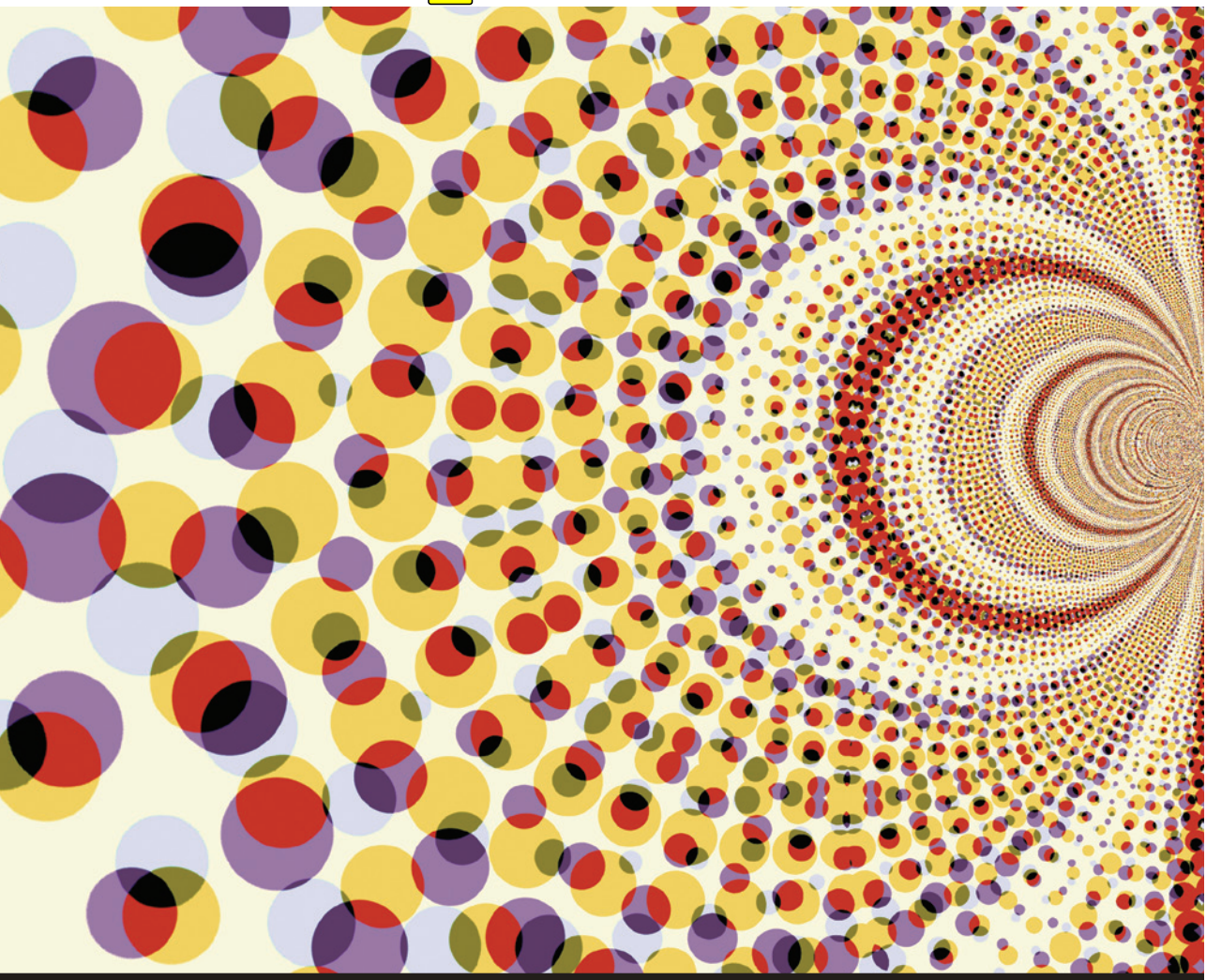


Partículas Elementares

A (des)construção da matéria pelo homem

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 a partir 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?

32. | **A NATUREZA DAS COISAS** | TERRA, FOGO, ÁGUA E AR | O NÃO DIVISÍVEL

34. | **FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL** | ATOMISMO | MISTERIOSA RADIAÇÃO

35. | **VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO** | GRANDE VAZIO | RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM

36. | **CRISE E ANTIMATÉRIA** | O SAGRADO E A HERESIA | SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS | A ANTIMATÉRIA

38. | **OS MÉSONS EM CENA** | FORÇA FORTE | QUEM ENCOMENDOU ISSO? | FINALMENTE, O PÍON

40. | **UM ZÔO SUBATÔMICO** | PARTÍCULAS ESTRANHAS | MULTA DE 10 MIL

41. | **VOLTA À SIMPLICIDADE** | SIMPLES E ELEGANTE | SEMPRE CONFINADOS | ACEITAÇÃO DE UM MODELO

43. | **MODELO PADRÃO** | LISTAGEM COMPLETA | PRECISÃO E SENSIBILIDADE | UNIFICANDO FENÔMENOS | AS QUATRO FORÇAS | BREVE CENÁRIO BRASILEIRO

46. | **O FUTURO** | OS LIMITES DO MODELO | O QUE FALTA DESCOBRIR | VOLTA ÀS ORIGENS

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

FOTO IAN SIMS

FOTO RAINER BERG

A NATUREZA DAS COISAS

TERRA, FOGO, ÁGUA E AR

De que são feitas as coisas? Várias civilizações, em diferentes épocas, formularam respostas a essa pergunta. Para o filósofo grego Empédocles (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

FOTO MICHALLEMANN

FOTO ALEX MARTIN

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 (480-420 a.C.) e Demócrito (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 Lucrécio (99-55 a.C.).

FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL

ATOMISMO

No século 17, o físico e matemático inglês Isaac Newton (1642 – 1727) retomou a concepção de que a matéria – inclusive a luz – era formada de corpúsculos. Mas a idéia se popularizou a partir de 1802, quando o químico John Dalton (1766-1844), seu conterrâneo, formalizou que tudo era feito de átomos. No final do século 19, em parte por influência desses dois cientistas, a realidade dos átomos se tornou um importante tema de debate, principalmente na Inglaterra.

MISTERIOSA RADIAÇÃO

Naquela época, as pesquisas sobre a eletricidade despertavam grande interesse entre os físicos. Vários se dedicavam, por exemplo, a decifrar a natureza de uma misteriosa radiação que brotava do pólo negativo (cátodo) de ampolas de vidro em cujo interior havia gases rarefeitos – aperfeiçoados, esses equipamentos deram origem aos tubos de TV. Experimentos desse tipo levaram o físico inglês Joseph Thomson (1856-1940) à conclusão de que os raios catódicos eram partículas subatômicas de carga negativa: os elétrons. O átomo havia sido fragmentado. E, para Thomson, ele se assemelhava a um pudim cuja massa (positiva) era recheada de ameixas (elétrons).

THE FRANKLIN INSTITUTE/ THE CASE FILES

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 estava 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.

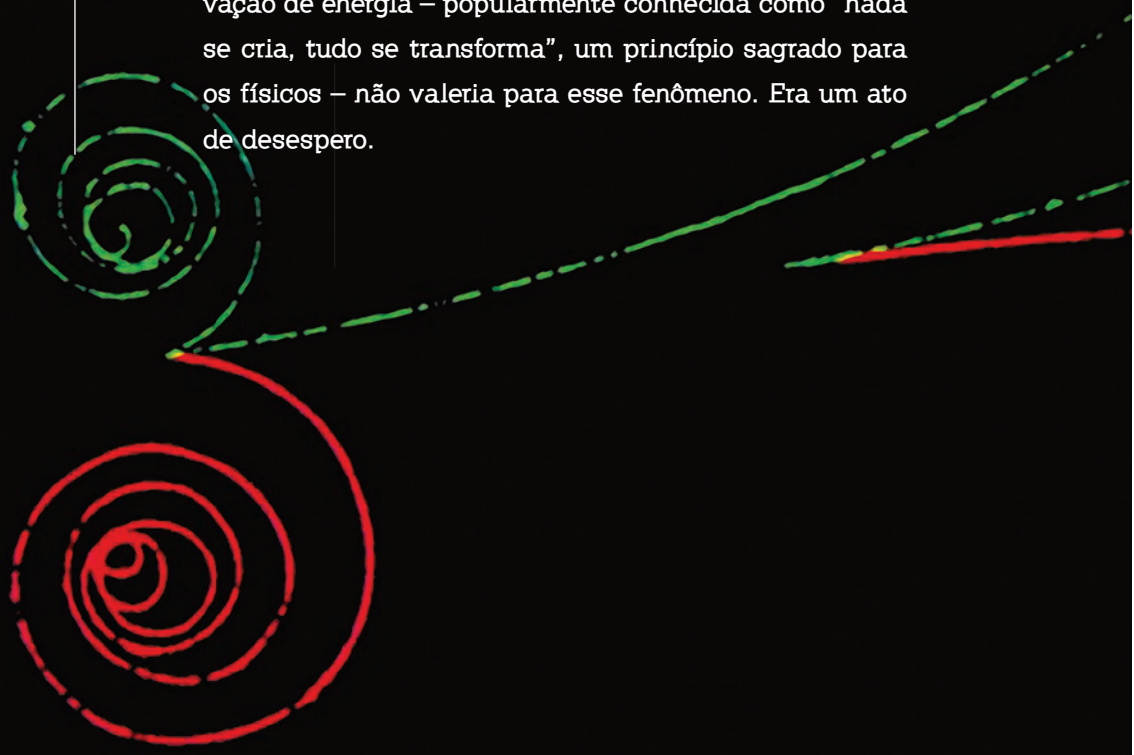
RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM

Um esquema mais detalhado do núcleo atômico se completou 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}m – 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.



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 1956.

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.

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 de que uma força atrativa, muito intensa, impedisse 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? Surgia 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. Entretanto, 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 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.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA/BERKELEY

Acelerador de partículas da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos)

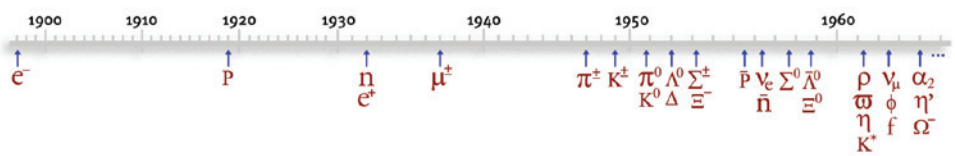
UM ZÔO SUBATÔMICO

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 káons) – eram apenas o prenúncio de uma torrente inesperada de novidades.

MULTA DE 10 MIL

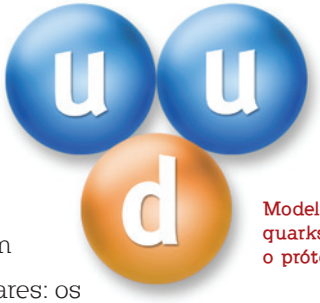
A partir da década da 1950, com o advento dos grandes aceleradores, formou-se um verdadeiro zoológico de novas partículas. Cada uma ganhou uma letra grega. Eram tantas que, nas palavras de um físico, temeu-se que o alfabeto grego não fosse suficiente. Em 1955, o físico norte-americano Willis Lamb Jr. 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]". Abaixo, vê-se como o cardápio de partículas se avolumou na época.



Cronologia das partículas elementares

VOLTA À SIMPLICIDADE

SIMPLES E ELEGANTE



Modelo de quarks para o próton

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 do inglês *glue*, que significa cola. Quarks permanecem ligados pela transferência mútua e frenética dos glúons, os verdadeiros "carregadores" da força forte nuclear.

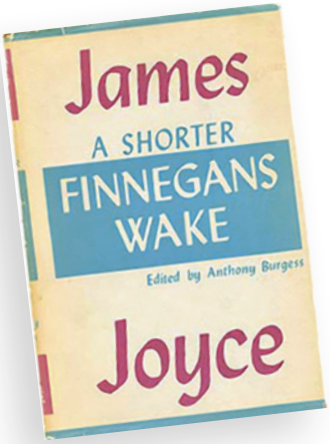
SEMPRE CONFINADOS

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 dos mésons.

FOTO DE BRYAN POWELL/SXC

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 reproduzissem os níveis de energia dos momentos iniciais do universo. Esse esquema teórico ganhou o nome de "modelo padrão de partículas e interações (ou forças) fundamentais". A tabela da página 45 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 ou indicações indiretas da existência deles. 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/Publicacoes.

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 seguin-

te, o inglês Michael Faraday (1791-1867) uniu a eletricidade ao 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 (1926-1996) propuseram, na década de 1960, de forma independente, a teoria eletrofraca, que unificava as forças (ou interações) eletromagnética e fraca.

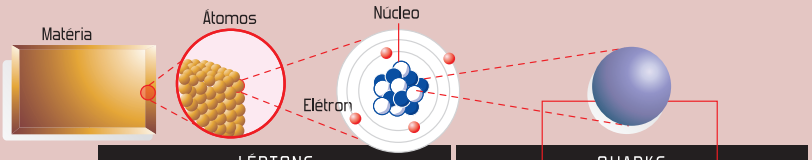
AS QUATRO FORÇAS

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 radioatividade 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.

Tabela de partículas elementares



	LÉPTONS		QUARKS	
Partículas de massa Toda a matéria comum está neste grupo	**Elétron** Responsável pela eletricidade e reações químicas. Carga -1 (o pósitron tem carga +1).	**Neutrino do elétron** Não tem carga elétrica. Massa possivelmente muito pequena	**Up** carga + 2/3 Prótons têm 2 e nêutrons 1	**Down** carga -1/3 Prótons têm 1 e nêutrons têm 2
Partículas produzidas logo após o Big Bang. Hoje, são encontradas em raios cósmicos ou fabricadas em aceleradores	**Múon** Mais pesado que o elétron. Vive cerca de 2 milionésimos de segundo. Carga +/- 1	**Neutrino do múon** Não tem carga elétrica. Criado juntamente com múons quando certas partículas decaem	**Charm** Carga +2/3. Descoberto em 1974. Mais pesado que o up	**Strange** Carga -1/3. Descoberto em 1963. Mais pesado que o down
	Tau Ainda mais pesado. Extremamente instável. Descoberto em 1975. Carga +/-1	**Neutrino do tau** Não tem carga elétrica. Descoberto em 2000	**Top** Carga +2/3. Descoberto em 1995. Ainda mais pesado	**Botton** Carga -1/3. Descoberto em 1977. Ainda mais pesado
Partículas de forças Estas partículas transmitem as quatro interações fundamentais (grávitons ainda não foram descobertos)	**Glúons** Portadores da força forte entre os quarks. Sentidos por quarks e glúons. A liberação explosiva de energia nuclear é resultado da força forte	**Fótons** Partículas de luz portadoras da força eletromagnética. Sentidos por partículas carregadas. Eletricidade, magnetismo e química são resultados da força eletromagnética	**Bósons vetoriais intermediários** W^+ W^- Z^0 Portadores da força fraca. Sentidos por quarks e léptons. Algumas formas de radioatividade resultam da força fraca	**Grávitons** ? Portadores da força gravitacional. Sentidos por todas as partículas. O peso que experimentamos é resultado da força gravitacional

Antimatéria: cada partícula tem sua antipartícula, com a mesma massa e carga elétrica oposta

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 entrou em funcionamento em 2008 no CERN.

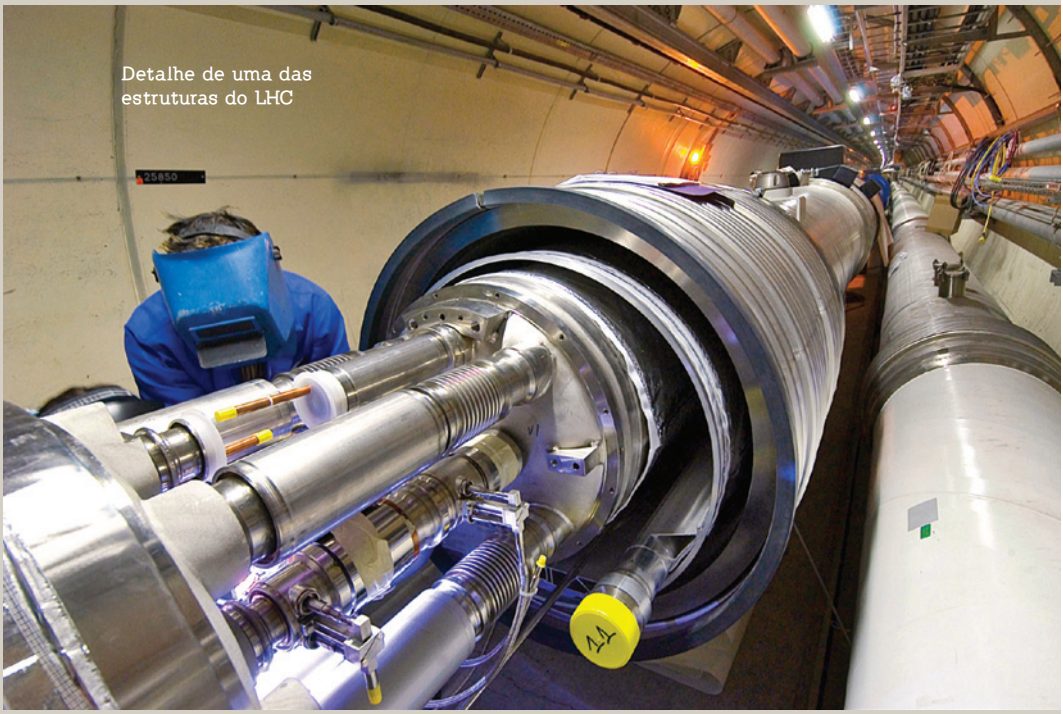
O QUE FALTA DESCOBRIR

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 como cordas diminutas. Cada modo de vibração dessas entidades representaria uma partícula elementar, assim como cada freqüência 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, quem sabe, fenômenos e partículas inéditos surjam nas novas gerações de aceleradores. E aí uma nova era na física começará, forçando o homem novamente a se perguntar: "De que são feitas as coisas?".



Detalhe de uma das estruturas do LHC

LHC/CERN