



Uma das características do homem é sua constante curiosidade sobre tudo o que nos cerca. Desde as cavernas, tentamos entender a natureza e a razão de nossa própria existência através de perguntas aparentemente simples – por quê, como, para quê, etc. –, mas extremamente penetrantes.

Um dos primeiros questionamentos foi ‘De que as coisas são feitas?’ A resposta tem evoluído ao longo do tempo, segundo nossos conhecimentos acumulados e passados de geração em geração.

Aqui, apresentamos nosso entendimento atual sobre os blocos constituintes da matéria e as forças que regem os fenômenos da natureza. Será uma visão definitiva? Certamente, não. A cada dia, temos algo novo a acrescentar a esse quadro. Quem sabe, você, leitor, não nos ajudará a encontrar o lugar de uma peça neste imenso quebra-cabeça que é a natureza?

Com este folder, damos prosseguimento às atividades de divulgação científica realizadas pelo CBPF. Esta série destina-se ao público não especializado, que encontrará aqui uma introdução às partículas elementares, bem como referências para leituras mais aprofundadas sobre essa área fascinante e atual.

Mais uma vez, esperamos que esta iniciativa sirva para despertar vocações em jovens estudantes, mostrando a eles que este é um campo promissor e sempre à espera de novos talentos.

João dos Anjos
COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Eduardo Campos

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF
Ricardo Magnus Osório Galvão

EDITORES CIENTÍFICOS
João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)
Adriano Antônio Natale (Instituto de Física Teórica/
Universidade Estadual Paulista)

APOIO FINANCEIRO
Vitae

REDAÇÃO E EDIÇÃO
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO, DIAGRAMAÇÃO, INFOGRÁFICOS E TRATAMENTO DE IMAGEM
Amper sand Comunicação Gráfica
(www.amperdesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ
Tel: (0xx21) 2141-7100
Fax: (0xx21) 2141-7400
Internet: <http://www.cbpf.br>

* Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para iva@cbpf.br. Este e outros quatro folders, bem como a revista CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa, estão disponíveis em formato PDF em <http://www.cbpf.br/Publicacoes/>

Vitae não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da
Ciência e Tecnologia



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2005

Partículas Elementares

A (des)construção da matéria pelo homem

Sumário

A NATUREZA DAS COISAS

Terra, fogo, água e ar
O não divisível

FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL

Atomismo
Misteriosa radiação

VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO

Grande vazio
Retrato do átomo quando jovem

CRISE E ANTIMATÉRIA

O sagrado e a heresia
Senhoras e Senhores Radioativos...
A antimatéria

OS MÉSONS EM CENA

Força forte
Quem encomendou isso?
Finalmente, o píon

UM ZÔ SUBATÔMICO

Partículas estranhas
Multa de 10 mil

VOLTA À SIMPLICIDADE

Simple e elegante
Sempre confinados
Aceitação de um modelo

MODELO PADRÃO

Listagem completa
Precisão e sensibilidade
Unificando fenômenos
As quatro forças
Breve cenário brasileiro

O FUTURO

Os limites do modelo
O que falta descobrir
Volta às origens

Fontes

A. A. NATALE e C. L. VIEIRA (eds). *Universo Sem Mistério – Uma visão descomplicada da física contemporânea: do Big Bang às partículas* (Vieira & Lent, Rio de Janeiro, 2003).

A. PAIS. *Inward Bound*. (Oxford University Press, Oxford, 1986)

F. CLOSE, M. MARTEN e C. SUTTON. *The Particle Explosion* (Oxford University Press, Oxford, 1987)

J. GRIBBIN. *Q is for Quantum* (Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1998)

NOBELPRIZE.ORG e PARTICLE DATA GROUP. *Structure of Matter*. Disponível em nobelprize.org/physics/educational/index.html

P. I. P. KALMUS. ‘Particle Physics’. In: *Physics Now – Review by leading physicists in the International Union of Pure and Applied Physics*. Jon Ogborn (ed.) (IUPAP, 39, pp. 65-73, 2004)

S. L. LLOYD. ‘Elementary Particle Physics Lectures’. Disponível em formato PDF em hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/

S. WEINBERG. *The Discovery of Subatomic Particles* (Penguin Books, Londres, 1993)

S. WOLFRAM. ‘History [of elementary particles]’. In: *A New Kind of Science* (Wolfram Media, s/l, notas para o capítulo 9, p. 1.043, 2002)

THE PARTICLE ADVENTURE. ‘Early Atomic Understanding’ e ‘Summary of Particle Physics’. Disponível em particleadventure.org (em português, www.aventuradasparticulas.ift.unesp.br/)

V. F. WEISSKOPF. ‘Elementary Particles’. In: *Physics*. Samuel Rapport e Helen Wright (eds.) (Washington Square Press, Washington, 1965)

V. L. FITCH e J. L. ROSNER. ‘Elementary Particle Physics in the Second Half of the Twentieth Century’. In: *Twentieth Century Physics*. Laurie M. Brown, Abraham Pais e Sir Brian Pippard (Institute of Physics Publishing / American Institute of Physics Press, Bristol e Filadélfia / NovaYork, vol. II, pp. 635-769, 1995)

W. BRAGG. ‘To See Atoms’. In: *The Search for Roots*. Primo Levi (Ivan R. Dee, Chicago, 2002)

W. E. LAMB, JR. ‘Fine Structure of Hydrogen Atom’. Palestra feita em 12 de dezembro de 1955 pelo recebimento do Nobel de física daquele ano. Disponível em nobelprize.org

A NATUREZA DAS COISAS

TERRA, FOGO, ÁGUA E AR • De que são feitas as coisas? Várias civilizações, em diferentes épocas, deram respostas para essa pergunta. Para o filósofo grego Empédocles (c. 490-430 a.C.), por exemplo, haveria quatro elementos eternos (terra, fogo, água e ar) e duas forças fundamentais: uma atrativa (o amor) e outra repulsiva (o ódio). Para os antigos chineses e indianos, madeira, metal e espaço também seriam constituintes básicos da matéria.

O NÃO DIVISÍVEL • Por volta do século 5 a.C., os filósofos gregos Leucipo (c.480-420 a.C.) e Demócrito (c.460-370 a.C.) propuseram que a matéria era formada por corpúsculos diminutos, invisíveis, dotados de movimento veloz. Essas entidades foram denominadas átomos, cujo significado é 'não' (a) 'divisível' (tomo). As idéias da escola atomista sobreviveram no poema *De Rerum Natura (Sobre a natureza das coisas)*, do romano Lucrecio (c. 99-55 a.C.).

VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO

GRANDE VAZIO • Em 1909, o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) e dois auxiliares, o inglês Ernest Marsden (1889-1970) e o alemão Hans Geiger (1882-1945), bombardearam folhas de ouro finíssimas com partículas de carga positiva emitidas por uma fonte radioativa. O resultado causou profunda estranheza. Parte dessas partículas – denominadas radiação alfa – ricocheteavam bruscamente ao atingir a lâmina do metal. Dois anos depois, Rutherford, em letras trêmulas, descreveu sua conclusão: o átomo continha um caroço maciço, de carga elétrica positiva, no qual estavam 99,99% de sua massa. “O átomo é um grande vazio”, resumiu Rutherford. Em 1919, ele associaria a carga positiva nuclear a uma nova partícula: o próton, cerca de 2 mil vezes mais pesado que o elétron.

RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM • Um esquema mais detalhado do núcleo atômico se completaria em 1932, quando o físico inglês James Chadwick (1891-1974) mostrou que o próton dividia a desprezível dimensão do núcleo – cujo diâmetro é da ordem de 10^{-14} metro – com uma partícula sem carga elétrica. Era o nêutron, levemente mais pesado que seu companheiro nuclear. O retrato do átomo parecia apresentar seu contorno final: um núcleo – formado por prótons e nêutrons – orbitado por elétrons. Além desses três, conheciam-se os fótons, as partículas de luz, cuja comprovação experimental havia ocorrido em meados da década de 1920. Porém, uma era nuclear cheia de surpresas estava por vir.

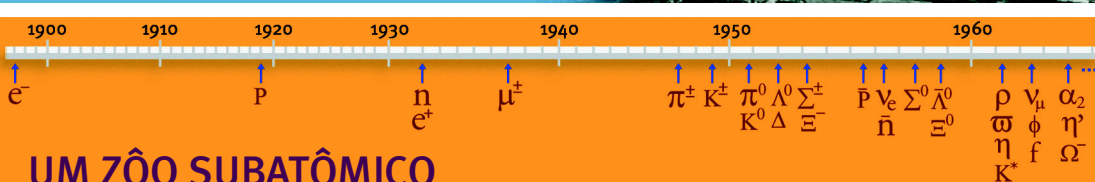
CRISE E ANTIMATÉRIA

O SAGRADO E A HERESIA • Pouco antes da descoberta do nêutron, uma crise entrou em cena. Motivo: o decaimento beta, processo em que um nêutron se transforma num próton e “cospe” um elétron do núcleo. Mas algo intrigava os físicos. As contas do balanço energético dessa forma de radioatividade não fechavam. Faltava um resquício – desprezível, é verdade – de energia que não era observado nos experimentos. Para explicar essa diferença, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) chegou a propor uma heresia: a conservação de energia – popularmente conhecida como ‘nada se cria, tudo se transforma’, um princípio sagrado para os físicos – não valeria para esse fenômeno. Era um ato de desespero.

OS MÉSONS EM CENA

FORÇA FORTE • Uma pergunta – aparentemente simples – ainda intrigava os físicos: o que mantém o núcleo coeso? Prótons, sendo positivos, deveriam se repelir, e nêutrons não sentem a força eletromagnética. No início da década de 1920, já se desconfiava que uma força atrativa, muito intensa, deveria impedir a desintegração (desmantelamento) do núcleo. Em 1935, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) lançou uma idéia ousada: se a interação eletromagnética se dá pela troca de fótons entre as partículas com carga elétrica, por que algo semelhante não poderia ocorrer entre prótons e nêutrons? Surgiu assim o méson – em grego, ‘médio’ –, pois sua massa estaria entre a do próton e a do elétron.

QUEM ENCOMENDOU ISSO? • Dois anos depois, foi detectada uma partícula com as características do méson de Yukawa. Mas, em 1945, mostrou-se que ela praticamente não interagia com o núcleo atômico. Estranho, pois, caso ela fosse a responsável pela força forte, ela deveria, ao atravessar a matéria, ser ‘sugada’ com voracidade por prótons



UM ZÔO SUBATÔMICO

PARTÍCULAS ESTRANHAS • Não bastasse o múon ser tratado como *persona non grata* no clube das partículas elementares, vieram outras surpresas inexplicáveis: começaram a ser detectadas partículas que se formavam em pares e que ‘viviam’ muito mais tempo que o previsto. As ‘partículas estranhas’ – mais tarde, reconhecidas como mésons K (ou cáons) – eram apenas o prenúncio de uma torrente inesperada de novidades.

MULTA DE 10 MIL • A partir da década da 1950,

SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS... • Em 1930, uma carta do físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) começava com ‘Senhoras e Senhores Radioativos’. Nela, ele se desculpava por sua ausência num congresso e propunha a solução para o mistério: uma partícula sem carga, de massa possivelmente nula, responderia pela energia que faltava. A aceitação do neutrino – como foi batizado pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), que a empregou para dar a primeira teoria satisfatória do decaimento beta – foi surpreendente. Teóricos passaram a empregar essa partícula-fantasma com entusiasmo, mesmo que ela só tenha sido detectada em 1955.

ou nêutrons. Sua identidade acabou revelada: era o múon, um primo mais pesado do elétron, o que acabou embaralhando todo o ‘menu’ de partículas da época. Com certa indignação e humor, o físico austríaco Isidor Rabi (1898-1988) resumiu o espanto dos físicos: “Quem encomendou essa partícula?”

FINALMENTE, O PÍON • O méson de Yukawa – hoje, conhecido como méson pi (ou píon) – só foi detectado em 1947 na observação de raios cósmicos, por uma equipe da Universidade de Bristol (Inglaterra), liderada pelo inglês Cecil Powell (1903-1969) e com participação determinante do físico brasileiro César Lattes (1924-2005). No ano seguinte, Lattes e o norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) detectaram píons produzidos artificialmente no acelerador de partículas da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos). Essa descoberta mostrou que a produção e a detecção de partículas podiam ser feitas de modo mais controlado com o desenvolvimento de aceleradores mais potentes e detectores mais precisos.

com o advento dos grandes aceleradores, formou-se um verdadeiro zoológico de novas partículas. Cada uma ganhou uma letra grega. Eram tantas que, nas palavras de um físico, temeu-se que o alfabeto grego não fosse suficiente. Em 1955, o físico norte-americano Willis Lamb Jr. descreveu o espanto de seus colegas: “[...] o descobridor de uma nova partícula elementar costumava ser agraciado com o prêmio Nobel, mas agora deveria ser punido com uma multa de \$10 mil [dólares]”. Acima, vê-se como o cardápio de partículas se avolumou na época.

A ANTIMATÉRIA • Em 1928, as equações nas quais o físico inglês Paul Dirac (1902-1984) trabalhava revelaram o inusitado: a existência de partículas de carga positiva com massa igual à do elétron. Era a primeira evidência de algo que os físicos hoje aceitam com naturalidade: a antimatéria. Esse elétron positivo – batizado pósitron – foi recebido com desconfiança. Mas, em 1932, ele foi detectado pelo norte-americano Carl Anderson (1905-1991). Pouco depois, percebeu-se que todas as partículas teriam sua correspondente antipartícula. Duas décadas depois, foram capturados o antipróton e o antinêutron. A antimatéria é parte da natureza, apesar de rara no universo atual.

VOLTA À SIMPLICIDADE

SIMPLES E ELEGANTE • Para dar alguma ordem e explicar as propriedades das partículas recém-descobertas, os físicos norte-americanos Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram uma nova família de partículas subnucleares: os quarks. Inicialmente, ela conteria três membros: o *up*, o *down* e o *strange*. Segundo esse novo modelo, os mésons seriam formados por um par de quarks – na verdade, um quark e um antiquark –, e os bárions (prótons e nêutrons, por exemplo) conteriam um trio de quarks. Diferentes combinações desses quarks podiam explicar todos os mésons e bárions conhecidos. E o que manteria os quarks ligados para formar mésons e bárions? Entram em cena os glúons – o nome vem de *glue*, do inglês cola. Quarks permanecem ligados pela transferência mútua

e frenética dos glúons, os verdadeiros ‘carregadores’ da força forte nuclear.

SEMPRE CONFINADOS • Diferentemente das forças gravitacional e eletromagnética, a força forte entre os quarks aumenta conforme aumenta a distância entre eles – pode-se imaginar que glúons agem como elásticos ligando os quarks. E isso tem uma implicação: quarks não são observados livres, vivendo, portanto, confinados dentro dos bárions e mésons.

ACEITAÇÃO DE UM MODELO • Mais uma peculiaridade dos quarks: eles têm cargas elétricas que são uma fração da carga do elétron ou do próton (+2/3 ou -1/3), pois só assim é possível explicar a carga elétrica dos bárions e dos mésons. Por exemplo, um próton é formado por dois quarks *up* (+2/3) e um *down*

(-1/3). A soma total das cargas elétricas ($2/3 + 2/3 - 1/3$) é igual a 1. Por conta do confinamento e das cargas fracionárias, o modelo dos quarks foi recebido com ceticismo. No final da década de 1960, experimentos no acelerador de Stanford (Estados Unidos) – e conceitualmente similares ao experimento de Rutherford – deram fortes evidências de que prótons e nêutrons continham subestruturas. E o modelo de quarks – inicialmente encarado apenas como um artifício matemático – forneceu uma boa interpretação desses resultados, trazendo de volta simplicidade e certa elegância ao mundo das partículas elementares. Curiosidade: Gell-Mann tirou o nome quark de uma passagem – “Three quarks for Muster Mark” (Três quarks para o Senhor Mark) – do romance *Finnegans Wake*, do irlandês James Joyce (1882-1941).

MODELO PADRÃO

LISTAGEM COMPLETA • Em meados da década de 1970, os físicos já tinham uma listagem completa das partículas elementares da natureza, mesmo que muitas ainda estivessem por ser detectadas, pois precisavam ser criadas em colisões que reproduzisse os níveis de energia dos momentos iniciais do universo. Esse esquema teórico ganhou o nome modelo padrão de partículas e interações (ou forças) fundamentais. A tabela ao lado mostra o atual quadro de partículas elementares.

PRECISÃO E SENSIBILIDADE • À medida que os aceleradores foram aumentando seu poder de acelerar partículas – bem como a precisão e a sensibilidade de detectores gigantes foram aprimoradas –, começaram a surgir os integrantes previstos pelo modelo padrão. Por exemplo: o quark *charm* (1974); o tau (1975), um primo mais pesado do elétron e do múon; o *bottom* (1977); os glúons (1979); as partículas *W*⁺, *W*⁻ e *Z*⁰ (1983), ‘carregadoras’ da força fraca nuclear. E, finalmente, em 1995, o ‘último dos moicanos’: o quark *top*. Uma lista das principais partículas conhecidas hoje pela física pode ser encontrada em www.cbpf.br/Publicações.

UNIFICANDO FENÔMENOS • A história da física pode ser contada pelo viés da unificação dos fenômenos. No século 17, Newton mostrou que a gravidade terrestre e a cósmica eram uma só. No século seguinte, o inglês Michael Faraday (1791-1867) uniu a eletricidade com o magnetismo. O eletromagnetismo, por sua vez, foi unificado com a óptica nas equações do escocês James Maxwell (1831-1879). Na área de partículas elementares, os norte-americanos Steven Weinberg, Sheldon Glashow e o paquistanês Abdus Salam

| | LÉPTONS | | QUARKS | |
|-------------------|---------|---------------------|--|----------------|
| 1ª família | Elétron | Neutrino do elétron | Up | Down |
| 2ª família | Múon | Neutrino do múon | Charm | Strange |
| 3ª família | Tau | Neutrino do tau | Top | Bottom |
| | Glúons | Fótons | Bósons vetoriais intermediários <i>W</i> ⁺ <i>W</i> ⁻ <i>Z</i> ⁰ | Grávitons ? |

(1926-1996) propuseram, na década de 1960, de forma independente, a teoria eletrofraca, que unificava as forças (ou interações) eletromagnética e fraca.

AS QUATRO FORÇAS • A seguir, está uma breve descrição das quatro interações (ou forças) fundamentais da natureza, bem como exemplos de fenômenos regidos por cada uma delas:

- ▶ a interação gravitacional, a qual se espera que ocorra pela troca de grávitons – partícula ainda não detectada –, age em todos os corpos com massa (ou energia), sendo responsável por atrair de volta à superfície um objeto lançado ao ar ou manter a Terra girando em torno do Sol;
- ▶ a interação eletromagnética – cuja partícula intermediária é o fóton – atua nos corpos dotados de carga elétrica, estando por trás de fenômenos como o atrito e a formação de moléculas;
- ▶ a interação fraca nuclear manifesta-se pela troca de três partículas (*W*⁺, *W*⁻ e *Z*⁰), agindo sobre léptons (partículas leves que não ‘sentem’ a interação forte) e quarks e estando envolvida na radioa-

tividade e na produção de energia nas estrelas; ▶ a interação forte, cuja partícula intermediária é o glúon, atua sobre uma propriedade que quarks e os próprios glúons têm – a chamada carga de cor, uma analogia com a carga elétrica nas interações eletromagnéticas –, sendo responsável por manter o núcleo atômico coeso e, em última instância, pela existência dos diferentes elementos da tabela periódica.

BREVE CENÁRIO BRASILEIRO • Desde a detecção do píon por Lattes em Bristol e Berkeley, o Brasil tem mantido uma longa tradição na área de física de partículas. Nas últimas décadas, o país vem participando dos principais projetos nos grandes aceleradores, como o Fermilab (Estados Unidos) e o CERN (Suíça). Físicos brasileiros, além de terem proposto a existência de novas partículas, como o *Z*⁰, participaram de experimentos em que muitas delas – por exemplo, o méson sigma e o quark *top* – foram detectadas.

O FUTURO

OS LIMITES DO MODELO • Até hoje, o modelo padrão – teoria na qual estão reunidas as forças eletromagnética, fraca e forte – passou com louvor nos testes a que foi submetido. Porém, ele tem limitações. Não indica, por exemplo, por que há três famílias (ou gerações) de léptons e quarks. Nem é capaz de explicar por que alguns léptons e quarks são tão mais pesados que seus companheiros. Experimentos recentes mostraram que os neutrinos têm massa, e isso cria para o modelo dificuldades que os físicos tentam agora driblar. Há muita expectativa em relação à detecção do chamado bóson de Higgs, uma partícula que seria a responsável pela geração das massas de todas as partículas, o que resolveria parte das limitações do modelo. Espera-se que isso ocorra com os experimentos no acelerador LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), que promete entrar em funcionamento em 2007 no CERN.

O QUE FALTA DESCOBRIR • Um século depois de a física incorrer no escândalo filológico de fraturar o átomo – na síntese perspicaz atribuída ao escritor argentino Jorge Luis Borges (1899-1986) –, unificar as quatro forças é ainda um sonho. O melhor candidato para isso é a chamada teoria de supercordas, que trata as partículas elementares não como pontos sem dimensão, mas sim como diminutas cordas. Cada modo de vibração dessas entidades representaria uma partícula elementar, assim como cada frequência de vibração de uma corda de violino está associada a uma nota musical. O problema é que a teoria de supercordas prevê não só um novo zoológico subatômico, as chamadas S-partículas, mas também dimensões espaciais extras, além das três conhecidas (altura, largura e comprimento). Se uma S-partícula for detectada nas colisões de altíssimas energias do LHC, uma nova revolução estará batendo à porta da física. Será uma evidência de que os físicos descobriram a trilha – ainda estreita e escura – rumo à unificação final. Acredita-se que o LHC também poderá testar se os quarks contêm subestruturas.

VOLTA ÀS ORIGENS • Talvez, 25 séculos depois dos primeiros questionamentos sobre a estrutura básica da matéria, os físicos cheguem a uma resposta definitiva. Ou, talvez, fenômenos e partículas inéditos surjam nas novas gerações de aceleradores. E aí uma nova era na física irá começar, forçando o homem novamente a se perguntar: “De que são feitas as coisas?”

