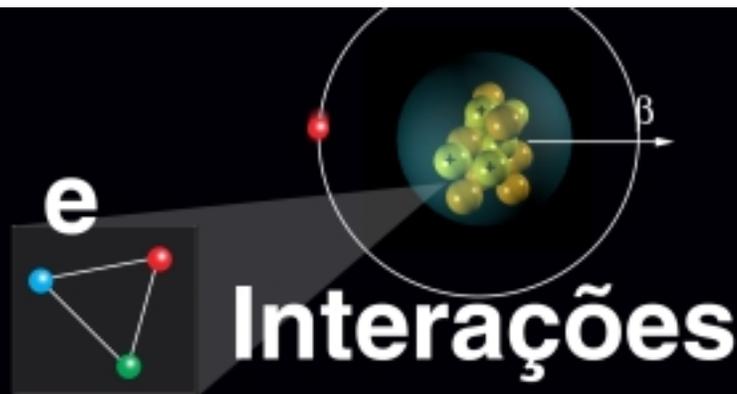


Partículas



.....
Marco Antonio Moreira

Instituto de Física da UFRGS, C.P.
15051, 91501-970 Porto Alegre - RS
moreira@if.ufrgs.br
www.if.ufrgs.br/~moreira
.....

Introdução

Este texto procura dar, através da técnica dos mapas conceituais (Moreira e Buchweitz, 1987), uma visão introdutória ao assunto partículas elementares e interações fundamentais. A intenção é a de mostrar que esse tema pode ser abordado, de maneira acessível, sem muitas ilustrações que acabam tolhendo a imaginação dos alunos e até mesmo dificultando a aprendizagem de certos conceitos. Essa introdução poderá ser seguida de considerações

Uma visão introdutória ao assunto partículas elementares e interações fundamentais pode ser abordado, de maneira acessível, de forma a transmitir aos alunos a idéia de um assunto excitante, colorido, estranho e charmoso

qualitativas sobre simetria e leis de conservação em Física, sobre a construção do conhecimento em Física (por exemplo, a previsão teórica das partículas que somente anos depois foram detectadas, ou que ainda não o foram), sobre as tentativas de unificar teorias físicas. Com habilidade didática, talvez se possa transmitir aos alunos a idéia de um assunto excitante, *colorido, estranho e charmoso*, ao invés de difícil e enfadonho.

Partículas¹ Elementares

Átomos consistem de elétrons, que formam as camadas eletrônicas, e núcleos, compostos por prótons e nêutrons que, por sua vez, consistem de quarks (dos tipos **u** e **d**). Quarks são, possivelmente, os constituintes fundamentais da matéria. Há seis espécies, ou *sabores*, de quarks: **u** (*up*), **d** (*down*), **c** (*charmed*), **s** (*strange*), **b** (*bottom*) e **t** (*top*). Cada uma dessas

espécies pode apresentar-se em três “edições” chamadas *cores*: 1 (vermelho), 2 (verde) e 3 (azul). Haveria então 18 quarks distintos. Porém, como cada um deles tem a sua antipartícula, o número total de quarks é 36 (uma antipartícula tem a mesma massa e o mesmo spin^2 da partícula em questão,

porém carga oposta.) Quarks têm carga elétrica fracionária (+2/3 para os sabores **u**, **c** e **t** e -1/3 para os sabores **d**, **s** e **b**), mas nunca foram detectados livres; aparentemente, estão sempre confinados em partículas chamadas

hádrons (da palavra grega *hadros*, que significa massivo, robusto, forte).

Há duas classes de hádrons, aqueles formados por três quarks, chamados bárions (da palavra grega *barys*, que significa pesado), e os constituídos por um quark e um antiquark, denominados mésons (do grego, *mesos*, significando intermediário, médio). Bárions obedecem o Princípio da Exclusão de Pauli³, mésons não; bárions têm spin fracionário (1/2, 3/2, ...), mésons têm spin inteiro (0, 1, 2, ...). O nêutron e o próton são os bárions mais familiares, os mésons π e K são exemplos de mésons; contudo, face às múltiplas possibilidades de combinações de três quarks ou de quarks e antiquarks, o número de hádrons é bastante grande, constituindo uma grande família.

Outra família, não tão numerosa, é a dos léptons (do grego *leptos*, que significa delgado, fino, leve). São par-

Este artigo apresenta um sumário das partículas elementares e das interações fundamentais, segundo o Modelo Padrão. Na seqüência, são apresentados dois mapas conceituais, um para partículas e outro para interações, que esquematizam conceitualmente esse modelo.

partículas de spin $1/2$, sem cor, que podem ter carga elétrica ou não (neutrinos). Parecem ser partículas verdadeiramente elementares, *i.e.*, nenhuma delas aparenta ter uma estrutura interna como a dos hádrons. O elétron é o lépton mais familiar, mas além dele existem o múon (μ), o tau (τ) e três neutrinos (neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau). Como a cada lépton corresponde um antilépton, parece haver um total de 12 léptons na natureza.

Começamos falando de elétrons, prótons e nêutrons e chegamos a léptons, passando por hádrons, bárions e mésons. Mas essa história ainda vai longe. Para se ter uma idéia da constituição da matéria, não basta saber que existem tais e tais partículas, que umas parecem ser realmente elementares e outras são compostas por “sub-partículas” confinadas. É preciso também levar em conta como elas interagem, como integram sistemas estáveis e como se desintegram, ou seja, é preciso considerar *interações e campos de força*, o que nos leva a outra categoria de partículas, as chamadas partículas mediadoras das interações fundamentais da natureza.

Interações Fundamentais

Há quatro tipos de interações fundamentais: eletromagnética, gravitacional, forte e fraca. A interação entre um elétron e um núcleo atômico é um exemplo de interação eletromagnética; a atração entre quarks é do tipo interação forte; o decaimento β (por exemplo, um nêutron decaindo para próton pela emissão de um elétron e um neutrino) exemplifica a interação fraca; a interação gravitacional atua entre todas as partículas massivas, e é a que governa o movimento dos corpos celestes, mas é irrelevante em domínios muito pequenos, assim como as demais podem não ser relevantes em alguns domínios.

A interação forte, como sugere o nome, é a mais forte no âmbito das

partículas elementares e mantém juntos prótons e nêutrons no núcleo atômico. Afeta somente hádrons. A interação fraca é responsável pelo decaimento relativamente lento de partículas como nêutrons e múons, e também por todas reações envolvendo neutrinos.

Tais interações são descritas através de campos de força. Campo é um conceito fundamental nas teorias sobre partículas elementares. Aliás, é um conceito fundamental em toda a Física. Os *quanta* desses campos são partículas mediadoras das interações correspondentes.

Assim, o fóton é o *quantum* do campo eletromagnético e media a interação eletromagnética, os glúons são os quanta do campo forte e mediam a interação forte, o gráviton é o quantum do campo gravitacional, mediando a interação gravitacional, e as partículas denominadas W^+ , W^- e Z^0 são os quanta do campo fraco e são mediadoras da interação fraca. Tais partículas são chamadas bósons, um termo genérico para partículas de spin inteiro (férmions é o termo genérico para partículas de spin $1/2, 3/2, 5/2, \dots$; léptons e quarks são férmions). De todas essas partículas, a única que ainda não foi detectada experimentalmente é o gráviton⁴.

Mediar a interação significa que a força existente entre as partículas interagentes resulta de uma “troca” (emissão e absorção) de outras partículas (virtuais) entre elas. Assim, a força eletromagnética resulta da troca de fótons entre as partículas (eletricamente carregadas) interagentes. Fótons são portadores

da força eletromagnética, são partículas de radiação, não de matéria; têm spin 1, não têm massa e são idênticos às suas antipartículas. É a energia de um fóton que determina seu “tipo”:

fótons de ondas de rádio, de luz visível, de radiação ultravioleta, de raios-X, de raios γ (embora seja γ o símbolo que representa qualquer fóton).

Analogamente, o campo de forças produzido por quarks e antiquarks, atuando sobre eles, é chamado de campo de glúons, e a força entre eles resulta da troca de glúons. Glúons representam para o campo de glúons o mesmo que os fótons para o campo eletromagnético. Quarks emitem e absorvem glúons e assim exercem a interação forte entre si. Glúons, tal como os fótons,

têm spin 1, mas, diferentemente deles, têm cor, *i.e.*, fótons são incolores, ou “brancos”, e glúons não. Assim como a carga elétrica é a fonte do campo fotônico, as cargas cor são a fonte dos campos glúônicos (há oito tipos de glúons)⁵.

Da mesma forma, a interação fraca é mediada por partículas, conhecidas como W (do inglês *weak*, que significa fraca) e Z , *i.e.*, pela troca de tais partículas, assim como a interação gravitacional é, teoricamente, mediada pela troca de grávitons.

A rigor, todas estas interações são mediadas por partículas virtuais. Consideremos, por exemplo, a interação eletromagnética entre um elétron livre e um próton livre: uma das partículas emite um fóton e a outra o absorve; no entanto, esse fóton não é um fóton livre ordinário, pois aplicando as leis de conservação da energia e *momentum* a tal processo poder-se-ia mostrar que haveria uma violação da conservação da energia (a energia do fóton emitido não seria igual ao produto de seu *momentum* pela velocidade da luz, como seria de se esperar para um fóton livre). Mas seria uma violação virtual porque, devido ao Princípio da Incerteza de Heisenberg⁶, a incerteza na energia do fóton implica que tal violação ocorreria em intervalos de tempo muito pequenos. Isso significa que o fóton seria imediatamente absorvido, *i.e.*, não seria livre, mas sim virtual.

Mediar a interação significa que a força existente entre as partículas interagentes resulta de uma “troca” (emissão e absorção) de outras partículas (virtuais) entre elas

A família dos léptons (do grego *leptos*, que significa delgado, fino, leve) apresenta partículas de spin $1/2$, sem cor, que podem ter carga elétrica ou não e parecem ser partículas verdadeiramente elementares: nenhuma delas aparenta ter uma estrutura interna

No mundo macroscópico a energia sempre se conserva, porém microscopicamente a Mecânica Quântica mostra que pode haver pequenas violações ΔE durante um tempo Δt de modo que $\Delta E \times \Delta t = h = 6,6 \cdot 10^{-22}$ MeV.s. Quando uma partícula livre emite um fóton, o desbalanço de energia é dado pela energia do fóton, de modo que quanto maior for essa energia, tanto mais rapidamente ele deve ser absorvido por outra partícula a fim de restabelecer o balanço energético. Quer dizer, quanto maior a violação da conservação da energia, tanto mais rapidamente deve ser restabelecido o equilíbrio energético. Essa violação virtual da energia é, portanto, importante na interação entre partículas. Fótons “reais”, assim como elétrons, por exemplo, podem ter uma vida infinita desde que não interajam com outras partículas. Fótons “virtuais”, por outro lado, têm uma vida muito curta.

O alcance da interação causada pela troca de partículas virtuais (quanta virtuais) está intimamente relacionado à massa de repouso dos quanta trocados. Quanto maior a massa da partícula, tanto menor o espaço permitido a ela pela relação de incerteza da Mecânica Quântica. Fótons, por exemplo, não têm massa, de modo que o alcance da interação eletromagnética para partículas carregadas é infinito. Grávitons também não têm massa, de sorte que o alcance da interação gravitacional é igualmente infinito. Por outro lado, as interações forte e fraca são mediadas por partículas massivas e são de curto alcance.

As classificações de partículas e interações feitas até aqui estão diagramadas nos mapas conceituais apresentados nas Figs. 1 e 2.

Um Mapa Conceitual para Partículas Elementares

No mapa conceitual apresentado na Fig. 1, o próprio conceito de partículas elementares aparece no topo como sendo o mais abrangente dessa área de conhecimento. Logo abaixo, aparecem os conceitos de férmions e bósons como duas grandes categorias de partículas elementares. (Esta clas-

sificação não se refere apenas às partículas elementares, mas também a quaisquer partículas que obedecem as leis da Mecânica Quântica como, por exemplo, as partículas alfa.) O fato de que os férmions obedecem ao Princípio da Exclusão de Pauli e os bósons não, é a principal diferença entre essas categorias. A partir dessa distinção inicial, pode-se prosseguir com outras categorizações como a de classes de férmions (léptons, quarks e bárions) e classes de bósons (partículas mediadoras de interações e mésons). Léptons e quarks são os férmions fundamentais: a rigor, toda a matéria é constituída de quarks e léptons, pois as demais partículas ou são compostas de quarks ou antiquarks (bárions) e pares quarks-antiquarks (mésons) ou são partículas mediadoras das interações fundamentais (glúons, Z e W , fótons e grávitons).

Tanto os léptons como os quarks têm seis variedades ou *sabores*, como indicado no mapa conceitual. Entretanto, diferentemente dos léptons, cada sabor de quark existe em três variedades distintas em função de uma propriedade chamada *cor*, ou *carrega cor*. Contudo, quarks não existem livremente, só podem ser observados em combinações que são neutras em relação à cor; estão sempre confinados em partículas compostas chamadas hádrons. Hádrons podem ser fermiônicos quando formados por quarks ou antiquarks (nesse caso são chamados bárions) ou bosônicos quando constituídos por um quark e um antiquark (então chamados mésons).

Tudo isso está “mapeado” na Fig. 1 que, de certa forma, “termina” com os “conhecidos” elétrons (são léptons), prótons e nêutrons (ambos são bárions; têm estrutura interna) que formam átomos e moléculas que constituem a matéria macroscópica tal como a percebemos.

Um Mapa Conceitual para Interações Fundamentais

O mapa conceitual mostrado na Fig. 2 também começa com o conceito mais abrangente: interações fundamentais. Logo abaixo aparecem as quatro interações existentes na natureza: gravitacional, eletromagnética,

fraca e forte. As interações eletromagnética e fraca podem ser interpretadas, teoricamente, como instâncias de uma única interação, a eletrofraca. A interação forte que existe entre bárions e mésons pode ser interpretada como fundamental ou residual quando decorre de um balanço imperfeito das atrações e repulsões entre os quarks e antiquarks que constituem tais partículas.

Essas quatro (ou três) interações são mediadas por partículas (portadoras de força) elementares - grávitons (gravitacional), fótons (eletromagnética), W e Z (fraca) e glúons (forte) - e descritas por campos de força. Os mésons mediam a interação forte residual. Quer dizer, além dos campos gravitacional e eletromagnético, que são relativamente familiares, há também o campo forte e o campo fraco. A energia armazenada nesses campos não está neles distribuída de maneira contínua; está quantizada, *i.e.*, concentrada nos chamados quanta de energia. Assim, os fótons são os quanta do campo eletromagnético, as partículas W e Z são os quanta do campo fraco, os glúons do campo forte e os grávitons do campo gravitacional.

A cada campo está associado um tipo de força: força gravitacional, força eletromagnética (elétrica e magnética), força fraca, e força cor (forte ou fundamental, e residual). Contudo, no domínio das partículas elementares, em reações altamente energéticas, partículas são criadas, destruídas e recriadas novamente, com velocidades e trajetórias com determinado grau de incerteza. Assim, o conceito de força não tem um significado muito preciso nesse domínio, e é preferível falar em interações, ou seja, a ação entre partículas. Por esta razão, no mapa da Fig. 2 as interações fundamentais aparecem na parte superior do mapa e as forças na parte inferior. Nesse contexto, interação é um conceito hierarquicamente superior ao de força.

Conclusão

Embora seja uma construção humana espetacular, presente em toda parte e, particularmente, na natureza científica do homem (Kelly, 1963), isto

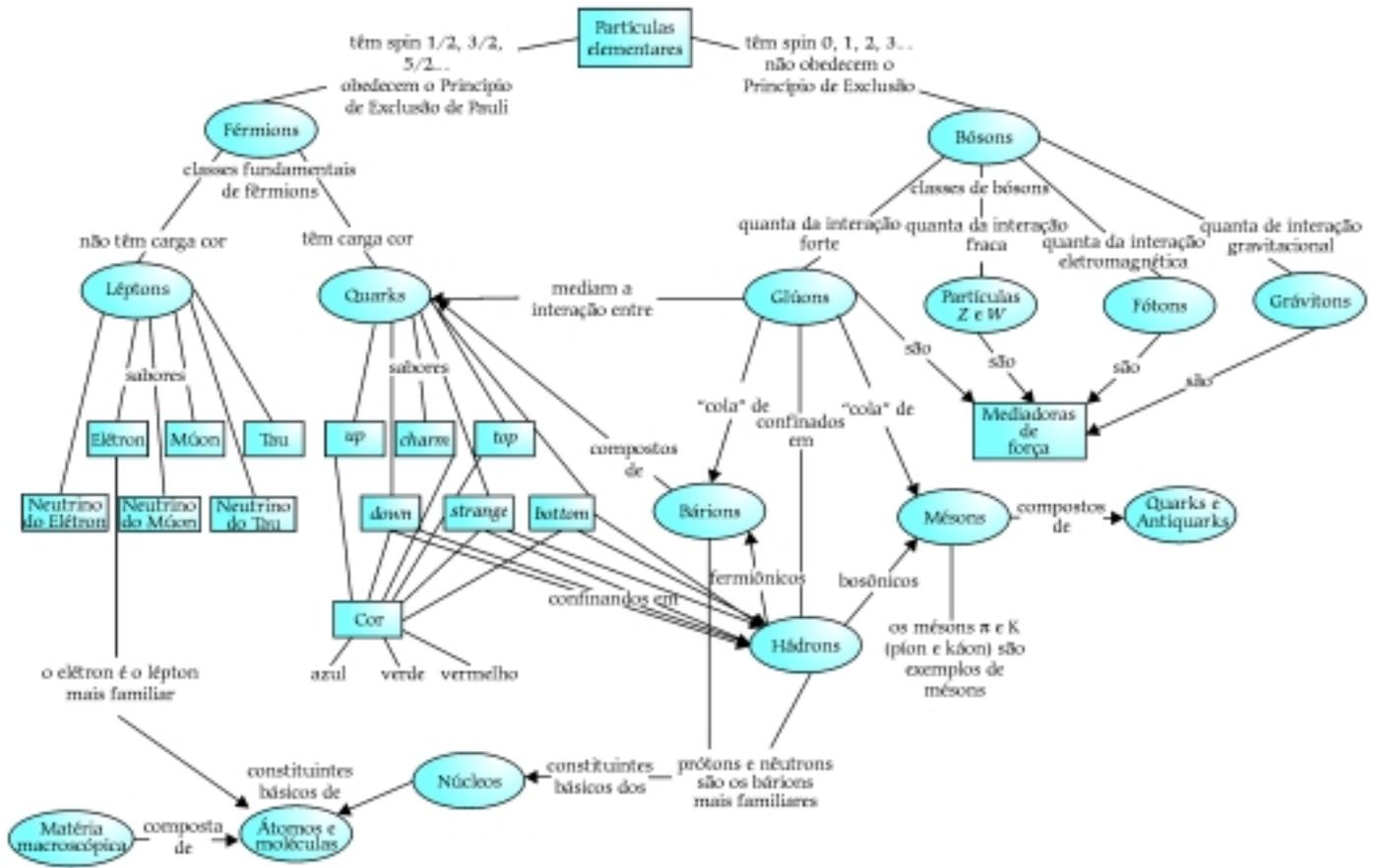


Figura 1. Um mapa conceitual entre partículas elementares (M.A. Moreira, 1989, revisado em 2004).

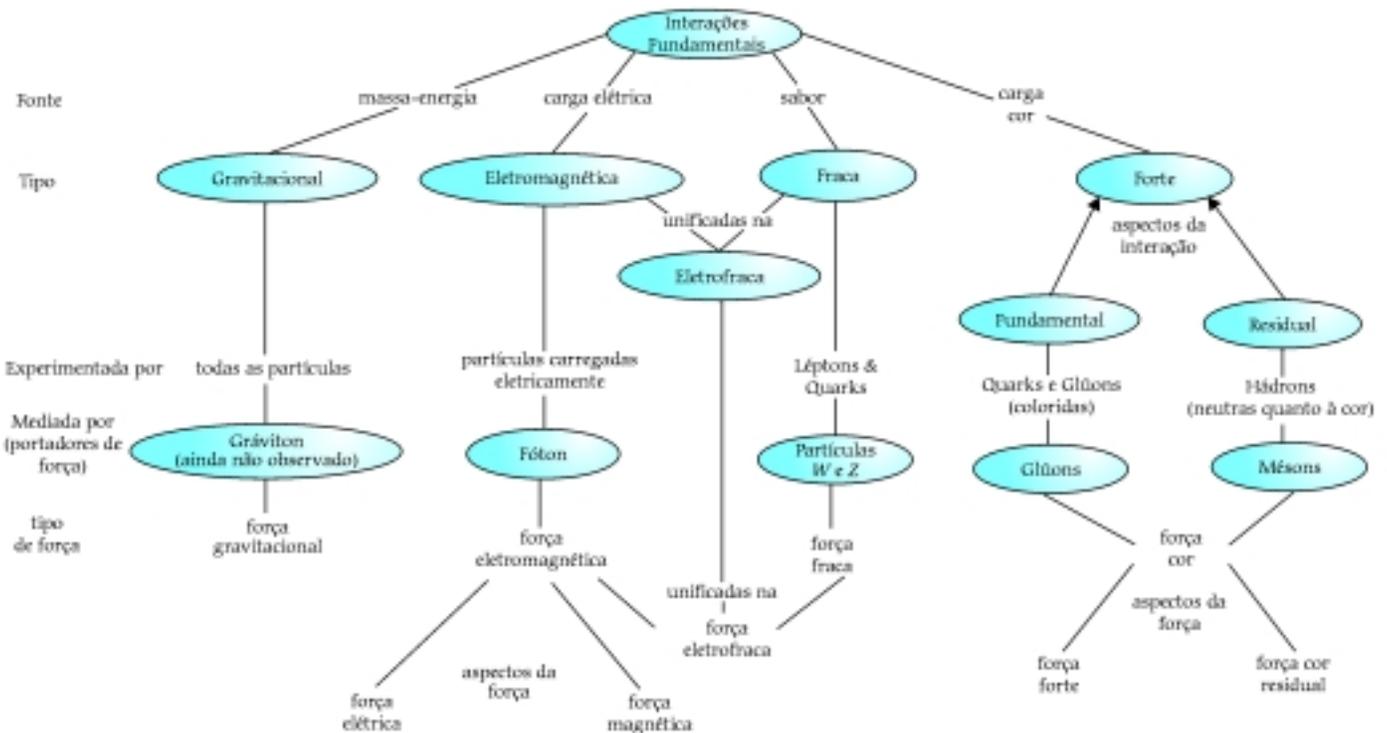


Figura 2. Um mapa conceitual para interações fundamentais (M.A. Moreira, 1990, revisado em 2004).

é, na sua permanente tentativa de dominar, construindo e testando modelos do universo em que vive, a Física é considerada, na escola, uma matéria difícil, pouco motivadora, aprendida mecanicamente. As causas são muitas, mas a falta de atualização ou, pelo menos, de reformulação do currículo deve ser uma das mais importantes. O currículo de Física nas escolas é desatualizado; ensina-se uma Física que não chega ao século XX que é quase só Mecânica e que invariavelmente começa pela Cinemática. Esta, por seu caráter altamente representacional, é, psicologicamente, talvez o mais inadequado dos conteúdos para se começar a aprender Física. Por que, então, não começar com tópicos contemporâneos? Difícilmente serão mais inapropriados do que a Cinemática, a Estática e a Dinâmica.

O presente trabalho pretende contribuir para uma reflexão nesse sentido e, ao mesmo tempo, servir como material de apoio para professores que queiram renovar ou, quem sabe, resgatar a Física no Ensino Médio.

Notas

¹Apesar de consagrado, o termo *partícula elementar*, em especial a palavra *partícula*, não é adequado para nomear as unidades fundamentais da matéria. No domínio subatômico, partícula não é um corpúsculo, um corpo diminuto. Pensar as partículas elementares como corpos muito pequenos, com massas muito pequenas, ocupando espaços muito pequenos, funciona como obstáculo representacional para compreendê-las de maneira significativa (partículas elementares podem, por exemplo, não ter massa; além disso, tais partículas não têm existência situada, *i.e.*, não podem ser localizadas com precisão). Por esta razão, ao longo deste texto as partículas elementares não serão referidas ou representadas por corpúsculos ou “bolinhas” como aparece na maioria dos textos didáticos sobre esse tema.

²Spin é uma propriedade fundamental das partículas elementares que descreve seu estado de rotação; é o *momentum* angular intrínseco das partículas. De acordo com as regras da

Mecânica Quântica, o spin das partículas elementares pode ter apenas determinados valores que são sempre um número inteiro (0, 1, 2, 3, ...) ou semi-inteiro (1/2, 3/2, 5/2, ...) multiplicados por \hbar ($h/2\pi$; onde $h \cong 6,6 \cdot 10^{-22}$ MeV.s é a constante de Planck, a constante fundamental da Mecânica Quântica). Isso significa que o spin das partículas elementares é uma propriedade essencialmente quântica, ou seja, um número quântico, sem análogo na Física Clássica, pois se tais partículas fossem bolinhas girando em torno de um eixo seu *momentum* angular poderia ter qualquer valor.

³De acordo com esse princípio, duas partículas da mesma espécie e com spins não inteiros não podem ocupar o mesmo estado quântico. Férmions (léptons e quarks) obedecem a esse princípio, bósons (fótons, glúons e partículas *W* e *Z*) não.

⁴Grávitons seriam, teoricamente, partículas de massa nula e spin 2. Fótons são também partículas de massa nula, porém a troca de fótons produz atração entre partículas de cargas opostas e repulsão entre partículas de mesma carga, enquanto a troca de grávitons produz só atração. No entanto, em condições terrestres a atração gravitacional é tão fraca que os *quanta* dessa interação são praticamente indetectáveis. A interação gravitacional torna-se dominante em energias da ordem de $2 \cdot 10^{-5}$ g, que é a chamada massa de Planck (ou energia de Planck), que seriam fantásticamente grandes para serem produzidas em condições de laboratório. Note-se que, devido à equivalência massa-energia, faz sentido medir a energia em unidades de massa e a massa em unidades de energia. A massa de Planck, $2 \cdot 10^{-5}$ g, equivale à energia de Planck, $1,1 \cdot 10^{19}$ GeV (Giga eV = 10^9 eV, onde $1 \text{ eV} \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$ J é a energia adquirida por um elétron acelerado ao longo de uma diferença de potencial de 1 V).

⁵Cada glúon tem uma cor (vermelho, verde e azul) e uma anticor (antivermelho, antiverde e antiazul), de modo que haveria nove possibilidades de pares cor anticor que corresponderiam a nove glúons. No

entanto, de acordo com a teoria da carga cor, a chamada Cromodinâmica Quântica (em analogia à Eletrodinâmica Quântica), no caso das possibilidades vermelho-antivermelho, verde-antiverde e azul-antiazul poderia haver transições de uma para outra que levaria a três combinações (superposições) lineares entre elas, das quais uma seria totalmente sem cor, *i.e.*, branca. Portanto, há oito glúons, não nove como pareceria inicialmente. Assim como a carga elétrica, a carga cor também obedece uma lei de conservação, porém enquanto existe apenas uma carga elétrica, há oito cargas cores distintas (Okun, 1987, p. 41-42).

⁶Medir a intensidade de duas grandezas físicas simultaneamente implica duas medições, porém a realização da primeira medida poderá perturbar o sistema e criar uma incerteza na segunda. Nesse caso, não será possível medir as duas simultaneamente com a mesma precisão. Não se pode, por exemplo, medir tanto a posição como a velocidade de uma partícula com toda precisão, nem sua exata energia num exato momento. Macroscopicamente isso não faz diferença, pois a perturbação é tão pequena que pode ser ignorada, porém para partículas subatômicas o efeito é dramático (Close, 1983, p. 175).

Bibliografia

- F. Close, *The Cosmic Onion. Quarks and the Nature of the Universe* (American Institute of Physics, USA, 1983), 180 p.
- P. Colas y B. Tuchming, *Mundo Científico* **247**, 46 (2003).
- H. Fritzsch, *Quarks: The Stuff of Matter* (Basic Books Inc., USA, 1983), 295 p.
- P.I.P. Kalmus, *Contemporary Physics*, **41**, 129 (2000).
- G. Kelly, *A Theory of Personality - The Psychology of Personal Constructs* (W.W. Norton & Company, New York, 1963), 189 p.
- M.A. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **11**, 114 (1989).
- M.A. Moreira, *Enseñanza de las Ciencias* **8**, 133 (1990).
- M.A. Moreira e B. Buchweitz, *Mapas Conceituais. Instrumentos Didáticos, de Avaliação e de Análise de Currículo* (Editora Moraes, São Paulo, 1987), 83 p.
- L.B. Okun, *A Primer in Particle Physics* (Harwood Academic Publishers, UK, 1987), 112 p.