

Chapter 9

O Sonho da Unificação

Há alguns anos atrás, Stephen Hawking disse que talvez o fim da física teórica estivesse próximo. Eu acho que ele estava se referindo aos recentes sucessos na tentativa de unificar a física dentro de um único sistema descritivo. Parece uma afirmativa bastante provocativa. O que você acha disso, tendo gasto uma vida tentando unificar certos aspectos da física?

Eu gastei uma vida nisso, e por toda a vida vi pessoas acreditando que a resposta estava logo ali na esquina. Mas nunca funcionou. Eddington pensava que com a mecânica quântica tudo seria simples, e fez suposições sobre tudo, porque pensava que tudo era simples, mas pensou errado. Einstein pensava que tinha uma teoria unificada nas mãos, mas não sabia nada sobre núcleos, e obviamente não podia adivinhar. Hoje existem várias coisas que ainda não são compreendidas, e mesmo assim as pessoas acham que estão próximas da resposta. Mas eu acho que não. (*Richard Feynman em **Superstrings. A Theory of Everything?**, P.C.W. Davies e J. Brown, Cambridge 1995*)

9.1 As Quatro Damas da Criação

O que uma bola rolando ladeira abaixo tem a ver com um avião voando, um giroscópio em movimento, ou a órbita da Terra em torno do Sol? Simples: tratam-se de movimentos mecânicos e portanto podem ser todos descritos a partir da mesma equação

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Imagine se para cada um desses fenômenos existisse uma lei física diferente! A segunda lei de Newton os *unifica* sob a mesma categoria. Sendo assim, tudo que temos a fazer é escrever corretamente para cada um deles a expressão de força do lado esquerdo desta equação e resolvê-la, para conhecermos tudo sobre o movimento.

Agora, o que um raio de luz tem a ver com a emissão de partículas beta por núcleos radiativos, ou com a atração da Lua pela Terra? A luz é um fenômeno eletromagnético, partículas beta são emitidas por núcleos pela ação da interação fraca, e a Lua é atraída pela Terra através da ação da força gravitacional. Aparentemente esses são fenômenos cujas origens físicas são completamente desconexas. Ou será que eles podem ser unificados em um nível mais fundamental?

Todos os fenômenos da Natureza são provocados por apenas quatro interações: a forte, a eletromagnética, a fraca, e a gravitacional, assim listadas em ordem de intensidade decrescente. Prótons e nêutrons dentro de núcleos são mantidos juntos pela interação forte. A interação fraca é a responsável pelos processos de decaimento beta nos núcleos atômicos. Uma maçã que cai ou um planeta que se move respondem à

ação da força gravitacional. Uma onda eletromagnética que se propaga, como a luz ou ondas de rádio, ou as reações químicas que ocorrem dentro dos neurônios nos nossos cérebros são devidas a interações eletromagnéticas. E assim por diante. Um fato importante a ser lembrado é que dessas quatro interações somente a gravitacional tem um caráter universal, ou seja, atua sobre toda a matéria, independentemente da carga, ou qualquer outra propriedade. A interação eletromagnética, por exemplo, tem sua origem na carga elétrica, e portanto não atua sobre partículas neutras, como por exemplo os nêutrons.

Mas, porque a Natureza escolheu quatro, e não cinco, ou três, ou dez, interações fundamentais? Ou ainda, porque não somente uma? Imagine se pudéssemos descrever essas quatro interações como originárias de uma única entidade física; uma única interação ou força fundamental da qual todos os fenômenos da Natureza derivariam. É o sonho da unificação!

Os físicos acreditam que de fato esta unificação já existiu durante os primeiros instantes do Universo. Na medida em que este foi se expandindo e se resfriando após o Big Bang, as interações fundamentais foram se separando umas das outras. Como veremos abaixo a ação entre corpos que interagem via uma ou mais dessas forças se dá através de determinadas *partículas*. Por exemplo, a interação eletromagnética entre duas cargas ocorre via uma “troca” de fótons, que são os “mensageiros” do campo eletromagnético. O fato de que as quatro forças estiveram unificadas no início do Universo estabelece uma interessante conexão entre a Cosmologia e a Física de Partículas, e nos leva a questionar se as condições do Universo após o Big Bang poderiam ser repro-

duzidas em aceleradores de partículas na Terra! Falaremos mais sobre isso na seção 9.4. A tabela abaixo, parcialmente compilada do interessante livro de James Trefil, **1001 Things Everyone Should know about Science** (1001 Coisas Sobre Ciência que Todos Deveriam Saber) (Doubleday 1992), resume a evolução do Universo em seus primeiros 10 bilhões de anos. Mais a direita, entre parênteses, são mostradas as temperaturas do Universo em cada momento.

10^{-43} segundos - separação da gravitação das outras forças (10^{32} °C)

10^{-36} segundos - interação forte se separa (10^{29} °C)

10^{-10} segundos - interações fraca e eletromagnética se separam (10^{16} °C)

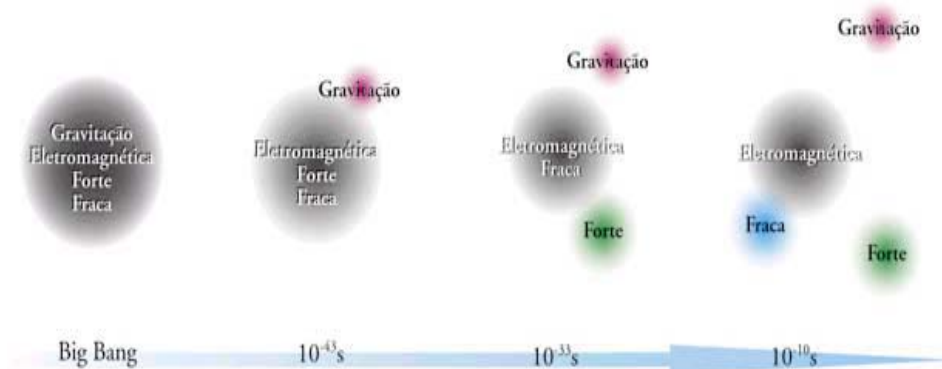
10 microssegundos - partículas são formadas (10^{14} °C)

3 minutos - formação de núcleos de átomos leves (10^{10} °C)

500 mil anos - átomos são formados (10^5 °C)

100 milhões de anos - quasares são formados (10^4 °C)

10 bilhões de anos - estrelas e galáxias são formadas (10^2 °C)



Nos primeiros instantes após o Big Bang as quatro interações fundamentais da Natureza estavam fundidas em uma só. Na medida em que o Universo foi se resfriando, elas se separaram.

9.2 Newton: Unificação do Céu com a Terra

Newton nasceu no ano em que Galileu morreu. Antes de Galileu não existia ciência, na concepção moderna do termo. Galileu pagou um preço alto por ter desafiado o mito aristotélico, a “ciência” oficial, imposta pela Inquisição durante toda a Idade Média. Seus dois grandes trabalhos foram o *Diálogo sobre os dois Principais Sistemas do Mundo*, de 1632, e os *Discursos sobre duas novas Ciências* de 1638. Foi Galileu quem introduziu a idéia de *modelo*, onde a linguagem da física deve ser a matemática e, que na medida do possível, os modelos teóricos devem

ser testados em experimentos de laboratório.

Newton por sua vez costumava dizer que se conseguira enxergar tão longe é porque havia subido sobre ombros de gigantes como Galileu. O método científico iniciado por Galileu foi levado ao seu extremo por Newton, e resultou no *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, onde a primeira grande unificação da física é feita. De fato, a Gravitação Universal de Newton unifica a física do Céu com a física da Terra. Objetos celestes se movem de acordo com as mesmas leis que governam a simples queda de uma maçã na superfície da Terra.

A obra de Newton é dividida em três livros, e é no Livro III onde ele aplica as leis de movimento ao sistema solar, incluindo o movimento da Lua, o problema das marés, o movimento dos planetas em torno do Sol, etc. É neste livro onde Newton enuncia as suas *Regras para o estudo da Filosofia Natural*, abaixo transcritas do livro de Pierre Lucie (**Física Básica. Mecânica 1**, Campus 1979):

Regra 1 - Não se devem admitir outras causas dos fenômenos naturais além das verdadeiras e suficientes para explicar os fenômenos.

Regra 2 - Os efeitos de mesma natureza devem ser sempre atribuídos à mesma causa, no que possível for.

Regra 3 - As qualidades dos corpos, que são suscetíveis de acréscimo ou decréscimo e que pertencem a todos os corpos com os quais é possível experimentar, devem ser consideradas como pertencentes a todos os corpos em geral.

Tivesse Newton enunciado essas regras com cem anos de antecedência, certamente teria virado torresmo em alguma fogueira!

A teoria da gravitação de Newton, hoje com 300 anos, causa grande admiração. Ela teve também um profundo efeito sobre o próprio Newton. Tendo tido uma educação religiosa, escreveu ao final da obra:

Essa ordenação admirável do Sol, dos planetas e dos cometas só pode ser obra de um Ser todo-poderoso e inteligente...

Esse Ser infinito governa tudo, não como a alma do mundo, mas como Senhor de todas as coisas... A dominação de um Ser espiritual é obra de Deus... e fala-se que Ele se alegra, se encoleriza, ama, odeia, deseja, constrói, fabrica, aceita, dá, porque tudo que se diz de Deus procede da comparação com as coisas humanas...

É isso o que eu tinha a dizer de Deus e suas obras constituem o objeto da Filosofia Natural...

Não consegui ainda deduzir dos fenômenos a razão das propriedades da gravitação e não finjo hipóteses. Pois tudo o que não se deduz dos fenômenos é uma hipótese: e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, ou mecânicas, ou de qualidades ocultas, não tem lugar na Filosofia Experimental. Nessa Filosofia, as proposições são deduzidas dos fenômenos e a seguir generalizadas por indução. (Pierre Lucie, Física Básica. Mecânica 1, Campus 1979)

9.3 Maxwell: Unificação da Eletricidade com o Magnetismo e com a Ótica Física

A segunda grande unificação da física ocorre com Maxwell, tendo como principais predecessores o inglês Michael Faraday e o dinamarquês Christian Oersted. Esses dois últimos descobriram conexões entre a eletricidade e o magnetismo. O famoso experimento de Oersted é muito simples, e pode ser realizado em casa com um pedaço de fio, pilhas grandes e uma pequena bússola. Passando uma corrente elétrica pelo fio, o ponteiro da bússola se move. Ou seja, a corrente elétrica gera no espaço um campo magnético.

O experimento de Faraday demonstra a mesma conexão, mas de maneira oposta: um fio formando um circuito fechado através do qual se faz mover um ímã, gera uma corrente elétrica. É a variação temporal do fluxo magnético através do circuito que gera a corrente. Maxwell formalizou essas descobertas em linguagem matemática, escrevendo um conjunto de quatro equações, uma obra de arte conhecida na física por equações de Maxwell. Nas equações de Maxwell, eletricidade é então unificada ao magnetismo. Mais espetacular ainda é o fato de que a partir dessas equações *deduz-se* que campos eletromagnéticos podem se propagar como uma onda, sendo a sua velocidade constante e igual a c , a velocidade da luz. Ou seja, a luz entra para a categoria dos fenômenos eletromagnéticos. A partir daí tudo passa a ser uma questão de comprimento de onda! Ótica e eletromagnetismo passam assim a ser

regidos pelas mesmas leis.

Essas são as duas grandes unificações da Física Clássica. O advento da mecânica quântica levou à descoberta de uma enormidade de novos fenômenos e a uma compreensão muito mais profunda sobre os processos de interação entre partículas na Natureza. A mecânica quântica abriu caminho para novas unificações.

9.4 Partículas Elementares: A Ducha Cósmica

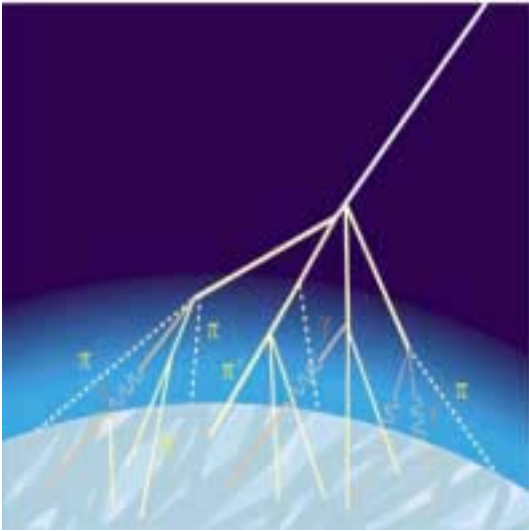
A descoberta da estrutura atômica com seus prótons, nêutrons e elétrons, com o fenômeno da radioatividade, deixaram claro duas coisas: (1) o átomo não é indivisível, e (2) o átomo não é o constituinte elementar da matéria. Este segundo ponto é particularmente importante, e tem sido debatido por cientistas desde os tempos de Demócrito: afinal, do que é feita a matéria? Prótons e nêutrons possuem estrutura interna, ou seja, são constituídos de objetos mais simples. E esses objetos, são por sua vez simples ou também possuem alguma estrutura interna? Existe uma partícula fundamental da qual toda a matéria deriva?

A descoberta da radioatividade na virada do século XX atraiu a atenção de muitos cientistas. Ao final da primeira década, partículas emitidas por núcleos radiativos podiam ser detectadas com facilidade. Um fato estranho que logo atraiu a atenção dos físicos da época era que os aparelhos de detecção registravam a presença de partículas mesmo quando não havia fontes radioativas por perto! De onde estariam vindo essas partículas? Experimentos mostraram que em qualquer lugar elas

estavam presentes, mesmo quando os detectores eram blindados!

Em 1910 um físico (e também padre jesuíta) chamado Theodor Wulf descobriu algo notável. Ele mediu esta radiação misteriosa do alto da torre Eiffel em Paris e verificou que havia mais radiação do que era esperado. O padre-cientista então imaginou que o único lugar de onde a misteriosa radiação poderia estar vindo era do espaço. Ou seja, a origem da radiação misteriosa era extraterrestre! Assim foram descobertos os hoje chamados *raios cósmicos*. Wulf então sugeriu que o experimento poderia ser realizado de dentro de balões, que a grandes altitudes deveriam registrar radiação ainda mais intensa.

Wulf não foi corajoso o suficiente para subir em balões ele mesmo, mas entre 1911 e 1912 o austríaco Victor Hess fez várias medições a altitudes de até 5 mil metros. O padre estava certo! Acima de 1000 metros a radiação cósmica se torna muito intensa, e a 5 mil metros ela é cerca de 5 vezes maior do que ao nível do mar. Hess concluiu que a Terra é constantemente bombardeada por partículas que vêm do espaço, e que são fortemente atenuadas pela atmosfera terrestre. Contudo, ninguém ainda conhecia a natureza dessa radiação. No início pensou-se que os raios cósmicos eram partículas gama de alta energia. Robert Millikan, do California Institute of Technology (Instituto Tecnológico da Califórnia), Caltech, sugeriu que a suposta radiação gama era originária das reações de fusão que ocorrem nas estrelas.



A Terra é permanentemente bombardeada por “partículas extraterrestres” altamente energéticas. Ao penetrarem na atmosfera, essas partículas decaem em outras gerando uma verdadeira chuva: são os raios cósmicos.

Em 1923 um passo decisivo foi dado por Dmitry Skobeltzyn trabalhando em Leningrado. Ele resolveu colocar seu detector de partículas entre os pólos de um ímã para se livrar dos elétrons que eram produzidos quando os supostos gamas atingiam as paredes do detector. Lembre do capítulo um que um campo magnético desvia a trajetória de partículas carregadas como o elétron. Quando atingiam o detector, os supostos raios gama arrancavam elétrons das suas paredes internas, que acabavam por mascarar a observação das partículas extraterrestres. Aplicando então um campo magnético, Skobeltzyn pensou que se livraria assim dos indesejáveis elétrons. O detector utilizado era uma câmara de Wilson (veja Painel XVII), onde a presença da partícula é acusada por um rastro deixado ao longo de sua trajetória. Além das tra-

jetórias dos elétrons de que Skobeltzyn queria se livrar, havia alguns traços quase retos indicando a presença de partículas altamente energéticas. Contudo, Skobeltzyn continuou ainda achando que se tratava de elétrons arrancados das paredes do detector pelos raios cósmicos.

XVII

A CÂMARA DE WILSON

O princípio de funcionamento da câmara de Wilson é semelhante ao efeito que leva os aviões que voam muito alto deixarem um rastro no céu. Aqueles rastros aparecem devido à condensação de vapores de água em torno da turbina do avião, deixando assim um desenho da sua trajetória no céu. A invenção de Wilson foi utilizada nos primeiros experimentos de detecção de partículas subatômicas.

Charles Wilson era um jovem físico que estudava fenômenos atmosféricos em um observatório meteorológico em 1894. A fim de reproduzir certos efeitos em laboratório, ele decidiu construir uma câmara que pudesse encher com vapor de água. A câmara continha um pistão com o qual ele controlava a pressão dentro dela. Ao expandir subitamente o volume do recipiente, o gás se resfriava produzindo uma névoa dentro da câmara. Durante esses experimentos Wilson notou a formação de traços no vapor de água. Ele sabia que os traços estavam se formando em torno de “alguma coisa”, que ele concluiu se tratar de partículas carregadas que atravessavam a câmara. Posteriormente ele repetiu os experimentos atravessando partículas alfa e beta pelo aparelho, confirmando as suas previsões. Era a primeira vez que partículas subatômicas se tornavam “visíveis”. Os experimentos foram realizados no Laboratório Cavendish, em Cambridge, na Inglaterra. Pelo seu invento Wilson recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1927.

Em 1930 Carl Anderson, aluno de Millikan no Caltech, teve uma idéia: colocou uma folha de chumbo atravessada na câmara a fim de frear essas partículas de alta velocidade. Com isso ele esperava que as partículas emergindo do outro lado da folha tivessem uma velocidade menor, e poderiam assim ser melhor defletidas pelo campo magnético. O resultado foi outro momento mágico da história da física. As partículas foram defletidas em uma direção *contrária* à dos elétrons, ou seja, elas eram na verdade carregadas positivamente¹. Mas havia algo bizarro: o raio da trajetória revelava uma partícula com a mesma massa que a dos elétrons. Ou seja, tratava-se de uma espécie de “elétron positivo”. Era a primeira observação do *pósitron*. Estava assim fundada a Física de Partículas.

O pósitron é uma das partículas que formam a chamada *antimatéria*. Este não é, convenhamos, um nome muito feliz, porque sugere que antimatéria seja algo contrário à matéria. Uma partícula de antimatéria é idêntica a uma de matéria, sendo a única diferença entre elas a carga elétrica. Cada partícula de matéria possui sua contrapartida de antimatéria. A existência do pósitron havia sido prevista teoricamente em 1927 pelo físico britânico Paul M. Dirac, o homem que inventou a *mecânica quântica relativística*. Portanto, o resultado de Anderson foi outro grande triunfo das físicas teórica e experimental!

A física de partículas se desenvolveu enormemente, e grande parte da história da física neste século, é de fato a história da física de partículas. Centenas de partículas foram descobertas. Uma delas tem

¹Lembre do Cap. 1 que para direções fixas dos vetores \mathbf{v} e \mathbf{B} , a direção da força de Lorentz é determinada pelo sinal da carga: $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

um significado especial para nós brasileiros, o pión, que está associado ao nome de Cesar Lattes, físico brasileiro, um dos fundadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

PAINEL XVIII
VIDA E OBRA DE CESAR LATTES²

Cesare Mansueto Giulio Lattes, ou simplesmente Cesar Lattes, é curitibano nascido a 11 de julho de 1924. Sua carreira científica teve enormes repercussões para o desenvolvimento da física no Brasil. Seu trabalho mais importante foi feito com Giuseppe Occhialini e Cecil Powell durante a década de 40 sobre partículas elementares. Primeiramente eles expunham chapas fotográficas altamente sensíveis a 2.800 metros de altitude nos montes Pirineus. A idéia era de que partículas da radiação cósmica penetrassem nas chapas, e a partir dos traços deixados pudessem ser identificadas. Posteriormente Lattes expôs chapas fotográficas a 5.600 metros de altitude no Monte Chacaltaya, na Bolívia, e a partir da sua análise confirmou a existência do méson- π . A participação de Lattes também foi decisiva para o sucesso dos primeiros experimentos que produziram essas partículas no laboratório Lawrence Berkeley, na Califórnia, marcando o início da física de aceleradores.

A repercussão internacional do trabalho de Lattes resultou no Brasil na criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), hoje um dos institutos de pesquisa do Ministério da Ciência e Tecnologia, localizado no Rio de Janeiro. Durante meados dos anos 50, trabalhando nos Estados Unidos, Lattes foi convidado a substituir Enrico Fermi na chefia do Instituto de Física da Universidade de Chicago, tendo contudo recusado o posto. Criou na Universidade de São Paulo (USP) um laboratório para o estudo da radiação cósmica, e participou da criação da Universidade de Campinas. Deu várias outras contribuições importantes para a física, e recebeu vários prêmios e honrarias.

²Veja o livro *Cesar Lattes, a descoberta do méson π e outras histórias*, Eds. F. Caruso, A. Marques e A. Troper, CBPF (1999).

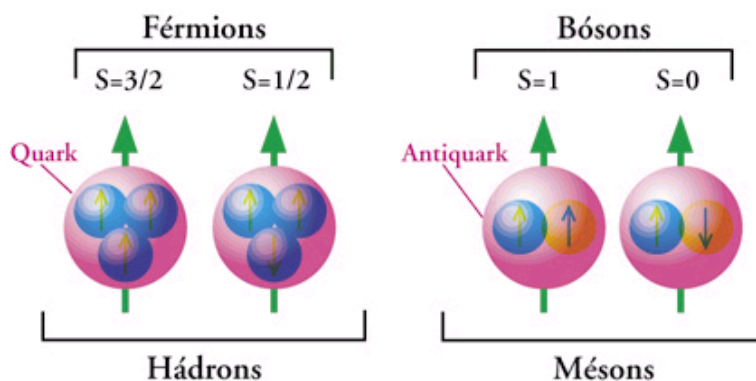
Mas, o que isso tudo tem a ver com a unificação das quatro interações fundamentais? Calma, o Brasil (ainda) é nosso! Nós vamos chegar lá!

Partículas são classificadas de acordo com seus atributos físicos, como a carga e a massa. Nós já vimos um tipo de classificação segundo o spin, no capítulo três. Partículas com spin semi-inteiro são férmions, e aquelas com spin inteiro são bósons. De acordo com a massa, as partículas são divididas em *léptons* - as mais leves, como elétrons, pósitrons e neutrinos; os *mésons* - de massa intermediária, como o pión, e os *hádrons* - partículas pesadas, como prótons e o nêutrons³.

Os léptons são considerados partículas elementares, ou seja, que não possuem estrutura interna. Ao contrário, os mésons e hádrons não são elementares, mas sim formados a partir de partículas ainda menores chamadas de *quarks*. Quarks possuem spin $1/2$, e portanto também são férmions. Cada quark possui um *antiquark* associado. Hádrons são formados por combinações de quarks, de duas maneiras possíveis: na primeira 3 quarks se combinam, de modo que o spin total da partícula formada será $1/2$ ou $3/2$. $S = 1/2$ significa que dois dos três quarks possuem spins antiparalelos, e $S = 3/2$ significa que os três spins são paralelos. Qualquer que seja a combinação, a união de 3 quarks resulta sempre em um férmion. A segunda opção é a combinação de um quark com um antiquark, e neste caso o resultado é um bóson, com $S = 1$ (spins paralelos) ou $S = 0$ (spins antiparalelos). Quanto à sua massa, a partícula formada neste caso é um méson.

³Uma tendência mais atual é classificar os léptons como aquelas partículas que não sentem a interação forte.

Resumindo: partículas são classificadas de acordo com sua massa em léptons, mésons e hádrons. Léptons são partículas elementares, ou seja, não possuem estrutura interna. Mésons são formados por um quark e um antiquark, e portanto são bósons. Hádrons são formados por três quarks, e portanto são férmions.



Mésons são formados por um quark e um antiquark, e portanto são bósons. Hádrons são formados por três quarks e portanto são férmions.

Existe outra coisa importante a ser dita acerca dos quarks. Considere um hádron como o próton. Ele possui spin $1/2$ e carga $+e$. O spin do próton, de acordo com o que foi dito acima, deriva da combinação dos spins de dois quarks que se alinham antiparalelamente e se anulam, restando apenas o spin de 1 quark. Mas, e com relação à carga do próton, como explicá-la em termos da carga dos quarks? É um fato que e é a carga elementar, ou seja, a unidade fundamental de carga. Para 3 quarks se combinarem e dar origem a um próton com carga igual a e , a carga de cada um deles deveria ser $e/3$, ou seja, uma

fração da carga elementar. Acontece que, até hoje, nunca uma partícula foi observada com tal valor de carga, caso contrário a carga elementar não seria elementar! A maneira de contornar o problema é dizer que os quarks nunca podem ser observados separadamente. Ou seja, eles estão sempre “grudados” uns nos outros formando mésons e hádrons. Nos referimos a esta situação como o *confinamento dos quarks*. Quarks só existem confinados, e não podem ser observados isoladamente.

Chegamos portanto a uma conclusão importante: como os quarks são férmions, e os léptons também, os “blocos fundamentais” da matéria são os férmions. Assim, não existe uma única partícula da qual toda a matéria deriva, mas uma “categoria”, os férmions, que forma toda a matéria⁴.

Vamos agora examinar um importante *bóson* fundamental: o quantum da radiação eletromagnética, o fóton. Ele possui spin 1 e carga zero. Quando dizemos por exemplo que cargas elétricas se repelem de acordo com a lei de Coulomb, nada está sendo afirmado a respeito do mecanismo de repulsão (ou atração). O mesmo ocorre com os planetas: o Sol atrai a Terra de acordo com a lei da gravitação de Newton. Mas qual o mecanismo? As expressões matemáticas

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad \text{ou} \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$

simplesmente descrevem a dependência funcional da força com as massas (ou cargas) e a distância entre os objetos interagentes. Elas nos

⁴Aqui uma observação importante: de acordo com a sua *massa*, quarks deveriam ser classificados como léptons. Mas, se classificarmos os léptons como partículas que não sentem a interação forte, quarks não podem ser classificados como tal. A partícula “mensageira” da interação forte é o *glúon*. Quarks ligam-se entre si trocando glúons.

dizem de quanto a força varia quando as massas, cargas, ou distâncias variam. Nada afirmam sobre *como* a interação se propaga de um objeto ao outro.

Aqui entram os bósons. Segundo a mecânica quântica dos campos eletromagnéticos, uma carga elétrica interage com outra carga elétrica, a atraindo ou repelindo, via *troca de fótons*. Ou seja, o fóton é uma espécie de mensageiro da interação eletromagnética. Veja como essa idéia é interessante, e possui um aspecto unificador poderoso: uma partícula carregada interage com outra partícula carregada, trocando partículas de campo. *Não só a matéria é feita de partículas fundamentais, mas também as interações entre objetos materiais!* Nesta perspectiva, tudo o que existe são partícula: férmions interagindo com férmions através de bósons formam tudo o que existe! No capítulo seis vimos algo semelhante na matéria condensada, onde as interações entre átomos, elétrons e spins se dá através de fônons, mágnons, etc, que também são partículas de interação dentro da matéria.

As outras interações fundamentais também possuem suas partículas associadas. No caso do campo gravitacional a partícula é o *gráviton*, no caso da interação forte são os *glúons* os mensageiros de campo, e no caso da interação fraca existem 3 partículas mensageiras, chamadas de W^+ , W^- e Z^0 .

9.5 Unificação Eletrofraca

A interação *eletrofraca* unifica as interações eletromagnética e fraca. A chamada teoria eletrofraca foi alcançada por Sheldon Lee Glashow,

Abdus Salam e Steven Weinberg, que foram agraciados com o Nobel de 1979. No Brasil, o nome de José Leite Lopes, um dos fundadores do CBPF, está associado a propostas que foram importantes para o desenvolvimento da teoria eletrofraca.

Um exemplo de processo envolvendo o bóson W^- é o decaimento beta de um nêutron em um próton. A teoria eletrofraca de Glashow-Weinberg-Salam postula que a altas energias as interações eletromagnética e fraca são equivalentes; partes de uma mesma teoria. Nesta situação as partículas mensageiras da interação seriam partículas sem massa. A baixas energias, contudo, como por exemplo no processo de decaimento de um nêutron em um próton, esta equivalência entre as interações eletromagnética e fraca deixa de existir (dizemos que há uma quebra de simetria), e as partículas mensageiras, que a altas energias não possuem massa, tornam-se os bósons W^\pm e Z^0 .

PAINEL XIX
VIDA E OBRA DE JOSÉ LEITE LOPES

José Leite Lopes, com César Lattes, é um dos nomes mais importantes da ciência do Brasil no século XX. Nascido no Recife no dia 28 de outubro de 1918, ingressou no Curso de Física da Faculdade Nacional de Filosofia, do Rio de Janeiro em 1940. Em 1944 seguiu para os Estados Unidos para fazer o doutoramento na prestigiada Universidade de Princeton, onde trabalhavam na época Wolfgang Pauli e Albert Einstein, tendo recebido o título de Ph.D em 1946. Em 1949, com Lattes, fundou o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, para logo depois retornar à Princeton como pesquisador, a convite de J.R. Oppenheimer. Em 1958 realizou importante trabalho sobre a natureza da interação fraca, onde vários resultados foram confirmados posteriormente na teoria de Glashow, Weinberg e Salam. Foi professor da Universidade de Orsay, na França, entre 1964 e 1967, e depois diretor do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Retornou à França em 1970 a convite da Universidade de Estrasburgo, onde permaneceu até 1985. Atualmente é Pesquisador Titular do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

A teoria eletrofraca faz diversas previsões, entre as quais os valores das massas dos bósons W^\pm e Z^0 . Em física de partículas é costume expressar as massas das partículas não em unidade de massa (kg), mas em unidade de energia (eV). Para isso basta multiplicar a massa da partícula por c^2 , o quadrado da velocidade da luz. Nesta unidade, a teoria eletrofraca prevê os seguintes valores para as massas das partículas da interação:

$$m_W c^2 = 82 \text{ GeV}$$

$$m_Z c^2 = 93 \text{ GeV}$$

onde ‘GeV’ significa *gigaelectronvolts*, o equivalente a bilhões de electronvolts. A vantagem de se expressar a massa de uma partícula em unidades de energia reside no fato de que o valor obtido nos dá diretamente uma idéia da energia necessária para produzi-la em laboratório. Em termos de unidades de massa, as partículas acima são aproximadamente 100 vezes mais pesadas que o próton! Veja que coisa estranha: o decaimento de um nêutron em um próton envolve uma partícula mensageira que é 100 vezes mais pesada que o próprio nêutron! É a equivalência entre massa e energia descoberta por Einstein que dá origem a esse tipo de coisa.

As primeiras evidências da existência das partículas W^\pm e Z^0 apareceram em 1983 em experimentos realizados no CERN por um time de cientistas liderados pelo físico italiano Carlo Rubbia. As partículas não são detectadas diretamente, mas através dos seus produtos de decaimento mostradas a seguir:

$$W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu$$

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$$

Dos resultados experimentais eles obtiveram os seguintes valores de massa para os bósons da interação eletrofraca:

$$m_W c^2 = 80,8 \pm 2,7 \text{ GeV}$$

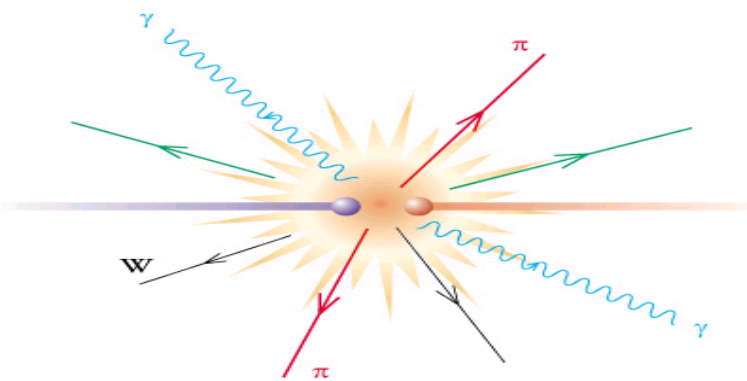
$$m_Z c^2 = 92,9 \pm 1,6 \text{ GeV}$$

Bingo! Os resultados experimentais estão de pleno acordo com as previsões da teoria eletrofraca de Glashow-Weinberg-Salam. Resultado: unificação das interações fraca e eletromagnética confirmada, e Carlo Rubbia embolsando o Estocolmo de 1984.

9.6 É Possível Recriar o Universo em um Laboratório?

Partículas elementares podem ser criadas em máquinas chamadas *aceleradores de partículas*. Um acelerador possui algumas semelhanças com um simples tubo de televisão, onde elétrons são emitidos de um filamento e acelerados por uma tensão elétrica através do tubo até atingir a tela do aparelho. Em um acelerador, partículas altamente energéticas são lançadas contra alvos. A idéia é que ao colidir com o alvo, a partícula literalmente se despedaça, e sua estrutura interna é revelada. Desse modo teorias sobre partículas elementares e suas interações podem ser testadas. Por exemplo, no experimento de Carlo Rubbia um feixe de prótons foi acelerado a uma energia de 270 GeV e feito colidir com um feixe de antiprótons (a antipartícula do próton), também a

270 GeV. Com essa energia o próton e o antipróton se despedaçaram deixando “escapar” os bósons W^\pm e Z^0 previstos pela teoria eletrofraca.

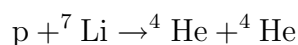


A física de partículas estuda os produtos de colisões entre partículas altamente energéticas, e a partir deles tenta descobrir a estrutura interna das partículas que colidiram.

O projeto de um acelerador depende do uso a que ele se destina. Eles são classificados, de acordo com sua energia, em aceleradores de baixa, média ou alta energia. Os de baixa energia produzem feixes de partículas entre 10 e 100 MeV e são em geral utilizados em estudos de reações nucleares ou espalhamento. Aceleradores de média energia operam na faixa de 100 a 1000 MeV (1000 MeV = 1 GeV). Colisões de prótons e nêutrons com energias dessa ordem são capazes de liberar mésons π , a partícula associada à interação forte nos núcleos. Tais aceleradores são em geral usados no estudo da natureza desta interação. Aceleradores de alta energia, por sua vez, operam acima de 1 GeV e produzem partículas elementares. É mais ou menos como quebrar um

daqueles relógios suíços, cheios de pecinhas e engrenagens delicadas. Se dermos uma pancada fraquinha, quebraremos somente o mostrador. Com uma pancada mais forte, além do mostrador quebraremos também os ponteiros. Mas se batermos com muita força, o relógio se despedaça. Catamos então as delicadas pecinhas espalhadas pelo chão, e tentamos adivinhar como elas estavam montadas e funcionando no relógio antes da pancada ser dada!

Partículas carregadas são aceleradas quando atravessam diferenças de potencial elétrico. O primeiro acelerador eletrostático foi construído em 1932 por Cockcroft e Walton; ele gerava potenciais da ordem de 800 kV. Com este acelerador foi produzida a primeira reação de desintegração nuclear mostrada abaixo:



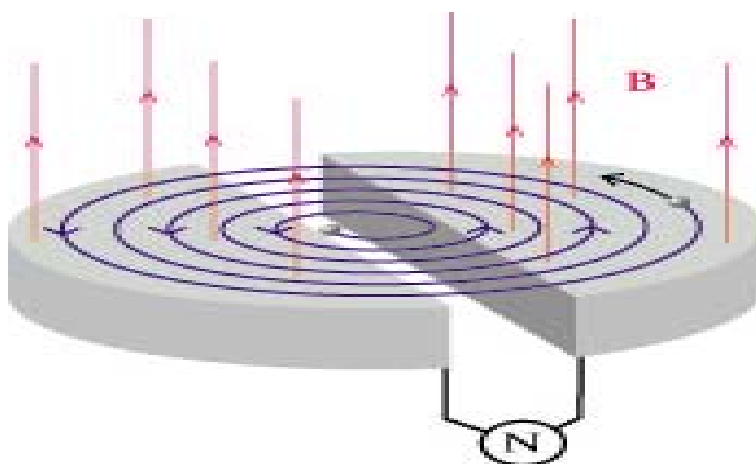
Os primeiros aceleradores eletrostáticos evoluíram para os chamados *geradores de Van de Graaff*, onde um eletrodo é continuamente carregado até produzir tensões elétricas de milhões de volts. Essa tecnologia tem produzido aceleradores que operam acima de 20 milhões de volts, e feixes de íons com energias na faixa de dezenas a centenas de MeV.

Em aceleradores eletrostáticos as partículas são aceleradas em um único estágio. Os chamados *aceleradores cíclotron* apresentam uma alternativa. A partícula carregada é acelerada em um anel circular, e a cada volta recebe um acréscimo de energia cinética através de um pequeno aumento de uma diferença de potencial eletrostático, desse modo alcançando energias da ordem de MeV. Em um acelerador deste tipo a

partícula orbita dentro de uma espécie de câmara circular dividida em duas metades. Um campo magnético é aplicado perpendicularmente ao plano da câmara de modo a curvar a trajetória da partícula. Uma voltagem elétrica é aplicada no hiato que separa as duas metades, de modo que a cada volta da partícula ela recebe um aumento de energia cinética. Para que o mecanismo funcione, é necessário que a tensão elétrica seja aplicada em exato sincronismo com o movimento da partícula. Este ganho de energia ocasiona um aumento do raio da órbita da partícula, cujo valor máximo dependerá das características da máquina. Na órbita de raio máximo, a energia cinética da partícula será dada por:

$$T = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

onde q é a carga da partícula, B o valor do campo magnético, R o raio da órbita máxima, e m é a massa da partícula. Esta fórmula mostra que para aumentarmos a energia da partícula temos que aumentar o raio de sua órbita, e conseqüentemente as dimensões do acelerador. Obviamente aumentar as dimensões do acelerador significa aumentar o tamanho do magneto utilizado para mantê-la. Atualmente cíclotrons podem acelerar partículas a energias da ordem de 500 MeV. Uma máquina de 1 GeV teria um custo absurdo, principalmente devido à construção do magneto. Alternativas tiveram que ser encontradas.

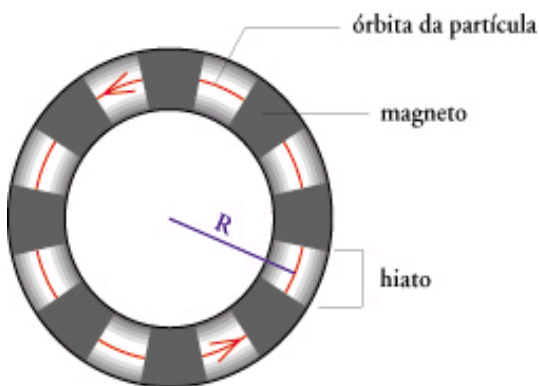


Nos aceleradores ciclotrons, partículas carregadas são aceleradas em trajetórias circulares antes de colidirem. O raio da órbita aumenta com a energia da partícula.

Os chamados *síncrotrons* vieram solucionar (parcialmente) o problema. Ao contrário dos ciclotrons, as partículas nos síncrotrons possuem uma trajetória com raio fixo. Ao invés de um único magneto, um acelerador síncrotron utiliza vários magnetos que desviam a órbita da partícula em seções. A energia da partícula é, como no caso dos ciclotrons, aumentada a cada volta através da aplicação de um campo elétrico em um hiato, em sincronia com o movimento.

Partículas são injetadas no anel de um acelerador síncrotron através de um acelerador linear. As primeiras máquinas apareceram no início dos anos 50 e podiam gerar feixes de partículas com várias centenas de MeV. Os dois principais aceleradores deste tipo atualmente no mundo estão no CERN, que é um laboratório conjunto de vários países europeus, localizado em Genebra, Suíça, e no FERMILAB (Fermi Na-

tional Accelerator Laboratory) em Chicago, nos Estados Unidos. O acelerador do CERN é chamado de SPS (Super Proton Synchrotron). Ele acelera prótons a energias de 400 GeV. Partículas são injetadas no anel do acelerador com uma energia de 26 GeV. O diâmetro do anel é de 2,2 km, e atravessa a fronteira entre a Suíça e a França. Foi no CERN que a teoria da interação eletrofraca foi confirmada experimentalmente.



Nos síncrotrons o raio da trajetória da partícula acelerada é fixo. O anel de um síncrotron é seccionado em vários campos magnéticos que mantêm as partículas em suas trajetórias.

O acelerador do FERMILAB possui um diâmetro de 2 km, e pode acelerar partículas a estonteantes energias de 1000 GeV, ou 1 TeV (= teraelétronvolts = trilhão de elétronvolts). Ele é conhecido como um *tevatron*. Não só a energia do acelerador é exuberante, mas todos os números ligados à atividade científica que ali se desenrola: são mais de 2000 empregados, cerca de 1000 físicos de mais de 200 países e, quando em completa operação, consome cerca de 60 megawatts de eletricidade,

o suficiente para alimentar uma cidade com 175 000 habitantes. O acelerador opera abaixo do chão. Acima dele existe uma rodovia para facilitar o deslocamento de um lado ao outro do anel. Cerca de 10^{13} prótons por minuto circulam dentro de tubos de aço inox com diâmetro de cerca de apenas 10 cm. Nada menos que 2000 magnetos são utilizados na operação do feixe.

Espera-se que entre em funcionamento no CERN uma nova geração de aceleradores até 2005: o LHC (Large Hadron Collider), e o NLC (New Lepton Collider). O primeiro será utilizado em experimentos de colisão do tipo próton-antipróton, e o segundo em experimentos do tipo elétron-pósitron. Essas máquinas operarão com energias na faixa de TeV e várias previsões teóricas poderão ser verificadas, como por exemplo, a existência de um verdadeiro zoológico de novas partículas com massas entre 400 GeV e 1 TeV: o *selectron*, o *squarks*, o *photino* (férmion massivo e neutro, parceiro do fóton), o *Z-ino*, o *W[±]-ino* e o *gluino*. Santo Deus!

Nessas máquinas, partículas serão aceleradas e feitas colidir umas contra as outras. Devido às altas energias alcançadas, espera-se nesses experimentos produzir, em uma região ínfima do espaço, a situação do Universo no momento da sua criação. Em outras palavras, estes experimentos visam “recriar” o Universo em um laboratório de física, e revelar a estrutura das interações fundamentais tais como elas eram há 15 bilhões de anos atrás!

PAINEL XX
O LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON

O Brasil também possui um acelerador síncrotron, que é utilizado na pesquisa em Matéria Condensada, e não em Física de Partículas. O LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron) localiza-se em Campinas, no estado de São Paulo, e as primeiras discussões a respeito do projeto de sua construção foram realizadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

O acelerador é um *anel armazenador de elétrons*. Quando acelerados em órbitas circulares, elétrons emitem um tipo de radiação chamada de *luz síncrotron*. Esta radiação é utilizada para a investigação das propriedades físicas de diferentes tipos de materiais, a nível atômico e molecular. Exemplos de aplicações são estudos de processos de corrosão e fadiga em estruturas metálicas, estudo de propriedades magnéticas de novos materiais, estudo de catalisadores para a indústria petroquímica, estudo das propriedades de polímeros, semicondutores, etc.

O LNLS é o único laboratório deste tipo no Hemisfério Sul. Ele foi inteiramente projetado, desenvolvido e é operado por cientistas, engenheiros e técnicos brasileiros.

9.7 Gravitação: outra Pedra no Caminho!

Os físicos acreditam que a interação gravitacional se separou das outras forças quando o Universo tinha apenas 10^{-43} segundos de idade. Não é difícil perceber que as energias envolvidas a esta altura da vida do Universo estão completamente além da capacidade de qualquer acelerador de partículas que possa ser construído na Terra! Estima-se em 10^{19} GeV a energia necessária para tornar visível a unificação da gravitação com as outras forças (lembre que o mais potente acelerador no momento é o do FERMILAB com seus “meros” 10^3 GeV).

Mas a gravitação possui outros problemas fundamentais que estão deixando os físicos “carecas”. Por um lado, em uma escala cosmológica, existe a teoria de Einstein da relatividade geral. Apesar de sua elegância e consistência interna, esta teoria está necessariamente incompleta. A razão é que ela nada diz sobre efeitos quânticos⁵. A tentativa de conciliação entre a mecânica quântica e a relatividade geral tem sido o “ganha-pão” de muita gente inteligente pelo mundo afora, mas até agora sem sucesso. As primeiras tentativas apareceram de fato poucos anos após a publicação da relatividade geral por Einstein em 1916. Um matemático alemão chamado Theodor Kaluza reformulou a teoria de Einstein em 5 dimensões (4 espaciais e 1 temporal) ao invés de 4 (3 espaciais e 1 temporal), e como resultado obteve não só as equações de Einstein da gravitação, mas também as de Maxwell do eletromagnetismo! O problema da teoria de Kaluza é que ela vai de encontro à própria relatividade, que afirma que vivemos em um mundo quadridi-

⁵Talvez porque Einstein fosse um forte opositor à teoria quântica!

mensional e não pentadimensional! Em 1926 o físico sueco Oscar Klein veio com uma saída no mínimo estranha, mas muito criativa. Ele disse que nós não percebemos a suposta “quinta dimensão” postulada na teoria de Kaluza simplesmente porque ela está dobrada (ou compactada) sob a forma de um tubo com o diâmetro incrivelmente pequeno, de 10^{-32} metros! A teoria de Kaluza-Klein foi na época considerada uma mera curiosidade matemática.

PAINEL XXI
O MODELO PADRÃO

O modelo teórico que descreve as famílias de partículas elementares existentes e suas interações é conhecido entre os físicos como o *Modelo Padrão*. As partículas de matéria são os léptons e os quarks. Existem ao todo seis léptons. Além do já conhecido elétron, os outros léptons são: o *múon*, o *tau*, e três neutrinos. Os quarks também aparecem em número de seis, e possuem nomes esquisitos: o *up*, o *down*, que formam prótons e nêutrons, e os outros: o *strange*, o *charm*, o *bottom* e o *top*. Até 1995, cinco dos seis quarks haviam sido detectados em experimentos com aceleradores, exceto o top. A razão para isso é a sua massa, muito maior do que a massa das outras partículas. O top foi finalmente produzido no FERMLAB por um time de centenas de cientistas, técnicos e engenheiros. A descoberta contou com a participação de vários brasileiros vinculados ao Laboratório de Altas Energias (LAFEX) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

A descoberta do top quark foi de tremenda importância, porque confirmou as previsões do Modelo Padrão, reforçando nossas idéias sobre os elementos constituintes da matéria e suas interações. Além disso, o top quark pode ajudar a esclarecer uma questão ainda muito mais fundamental, e que ainda não sabemos responder: porque afinal de contas a massa existe, e de onde ela aparece?

O top quark aparece de colisões entre prótons e antiprótons que são acelerados uns contra os outros. A cada colisão, dezenas de partículas são criadas, uma delas podendo ser um top quark. A detecção não é feita diretamente, mas através dos produtos de decaimento do top, e a proporção dos eventos que indicam a sua presença em relação a todos os outros é somente de um para vários bilhões! As partículas criadas deixam traços de suas trajetórias, que são analisadas por programas de computadores que tentam “garimpar” a presença do top.

A despeito de seu sucesso, os físicos começam a ter razões para acreditar que o Modelo Padrão não é - ainda - a suprema teoria da matéria. O modelo prevê que os três neutrinos associados ao elétron, ao múon e ao tau não possuem massa de repouso (do mesmo modo que o fóton). O ano de 1998 pode vir a ser lembrado como

aquele em que esta crença foi por terra - e com ela o Modelo Padrão! Em junho deste ano, pesquisadores americanos e japoneses apresentaram evidências experimentais de que neutrinos podem ter massa. Esta massa seria somente algo entre 0,01 e 0,1 eV (para efeitos de comparação, a massa de repouso do elétron é de 500 mil eV). Mas como para cada elétron existem 600 milhões de neutrinos (neste exato momento você está sendo atravessado por trilhões deles!) uma pequena massa de 0,1 eV seria suficiente para explicar uma boa parte da massa “invisível” do Universo (a chamada *matéria escura*, ou *dark matter*, em inglês). Essas descobertas recentes jogam nova luz e injetam novo ânimo na Física de Partículas.

9.8 Teorias de Tudo

A despeito das enormes dificuldades em se formular uma teoria que unifique as forças da Natureza, os físicos (pelo menos grande parte deles) seguem firmes na crença de que um dia isso será possível. Nesta pretensão, tudo o que existe seria derivado de um único princípio. A física teórica teria então chegado de fato ao seu objetivo supremo: uma *teoria de tudo*. É preciso entender que tal teoria não necessariamente seria capaz de reproduzir ou prever detalhes experimentais de sistemas físicos particulares, como por exemplo, o movimento de uma ameiba. O que se entende por uma teoria de tudo é uma teoria que aglutinasse em um só princípio todas as forças da Natureza. Como afirmou Leon Lederman, ex-diretor do FERMILAB, esta unificação deveria ser expressa por uma simples fórmula matemática que você poderia usar na sua camiseta!

Indicações de que tal superteoria poderia ser de fato formulada apareceram somente no início dos anos 80. A história começa, contudo, no final dos anos 60, quando Gabrielle Veneziano estudava a interação forte entre hádrons produzidos em aceleradores. Para explicar dados experimentais, Veneziano propôs um modelo em que as partículas não eram vistas como pequenos objetos localizados no espaço, mas como pequenas *cordas* vibrantes. Essa idéia, que está claramente em contraste com todas as teorias físicas até então formuladas em termos de partículas localizadas, inicialmente não chamou muito a atenção. A partir dos anos 70, contudo, com o trabalho principalmente de John Schwartz e Michael Green a idéia de representar a matéria como cor-

das vibrantes ganhou força e se transformou no esquema de unificação mais promissor já alcançado pelos físicos, principalmente por incluir o *gráviton*, a partícula mensageira do campo gravitacional. Tal é a *teoria de supercordas* (ou *superstrings*). Nesta teoria partículas são representadas pelos modos de vibração dessas cordas. É como se cada partícula fosse uma “nota musical” em um instrumento de cordas. Controversa, e ainda cheia de dificuldades conceituais, a teoria chamou a atenção de grandes nomes da física teórica contemporânea, dividindo as opiniões. Para terminar esse capítulo (e o livro!) transcrevemos o depoimento de algumas figuras centrais envolvidas no problema, compilados do livro de P.C.W. Davies e J. Brown **Superstrings. A Theory of Everything?**.

O que seriam essas cordas? Devemos imaginar partículas como elétrons ou quarks como feitas de cordas que existem dentro delas? Seriam anéis, ou algo assim?

John Schwartz (Professor de Física do Caltech) - Bem, eu expressaria isso um pouco de forma diferente. Uma corda pode vibrar e oscilar de maneiras diferentes. Cada uma dessas maneiras pode ser vista como um tipo de partícula diferente. Ou seja, o elétron é um modo normal de vibração da corda, um quark é um outro, o gráviton outro, etc.

Então não devemos mais pensar no mundo como feito de partículas, mas de pequenas cordas que oscilam?

Edward Witten (Instituto de Pesquisas Avançadas de Princeton) - Certo. Quando pensamos em partículas, devemos lembrar que desde o advento da mecânica quântica, tudo no mundo passou a ser visto

como um pouco incerto, um pouco “borrado”. Na teoria de cordas, essas partículas “borradas” são substituídas por pequenas cordas.

Qual o tamanho dessas cordas?

A corda que corresponde ao elétron possui cerca de somente 10^{-33} centímetros de comprimento, e portanto é infinitamente menor do que um átomo.

A teoria de supercordas se transformará em uma Teoria de Tudo?

Michael Green (Professor de Física, Queen Mary College - Londres) - Deixe-me dizer que é porque entendemos tão pouco da estrutura da teoria, que tenho objeções a esta terminologia que é frequentemente usada, esta “Teoria de Tudo”. Não sabemos as previsões da teoria, e não sabemos nem mesmo as perguntas que devem ser feitas. Tenho a impressão de que ao compreendermos a teoria de uma maneira mais profunda, questões serão levantadas, e provavelmente não terão respostas. Acho que a denominação “Teoria de Tudo” é neste momento uma afirmativa de que ela pode vir a responder questões importantes em física de partículas.

Você acha que temos o direito de supor que a Natureza é unificada - que existem fórmulas matemáticas que podem conter toda a realidade?

Richard Feynman (Professor de Física do Caltech - Prêmio Nobel de Física de 1965) - Em nosso campo temos o direito de fazer o que bem entendermos. É só uma hipótese. Se você faz a hipótese que tudo pode ser incorporado em um número muito pequeno de leis, você tem o direito de tentar. Não temos que temer nada, porque se algo sai errado você simplesmente compara com experimentos, e experimentos podem

lhe dizer se você está certo ou não. Não existe perigo nisso. Pode ser que haja perigo psicológico, se você investir muito em uma direção, mas em geral não é uma questão de estar certo ou errado. Se a Natureza possui ou não uma formulação última, simples, unificada e bela, é uma questão em aberto que eu não sei responder.

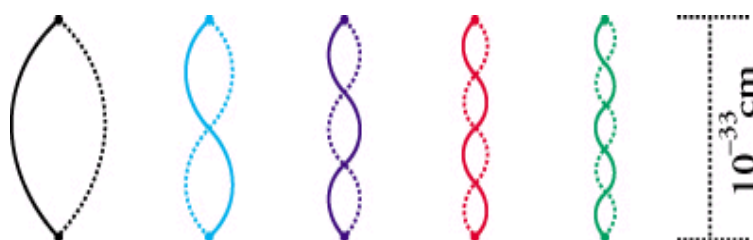
Um dos problemas acerca dos testes experimentais dessas idéias recentes, é que a teoria sugere que a unificação ocorre somente a energias muito altas. Acho que estamos começando a chegar ao final da linha para a física de partículas, pelo menos no que diz respeito aos aceleradores. Você acha que a física teórica está degenerando em filosofia?

Pode ser que a física teórica esteja degenerando, mas não sei em que. Deixe-me dizer uma coisa primeiro. Quando eu era mais jovem, eu notava que várias pessoas mais velhas não conseguiam entender idéias novas muito bem, e resistiam de uma maneira ou de outra, e pareciam estúpidas ao dizerem que certas idéias estavam erradas - como Einstein, que não foi capaz de aceitar a mecânica quântica. Agora eu sou um velho, e essas são idéias novas, e elas parecem malucas para mim, e parecem que vão na direção errada. Sei que outros homens foram estúpidos dizendo coisas assim, e portanto eu serei também estúpido em dizer que isso tudo não tem sentido. Eu serei de fato muito estúpido porque tenho a forte sensação que isso tudo não faz o menor sentido! Não posso fazer nada, mesmo sabendo o perigo que corro com este ponto de vista.

O que você não gosta na teoria?

Eles não calculam nada. Eles não checam suas idéias. Costuram explicações para qualquer coisa que discorde de experimentos. Por

exemplo, a teoria requer 10 dimensões. Bem, pode ser que seja possível “enrolar” 6 dimensões. Sim, isso é possível matematicamente, mas porque não 7? As equações é que deveriam decidir quantas dimensões devem ser compactadas, e não o desejo de fazer a teoria concordar com os experimentos.



Na teoria de cordas, partículas elementares são representadas por diferentes modos de vibração de cordas com comprimentos incrivelmente pequenos, da ordem de 10^{-33} cm .

Chegamos ao fim do livro. As questões acima mostram claramente que na fronteira da Física não existe certo ou errado, e mesmo quando gigantes da ciência contemporânea se enfrentam, muito do que é dito está baseado em uma crença íntima e irredutível.

Estamos novamente atravessando outro daqueles momentos em que nossas idéias sobre a Natureza encontraram seus limites, e precisarão ser aprimoradas em todos os níveis: a nível fundamental, o Modelo Padrão para as partículas elementares e suas interações terá que ser al-

terado, ou mesmo substituído, se for comprovada a existência de massa no neutrino. A nível intermediário, os modelos da matéria condensada são esfacelados e vários fenômenos (como a supercondutividade a altas temperaturas) não possuem explicação satisfatória. Finalmente, o Big Bang, aceita por décadas como “A Teoria” de formação do Universo, precisará ser revista se confirmadas recentes observações de que o Universo acelera na medida em que se expande, ao contrário do que prevê esta teoria.

A Física é uma deusa que se alimenta de novas idéias e, como teria dito certa vez Max Plank, às vezes novas idéias são aceitas não porque elas convencem a todos, mas porque aquelas pessoas que discordam eventualmente envelhecem e morrem. É através deste debate angustiado e fascinante que os segredos da Natureza vão sendo desvendados.

Acreditem, há muita poesia nisso. . .

Onde saber mais: deu na Ciência Hoje.

1. *Antimatéria*, Juan Alberto Mignaco, vol. 1, no. 5, p 54.
2. *Morre Dirac, o Pai da Antimatéria*, Guido Beck, vol. 3, no. 16, p 9.
3. *Física de Altas Energias: Há Espaço para o Brasil?*, Ronald Cintra Shellard, vol. 33, no. 74, p. 26.
4. *Encontrada a Partícula Z: Confirma-se a Teoria das Interações Eletrofracas*, Ronald Cintra Shellard, vol. 2, no. 7, p. 19.
5. *Feynman e a Física no Brasil*, José Leite Lopes, vol. 9, no. 51, p. 72.
6. *As Surpresas da Interação Luz e Matéria*, Cid B. de Araújo e José R. Rios Leite, vol. 5, no. 27, p. 38.
7. *O que é a Máquina Tokamak*, Aluísio Neves Fagundes, vol. 2, no. 9, p. 72.
8. *A Matéria Indivisível*, Juan Alberto Mignaco e Ronald Cintra Shellard, vol. 3, no. 14, p. 42.
9. *A Matéria Superaquecida e Supercomprimida*, Carlos A. Bertulani, vol. 8,

no. 46, p. 48.

10. *Neutrino, Neutrinos*, João Carlos dos Anjos, vol. 9, no. 50, p. 9.

11. *Os Neutrinos Pesados*, Ronald Cintra Shellard, vol. 13, no. 73, p. 8.

12. *Novas Partículas no Horizonte da Física*, Ronald Cintra Shellard e Sérgio Léo, vol. 3, no. 13, p. 20.

13. *A Origem dos Raios Cósmicos: Finalmente uma Pista*, Gil da Costa Marques, Oscar J.P. Éboli e Ely Silva, vol. 4, no. 24, p. 9.

14. *Radiação de Síncrotron*, Ramiro Muniz e Roberto Lobo, vol. 2, no. 11, p. 38.

15. *Energias Extremas no Universo*, Carlos Ourivio Escobar e Ronald Cintra Shellard, vol. 26, no. 151, p. 24.

16. *Neutrinos: Partículas Onipresentes e Misteriosas*, Adriano A. Natale e Marcelo M. Guzzo, vol. 25, no. 147, p. 34.

17. *A Assimetria do Universo: por que Existe mais Matéria do que Antimatéria?*, Leandro de Paula e Miriam Gandelman, vol. 25, no. 148, p. 30.

18. *A Massa do Neutrino e suas Conseqüências*, Adriano A. Natale, vol. 24, no. 142, p. 20.

19. *Supercordas, em Busca da Teoria Final*, Victor O. Rivelles, vol. 23, no. 138, p. 46.

20. *Méson Pi: o Início da Física de Altas Energias*, E.H. Shibuya, vol. 22, no. 132, p. 36.

21. *Elétron em Velocidade Máxima*, Marcia Begalli e Maria Elena Pol, vol. 22, no. 131, p. 32.

22. *O Elétron Revela o Invisível*, Aldo Craievich e Daniel Ugarte, vol. 22, no. 131, p. 34.

23. *Cesar Lattes. Modéstia, Ciência e Sabedoria*, Micheline Nussenzvieg, vol. 19, no. 112, p. 10.

24. *Do Elétron ao Quark Top*, Gilvan Augusto Alves, Alberto Santoro, Moacyr Henrique Gomes e Souza, vol. 19, no. 113, p. 34.

25. *Neutrinos Solares*, Carlos A. Bertuloni, vol. 18, no. 108, p. 52.

Resumo - Capítulo Nove

Uma parte dos físicos teóricos se dedica a tentar construir uma teoria unificada das forças da Natureza. Em tal teoria, as quatro interações fundamentais - gravitacional, eletromagnética, fraca e forte - derivariam de um único princípio, uma única interação fundamental. Acredita-se que esta unificação existiu durante os primeiros 10^{-43} s de vida do Universo, quando então as forças começaram a se separar. Idéias de unificação de fenômenos aparentemente diferentes já foram realizadas na física clássica. Newton unificou a 'física do Céu' com a da Terra, e Maxwell unificou a eletricidade, o magnetismo e a ótica física. A física de partículas estuda os constituintes fundamentais da matéria e suas interações. Os objetos mais simples que formam a matéria são os léptons e os quarks. Léptons são partículas leves, como o elétron e o pósitron, e podem ser observados separadamente. Os quarks, ao contrário, só existem em estado de confinamento. Essas partículas se combinam para formar os hádrons - como prótons e nêutrons, e os mésons - como o píon. A detecção experimental do píon nos raios cósmicos, e a sua produção em laboratório teve a importante participação do físico brasileiro Cesar Lattes. As interações entre objetos materiais se dão via partículas de campo. O exemplo mais simples é o caso do fóton, que é o mensageiro do campo eletromagnético. A partícula do campo gravitacional é o gráviton, e a da interação forte o glúon. As interações eletromagnética e fraca foram unificadas por Glashow, Salam e Weinberg. José Leite Lopes, físico brasileiro, teve importante participação na chamada teoria eletrofraca. As partículas de campo da interação eletrofraca são chamadas W^+ , W^- e Z^0 . Essas partículas foram detectadas experimentalmente em 1983 pela equipe do italiano Carlo Rubbia, trabalhando no CERN. Até agora as tentativas de unificação total falharam. A teoria de supercordas apareceu durante a década de 70 como um esquema promissor de unificação. Nesta teoria os objetos fundamentais da matéria não são partículas, mas pequenas cordas, com comprimentos infinitamente menores do que o diâmetro de um próton. Cada partícula é representada por um modo normal de vibração destas cordas. Esta teoria, contudo, possui várias dificuldades conceituais e tem recebido duras críticas de importantes físicos contemporâneos. O sonho da unificação permanece, no momento, em suspense.