir qualquer valor, mas deveria ser diretamente proporcional à frequência de oscilação (ν):

$$E = h\nu$$

Onde h é a constante de proporcionalidade (constante de Planck). Assim, no processo de emissão do corpo negro, a radiação eletromagnética é quantizada, o que leva a uma curva teórica que se ajusta à curva experimental dada pela Física Estatística [Figura 8].



[Figura 8] Gráfico que compara a previsão de Planck (linha cheia) com dados experimentais (pequenos círculos). [Bahiana]

Albert Einstein supôs, então, que a energia da luz estivesse concentrada em pacotes de energia, quanta de energia de Planck, ($h\nu$). Desse modo, a luz é emitida em pacotes com energia (fótons):

$$E = h\nu$$

Onde h é uma constante e ν é a frequência da radiação.

Esta hipótese também permitiu explicar o efeito fotoelétrico (Nobel de 1921). Neste fenômeno, um material emite elétrons quando exposto a uma radiação eletromagnética. Na explicação de Einstein, a energia máxima de um fóton emitido independe da intensidade da radiação, e é dada por:

$$E = h\nu - \Phi$$

Onde Φ é a energia perdida na emissão (função trabalho).

O átomo de luz pode ser interpretado como uma partícula, uma unidade (pacote de energia) da luz com energia definida.

2.4 Classes de partículas

Como vimos, temos vários componentes do átomo: o elétron, o nêutron o próton e, agora, o fóton, mais estranho. Há uma diversidade de elementos que compõe a matéria e queremos definir o que é fundamental, e o que é composto, ou seja, não elementar.

Uma coisa, no entanto, já está clara. Há, pelo menos, três tipos de partículas: o próton e o nêutron ficam confinados no núcleo atômico e possuem massa; o elétron orbita o núcleo, porém com um comportamento especial, existe em estados estacionários, apenas. E agora os fótons. Partículas curiosas que compõe a radiação eletromagnética em quantidades definidas de energia (quanta).

O papel de cada partícula destas gerará o que chamamos hoje de Modelo Padrão. Mostramos que estes componentes da matéria surgiram de engenhosas experiências e deduções teóricas. Nasceram da necessidade de se explicar os resultados que se obtinham.

Da mesma maneira, neste trabalho, o Modelo Padrão deve vir de uma necessidade de se explicar cada vez melhor as unidades básicas da matéria e como interagem. Veremos que temos, de fato, três tipos de partículas: do tipo do elétron, os léptons; do tipo do fóton, os bósons e do tipo que formam os prótons e nêutrons – os quarks.

Esses três tipos de partículas serão capazes de formar tudo que existe. E é o objetivo deste trabalho, mostrar, usando modelos e deduções mais simples possíveis como se chegou ao Modelo Padrão.

Capítulo 3

Interações

Para entender a constituição básica da matéria e sua organização, devemos investigar como suas partes, seus constituintes, interagem entre si. Ao observar dois ímãs se atraindo fica claro que há algum tipo de ação que os fazem interagir. Podemos supor que há algo diferente nos ímãs em comparação a outros materiais que não se atraem ou se repelem. Portanto, a estrutura dos ímãs deve ser diferente daquela de outros materiais nos quais não se observa esta propriedade.

Portanto, a explicação para a estrutura interna da matéria deve passar pelas interações que experimentam. Elas fornecem pistas sobre sua constituição.

Pretende-se mostrar que uma interação se enquadra em um dado contexto teórico e que a introdução de novas interações pode exigir a elaboração de um novo modelo teórico e, ao mesmo tempo, a reformulação das interações já estabelecidas de acordo com o novo modelo. Dessa maneira, veremos como a classificação das partículas constituintes da matéria relaciona-se às interações fundamentais entre elas.

3.1 A interação como ação à distância

Interação Gravitacional

A interação gravitacional é certamente a mais familiar das interações. Seus efeitos são sentidos por todos nós desde nossos primeiros passos. Entretanto, sua formalização matemática e principalmente sua universalização só foram possíveis com o advento da Mecânica Clássica.

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.

As características desta força gravitacional podem ser extraídas da análise de sua expressão: entre duas partículas estabelece-se uma força de atração mútua que é uma

proporção direta do produto de suas massas e uma proporção inversa do quadrado da distância que as separa:

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$

*Onde F é a força de atração gravitacional entre as partículas;
G a constante gravitacional;
m e M as massas das partículas;
e r a distância entre elas.*

A massa que aparece na expressão da força é a massa gravitacional. Tal massa é uma característica intrínseca dos corpos materiais que determina a existência e a intensidade dessa interação em corpos específicos, não tendo em princípio nenhuma relação com a massa inercial que aparece na segunda lei de Newton, razão pela qual poderíamos denominá-la apropriadamente de carga gravitacional [Castellani, 2001].

Entretanto os fatos experimentais mostram com uma precisão impressionante que a massa inercial de um corpo é proporcional à sua massa gravitacional, permitindo que escolhamos um sistema de unidades onde as duas massas são exatamente iguais. Essa importante propriedade é enunciada na Física como o Princípio da Equivalência [Castellani, 2001].

Nesse ponto vamos destacar três propriedades da interação gravitacional que são relevantes em nossa discussão.

- I) A interação gravitacional depende de uma constante universal G a qual determina a intensidade da interação: A interação é tanto maior quanto maior for G. Por essa razão, G é uma constante de acoplamento e o seu valor é uma característica exclusiva da interação gravitacional. É útil mencionar que o valor real da constante G, medida em diversos experimentos físicos, nos permite afirmar que a interação gravitacional é de fato uma interação muito fraca quando comparada com as demais.

II) A interação gravitacional é de longo alcance. Essa propriedade juntamente com o seu caráter sempre atrativo faz com que a interação gravitacional, apesar de sua fraca intensidade seja fundamental na escala planetária ou cosmológica. Nessa escala as demais interações são de curto alcance, ou são blindadas ou são neutralizadas. Contudo é importante definir claramente o que entendemos por uma interação de longo alcance.

Notemos, inicialmente, que a força gravitacional tende para zero quando a distância r tende para o infinito, mas o produto dessa força vezes a área de uma superfície esférica de raio r é uma constante, mesmo no limite de r tendendo para infinito, É nesse sentido que a força gravitacional é de longo alcance. Uma força é de longo alcance se sua intensidade multiplicada pela área de uma esfera de raio r aumenta ou tende para um valor finito quando r tende para o infinito.

III) Terceira: A interação gravitacional é instantânea. Essa propriedade se manifesta no fato da força gravitacional depender da distância entre os corpos que interagem. Se a distância varia imediatamente a força muda de valor. Dizemos, nesse caso, que a velocidade da interação gravitacional é infinita.

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 Δt , 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.

Entretanto, se o intervalo de tempo Δt 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 momento.

Então, 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 $\Delta t < \frac{r}{v} = 0$ nunca é satisfeita. Assim, a lei de conservação do momento é consistente com a interação

Contudo, a validade da lei de conservação do momento linear total não depende somente da instantaneidade da interação. A premissa inicial de que o momento linear total se conserva nos conduziu ao raciocínio de que a interação deve ser instantânea. Entretanto, poderia haver interações que também causassem variações instantâneas no momento, mas que não satisfariam a 3ª lei de Newton. Desta maneira, não podemos concluir que o momento se conserva.

Em resumo: a conservação do momento total implica na instantaneidade da interação. Mas uma interação ser instantânea não é garantia de que o momento será conservado. É preciso, ainda, que satisfaça a 3ª lei de Newton.

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, a interpretação da interação como ação à distância é misteriosa, pois não há nenhum meio capaz de fazer a transmissão da interação. Como o nome diz, a interação ocorre à distância. 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. Porém, isto não impediu Newton de destacar esta dificuldade conceitual:

“É inconcebível que a matéria inanimada e bruta, sem a mediação de outro agente, que não é material, possa operar sobre outra matéria e afetá-la, sem o contato mútuo de ambas. [...] É um absurdo [...] pensar [...] que um corpo possa agir sobre outro a distância sem a mediação de nenhuma outra coisa pela qual a ação e a força possam ser transportadas. Isto me parece um absurdo tão grande, que não acredito que qualquer pessoa competente para raciocinar em termos de filosofia natural possa acreditar nisso” Isaac Newton, 1693. [Dabro, 1951]

2.2 A interação via campo

Interação Eletromagnética

Semelhantemente à interação gravitacional a interação eletromagnética é bastante familiar. Os efeitos que decorrem dessa interação são abundantes e diversificados na nossa experiência diária. Essa riqueza de efeitos causados por essa interação dificultou enormemente a identificação da força eletromagnética. Os fenômenos magnéticos e elétricos sequer eram vistos como a manifestação de uma

mesma interação. Ao contrário da lei da gravitação universal, as leis do eletromagnetismo foram formuladas em um largo período de tempo e de forma desconectada. O trabalho para unificar a interação elétrica com a interação magnética em uma única interação eletromagnética só foi concluído por Maxwell. Apresentamos a seguir os passos relevantes para nossa discussão.

A descoberta da Lei de Coulomb começou com Charles Coulomb (1736 – 1806), que construiu um aparelho denominado balança de torção, através do qual ele podia fazer medidas da força de atração e repulsão entre duas esferas eletricamente carregadas.

Em razão da força elétrica que se manifesta nesse processo, a haste que está suspensa por um fio gira, provocando uma torção no fio. Ao medir o ângulo de torção, Coulomb conseguia determinar a força entre as esferas.

Após realizar várias medidas com as esferas separadas em várias distâncias, Coulomb acabou por concluir que a força elétrica era inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as duas esferas. Além disso, ele ainda concluiu que a força elétrica era proporcional ao produto das cargas elétricas das esferas envolvidas:

$$F = \frac{KqQ}{r^2}$$

*Onde F é a força elétrica de atração ou repulsão (conforme as cargas);
K a constante elétrica;
q e Q as cargas elétricas das partículas;
e r a distância entre elas.*

As expressões matemáticas para as leis da gravitação newtoniana e a lei da interação elétrica coulombiana são idênticas e portanto temos elementos análogos nas duas leis: Uma constante K característica da interação, a existência de cargas elétricas intrínsecas, alcance infinito, instantaneidade. Entretanto há diferenças importantes:

- I) As cargas elétricas podem ser positivas ou negativas, gerando forças atrativas ou repulsivas. Essa característica tende a neutralizar a força elétrica, pois se um corpo se torna carregado positivamente ele tende a atrair cargas negativas até perder sua capacidade de atrair mais cargas, ou seja, quando se neutralizar.

- II) A constante elétrica K , determinada experimentalmente, faz com que a interação elétrica seja muito maior que a interação gravitacional. O que impede que a interação elétrica se manifeste em uma escala planetária ou cosmológica é justamente a neutralidade da matéria.
- III) Não há um princípio da equivalência para as cargas elétricas.

Na nossa escala macroscópica a neutralidade da matéria não impede a manifestação das forças elétricas. Contudo seus efeitos são enormemente abrandados, permitindo uma competição mais equilibrada com a interação gravitacional. Falaremos mais sobre esses efeitos quando abordarmos a teoria atômica da matéria.

Há, contudo, uma diferença radical entre as leis da gravitação newtoniana e a lei da interação coulombiana: enquanto a primeira é válida para corpos em qualquer estado de movimento a segunda somente vale para corpos em repouso. A interação entre duas cargas elétricas em movimento revelou dificuldades que afastaram definitivamente as semelhanças iniciais e exigiram a introdução de conceitos novos. Uma dificuldade importante foi 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

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

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.

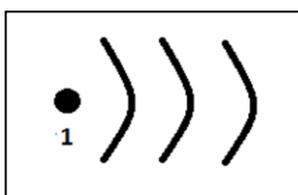
A solução consolidada por James Maxwell (1831 – 1879) exigiu uma nova concepção de interação. A ação à distancia foi substituída pela ação mediada por campos. No caso da interação eletromagnética a teoria de Maxwell eliminou as inadequadas e desconexas noções de interação elétrica e interação magnética,

unificando-as em uma única noção de interação eletromagnética mediada pelo campo eletromagnético.

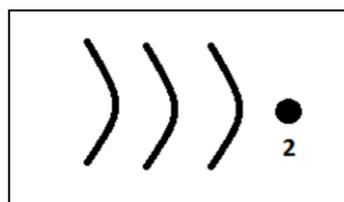
No conceito de campo, cada carga não interage diretamente com a outra, mas com o campo criado. A primeira carga estabelece o campo. A segunda carga interage com esse campo no ponto onde está localizada. O campo tem função de intermediário entre as duas cargas. A força é exercida pelo campo na posição 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.

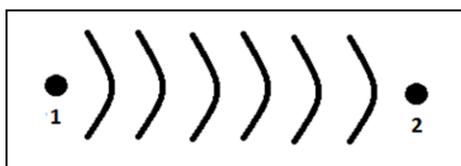
A interação, que antes era vista como à distância, agora é local. A segunda carga interage com o campo na posição do espaço onde se encontra, localmente.



[Figura 9] A carga 1 cria o campo

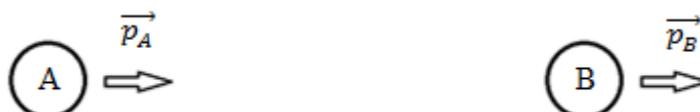


[Figura 10] A carga 2 sente este campo no ponto onde está localizada



[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.

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

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):

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

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

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

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:

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

Derivando em relação ao tempo obtemos:

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

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.

Exemplo gravitacional

No exemplo gravitacional, a primeira massa, carga deste campo, cria um campo gravitacional no espaço ao seu redor. A existência deste campo é sentida por uma segunda massa colocada neste espaço, m . Este campo \vec{g} pode ser definido matematicamente como a razão entre a força e a massa m :

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Onde \vec{g} é o vetor campo gravitacional;
Onde \vec{F} é o vetor força de atração gravitacional entre as partículas;
 m a massa de prova, sensível ao campo.

Assim, o campo independe de m , pois se m aumentar, $|\vec{F}|$ aumenta na mesma proporção. Dessa maneira, o campo é criado de forma que independa da existência de uma segunda massa para “sentir” a interação. O campo existe independentemente de haver ou não outras massas para identificá-lo.

$$\vec{g} = \frac{GM}{r^2} \hat{r}$$

Que só depende da massa M
que cria o campo.

Portanto, em cada ponto do espaço há um valor para o campo, independente de haver ou não outra massa ali.

A existência do campo é revelada quando se coloca a segunda massa m neste campo. Ela “sente” o campo, por possuir carga compatível (massa). A força aparece como resultado da interação local entre a massa e o campo [figura 10].

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

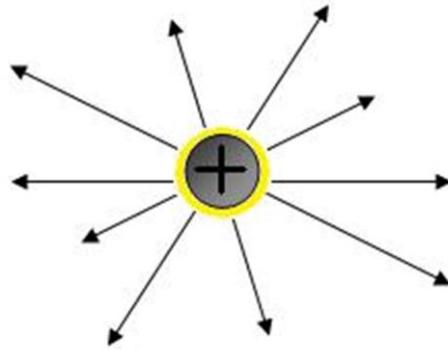
Onde \vec{F} é o vetor força de atração gravitacional;
 m a massa que sente o campo;
 \vec{g} o campo gravitacional.

Exemplo elétrico

Com raciocínio análogo, fazemos as mesmas considerações para a força elétrica. O que cria o campo elétrico é a carga elétrica. A ressalva fica pelo fato de a força elétrica poder ser atrativa ou repulsiva. Assim, atribui-se um sinal positivo ou negativo ao campo (ou um sentido, vetorialmente). Conceitualmente, o raciocínio para o campo elétrico é o mesmo:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Onde \vec{F} é o vetor força elétrica;
 q a carga elétrica que sente o campo;
 \vec{E} o campo elétrico.



[Figura 12] Representação de um campo elétrico gerado por uma carga positiva. As setas representam o campo de afastamento. (desenho próprio)

Exemplo magnético

Podemos tratar o campo magnético da mesma forma, apenas considerando que uma carga elétrica sente este campo ao entrar em movimento:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Onde \vec{F} é o vetor força magnética;
q a carga elétrica que sente o campo;
 \vec{v} a velocidade da carga
 \vec{B} o campo magnético.

3.3 A interação via troca de bósons

Como visto no capítulo 1, o modelo atômico de Rutherford pressupõe que a maior parte da matéria que compõe o átomo está numa pequena região central. Em termos quantitativos, por exemplo, seu modelo estimou que o raio do núcleo do átomo de ouro devesse ser da ordem de 10^{-14} m, ou seja, 4 ordens de grandeza menores que o átomo como um todo (o raio do átomo é da ordem de 10^{-10} m).

Esse pequeno núcleo é formado por prótons positivos. Como se sabe, partículas positivas se repelem. Assim, deve existir uma intensa força de repulsão eletromagnética entre os prótons, que estão tão próximos uns dos outros.

Assim descrito, a força dominante no núcleo é a interação eletromagnética. A intensa repulsão provocaria um rápido afastamento entre os prótons, impedindo que eles

se aglutinassem para, juntamente com os nêutrons, produzirem os núcleos. E, obviamente, se os núcleos atômicos não existissem, os átomos não existiriam, nem as moléculas (que são formadas por átomos).

Por que motivo, então, o núcleo de um átomo é estável?

A interação forte

Não podemos contar com o núcleo mantido unido apenas pela força eletromagnética repulsiva. Deste modo, deve haver outra interação, que dê conta desta coesão.

A interação gravitacional não poderia desempenhar este papel, pois, apesar de atrativa, como visto, é de fraca intensidade, incapaz de exceder a força eletromagnética. Como os núcleos existem, podemos concluir que deve existir uma força de natureza diferente da força eletromagnética ou da força gravitacional – e muito mais intensa que estas – que mantém os núcleos coesos.

Deste modo, devemos introduzir uma interação nova, atrativa, capaz de sobrepujar a força elétrica repulsiva entre as cargas positivas do núcleo a fim de manter a estabilidade nuclear. A estabilidade nuclear é alcançada pela presença de um novo tipo de interação entre partículas.

Portanto, foi postulada a chamada Interação Forte para explicar como o núcleo atômico continua unido apesar da mútua repulsão eletromagnética dos prótons. Essa interação fundamental atuaria no núcleo atômico e deveria superar a tremenda repulsão que surge quando os prótons positivamente carregados são reunidos no pequeno espaço do núcleo.

Agindo neste pequeno espaço, ela embarca não só os prótons, mas também os nêutrons. Como os nêutrons interagem com os prótons por meio da força forte, mas não têm carga elétrica, mais e mais nêutrons são necessários para "diluir" as forças repulsivas e manter os núcleos pesados juntos.

Então, fica a cargo da interação nuclear forte entre pares de prótons, pares de nêutrons, ou entre um par nêutron-próton, a responsabilidade pela manutenção do núcleo atômico coeso.

Suas características são:

- I) De curto alcance: Agem apenas no espaço do núcleo atômico, de modo que apenas supere a repulsão elétrica quando os prótons estão suficientemente próximos, dentro do núcleo atômico. Na verdade, a força forte só é efetiva na escala das dimensões do núcleo atômico, ou seja, seu alcance é da ordem de 10^{-13} centímetros, pois não é detectada fora do núcleo.
- II) Possui magnitude maior que a interação eletromagnética: a ordem de grandeza da interação forte é 100 vezes maior do que a eletromagnética, pois deve prevalecer sobre repulsão elétrica entre os prótons.
- III) A interação forte, ao contrário das outras forças fundamentais da natureza, (eletromagnética, fraca e gravidade) não fica menos poderosa com o aumento da distância, dentro de seu raio de atuação (núcleo atômico).

Como a interação forte atua em prótons, que têm carga elétrica, e em nêutrons, que não têm, pode-se supor um novo tipo de carga, que seria sensível à esta nova interação. Esta “carga forte” seria compartilhada pelos prótons e nêutrons.

Assim, a carga pode ser vista como a propriedade do objeto de poder interagir com outro que possua carga de mesmo tipo. Corpos que possuem carga do tipo elétrica interagem com outros que possuem o mesmo tipo de carga eletricamente. E corpos que possuem carga do tipo massa interagem com outros que também possuem carga massa gravitacionalmente.

Da mesma maneira, essa ideia é expandida para a interação forte. Dentro deste raciocínio, só interagem fortemente as partículas que possuam carga forte. Em resumo, os prótons possuiriam (até aqui) três cargas: massa, carga elétrica e carga forte. Enquanto os nêutrons possuiriam: massa e carga forte.

Esta discussão é importante na medida em que surge um critério de distinção entre partículas. As partículas podem ser encaixadas na mesma classificação de acordo com as interações a que está sujeita, ou seja, de acordo com as cargas que possui.

Méson pi (píon)

Da necessidade de suplantar a repulsão eletromagnética surge a interação forte. Mas será que apenas os prótons e nêutrons estão sujeitos a ela? Em 1934, Hideki Yukawa (1907 – 1981) previu que deveria existir uma partícula mais pesada que o elétron e que interagiria fortemente [Moreira, 2007].

Em 1947, da observação de raios cósmicos detectou-se a partícula que viria a ser chamada de méson-pi (ou píon). Mais tarde, a mesma partícula foi produzida artificialmente em um acelerador de partículas [Moreira, 2007].

Os mésons, diferentemente dos elétrons e das partículas nucleares (prótons e nêutrons) não aparecem na estrutura da matéria ordinária. Isto ocorre porque não são partículas estáveis. Abandonado a si mesmo, um méson desintegra-se em outras partículas elementares.

Os mésons pi negativos, contudo, tinham pequena probabilidade de desintegrarem-se espontaneamente e eram geralmente atraídos pelos núcleos positivos dos átomos vizinhos e capturados por eles, produzindo violentas rupturas do núcleo [Griffiths, 1987].

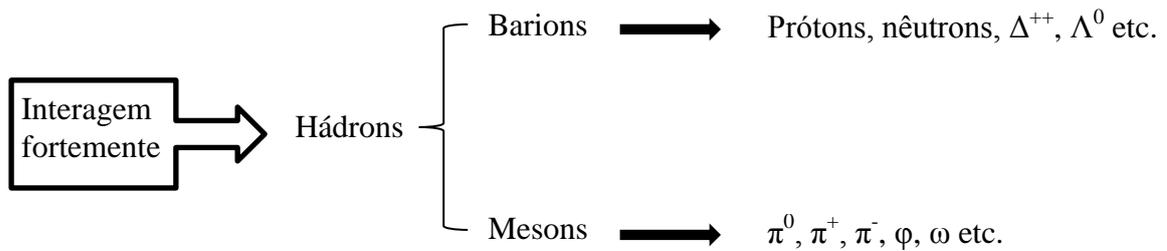
Este fato, associado a estudos posteriores, indicou que esta partícula tinha uma forte interação com o núcleo atômico possuindo, assim, as características exigidas pela teoria de Yukawa.

O píon não é a única partícula a possuir estas características. Várias outras foram sendo descobertas com o tempo, dando-se letras gregas para denotá-las: k, ρ^+ , por exemplo. Estas partículas, portanto, interagem fortemente – possuem carga forte – e não fazem parte da matéria “ordinária”, prótons, nêutrons e elétrons.

Deste modo, a interação forte não só se estabelece como deixa de ser exclusiva de prótons e nêutrons, mas de todo um grupo de partículas que compartilham entre si carga forte.

A existência dos píons e de outras partículas, descobertas nos anos seguintes, principalmente com pesquisas em aceleradores de partículas, colocou em xeque a ideia de que as partículas elementares seriam os prótons, elétrons e nêutrons.

O surgimento dessas novas partículas, que apresentavam propriedades semelhantes, permitiu agrupá-las em uma mesma família denominada hádrons (que significa forte em grego), cujas interações podem ocorrer pela força forte [Moreira, 2007].



O núcleo atômico composto apenas de prótons e nêutrons é insustentável. A força forte complementa a estrutura do núcleo. Contudo, partículas adicionais entram em cena. E qual seria a ligação destas novas partículas com a interação forte?

Pela teoria de Yukawa, a nova interação tinha como origem a troca de partículas entre eles [Moreira, 2007]. Com esse modelo, além das partículas elementares conhecidas até então (prótons, elétrons e nêutrons), a matéria passaria a ser constituída também por outras partículas, responsáveis pela mediação da força forte, como vimos.

Com as trocas de píons, podemos ter as seguintes situações:

- I) Um próton emitindo um pión mais (π^+) transforma-se em um nêutron, já que perde sua carga positiva;
- II) Um nêutron emitindo um pión menos (π^-) transforma-se em um próton, já que fica com uma carga negativa a menos.
- III) Os nêutrons também podem trocar píons entre si, o mesmo ocorrendo com os prótons, porém, nesses casos, a carga do pión será nula e teremos o pión zero (π^0). Observe-se que, em todos esses casos, a conservação das cargas elétricas é respeitada.

Como se pode perceber, um próton pode virar um nêutron e vice-versa. Como eles têm aproximadamente a mesma massa, prótons e nêutrons agem como se fossem partículas idênticas diferindo apenas pela carga elétrica. Utilizamos a palavra nucleon quando nos queremos referir ao próton ou ao nêutron sem fazermos uma distinção entre eles.

Troca de partículas

Do modo como está descrita, a interação forte depende da ideia de Yukawa de que a força forte é transmitida por uma partícula, o pión, superando a noção anterior de interação via campo. Essa é uma boa oportunidade, pois o questionamento de Newton sobre a falta de um “meio material” para a interação persiste. Nesta nova visão, as interações fundamentais ocorreriam como se as partículas que interagem trocassem uma partícula intermediária entre elas.

Nessa concepção como seria descrito o campo eletromagnético e gravitacional? Quem é o quantum desses campos? A teoria quântica dos campos prevê também um campo quantizado para o eletromagnético e o gravitacional com seus respectivos quanta, ou seja, uma descrição da interação através da troca de partículas.

Por exemplo: um elétron repele outro elétron não por outro campo, mas porque o primeiro elétron emite uma partícula. Esta partícula mediadora viaja até o segundo elétron que a absorve. Ao detectá-la, a segunda partícula recebe a informação da primeira, e ocorre a interação.

Podemos fazer a analogia clássica 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. Haverá 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 [Ostermann, 1998], 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 o 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.

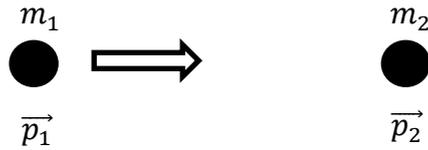
Esta é uma boa oportunidade para provocar uma mudança de paradigma. A dificuldade de encontrar uma boa analogia clássica para a emissão e absorção de partículas reside no fato de que temos que abandonar o quadro puramente clássico e introduzir o princípio da incerteza, envolvendo a energia e o tempo.

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 .



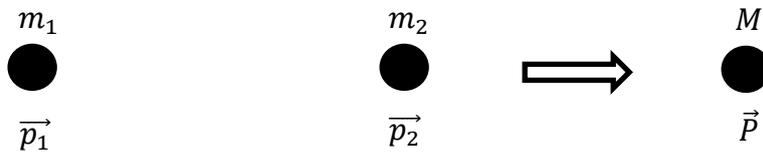
Portanto, antes da colisão o momento é dado por:

$$\overrightarrow{P_{antes}} = \overrightarrow{p_1} + \overrightarrow{p_2}$$

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:

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

E a energia:

$$E_{depois} = \frac{P^2}{2M} \quad (15)$$

Onde $M = m_1 + m_2$

Supondo que haja conservação da energia, podemos dizer que:

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

Dessa forma, substituímos (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):

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

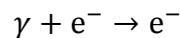
No centro de massa: $p_1 = -p_2$

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

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 (γ) 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

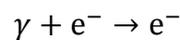
Um dos pilares da Mecânica Quântica é o princípio da incerteza. Em 1919, Werner Heisenberg (1901 – 1976) formulou esse princípio, que leva seu nome, segundo o qual, estabelece-se que não é possível ter simultaneamente a certeza da posição e da velocidade de uma partícula. Assim, quanto maior for a precisão com que se conhece uma delas, menor será a precisão com que se pode conhecer a outra [Moreira, 2009].

Isto não é questão de medição, mas uma característica da natureza das partículas subatômicas. Podemos então associar este fato físico à nossa discussão.

Portanto, o Princípio da Incerteza surge como a hipótese que permitirá a emissão da partícula mediadora. A solução encontrada é que não será possível conferir se a conservação da energia está valendo durante toda a interação, pois eu não poderei medi-la. Pelo menos pelo pequeno tempo que a partícula mediadora leva para transmitir a variação, não haverá conservação de energia.

A solução, então, 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 ΔE desde que sua vida não seja maior do que indicado na equação (Δt). Como a constante \hbar é da ordem de grandeza 10^{-34} , são possíveis grandes violações apenas em tempos muito reduzidos.

Partículas virtuais

A partícula mediadora é, então, denominada virtual, pois pode existir somente durante este curto intervalo de tempo, obedecendo ao Princípio da Incerteza. Fazemos a analogia com um banco. Há um “banco de energia” disponível, de onde se pode pegar energia emprestada, desde que a restitua dentro de um breve intervalo de tempo. Quanto mais energia pegar emprestado, menor a duração do empréstimo. [Moreira, 2004]

As partículas de detectáveis, ditas reais, interagem trocando partículas virtuais, que podem ou não possuir massa. Lembre-se da relação massa-energia. É um “construto” lógico: partículas podem ser criadas tomando energia emprestada de alguma. Por exemplo: um elétron pode emitir um fóton, que pode ser real ou virtual dependendo da disponibilidade de energia [Moreira, 2004].

A duração desse empréstimo é governada pela relação de incerteza:

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

Ou seja, quanto maior a energia “emprestada”, menor o tempo que ela pode existir. Em resumo, tanto partículas usuais como partículas mediadoras podem ser reais ou virtuais, podem estar em um estado real ou virtual.

Portanto, podemos interpretar as interações que afetam as partículas ditas reais como uma troca de partículas transportadoras de força (mediadoras), um tipo completamente diferente de partícula. Como analogia, sugerimos bolas de basquete

atiradas entre jogadores [Ostermann, 2001a]. O que nós pensamos normalmente como "forças" são, na verdade, os efeitos das partículas transportadoras de força sobre as partículas reais.

Um fator a ser levado em consideração é que uma partícula transportadora, de um tipo particular de força, só pode ser absorvida ou produzida por outras partículas que são afetadas por essa força. Por exemplo, elétrons e prótons têm carga elétrica; portanto, eles podem produzir e absorver as transportadoras de forças eletromagnéticas, ou seja, o fóton. Neutrinos, por outro lado, não têm carga elétrica, então eles não podem absorver ou produzir fótons.

É preciso levar em conta que as partículas podem ter mais de uma carga, experimentando várias interações e forças. Devemos considerar, portanto, o âmbito da interação. Em determinados domínios pode-se desprezar uma interação para realçar outra.

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.

Não devemos cometer o erro de tratar partículas virtuais como partículas reais. Elas ocorrem como objetos intermediários de cálculo e não podem ser observadas diretamente. Um fóton virtual pode aparecer espontaneamente em qualquer instante e desaparecer de novo, dentro do tempo permitido pelo princípio da incerteza. Outras partículas virtuais podem ser criadas da mesma forma.

Atração e Repulsão

Esse modelo das interações, entretanto, exige mais explicações, pois as interações podem ser atrativas ou repulsivas. Inicialmente notemos que a relação relativística entre energia e momento, $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, permite valores positivos e negativos para uma partícula de massa m . Os dois valores são:

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

O valor positivo é aceito sem qualquer dificuldade na uma física clássica, não-quântica, como energia de uma partícula livre. O valor negativo, contudo, parece não ser aceitável como energia de uma partícula livre. Porém, estamos analisando efeitos

gerados simultaneamente pelas teorias da relatividade e quântica, ou seja, efeitos que são explicados por uma teoria quântica relativística.

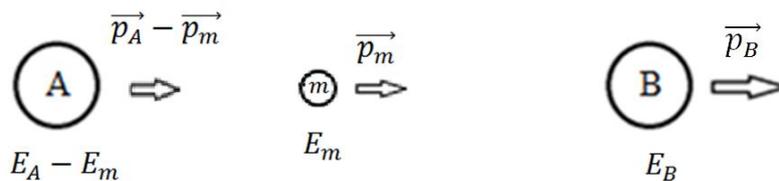
Tal teoria para ser consistentemente construída exige a inclusão desses estados de energia negativa e, conseqüentemente, massa negativa. A força repulsiva decorre de uma partícula mediadora com energia positiva que é absorvida ou emitida pelas partículas A e B. Este mecanismo será descrito a seguir:

Tome duas partículas A e B, com momentos e energias iniciais \vec{p}_A , E_A e \vec{p}_B , E_B , respectivamente. A figura abaixo mostra as partículas antes da emissão da partícula mediadora.



Em seguida ocorre a emissão de uma partícula mediadora m , com momento e energia \vec{p}_m e E_m . Repare que a partícula m foi emitida pela partícula A, que tem seu momento alterado de p_A para $p_A - p_m$, e sua energia alterada de E_A para $E_A - E_m$.

A segunda figura mostra as partículas após a emissão da partícula mediadora m :



Em seguida, esta partícula mediadora é absorvida pela partícula B. Assim, esta também altera seu momento e energia que passam de p_B para $p_B + p_m$, e sua energia alterada de E_B para $E_B + E_m$.

A terceira figura mostra as partículas após a absorção da partícula mediadora



Assim vemos que após o processo de emissão e absorção da partícula mediadora as partículas A e B têm energia e momento finais que são produzidos por uma força repulsiva.

A força atrativa decorre de uma partícula mediadora com energia negativa e massa negativa que é absorvida ou emitida pelas partículas A e B. Analisando a sequência de figuras anteriores no caso $E_m < 0$, verificamos que a energia da partícula A aumenta e a energia da partícula B diminui. Assim vemos que após o processo de emissão e absorção da partícula mediadora as partículas A e B têm energia e momento finais que são produzidos por uma força atrativa.

Alcance

O alcance da interação causada pela troca de partículas virtuais (chamados bósons) está intimamente relacionado à massa de repouso dos quanta trocados. Quanto maior a massa da partícula, tanto menor o espaço permitido a ela [Moreira, 2004]. A justificativa desta afirmação está ancorada no Princípio de Incerteza [Galante].

Como visto, a troca destas partículas (bósons) envolve a violação momentânea da conservação da energia que, para minimizar os efeitos dessa violação, deve ocorrer no menor intervalo possível de tempo. Portanto, essa partícula só pode existir dentro das restrições impostas pelo princípio da incerteza, que é dado por [Galante]:

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

Assim vemos que o menor tempo possível Δt ocorre quando obtemos a igualdade (aproximadamente) no princípio da incerteza:

$$\Delta E \cdot \Delta \tau \approx \hbar \quad (13)$$

Por outro lado, a incerteza na energia (ΔE) da partícula criada é igual a energia de repouso (E), ou seja,

$$\Delta E \approx E = mc^2$$

De maneira que:

$$\Delta E = mc^2 \quad (14)$$

Substituindo (14) em (13):

$$mc^2 \cdot \Delta \tau \approx \hbar \quad (14)$$

Considerando que esta partícula não pode exceder a velocidade da luz (c), a distancia máxima (Δs , dito alcance) que ela pode viajar é:

$$\Delta s = c \cdot \Delta \tau \quad (15)$$

Explicitando o tempo Δt :

$$\Delta \tau = \frac{\Delta s}{c} \quad (16)$$

Substituindo (16) em (14):

$$mc^2 \cdot \frac{\Delta s}{c} \approx \hbar$$

Simplificando a equação anterior:

$$mc \cdot \Delta s \approx \hbar$$

Assim, explicitando Δs , o alcance máximo é dado por:

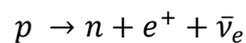
$$\Delta s \approx \frac{\hbar}{mc}$$

Deste modo, quando um bóson intermediário é emitido, ele tem não só um tempo para existir como um alcance determinado. Conclui-se que o alcance das forças elementares está associado ao inverso da massa do bóson mediador. Este fato também nos ajuda a entender melhor os componentes da matéria. O bóson mediador terá massa tão grande quanto for necessário ao seu alcance.

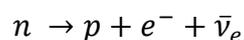
3.4 O vértice de interação

A última interação a ser descoberta foi a interação fraca. Historicamente, ela surgiu no estudo do decaimento β que envolve o decaimento de prótons e nêutrons ligados no interior do núcleo atômico. O estudo desses decaimentos levou também, em 1930, o físico Wolfgang Pauli (1900 – 1958) à descoberta do neutrino [Griffiths, 1987]:

Podemos notar isso em algumas reações exemplificativas. Por exemplo, um próton decai em um nêutron, mas também gera um pósitron (e^+ , um elétron positivo, a antipartícula do elétron, como veremos) e um antineutrino ($\bar{\nu}_e$, a antipartícula do neutrino):

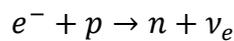


Em outra reação, acontece o oposto, o nêutron decai em um próton, mas também produz um elétron (e^-) e um antineutrino ($\bar{\nu}_e$)

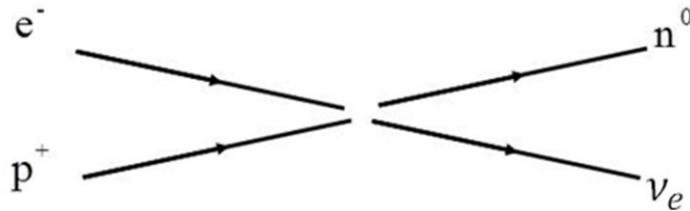


Estas reações mostram claramente a participação do elétron e do pósitron, que não interagem fortemente. Podemos concluir que tais decaimentos não se devem à interação forte. Esses e muitos outros resultados experimentais demonstraram a existência de uma nova interação que foi denominada de interação fraca. A principal característica dessa interação é justamente o fato dela acoplar os léptons (por exemplo, elétrons) com os hádrons (prótons e nêutrons).

A primeira descrição da força fraca foi dada por Fermi (1934) por meio de uma interação de contato entre quatro partículas [Griffiths, 1987]. Podemos representá-la de duas maneiras:



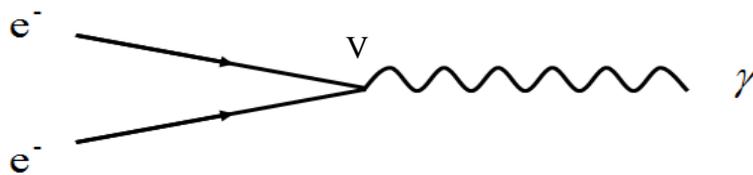
Ou:



[Figura 14] Outra forma de representar a interação de partículas [Berg, 2006]

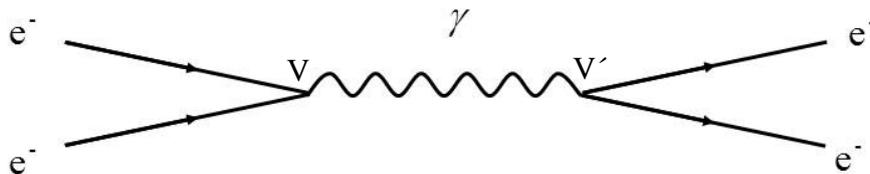
No modelo de Fermi a interação não se deve a troca de um bóson intermediário como na interação eletromagnética [Griffiths, 1987]. A sua ação é local e caracteriza-se pela existência do vértice entre as linhas dos quatro férmions.

Contudo, o modelo de Fermi foi substituído por uma teoria mais elaborada na qual novos bósons foram introduzidos para intermediar a interação fraca. Além disso, ficou claro que a essência da interação não está na troca do bóson, mas sim na própria emissão do bóson, ou seja, o bóson é emitido graças à interação que resulta da existência do vértice que une as linhas dos férmions e do bóson. A figura abaixo ilustra esse mecanismo.



[Figura 15] Representação do vértice de interação [Berg, 2006]

No vértice V ocorre a interação eletromagnética responsável pela emissão do fóton. A interação entre duas cargas elétricas deve-se ao fato do fóton emitido ser absorvido em uma nova interação eletromagnética em segundo vértice.



[Figura 16] Interação com os vértices [Berg, 2006]

Essa mesma ideia funciona com as interações forte e fraca, envolvendo, contudo, outras partículas e outros bósons.

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.

As massas dos bósons das forças de alcance infinito, eletromagnética e gravitacional, devem ter massa nula [Moreira, 2004]. É o caso do fóton na interação eletromagnética. A interação gravitacional possui o gráviton, que ainda não foi detectado. Desta maneira trata-se a gravitação, ainda, de modo clássico.

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) [ParticleAdventure.org].

A força forte, responsável pela coesão do núcleo atômico, aparece nesta escala (10^{-14} m). No entanto, no desenvolvimento da física de partículas, reconheceu-se que a interação nuclear forte entre nucleons corresponde a um efeito residual da interação forte, que ocorre, na verdade, entre quarks (como será visto à frente). Desta maneira, o modelo de Yukawa não poderia mesmo corresponder a uma descrição mais fundamental desta interação [ParticleAdventure.org]. .

Neste nível, a interação forte é mediada pelos chamados glúons. A interação forte também é responsável pela produção de píons e outras colisões de energias elevadas. No entanto, a força entre dois nucleons é mais facilmente entendida considerando-se o méson como mediador.

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.

Capítulo 4

Partículas Elementares

A Física de partículas elementares estuda de que a matéria é feita em seu nível mais fundamental. É um universo de pequeníssimas quantidades de matéria com enormes espaços vazios. Esta matéria é formada por diversos tipos de partículas, cada qual sempre igual, com propriedades e características idênticas [Moreira, 2004].

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 [Moreira, 2009].

Na década de 1950, apareceram várias partículas e dependendo de suas características, propriedades etc., surgiu a necessidade de classificá-las ordenadamente. Assim, introduziram-se leis de conservação que unidas às leis de conservação clássicas (energia, momentos e carga) poderiam dar sentido ao que acontecia no mundo das partículas [Ostermann, 1999].

Quarks

Neste cenário, a descoberta de certas partículas fez com que 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 [Ostermann, 1999].

Assim, as centenas de partículas conhecidas na época poderiam ser explicadas como combinações de apenas três partículas fundamentais. As partículas constituintes (trinca) dos hádrons seriam identificadas por um número quântico (estranheza) que seria conservado apenas nas interações fortes [Ostermann, 1999].

Essas partículas deveriam possuir cargas fracionárias da carga do elétron. De modo que devem possuir cargas elétricas fracionárias de $2/3$ e $-1/3$ para que, em sua combinação na trinca, mantenha o próton com carga inteira, por exemplo [Silva, 2008]. Essas cargas nunca haviam sido observadas antes.

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. Em 1995, descobriu-se o quark top, o último dos quarks previstos [Abdalla, 2005].

O modelo dos quarks violaria o Princípio da exclusão de Pauli. A partícula Ω^- , por exemplo, é constituída de três quarks s, de modo que dois deles não podem ocupar o mesmo estado quântico. Para resolver este dilema, propôs-se, então, que estes três quarks s não fossem iguais. Cada um diferiria do outro de acordo com uma nova propriedade chamada de cor [Abdalla, 2005].

Esta elegante solução propõe que cada quark pode ter três cores: azul, verde e vermelho. Assim, a partícula Ω^- pode ser escrita como $S_{vermelho}S_{verde}S_{azul}$, respeitando o princípio de Pauli.

Cor é uma propriedade da matéria, assim como carga elétrica também é uma propriedade da matéria. Não tem nada a ver com significado de cor na Óptica ou no cotidiano. Algumas partículas têm essa propriedade outras não. Indo mais adiante, a cor é interpretada como a carga que origina a força forte. A força forte residual, como visto, é mediada pelos mésons. No entanto, a interação forte propriamente dita é mediada por outro bóson, que carrega esta nova propriedade, a cor.

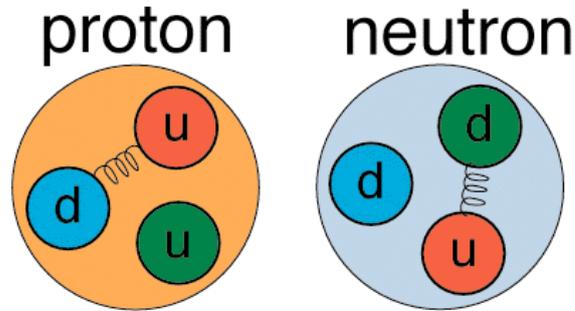
Então, entendemos que a força forte é mediada pelos glúons (bóson da interação forte), que possuem cor. Um próton, que é formado por três quarks com a configuração uud, na verdade é um sistema físico onde ocorre uma intensa troca de glúons, continuamente, entre seus quarks constituintes. Vemos, portanto, que a estrutura da matéria nuclear é muito mais complicada do que pensávamos anteriormente.

Ao invés de estudarmos a interação entre dois prótons como sendo uma interação entre duas partículas, vemos que, considerando seus quarks e glúons, a colisão entre dois prótons é um processo de interação entre seis!

Além disso, cabe notar que existem oito tipos diferentes de glúons. As propriedades desses glúons é obtida a partir de trabalhos teóricos envolvendo uma parte da matemática conhecida como "teoria dos grupos".

Os quarks não são observados livres. Eles só existem combinados, seja num bárion ou em um méson. A esta propriedade chamamos confinamento [Silva, 2008].

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 [Bertulani]

Quadro com os quarks:

Geração	Nome	Símbolo	Carga
Primeira	Up	u	$+\frac{2}{3}e$
	Down	d	$-\frac{1}{3}e$
Segunda	Strange	s	$-\frac{1}{3}e$
	Charm	c	$+\frac{2}{3}e$
Terceira	Bottom	b	$-\frac{1}{3}e$
	Top	t	$+\frac{2}{3}e$

Antipartículas

Paul Dirac (1902 – 1984) descobriu que a equação que descreve a energia de elétrons livres [Griffiths, 1987]:

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

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.

Carl Anderson (1905 – 1991) fotografando os rastros dos raios cósmicos percebeu que numa mesma fotografia apareciam frequentemente duas espécies de trajetórias, de curvaturas opostas, embora ambas semelhantes às trajetórias dos elétrons. Mais tarde confirmou-se a existência do pósitron, a antipartícula do elétron.

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

Já vimos como partículas que parecem elementares possuem estrutura interna. Os prótons, por exemplo, são formados por quarks. No entanto, apesar de algumas particularidades, como a antipartícula, a matéria parece ser constituída de quarks, quaisquer que sejam suas cores.

No entanto, 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.

O neutrino associado à produção de um múon não é uma partícula igual ao neutrino produzido no decaimento beta, associado ao aparecimento de um elétron.

Eles são denominados de neutrino do múon e neutrino do elétron. São partículas diferentes, pois se um feixe de neutrinos do múon incide em um alvo, apenas múons são observados entre as partículas produzidas pelas colisões.

No entanto, se o alvo é submetido a neutrinos do elétron apenas elétrons são observados no meio das partículas produzidas pelas colisões. O outro lépton conhecido, o tau, também está associado a um neutrino diferente dos outros dois citados.

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.

Na próxima página, a tabela das três famílias de léptons:

Família	Partícula	Símbolo
Elétron	Elétron	e^-
	Neutrino do Elétron	ν_e
Múon	Múon	μ^-
	Neutrino do Múon	ν_μ
Tau	Tau	τ^-
	Neutrino do Tau	ν_τ

Existem, portanto, seis tipos de léptons, três dos quais possuem carga elétrica e três, não. O elétron (e^-), o múon (μ) e o tau (τ), que são carregados como os elétrons, mas têm muito mais massa. Os outros léptons são os três tipos de neutrinos (ν). Eles não possuem carga, têm massa pequena e são de difícil detecção.

Os léptons mais pesados, o múon e o tau, não são encontrados em toda matéria. Isso porque quando são produzidos, eles decaem muito rapidamente, ou transformam-se em léptons mais leves, e às vezes o tau pode decair em quarks, antiquarks e um neutrino. Os elétrons e as três espécies de neutrinos são estáveis e, por isso, são os tipos mais encontrados ao nosso redor.

Quando um lépton pesado decai, uma das partículas na qual ele decai é sempre seu neutrino correspondente. As outras partículas poderão ser um quark e seu antiquark, ou outro lépton e seu antineutrino.

Então, uma coisa importante sobre os léptons é que o número de elétron, o número de múon e o número de tau são sempre conservados quando um lépton massivo decai em léptons menores.

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 sabores 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.

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 Z^0 e ao γ não. Este bóson ainda não foi verificado e é objeto de estudo pelo LHC (Large Hadron Colider, ou Grande Colisor de Hádrons).

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

Capítulo 5

Conclusão

Tudo que existe no universo é formado pelo que descrevemos neste trabalho. Pelo menos o que se sabe até hoje. A ciência não é uma casa terminada. Mas uma estrada em construção. Novas observações e teorias sobre energia e matéria escuras, por exemplo, lançam novas possibilidades à frente.

É uma grande contemplação observar o que o homem fez desde Dalton até o LHC (grande colisor de hádrons). Até uma Lei de Proporções obtida por cuidadosa observação até a análise criteriosa de *pentabytes* de informações em colisões de altíssimas energias.

De fato, o espírito que moveu o ser humano de 1803, da Teoria Atômica de Dalton até 2008, ano em que entrou em operação o LHC é o mesmo: a curiosidade. Este espírito não deve ser alimentado com informação acabadas, com resultados finais. Mas com um convite para acompanhar que desafios surgiram para que se propusesse uma nova teoria.

Desta maneira procurou-se, neste trabalho, guiar procurando sempre as razões, os porquês de sabermos o que sabemos hoje: os quarks *u* e *d* (que formam o próton e o nêutron) juntamente com o elétron são as partes básicas da matéria sobre as quais tudo se constrói em infinitas possibilidades de recombinação. Não temos pretensões de esgotar todos os aspectos da teoria, muito menos aprofundá-la.

Contudo, as razões de estas partículas se classificarem de uma maneira ou outra estão contidas neste trabalho. Fugindo a meras descrições, vimos o que levou Dalton a propor a lei das proporções, ou o que impedia o momento de se conservar numa emissão espontânea. Ainda, por que os quarks deveriam ter carga colorida, por exemplo.

É claro que isto é um resultado de esforço muito grande e vidas dedicadas à ciência. Muitas contribuições históricas não estão aqui contidas, muitas controvérsias e discussões, às vezes durando séculos, limaram as bases das teorias aqui contidas.

Esperamos verdadeiramente que estas racionalizações possam contribuir para um ganho no processo de ensino-aprendizagem, muito além do que a leitura pura. O leitor é colocado em posição de acompanhar a discussão, não podendo ser parte passiva, mas devendo agir para acompanhar ou mesmo criticar as ideias.

Dentro deste princípio, o presente trabalho tem um alvo duplo. Tanto o professor de Ensino Médio pode enriquecer sua discussão de Física Moderna em aula, que é a proposta do produto didático, quanto um aluno com particular interesse por ciência pode se servir dos cálculos.

O universo subatômico tem suas peculiaridades, principalmente por causa da escala, não só em tamanho, como em energia. Os efeitos quânticos e relativísticos desempenham um papel importante, de modo que a discussão teórica exige uma matemática apurada.

Contudo, isto não pode constituir impedimento à expansão e divulgação do conhecimento da física pela sociedade, particularmente no Ensino Médio. A Física não pode encerrar-se nos corredores de universidades, alheia à comunidade que a cerca.

Por este mesmo motivo, deve tomar conhecimento das teorias de aprendizagem, psicologia e de outros recursos que permitam compreender o processo educativo.

Com efeito, transpor conhecimentos de nível superior para este nível de ensino constitui tarefa muito difícil, visto as discrepâncias de linguagem, tanto matemática como conceitual. É necessário um longo caminho desde o Saber Sábio até o Saber Ensinado. Não queremos que nossa tentativa seja permeada de simplificações, analogias e comparações que, por vezes, comprometam o modelo.

Longe de nos afastarmos destas vicissitudes, a atitude corajosa e embasada é que deve guiar tais esforços. Assim, neste trabalho, escolhemos utilizar conceitos clássicos que trouxessem ganhos teóricos, ainda que incompletos. Deduzir a não conservação da energia, por exemplo, lança ao leitor questionamentos, fazendo-o pensar em cima desta problemática, com as armas que possuí, sem a necessidade de recorrer a gráficos ou desenhos, apenas a um desafio teórico.

Esperamos com confiança que ideias aqui lançadas possam ajudar tanto o profissional como o estudante a olhar de outra maneira para um assunto enigmático, principalmente no tocante à matemática. Que o leitor se sinta capaz de pensar realmente sobre o mundo subatômico, sem ler como num romance, apenas descrições figurativas.

Durante o texto, procuramos nos afastar destas descrições para buscar as razões de por que ser assim. Qual a motivação a se pensar numa alternativa, ou quais evidências levaram ilustres cientistas a propor ideias muitas vezes estranhas.

Desta maneira, apela-se, não à paciência, mas à inteligência e raciocínio, para que possamos entender de que são feitas todas as coisas que nos rodeiam. Longe de esgotada, esta discussão sai enriquecida, viável, à mão.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

[Abdalla, 2005] ABDALLA, M. C. B. “Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares”, *Física na Escola*, v. 6, n. 1, 2005.

[Azzellini] AZZELLINI, G. C. *Notas de Aula curso química*, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www2.iq.usp.br/docente/gcazell/1_OrigemElementos_EstruturaAtomica.pdf>. Acessado em 28 jan 2012.

[Bahiana] BAHIANA, M. *Curso de Mecânica Quântica*, Consórcio CEDERJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://omnis.if.ufrj.br/~marta/cederj/quanta/mq-unid2-textocompl-1.pdf>>. Acessado em 28 jan 2012.

[Bertulani] BERTULANI, C. A. *Projeto de ensino de física à distância*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/nuclear/sizes-2.html>>. Acessado em 28 jan 2012.

[Berg, 2006] BERG, E; HOEKZEMA, D. “Teaching conservation laws, symmetries and elementary particles with fast feedback”, *Physics Education*, 4147, 2006.

[Camargo] CAMARGO, A. J. *Notas de aula do curso de química quântica*. Universidade Estadual de Goiás, Goiânia. o Paulo. Disponível em: <http://www.fisica.ueg.br/ademir/aulas/Apostila_quimica_quantica_V2.pdf>. Acessado em 28 jan 2012.

[Castellani, 2001] CASTELLANI, O. C. “Discussão dos Conceitos de Massa Inercial e Massa Gravitacional”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, p. 356–359, 2001.

[Dabro, 1987] DABRO, A. *The rise of the New Physics*. New York: Dover, 1951.

[Freitas, 2008] FREITAS, L. S. Partículas elementares:do átomo grego ao bóson de higgs. 2008. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. 2008.

[Galante] GALANTE, D. *Notas de aula do curso de cosmologia*. Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~douglas/cosmologia/arquivos/aulas/cap03.pdf>>. Acessado em 28 jan 2012.

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

[Idhe, 1984] IDHE, A. J. *The Development of Modern Chemistry*. Dover Publications, 1984.

[Langford, 1995] C. H. LANGFORD, C. H.; BEEBE, *The Development of Chemical Principles*. Dover Publications, 1995.

[Monteiro, 2009] MONTEIRO, M. A. et al, “A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”, *Ciência & Educação*, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009.

[Moreira, 2004] MOREIRA, M. A. “Partículas e Interações”, *Física na Escola*, v. 5, n. 2, 2004.

[Moreira, 2007] MOREIRA, M. A. “A física dos quarks e a epistemologia”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 2, p. 161-173, 2007.

[Moreira, 2009] MOREIRA, M. A. “O Modelo Padrão da Física de Partículas”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 1306, 2009.

[Nisenbaum] NISENBAUM, M. A. *Estrutura Atômica*. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_estrutura_atomica.pdf>. Acessado em 28 jan 2012.

[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, 1999] OSTERMANN, F. “Um Texto para Professores do Ensino Medio sobre Partículas Elementares”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 21, no. 3, 1999.

[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.

[Ostermann, 2001b] OSTERMANN, F; MOREIRA, M. A. “Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores”, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.18, n.2: p.135-150, 2001.

[ParticleAdventure.org] ParticleAdventure.org, criado por *Particle Data Group*, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Disponível em <<http://www.particleadventure.org>>. Acessado em 28 jan 2012.

[Perozzo, 2008] PEROZZO, C. C. Carla Cristina Perruzi. Um estudo sobre a carta a menecceu: a felicidade na filosofia epicurista. 2008. 143 p. Tese (Mestrado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Sociais, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.

[Silva, 2008] SILVA, P. R. “Interação forte e eletromagnetismo”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, 3305, 2008.

[Siqueira, 2006] SIQUEIRA, M; PIETROCOLA, M. “A transposição Didática aplicada a teoria contemporânea: a física de partículas elementares no ensino médio”, *Anais do X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física*, Londrina, 2006.

Apêndice

Produto Didático

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.

Interação como ação à distância

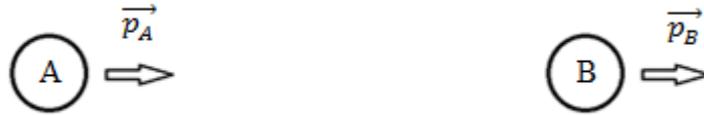
Em 1693, Isaac Newton publicou sua monumental obra, *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, na qual são formuladas as leis da Mecânica, as famosas leis de Newton, e a lei da gravitação universal.

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 Δt , 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 Δt 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.

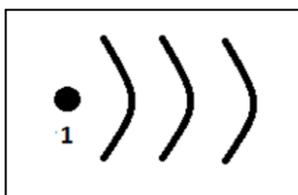
A solução consolidada por James Maxwell (1831 – 1879) exigiu uma nova concepção de interação. A ação à distancia foi substituída pela ação mediada por

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.

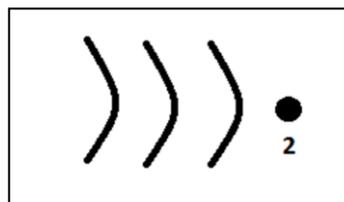
No conceito de campo, cada carga não interage diretamente com a outra, mas com o campo criado. A primeira carga estabelece o campo. A segunda carga interage com esse campo no ponto onde está localizada. O campo tem função de intermediário entre as duas cargas. A força é exercida pelo campo na posição 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.

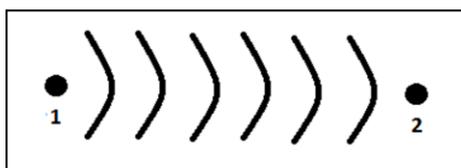
A interação, que antes era vista como à distância, agora é local. A segunda carga interage com o campo na posição do espaço onde se encontra, localmente.



[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.

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

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):

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

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

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

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:

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

Derivando em relação ao tempo obtemos:

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

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.

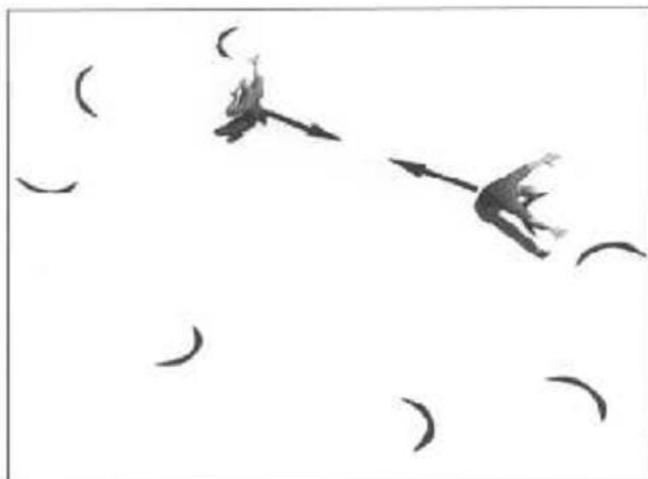
Interação como troca de partículas

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 o 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.

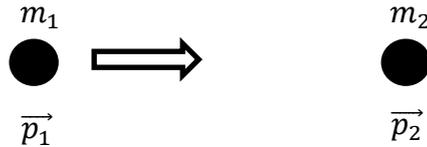
Esta é uma boa oportunidade para provocar uma mudança de paradigma. A dificuldade de encontrar uma boa analogia clássica para a emissão e absorção de partículas reside no fato de que temos que abandonar o quadro puramente clássico e introduzir o princípio da incerteza, envolvendo a energia e o tempo.

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 .



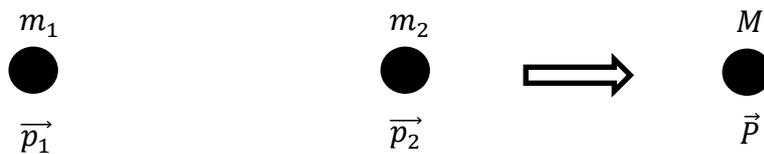
Portanto, antes da colisão o momento é dado por:

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

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:

$$\vec{P}_{depois} = \vec{P}$$

E a energia:

$$E_{depois} = \frac{P^2}{2M} \quad (15)$$

Onde $M = m_1 + m_2$

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):

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

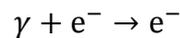
No centro de massa: $p_1 = -p_2$

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

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 (γ) 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.

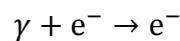
Princípio da Incerteza

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 ΔE desde que sua vida não seja maior do que indicado na equação (Δt). 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

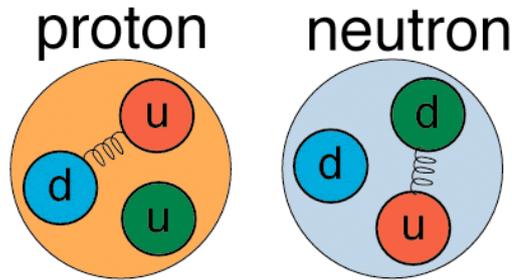
Os físicos Murray Gell-Mann (1929 –) e George Zweig (1937 –) propuseram, independentemente em 1964, que as propriedades de partículas como prótons e nêutrons (hádrons) poderiam ser explicadas por tratá-los como uma trinca de outras partículas.

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 bárion (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] O 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
Elétron	Elétron	e^-
	Neutrino do Elétron	ν_e
Múon	Múon	μ^-
	Neutrino do Múon	ν_μ
Tau	Tau	τ^-
	Neutrino do Tau	ν_τ

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 γ , 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 Z^0 e ao γ não. Este bóson ainda não foi verificado e é objeto de estudo pelo LHC (Large Hadron Colider, ou Grande Colisor de Hádrons).