



.....
Maria Cristina Batoni Abdalla
Instituto de Física Teórica, UNESP
e-mail: mabdalla@ift.unesp.br
.....

Quantas e quais são as partículas elementares que compõem a matéria observada no nosso universo? Não exatamente usando o conceito de partículas elementares (que é moderno), durante milhares de anos temos buscado uma resposta a essa pergunta que aparentemente parece simples. Os gregos já tinham idéia de que a matéria era composta de átomos (do próprio grego indivisível). Essa concepção de indivisibilidade hibernou por mais de 25 séculos e somente no ano de 1897 o átomo foi “quebrado” pelo físico inglês Joseph John Thomson e a primeira partícula elementar foi descoberta: o elétron. A última partícula elementar encontrada (bem menos conhecida) foi o neutrino do tau em 2000, por uma equipe de físicos do Fermi National Laboratory (Fermilab), Estados Unidos.

A física moderna precisou de 103 anos para descobrir e classificar todas essas pequeninas partículas fundamentais. O modelo que classifica as partículas elementares começou a ser formulado teoricamente em meados da década de 1960, mas só foi coroado de êxito duas décadas depois, no final de 1982, com a fantástica descoberta dos bósons mediadores (W^+ , W^- , Z^0) da interação fraca.

Recomendamos fortemente que, antes de o leitor prosseguir nessa leitura, os trabalhos de Ostermann (2001) e Moreira (2004), já publicadas nesta mesma revista, fossem lidas e estudadas cuidadosamente, pois vários termos e conceitos utilizados aqui estão lá explicados e colocados no contexto da física de partículas de uma forma bem didática.

O século passado testemunhou a descoberta de centenas de novas partículas. Até o início da década de 1950, a grande maioria das partículas descobertas foi erroneamente considerada elementar, pois o método de observação utilizado não permitia ver-lhes a natureza mais íntima. O critério que define elementar até que não é difícil – é até bastante intuitivo: toda partícula que pode ser quebrada não é elementar, e toda aquela que tem um único constituinte é considerada elementar. No entanto, do ponto de vista experimental e teórico, o conceito não é tão simples assim; há grandes dificuldades quanto aos limites intrínsecos à observação, e há também dificuldades na concepção dos modelos teóricos que descrevem o comportamento da matéria.

Do ponto de vista teórico, o conceito que define uma partícula elementar é, antes de tudo, de natureza abstrata e matemática. Todas as partículas elementares são descritas por objetos matemáticos denominados *funções de onda*, a partir das quais são extraídas informações sobre a dinâmica de tais partículas. A função de onda que descreve uma partícula elementar não pode ser redutível à função de onda de outras partículas. Essa linguagem é ditada pela mecânica quântica e, para nossos propósitos, parece um bocado complicada. É difícil transmitir os conceitos que envolvem a função de onda a quem não é especialista. Além disso, como seria impossível construir a família das partículas elementares de um ponto de vista estritamente teórico, optamos por contar sobre suas descobertas teóricas e experimentais em uma organização histórica cronológica, fazer uma representação artística para as características dessas partículas e depois acomodá-las no modelo aceito hoje em dia que é chamado de Modelo Padrão

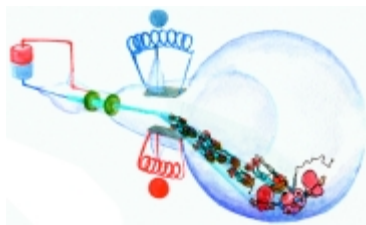
Quantas e quais são as partículas elementares que compõem a matéria observada no nosso universo? Neste artigo contamos brevemente a descoberta destas partículas elementares. Representações lúdicas e artísticas tentam amenizar para o leitor essa aventura maravilhosa.

(MP). É importante ficar claro que os desenhos artísticos utilizados neste trabalho pretendem fazer apenas uma representação gráfica para as características das partículas (como a massa, por exemplo, que em última análise é o que se mede) e assim atrair a atenção dos não-iniciados de uma forma divertida e pitoresca, de modo que a informação visual fique retida e, principalmente, para eliminar a idéia de que as partículas elementares são “bolinhas”.

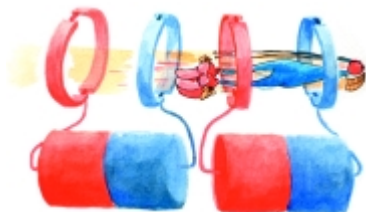
O Modelo Padrão (MP) estabelece: toda a matéria de que se tem notícia é composta de três tipos de partículas elementares: léptons, quarks¹ e as mediadoras, e que um punhadinho de 61 partículas basta para construir toda a matéria observada neste universo (incluindo, é claro, as observadas em laboratórios). Como chegamos a esse número? Quais são elas? Como estão classificadas? Essas são algumas das perguntas que tentaremos responder. Contudo, não temos condição de fazer aqui uma revisão sobre conceitos da mecânica quântica para depois falar em “partícula elementar” e seus “números quânticos”. Vamos nos deter às descobertas e ao mesmo tempo situar essas descobertas no contexto histórico.

O elétron (e^-) foi a primeira partícula elementar a ser descoberta. Thomson, em 1897 realizou uma experiência com raios catódicos na Ampola de Crooks e flagrou a divisibilidade do átomo, ganhando o Prêmio Nobel em 1906.

Veja, ao lado esquerdo, uma figura artística ilustrativa da Ampola de Crookes, onde um feixe das partículas que estavam sendo observadas passa primeiro por um campo elétrico, sendo acelerado, e depois por um campo magnético, que curva sua trajetória.

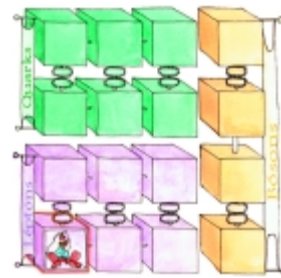


Thomson observou apenas um pontinho no bulbo da ampola e pela curva certificou-se que era o elétron. Na experiência há duas propriedades importantes sobre partículas carregadas, a saber: quando um elétron passa por um campo magnético, sua trajetória é curvada (veja figura ao lado direito). Ao passar por um campo elétrico o elétron é acelerado, como mostra a segunda figura à esquerda. Essas duas propriedades formam o princípio básico dos aceleradores de partículas carregadas como o colisor do European Laboratory for Particle Physics (CERN), em Genebra, Suíça.



A questão que colocamos agora é a seguinte: Conhecidas as propriedades do elétron, como ele é classificado no MP? Uma forma pictórica de representar o MP é o quadrado ao lado, com 16 caixinhas onde temos espaço para 6 léptons (caixinhas roxas), que não interagem fortemente, para 4 quarks (caixinhas verdes) que interagem fortemente e 4

partículas mediadoras (caixinhas amarelas). Sabemos que o elétron tem massa, carga elétrica e spin $1/2$ (lembre-se das aulas de Química sobre distribuição eletrônica) e ele é um férmion fundamental² que não interage fortemente (não tem interação nuclear), portanto é um lépton e por isso vai ocupar a primeira caixa roxa da figura acima.



O fóton (γ) é a segunda partícula elementar a entrar no cenário. Em 1905, o físico alemão Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico usando a hipótese de que a luz é formada de pacotinhos de energia que mais tarde receberam o nome de fóton³. O fóton também é conhecido como quantum de luz. Por mais incrível que possa parecer, o fóton não tem massa – é uma partícula que só tem energia e seu spin é 1, e portanto ele é um bóson. Na figura ao lado representamos artisticamente as características do fóton.

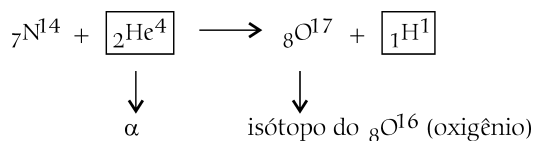
Ao lado ilustramos o efeito fotoelétrico: quando a luz (fótons) que incide em uma placa de metal tem energia suficiente, os elétrons do metal podem ser arrancados e ejetados, porque eles adquirem energia cinética proveniente dos fótons e com essa energia cinética eles “pulam” da placa. Elétrons são, então, emitidos de metais iluminados, e a energia dos elétrons, ao contrário do que se podia imaginar, depende da frequência da luz (cor) e não da sua intensidade. Na verdade, quanto maior a intensidade da luz, mais elétrons “pulam” da placa, mas todos com a mesma energia!



Einstein mostrou que esse fenômeno poderia ser explicado se a luz de frequência (f) fosse composta de quanta individuais de energia (hf). Ganhou, por essa descoberta, o prêmio Nobel de 1921. Em 1923, dezessete anos depois da proposta teórica de Einstein, o fóton foi confirmado na experiência do efeito Compton (no espalhamento Compton, o fóton que bombardeia o elétron em repouso perde energia e se espalha com energia menor). No MP, o fóton é umas das partículas mediadoras e vai ocupar o primeiro lugar dos bósons mediadores.



Cronologicamente, a próxima partícula encontrada foi o próton (vem do grego *protos* e quer dizer *o primeiro*). Em 1919, o próton foi descoberto pelo físico Ernest Rutherford através do bombardeamento do nitrogênio por partículas alfa (núcleos do átomo de hélio), resultando em um isótopo do oxigênio mais um núcleo do átomo de hidrogênio (próton), com mostra a reação a seguir.



É importante dizer que na época pensava-se que o próton fosse uma partícula elemental. No entanto, hoje sabemos que o próton **não é** uma partícula elemental e, portanto **não entra** no Modelo Padrão, pois como veremos mais adiante ele é composto de três quarks.

Núcleos atômicos podem emitir partículas de seu interior. No final da década de 20 um dos grandes mistérios da Física experimental era que os elétrons emitidos do núcleo atômico não tinham uma energia muito bem definida, isto é, podiam ser ejetados com energias que variavam continuamente, desde zero até altos valores. O físico alemão Wolfgang Pauli sugeriu então a existência de uma partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria, para explicar essa aparente falha da conservação de energia nas medidas do momento do elétron ejetado. Essa partícula leve também seria ejetada com uma certa energia, de forma que a distribuição de momento do elétron fosse entendida (esse processo é conhecido por decaimento β). Surge assim o neutrino (ν), a terceira partícula elemental a ser estudada que mais adiante será

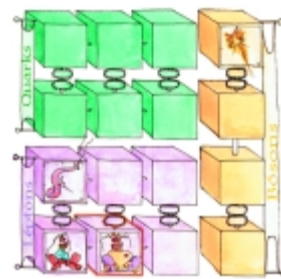


representada por ν_e . Hoje sabemos que o processo fundamental do decaimento β é a desintegração do nêutron, resultando em um próton, um elétron energético (esse elétron é β) e um antineutrino. Inicialmente as tentativas para encontrar o neutrino falharam, e seu apelido passou a ser “o pequenino que não está lá”. Ele só foi observado experimentalmente em 1956, no reator nuclear Savannah River, na Carolina do Sul, Estados Unidos. A confirmação inequívoca da sua existência ficou a cargo de Clyde Cowan e Frederick Reines, que ganharam o prêmio Nobel em 1995, trinta e nove anos depois da primeira detecção. Esse fato marca uma evidência interessante na pesquisa em física de partículas: inicialmente a observação da possível não-conservação de energia; posteriormente a previsão teórica, baseada em princípios primeiros, e em seguida a detecção experimental. O neutrino é um lépton, e no MP ele entra na caixa roxa acima do elétron, formando a primeira família de léptons.

O múon (μ) é a quarta partícula elemental e a primeira das partículas elementares instáveis a ser descoberta. Em 1933, o físico japonês H. Yukawa (Prêmio Nobel de 1949) propôs uma teoria para a força nuclear. Previu uma partícula de massa 200 vezes superior à massa do elétron. Em 1937, os físicos S.H. Neddermeyer e C.D. Anderson anunciaram a primeira evidência da sua existência. Encon-



trada em uma câmara de nuvens⁴, a partícula foi batizada de *mésotron* – que passou, mais tarde, a *méson* μ (*intermediária*, em grego) e, mais tarde ainda, passou a ser conhecida por *múon*. Representada por μ , tem duas cargas elétricas possíveis (μ^+ e μ^-). Na verdade, a partícula que havia sido descoberta nem era a partícula prevista por Yukawa, tampouco era um méson. Quem era então essa partícula descoberta em 1937, tão parecida com o elétron? Suas principais características: seu spin é 1/2 e pode ser visto como um elétron crescido, pois sua massa é 207 vezes maior. A diferença essencial entre os dois consiste em o múon não ser estável e, portanto, decair, enquanto o elétron é estável, por uma razão muito simples: não há nada em que o elétron possa decair, por ele ser o mais leve. Ele é um lépton e não é afetado pela força nuclear forte, ou seja, as forças que o afetam são as eletromagnéticas e a nuclear fraca.



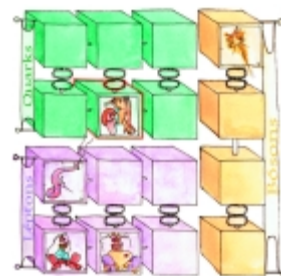
No MP ele ocupa a segunda caixa roxa.

Em 1947 o pión (π) foi descoberto e o físico brasileiro César Lattes esteve envolvido na sua detecção, mas o pión não entra no MP porque ele **não é** uma partícula elemental.

A década de 1950 é conhecida pelo número espantoso de partículas novas, um verdadeiro zoológico de espécies! Apenas por curiosidade, eis algumas: K^+ , Λ , K^0 , Δ^{++} , Ξ^- , Σ^+ , \bar{p} (nenhuma delas elemental). A necessidade de classificá-las se fazia urgente, mais que isso: era necessário formular uma classificação inteligente, ou seja, capaz de ordenar tantas partículas. Nessa tentativa os físicos passaram a elaborar leis de conservação que podiam ser aplicadas às reações vistas nos laboratórios. Naquela época estava “no ar” que, além das quatro leis de conservação clássicas (massa-energia, carga elétrica, momento linear e momento angular), outras leis de conservação permitiriam dar sentido ao que acontecia no mundo das partículas elementares. Assim, as leis de conservação, que são resultados da observação, também poderiam ser estendidas e refinadas de forma a acomodarem as novas descobertas fenomenológicas.

Uma vez estabelecido esse consenso, o físico norte-americano Murray Gell-Mann, em 1953, sugeriu que certas partículas “estranhas” fossem identificadas por um novo número quântico que batizou de *estranheza* e postulou que seria conservado nas interações fortes, mas não nas fracas. E foi assim que uma nova lei de conservação, a *estranheza* (s), foi introduzida para explicar

os estranhos comportamentos de algumas partículas. Na verdade, a *estranheza* é um número quântico como o spin. Além de as partículas estranhas serem produzidas aos pares, uma característica marcante era que, ao decaírem em outras partículas carregadas, o traço deixado na câmara de

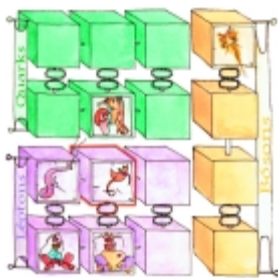


bolhas apresentava sempre a forma de um V invertido. Por essa particularidade, elas chegaram a ser conhecidas como *partículas V*. Hoje sabemos que as partículas estranhas são produzidas pela força forte e que seus decaimentos são regidos pela força fraca. Cerca de 10 anos mais tarde, esse conceito deu origem ao quark estranho (s), que está representado artisticamente na página anterior.

Em 1962, cientistas do Brookhaven National Laboratory (BNL) observaram a primeira evidência do neutrino do múon (ν_μ), fato que mostrava a existência de mais de um tipo de neutrino. O Prêmio Nobel foi outorgado a Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger, em 1988, os três da universidade de Columbia, Estados Unidos, e



fizeram a descoberta utilizando o Alternating Gradient Synchrotron (AGS), na época um dos mais sofisticados aceleradores do mundo. O experimento utilizou um feixe de prótons energéticos do AGS para produzir um verdadeiro chuveiro de mésons π , que viajaram 70 pés (2.133,6 cm) de uma parede de 5.000 toneladas de aço fabricada com placas de um velho couraçado. No caminho, os mésons decaíram em múons e neutrinos, mas só estes últimos podem passar através da parede na direção de um detector pleno de neon. Dentro da câmara, o impacto dos neutrinos contra placas de alumínio produziu rastos do múon, que foram detectados e fotografados, comprovando a existência de neutrinos do múon. No MP, o neutrino do múon ocupa a caixa roxa acima do múon, completando a segunda família dos léptons.



Vamos falar agora dos quarks *up* (u) e *down* (d)

Na década de 60, alguns físicos passaram a reviver uma idéia



que havia sido descartada no passado e que considerava a hipótese de os hádrons² serem formados por um punhado de “tijolinhos” fundamentais, responsáveis pela existência de toda a matéria observada no universo. Gell-Mann publicou um trabalho brilhante, em 1964, propondo que todos os hádrons [2], seriam formados por três partículas fundamentais (e suas respectivas antipartículas), às quais nomeou *quark*, que são férmions de spin 1/2. A sorte de Gell-Mann foi que o modelo previa a existência da partícula Ω^- e ela foi descoberta em pouquíssimo tempo. Esse fato atraiu atenção e interesse de muitos físicos. No MP os quarks *up* e *down* ocupam as duas primeiras caixas verdes, completando a primeira família de quarks.



Segundo o modelo de Gell-Mann, os quarks aparecem em três tipos: *up*, *down* e *strange*, denominados *sabores*,

além das suas respectivas antipartículas (\bar{u} , \bar{d} , \bar{s}). As regras básicas do modelo são de uma simplicidade impressionante: 1) os (anti)bárions são formados de 3 (anti)quarks ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$); 2) os mésons são formados por um par quark-antiquark ($q\bar{q}$). Com essas duas singelas asserções, **todas** as partículas conhecidas puderam ser entendidas e construídas. Enfatizamos aqui que a matéria comum, essa de nosso cotidiano, é feita de quarks leves u e d. Os exemplos



mais simples são o próton (uud) e o nêutron (udd). Agora sim, podemos entender porque o nosso cartunista desenhou o próton como sendo aquela figura tão estranha. Se você “tirar a roupa do próton” verá que ele é formado por 2 quarks *up* (os vermelhos) e um quark *down* (verde).

Apesar de fundamentais, quarks nunca foram observados livremente e eles só existem em estados ligados formando as partículas. Pensou-se até que encontrar um quark livre seria um evento muito raro. Foram analisadas amostras do leito antigo de oceanos, de meteoritos e até da poeira de camadas altas da atmosfera, e nunca se encontrou um só quark livre. Na verdade essa é uma característica da teoria à qual damos o nome técnico de *confinamento*.



Embora o modelo de Gell-Mann tenha se tornado um sucesso, havia um problema teórico que precisava de solução imediata. Aparentemente, violava o princípio de exclusão de Pauli, (dois férmions idênticos jamais podem ter os mesmos números quânticos ou ocupar o mesmo lugar no espaço). A partícula Ω^- é formada por três quarks estranhos (sss) e, como cada s é um férmion, temos um problema: dois deles não poderiam ocupar o mesmo estado físico.

Ainda em 1964, dois físicos da Universidade de Chicago, Yoichiro Nambu e Moo-Young Han, resolveram o impasse propondo um novo número quântico: a cor. Os quarks, que certamente obedeciam ao princípio de Pauli, não só viriam em três sabores diferentes, mas também em três cores. Cada quark aparece em três versões coloridas: **vermelho**, **azul** e **verde**. Assim, uma forma possível de se escrever a partícula Ω^- , formada por três quarks estranhos, seria ($S_{\text{vermelho}} S_{\text{verde}} S_{\text{azul}}$), de maneira que todos os quarks estranhos fossem diferentes. Na linguagem do físico, não estariam mais no mesmo estado.

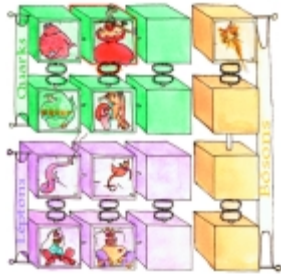
O charme (c) foi o quarto quark a ser proposto. Apesar de o nome *quark* revelar uma origem bem romanceada como conta seu inventor⁵, a mítica não funciona para o número 3, que estava longe de ser tão perfeito como Gell-Mann supôs inicialmente. Em 1964, os norte-americanos James Daniel Bjorken e Sheldon Lee Glashow propuseram a existência de outro férmion fundamental:



o quark charmoso. Um novo número quântico nomeado *charme* seria violado apenas nas interações fracas. No trabalho original, os autores preconizam a existência de muitas partículas charmosas, cuja descoberta seria cru-

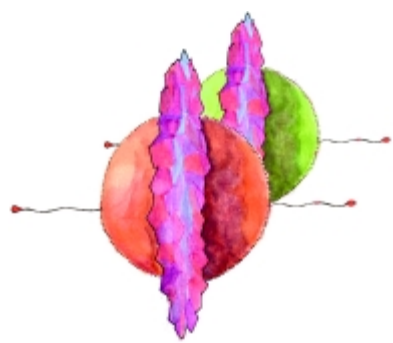
cial para testar a idéia. A idéia dos autores para a inclusão de um quarto quark foi, no início, baseada em argumentos puramente estéticos: afirmavam que os léptons fundamentais existiam em número de quatro (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ). Logo, por uma questão de simetria, os quarks fundamentais também deveriam existir em número de 4 (u, d, s, c). Assim como a matéria ordinária estável é formada pelos quarks leves u e d, os quarks mais pesados, s e c, compõem as partículas mais instáveis, que vivem muito pouco e são produzidas em reações nos laboratórios. O quark charmoso

foi observado no verão norte-americano de 1974, e deu metade do prêmio Nobel de 1976 ao grupo liderado por Samuel Chao Chung Ting, em Brookhaven, Estados Unidos. A outra metade foi para o norte-americano Burton Richter que liderava o grupo no Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). No MP, ele ocupa a caixa verde acima da *estranheza*, completando a segunda família.



Na década de 1960, surge também uma nova teoria unindo a força eletromagnética e a força fraca em uma única superforça chamada *eletrofraca*. Em 1967, Steven Weinberg propôs um modelo para a síntese eletrofraca, em que as interações são mediadas por quatro bósons – W^+ , W^- , Z^0 , e γ . Os três primeiros são massivos e denominados *bósons mediadores*; o quarto é o fóton, que medeia a força eletromagnética e não tem massa. Abdus Salam, em 1968, e Sheldon Glashow, em 1970, trabalharam outros aspectos fundamentais para a formulação da chamada Teoria Eletrofraca.

Em 1979, Weinberg recebeu o prêmio Nobel junto com Abdus Salam e Sheldon Glashow, mesmo sem que essas no-



vas partículas mediadoras tivessem sido descobertas em laboratório. A confirmação experimental dos três bósons ocorreu em 1983, outorgando o prêmio Nobel de 1984 ao físico italiano Carlo Rubia, que liderava um experimento instalado no CERN. A experiên-

cia observou a colisão de um próton e um antipróton, para procurar posteriormente os seguintes modos de decaimentos: $W^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e$ e $W^- \rightarrow e^- + \nu_e$ (e^+ é o pósitron, a antipartícula do elétron). Dados foram tomados ininterruptamente durante trinta dias, no final de 1982, e observaram um bilhão de colisões, gravando um milhão em fitas magnéticas, das quais os computadores selecionaram 2.125 eventos. A precisão com que os traços das partículas são reconstruídos pelos computadores é impressionante. Sob análise cuidadosa, esses eventos reduziram-se a 39 e, finalmente, cinco deles mostravam ao mundo a existência dos W^\pm !

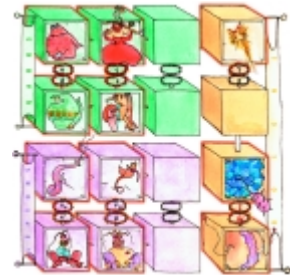
O Z^0 foi descoberto em meados de 1983, observando outros modos de decaimento: $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ e $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$. O

Z^0 decai de muitas formas diferentes, inclusive nas que incluem neutrinos; esse comportamento está intimamente



ligado a uma relação simples, que pode ser deduzida da teoria eletrofraca, entre a vida média do Z^0 e o número de possíveis tipos de neutrinos existentes na natureza. Na linguagem do físico, o número de

gerações dos léptons! Veja que informação importante: teoricamente, o número de gerações é igual a três. Isso significa que há só três tipos de neutrinos. Para observar o Z^0 mais a fundo, um novo acelerador foi projetado. Em 1983, um imenso túnel de 27 km de circunferência começou a ser cavado no CERN para construir o Large Electron Positron ring (LEP), com espaço para quatro enormes detectores diferentes, destinados a observar o resultado das colisões dos dois anéis de matéria e antimatéria. Em 1989, o LEP ficou pronto e, logo na primeira tomada de dados, oito minutos de observação bastaram para a detecção do primeiro Z^0 . No MP, o W^+ e o W^- ocupam a caixa amarela de baixo e o Z^0 ocupa a caixa amarela acima deles.



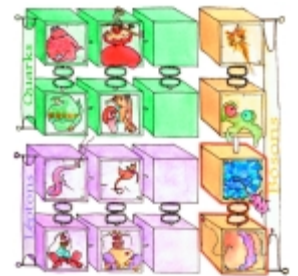
Apesar de o número quântico cor ter sido proposto para resolver o problema do Princípio de Exclusão de Pauli, a razão mais profunda da necessidade desse número quântico extra consiste no fato de a força forte que inter-relaciona os quarks ser mediada pela cor. Em outras palavras, a força entre os quarks tem sua origem na cor. A cor é uma espécie de carga que origina a força forte, da mesma forma que a carga elétrica é fonte da interação eletromagnética.

Da teoria batizada de Cromodinâmica Quântica (QCD),



sabe-se que a força forte é transmitida por oito partículas sem massa, eletricamente neutras e de spin 1, chamadas *glúons*, termo que se originou da palavra *glue, cola*, em inglês.

Os glúons mediam a força forte e carregam cor e anticor. Na linguagem do físico, dizemos que, na função de onda do glúon, há um número quântico especificando a cor e outro indicando a anticor. Como há três cores (**vermelho azul verde**) e três anticores ($\bar{v} \bar{a} \bar{v}$), há 9 espécies de glúons diferentes – um octeto (8 glúons obtidos de combinações adequadas dos 9) e um singleto (glúon solitário) que não é importante, pois a soma das cores resulta branco. No MP, os 8 glúons ocupam a caixa amarela abaixo do fóton.

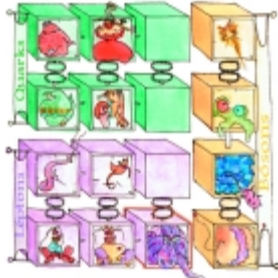


O tau (τ) vem formar a terceira geração de léptons. Já vimos que a família dos léptons acomodava quatro elementos agrupados dois a dois: (e^- , ν_e), (μ^- , ν_μ). No entanto, em 1975, um novo lépton entrou em cena. Em Stanford, Estados

Unidos, o físico Martin Perl, observando o processo no qual elétrons e pósitrons aniquilam-se, fez uma descoberta muito importante. Em meio a tantas partículas, havia muito tempo que não se descobria um lépton. E eis que um lépton genuíno aparece, quase duas vezes maior do que o próton – sua descoberta provocou uma verdadeira surpresa no meio científico. Foi batizado de **tau** (τ), referindo-o à palavra *triton*, que vem do grego e significa o *terceiro*.



Da mesma forma que seus dois irmãos, elétron e múon, o tau apareceu em duas versões: com cargas positiva e negativa. De fato, o τ inicia a terceira família de léptons (e^- , ν_e), (μ^- , ν_μ), (τ^- , ν_τ) dando esperança à existência do neutrino do tau (ν_τ), sobre o qual falaremos mais adiante. Perl recebeu o prêmio Nobel de 1995 junto com Fred Reines, responsável pela detecção do neutrino em 1956. No MP, o tau ocupa a terceira caixa roxa da primeira linha dos léptons.



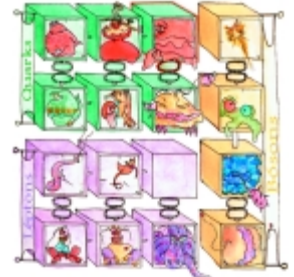
O *bottom* (*b*) foi o quinto quark a ser descoberto. Depois que as primeiras gerações de quarks – (*u*, *d*) e (*s*, *c*) – tinham sido entendidas, a questão era saber, e testar em laboratório, se quarks ainda mais pesados existiam. Em 1977, Lederman, líder de um grupo do Fermilab, observou a primeira evidência do méson úpsilon [$Y(1S)$], interpretado como um estado ligado de um *bottom* com um *antibottom*, indicando, de fato, uma terceira família de quarks. Esse quinto quark era bem maior do que qualquer partícula já descoberta e foi batizado de *b*. Uns dizem ser *b* de *bottom*, em contraposição a *down*, outros acham que seria *b* de *beauty*, em analogia ao *charm*. Enfim, o nome que pegou foi *b* de *bottom*. No MP o *bottom* ocupa a terceira caixa verde da primeira linha dos quarks.



No início da década de 1980, a lista de mésons contendo o quinto quark aumentou de modo significativo, e os físicos teóricos começaram a especular sobre a existência de um sexto quark para completar a simetria. Muitas foram as tentativas de detectá-lo, e o *top* (*t*) foi o último quark a ser descoberto, em 1995. Para se ter uma idéia do seu tamanho, a massa do *top*, que é uma partícula elementar, é da ordem de um átomo inteiro de ouro. Essa partícula só existiu em condições naturais na época do *big bang*. Depois, com o resfriamento do universo, ela deixou de existir e, agora, precisamos de aceleradores que atinjam energias muito altas para recriá-la, mesmo que seja por um brevíssimo instante. Aparentemente, o único acelerador em condições de detectar uma partícula tão pesada seria o Tevatron, no Fermilab. Neste



acelerador subterrâneo de 2 km de diâmetro, que começou a funcionar em janeiro de 1987, tanto o próton como o antipróton eram acelerados de modo a se encontrarem em algum ponto de colisão. Inicialmente foi construído com apenas um detector, o Collider Detector at Fermilab (CDF). Em 1992 surgiu outro detector, chamado DZero. Mais de 900 cientistas de 21 estados norte-americanos e de 12 outros países passaram, então, a colaborar na busca do *top*, e, em 1995, observaram, afinal, o sexto quark, *t* (de *truth* ou *top*). No MP, o *top* ocupa a terceira caixa verde acima do *bottom*.



Note que nosso cartunista representou as partículas respeitando, na medida do possível, uma escala de massas. A relação entre as massas dos quarks e dos léptons permanece até hoje um enorme mistério.

O neutrino do tau (ν_τ) foi a última partícula a ser descoberta. Depois de o *top* ter sido encontrado em 1995, as simetrias clamavam por um acompanhante-neutrino. Da mesma forma que os outros dois léptons – o elétron (e^-) e o múon (μ^-) – tinham seus respectivos neutrinos (ν_e) e (ν_μ), o tau (τ) também deveria vir acompanhado do seu neutrino (ν_τ). A busca experimental foi intensa. Iniciou-se oficialmente em 1997, quando físicos que trabalhavam no Tevatron fizeram uso de um feixe intenso que passava por um alvo de 15 m de comprimento, feito de placas de ferro e camadas de emulsão adequadas ao registro dessas interações; o aparato foi chamado Direct Observation of the Nu Tau (DONUT). Apenas um neutrino, de um trilhão deles, interage com um núcleo de ferro e se transforma em um tau que vive só 300 femtosegundos (10^{-15} s), deixando registrado na emulsão um minúsculo rastro de um milímetro, mas suficiente para garantir a existência da partícula. O DONUT registrou 6 milhões de eventos, dos quais mil foram selecionados pelos computadores – 4 deles exibiam evidências concretas da existência do neutrino do tau! No MP, ele ocupa a caixa roxa acima do tau. Enfim, o zoológico completo!



Resumindo: Há três famílias perfazendo seis léptons. Há ainda seis antiléptons. Juntos, somam doze partículas elementares. Os seis quarks também aparecem em três famílias. As cargas são frações da carga do elétron. Os quarks aparecem em três cores de modo que temos $3 \times 6 = 18$ quarks. Como há também os antiquarks, juntos somam 36 partículas. Partículas mediadoras: o spin é sempre 1, e as partículas mediadoras dependem do tipo da força em questão. Considerando as forças forte, fraca e eletromagnética temos 8 glúons, 1 fóton, W^+ , W^- , Z^0 . A Tabela 1 resume tudo.

A contagem final nos leva a 60 partículas elementares, número que não deve ser considerado alarmante nem excessivo.

sivo. Fato extremamente intrigante, no entanto, é que para formar a matéria ordinária que nos rodeia precisamos apenas e tão somente da primeira família estável – o elétron (com seu neutrino sempre à sua volta) e os quarks *up* e *down*, que são os formadores básicos dos prótons e nêutrons!

Ah! Não podemos nos esquecer do Higgs – a última partícula elementar que **falta ser encontrada no MP!** A sua verificação experimental é tão importante que um acelerador especial no CERN, chamado Large Hadron Collider (LHC), está sendo construído para procurá-lo (estará em operação em 2007). Um orçamento de bilhões de dólares e mais de 3000 físicos em busca de uma única partícula! Em princípio o Higgs é o responsável pela escala de massas, então vamos promovê-lo e elevar o número total para 61!

A história do Higgs começou em 1964 quando o físico inglês Peter Higgs, da Universidade de Edinburg, Inglaterra, propôs um mecanismo que ficou conhecido por Mecanismo de Higgs, um dos maiores enigmas do MP, e que gera a massa das partículas chamadas bósons mediadores (W^\pm e Z^0). Na década de 1970, com os físicos Weinberg e Salam, aprendemos que, a temperaturas muito altas, da ordem de 10^{15} graus, a força fraca e a eletromagnética constituem, juntas, uma superforça, batizada de força eletrofraca⁶. De certa forma, seriam duas facetas da mesma força. Sabemos que os mediadores dessa superforça são bósons. O bóson que medeia a força eletromagnética é o fóton, que não tem massa, e os bósons que medeiam a força fraca são os W^\pm e Z^0 , que são massivos! Ora, por que essa falta de reciprocidade?



propôs um mecanismo que ficou conhecido por Mecanismo de Higgs, um dos maiores enigmas do MP, e que gera a massa das partículas chamadas bósons mediadores (W^\pm e Z^0). Na década de 1970, com os físicos Weinberg e Salam, aprendemos que, a temperaturas muito altas, da ordem de 10^{15} graus, a força fraca e a

eletromagnética constituem, juntas, uma superforça, batizada de força eletrofraca⁶. De certa forma, seriam duas facetas da mesma força. Sabemos que os mediadores dessa superforça são bósons. O bóson que medeia a força eletromagnética é o fóton, que não tem massa, e os bósons que medeiam a força fraca são os W^\pm e Z^0 , que são massivos! Ora, por que essa falta de reciprocidade?

Essa força eletrofraca é a jóia preciosa do Modelo Padrão e precisa ser entendida em toda a sua extensão. E eis que, em certo momento da origem do universo, essa superforça separa-se, para todo o sempre, em duas. De um lado, a força eletromagnética; de outro, a força fraca. Esse é o momento exato em que o abominável infrator da simetria entra em jogo: o Higgs, e como se fosse uma espécie de rei Midas, atribui massa a tudo o que toca. Antes de o Higgs aparecer, tanto o fóton como os bósons mediadores não eram massivos. Quando o Higgs entra em cena, os W^\pm e Z^0 adquirem uma notável corpulência, enquanto o fóton continua sem massa. Teoricamente – e com uma margem de erro bem grande –, a massa do Higgs é estimada em $110 \text{ GeV}/c^2$ (giga eletronsvolts (10^9 eV) dividido pela velocidade da luz ao quadrado, pois $E = mc^2$). Se ele existir e for descoberto (basta apenas um!), os físicos ficarão muito felizes, porque o modelo padrão terá funcionado maravilhosamente bem, e tudo, enfim, será explicado!... ou melhor, quase tudo...

O Modelo Padrão resiste aos testes experimentais há mais de 30 anos. Mas apesar de todo o seu sucesso, nem tudo está explicado. Ele não responde a diversas perguntas fundamentais: por que as partículas têm massas numa certa hierarquia? Qual seria o mecanismo que privilegia a matéria suprimindo a antimatéria? Como incluir a força gravitacional, que é a quarta interação fundamental⁶, de forma a atribuir o status de partícula ao quantum de interação gravitacional (gráviton)? Seriam as quatro forças da natureza (forte, fraca, eletromagnética e gravitação) simplesmente aspectos diferentes de uma mesma realidade? Uma possível resposta é a teoria de cordas, mas esse já é um assunto que está fora do escopo deste artigo. Para responder a essas perguntas o físico continua o seu trabalho...

Tabela 1. Resumo do número total de partículas elementares do Modelo Padrão.

	Partículas	Antipartículas	Total
Léptons	$e^-, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$ (6)	$e^+, \bar{\nu}_e, \bar{\mu}, \bar{\nu}_\mu, \bar{\tau}, \bar{\nu}_\tau$ (6)	12
Quarks	u, d, s, c, b, t (cada quark pode ter 3 cores) ($6 \times 3 = 18$)	$\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ (18)	36
Mediadoras	$\gamma, W^+, W^-, Z^0, g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8$ (12)	As antipartículas são as mesmas que as partículas	12
Total			60

Referências

- [1] Abdalla, M.C.B. *O Discreto Charme das Partículas Elementares* (Editora da Unesp, São Paulo, no prelo, previsto para outubro de 2005).
- [2] Ostermann, F. *Um Pôster para Ensinar Física da Partículas na Escola*. Física na Escola, **2**(1), 13-18 (2001).
- [3] Moreira, M.A. *Partículas e Interações*, Física na Escola **5**(2), 10-14, (2004).

Notas

- ¹ Insistimos que o leitor deve ler antes o trabalho de Ostermann (2001) para que os termos léptons, quarks e bósons mediadores, entre outros, passem a fazer parte do vocabulário básico e possibilite uma melhor compreensão deste texto.
- ² O próton é um férmion pois seu spin é $1/2$. No entanto ele não é um férmion fundamental, pois é constituído de partículas ainda menores chamadas quarks.
- ³ O termo *fóton* foi proposto por Gilbert N. Lewis em 1926, onze anos depois de Einstein ter resolvido o efeito fotoelétrico, em uma carta ao editor da revista Nature: "(...) Portanto eu tomo a liberdade de propor para esse átomo novo hipotético, que não é luz, mas

desempenha um papel essencial em todos os processos de radiação, o nome fóton."

⁴ Câmara de nuvens: inventada em 1912 por pelo físico escocês Charles Thomson Rees Wilson (premio Nobel de 1927), foi muito utilizada no estudo da radioatividade. Vapor de água é confinado em uma câmara fechada até o ponto de saturação. A pressão é diminuída, produzindo-se ar num estado supersaturado. A passagem de partículas carregadas condensa essa massa de ar em gotículas diminutas de vapor, deixando, assim, os vestígios da partícula que passou.

⁵Em 1963, quando atribuí o nome 'quark' aos constituintes fundamentais dos núcleons, primeiro eu tinha o som da palavra, sem sua grafia, que poderia ser *kwork*. Então, em uma das minhas olhadelas ocasionais em *Finnegans Wake*, de James Joyce, encontrei a palavra quark na frase *Three quarks for Muster Mark!*... Como *quark*, que significa, entre outras coisas, o *pio da gaivota*, tinha a intenção clara de rimar com Mark, assim como *bark* e outras palavras semelhantes, eu tinha encontrado uma desculpa para pronunciá-la como *kwork*. ... De qualquer modo, o número 3 ajusta-se perfeitamente ao modo pelo qual os quarks ocorrem na natureza" (*O Quark e o Jaguar* (Rocco, São Paulo, 1994), p. 194.

⁶Veja mapa conceitual para interações fundamentais em Moreira (2003).