



Pouca gente sabe que só existem quatro tipos de força na natureza: a gravitacional, responsável pela atração entre os corpos celestes e por estarmos presos ao chão; a força forte, que mantém coeso o núcleo dos átomos; a força fraca, que está por trás de certos tipos de radioatividade, bem como da produção de luz e energia nas estrelas; e a força eletromagnética, que atua entre cargas elétricas e causa o atrito entre os corpos.

No século passado, o desenvolvimento da teoria da relatividade geral e da mecânica quântica deu o arcabouço teórico para a formulação e o entendimento dessas quatro forças (ou interações) fundamentais. A mecânica quântica descreve fenômenos na escala subatômica. A relatividade mostrou que espaço e tempo são dimensões intimamente ligadas e podem, em certas circunstâncias, se dilatar ou se contrair.

Mas será que a relatividade funciona quando efeitos quânticos se tornam importantes? Parece que não. Uma unificação dessas quatro forças, no entanto, parece exigir a existência de dimensões espaciais extras. Será que vivemos em um mundo de dez dimensões? Por que só sentimos quatro delas (comprimento, largura, altura e tempo). Onde estão as outras? Será que um dia poderemos provar a existência delas? Essas questões são tratadas neste folder, que certamente abrirá novas dimensões na maneira de o leitor ver o mundo. Boa leitura.

João dos Anjos

COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Sergio Machado Rezende

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF
Ricardo Magnus Osório Galvão

EDITOR CIENTÍFICO
Nathan Berkovits (Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)

APOIO FINANCEIRO
Vitae

EDIÇÃO DE TEXTO
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO
Amperand 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>

Agradecimentos: Geová Maciel Alencar Filho
(Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)

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

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



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2006

Supercordas

O sonho da **unificação** das quatro forças da natureza

Sumário

CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO
Inconsistentes entre si
Força infinita
As outras forças
Modificação consistente

EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO
Dimensão circular
Objetos unidimensionais

DIMENSÕES EXTRAS
De perto e de longe
Como plantas e peixes

BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO
Sugador de luz e matéria
Sumiço de elefantes
Solução do paradoxo

O PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO
Escapar ou não
Área do horizonte
Superfície bidimensional

TEORIA DAS SUPERCORDAS
Corda fundamental
Modos de vibração
Teste de propriedades
Compactação das dimensões

SUPERSIMETRIA
Bósons e férmions
Princípio da exclusão
Simetrias estabelecidas
O grande acelerador

PESQUISA NO BRASIL
Altas energias

Sugestões para leitura

BERKOVITS, N. "Supercordas: a física do futuro?" In: *O universo sem mistério - uma visão descomplicada da física contemporânea*. (Natale, A. A. e Vieira, C. L., eds.) (Vieira & Lent Casa Editorial, Rio de Janeiro, 2003)

BERKOVITS, N. "Descobrimo a teoria de supercordas" In: *Scientific American Brasil*, artigo de capa de janeiro de 2004

GREENE, B. *Universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva* (Companhia das Letras, São Paulo, 2001)

MALDACENA, J. "Ilusão em três dimensões", In: *Scientific American Brasil*, artigo de capa de novembro 2005

RANDALL, L. *Warped passages - unraveling the mysteries of the universes's hidden dimensions* (Harper Collins, New York, 2005)

Supercordas
O sonho da unificação das quatro forças da natureza

CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO

INCONSISTENTES ENTRE SI • A mecânica quântica, teoria que lida com o microuniverso atômico e subatômico, e a relatividade geral, que trata dos fenômenos gravitacionais, foram postuladas no começo do século passado e talvez sejam as duas teorias mais bem sucedidas de toda a física. Mas há um conflito entre elas. Embora a relatividade geral, finalizada em 1915 pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), tenha sua precisão checada para distâncias interplanetárias, a verificação dela ainda não foi feita para distâncias subatômicas. De fato, há razões teóricas para acreditar que as duas teorias, que são as colunas de sustentação da física contemporânea, sejam inconsistentes entre si.

FORÇA INFINITA • A força gravitacional aumenta à medida que os corpos se aproximam. Se, por acaso, a distância entre a Terra e a Lua caísse para a metade, a força gravitacional entre nosso planeta e seu satélite aumentaria quatro vezes. Se passasse a ser um quarto do que é, a força seria 16 vezes maior. E assim por diante. No entanto, na teoria da relatividade geral, as partículas elementares (elétrons, fótons, quarks etc.) são corpos pontuais, ou seja, sem dimensão. Nesse caso, fica fácil imaginar o que aconteceria com a força gravitacional na colisão entre duas dessas partículas: a força gravitacional entre elas seria infinita, pois a distância entre elas se tornaria nula. Eis aí a causa da inconsistência entre a relatividade geral e a mecânica quântica.

AS OUTRAS FORÇAS • O modelo atual para descrever a força eletromagnética, a força forte e a força fraca (estas duas últimas atuam somente no âmbito do núcleo atômico) é chamado modelo pa-



drão. Embora nele as partículas elementares também sejam corpos pontuais, essas forças são perfeitamente consistentes com a mecânica quântica (vale lembrar que ele foi aprovado em vários experimentos envolvendo distâncias subatômicas). No modelo padrão, a eliminação dos infinitos que surgem quando duas partículas com cargas opostas se aproximam é possível graças a um processo chamado 'renormalização'. Porém, a renormalização não funciona na teoria da relatividade geral, porque a força gravitacional entre duas partículas é proporcional às massas delas e não às suas cargas.

Uma maneira de entender por que massas e cargas são diferentes é lembrar que a massa é sempre positiva, enquanto a carga pode ser ou positiva (como no próton), ou negativa (como no elétron).

MODIFICAÇÃO CONSISTENTE • As inconsistências quânticas na relatividade geral se tornam apreciáveis quando as distâncias são da ordem de 10^{-30} cm, que está muito longe da precisão obtida hoje nos experimentos. Mesmo diante dessa impossibilidade prática, há razões para tentar resolver essa inconsistência da relatividade geral. Uma delas é que entender o comportamento dessa teoria a distâncias muito pequenas é essencial para o estudo, por exemplo, dos buracos negros e do universo primordial (perto do Big Bang). Outra razão: a resolução de inconsistências da relatividade geral pode levar a idéias que ajudem a entender fenômenos além daqueles governados pela gravitação. E, finalmente, se quisermos concretizar o sonho de Einstein e construir uma teoria que unifique a força gravitacional com as outras três forças da natureza (a eletromagnética, a forte e a fraca), teremos que achar uma modificação da relatividade geral que seja consistente com a mecânica quântica.

EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO

DIMENSÃO CIRCULAR • Depois de formular a teoria da relatividade geral, Einstein dedicou praticamente suas últimas três décadas de vida à tentativa de unificar, numa só teoria, a força eletromagnética e a força gravitacional. Uma proposta a que Einstein se dedicou foi a teoria idealizada, independentemente, pelo físico alemão Theodor Kaluza (1885-1954) e o sueco Oskar Klein (1894-1997). Nela, além das três dimensões usuais de altura, largura e comprimento, o espaço

teria uma dimensão a mais. Mas, diferentemente das três dimensões em que vivemos, cujos tamanhos são infinitos, a dimensão extra da teoria de Kaluza e Klein teria a forma de um círculo com raio muito pequeno. Partículas andando no sentido horário do círculo teriam carga elétrica negativa (como o elétron), enquanto aquelas se movimentando no sentido anti-horário seriam positivas (como o pósitron). Partículas paradas em relação a essa quarta dimensão espacial teriam carga elétrica zero (como o neutrino).

DIMENSÕES EXTRAS

DE PERTO E DE LONGE • Se o nosso universo tem mais que três dimensões espaciais, por que não as vemos? Uma possível explicação é que as dimensões extras são círculos com raio tão pequeno que seria necessária luz com energias altíssimas para observá-las, bilhões de vezes mais intensas que a energia da luz visível. Por exemplo, um fio de aço visto de longe parece ter somente uma dimensão, ou seja, comprimento. Mas, se olharmos de perto, percebemos que o fio também tem uma segunda dimensão, que é um círculo pequeno, descrevendo sua circunferência. Então, nesse modelo de dimensões extras, as três dimensões infinitas (altura, comprimento e largura) seriam dimensões como o comprimento de nosso fio, enquanto as outras dimensões seriam circulares, como a circunferência dele.

COMO PLANTAS E PEIXES • Outra possível explicação para não observarmos as dimensões extras: nosso universo observável é uma superfície tridimensional dentro de um volume com quatro ou mais dimensões espaciais. Nessa possibilidade, chamada 'brane-world' (ou mundo-brana), partículas como os elétrons e os fótons estariam confinados à superfície tridimensional. Apenas o gráviton, o transmissor da força gravitacional, estaria livre para perambular no volume inteiro. Então, nesse modelo, os elétrons e os fótons seriam como plantas destinadas a boiar na superfície de um lago, enquanto os grávitons seriam como peixes que nadariam livremente dentro dele. Como a luz é composta de fótons, sempre confinados à superfície tridimensional, somente as três dimensões usuais seriam observadas diretamente.



OBJETOS UNIDIMENSIONAIS • Embora a teoria de Kaluza e Klein unificasse a força gravitacional com a força eletromagnética, ela ainda era inconsistente com a mecânica quântica. Essa inconsistência só seria resolvida 50 anos mais tarde, com o surgimento de uma nova teoria na qual o conceito de partícula como um ponto sem dimensão seria substituído pelo de objetos unidimensionais.

BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO

SUGADOR DE LUZ E MATÉRIA • Quando uma estrela colapsa, depois de chegar ao final de sua vida, ela pode formar um objeto cósmico ultramacio, tão denso que qualquer corpo que se aproxima dele é puxado para o seu interior pela força gravitacional. Nem mesmo as partículas de luz (fótons) escapam de serem sugadas por ele. Daí a denominação buraco negro para esses 'ralos' cósmicos. Como um buraco negro cria forças gravitacionais enormes, e seu tamanho é muito pequeno, efeitos quânticos passam a ser relevantes, fazendo do mais bizarro corpo celeste um laboratório para estudar a união da gravidade com a mecânica quântica, a chamada gravitação quântica.

SUMIÇO DE ELEFANTES • Uma das conseqüências dos efeitos quânticos sobre os buracos negros é que esses corpos cósmicos podem evaporar. Um paradoxo relacionado com esse fenômeno se expressa através da seguinte pergunta: o que acontece com a informação contida num buraco negro depois que ele evapora totalmente? Por exemplo, se um elefante cai num buraco negro, o que acontece com essa informação depois que o buraco negro desaparece por evaporação? É perdida para sempre? A resposta parece ser não, pois a mecânica quântica prediz que a informação é sempre preservada. Portanto, se a informação contida num buraco negro fosse realmente perdida, a mecânica quântica teria de ser abandonada.

SOLUÇÃO DO PARADOXO • Um dos sucessos da teoria das supercordas, a melhor candidata até agora para a unificação das quatro forças da natureza, foi resolver o aparente paradoxo da perda de informação em buracos negros. Essa teoria prevê que a informação contida num buraco negro não é perdida, pois está armazenada na radiação expelida durante a evaporação. Isso faz com que o processo de evaporação de um buraco negro passe a ser consistente com os princípios da mecânica quântica.

O PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO

ESCAPAR OU NÃO • Todo buraco negro tem um 'horizonte' ao seu redor. Essa fronteira virtual determina se uma partícula poderá ou não escapar dele. Antes de cruzar essa superfície bidimensional, ainda é possível para uma partícula desviar e escapar de cair dentro do buraco negro. Mas, ultrapassado o horizonte, qualquer corpo está fadado a um destino cruel: ser sugado pelo buraco negro e só ser devolvido ao mundo exterior na forma de radiação.

ÁREA DO HORIZONTE • Uma propriedade interessante dos buracos negros é que a informação contida nele é proporcional à área de seu horizonte. Esse fato é surpreendente, pois, normalmente, se esperaria que a quantidade de informação contida num objeto fosse proporcional ao seu volume. Por exemplo, a informação contida num livro é proporcional ao tamanho de uma página bidimensional multiplicado pelo número de páginas do livro.



SUPERFÍCIE BIDIMENSIONAL • Um exemplo no qual toda a informação é contida em uma superfície bidimensional é o de uma foto holográfica. Por isso, essa propriedade da informação nos buracos negros (ou seja, o fato de a informação contida nele ser proporcional à área de seu horizonte) é chamada 'princípio holográfico'. Recentemente, essa propriedade holográfica de buracos negros foi explicada com a ajuda da teoria de supercordas.

TEORIA DAS SUPERCORDAS

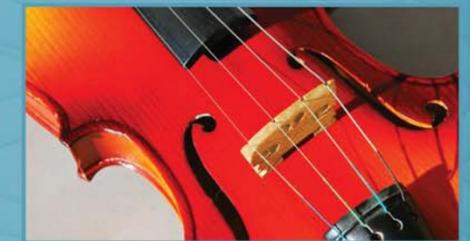
CORDA FUNDAMENTAL • Como vimos, o modelo mais promissor deste início de século para se chegar a uma gravitação quântica (ou seja, à unificação da relatividade geral com a mecânica quântica) é a teoria das supercordas. Ela foi formulada inicialmente na década de 1970 e postulou que todas as partículas elementares (por exemplo, quarks, elétrons, neutrinos etc.) são ressonâncias de uma corda unidimensional. Nesse modelo, em vez de existirem várias partículas elementares, há apenas uma entidade física: a corda fundamental, cujas diferentes vibrações descrevem diferentes partículas.

MODOS DE VIBRAÇÃO • Semelhantemente a uma nota musical produzida, por exemplo, pela corda de um violino – cuja altura (grave ou aguda) e intensidade (forte ou fraca) dependem, respectivamente, da frequência e da energia da vibração –, as propriedades de uma partícula (como sua massa e carga elétrica) dependem de como a corda fundamental está vibrando.

TESTE DE PROPRIEDADES • A teoria das supercordas prevê que, quando as distâncias são grandes, a força gravitacional toma a forma daquela estabelecida pela relatividade geral. Mas, para distâncias pequenas (da ordem de 10^{-30} cm), a teoria de supercordas modifica a relatividade geral para torná-la compatível com a mecânica quântica. Embora as energias acessíveis em experiências feitas neste início de século não sejam suficientemente altas para testar essas modificações, há várias propriedades da teoria

de supercordas que podem ser efetivamente testadas em experimentos.

COMPACTAÇÃO DAS DIMENSÕES • Diferentemente da teoria da relatividade geral, que pode ser definida com qualquer número de dimensões espaciais, a teoria das supercordas somente é consistente quando o espaço contém nove dimensões. Mais uma vez, as dimensões extras devem ser compactas (ou seja, devem ser muito pequenas), de modo que não possamos vê-las. Há várias maneiras de compactar essas seis dimensões extras. Uma delas é a de Kaluza e Klein, na qual todas as seis dimensões extras seriam círculos muito pequenos. Outra é a chamada compactação de Calabi-Yau (referência ao matemático norte-americano Eugenio Calabi e ao chinês Shing-Tung Yau), em que essas seis dimensões se entrelaçam de uma maneira menos trivial. Infelizmente, ainda não sabemos se a teoria das supercordas é capaz de dizer de que modo essas seis dimensões extras estão compactadas.



SUPERSIMETRIA

BÓSONS E FÉRMIONS • Quando as distâncias são pequenas, a teoria das supercordas prevê, além das dimensões extras, uma outra propriedade que poderia ser testada experimentalmente: a supersimetria. Supersimetria é o nome dado para uma relação postulada entre as duas principais classes de partículas elementares, ou seja, os bósons (responsáveis por transmitir as forças da natureza) e os férmions (quarks, elétrons, neutrinos etc.). A supersimetria prevê que, para cada férmion, deve existir um bóson companheiro dele, isto é, uma partícula supersimétrica. E vice-versa. Isso faria crescer significativamente o número de partículas elementares conhecidas hoje. A supersimetria parece ser não só um elemento essencial para as supercordas, mas sim um ingrediente necessário para dar consistência teórica a essa teoria.

PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO • Bósons e férmions podem ser distinguidos pelo fato de que qualquer número de bósons cabe no mesmo ponto do espaço, onde só caberia um férmion. Uma analogia para ilustrar a diferença de comportamento entre essas duas classes de partículas: se um grande grupo de bósons fosse se hospedar num hotel, provavelmente todos eles dormiriam no mesmo quarto e... na mesma cama! No caso dos férmions, cada um deles ocuparia primeiramente um quarto separado. Se o número de quartos fosse insuficiente para todos, só aí é que eles começariam dividí-los, mas nunca dormiriam na mesma cama! Essa propriedade 'anti-social' dos férmions é chamada princípio da exclusão, sendo responsável pela Tabela Periódica, que descreve os vários tipos de átomos segundo a quantidade de elétrons que eles têm. Como os elétrons são férmions, os átomos na tabela periódica com mais elétrons têm tamanho maior, pois elétrons têm que estar em pontos diferentes do espaço.

SIMETRIAS ESTABELECIDAS • As simetrias experimentalmente bem estabelecidas

até agora são: i) a simetria de translação (uma experiência feita em São Paulo vai dar o mesmo resultado que uma teoria feita em Paris); ii) a simetria de rotação (o resultado de uma experiência não depende de o equipamento estar orientado na direção leste-oeste ou na direção norte-sul); iii) a simetria de impulso (uma experiência feita num trem com velocidade constante dará o mesmo resultado que uma experiência feita num trem parado). Existem argumentos teóricos de que a única extensão natural dessas três simetrias é a supersimetria, que, como vimos, relaciona bósons e férmions.

O GRANDE ACELERADOR • No entanto, ainda não há evidências diretas que confirmem a supersimetria. Ou seja, ainda não foi descoberta nenhuma partícula supersimétrica. Mas já existem evidências indiretas, vindas de experiências com aceleradores de partículas. É possível que a existência da supersimetria seja confirmada em experiências no LHC (sigla, em inglês, para Grande Acelerador de Hádrons), que será o mais potente acelerador de partículas do mundo. O LHC está sendo construído pelo Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, em Genebra (Suíça), e deve entrar em funcionamento em 2007.



PESQUISA NO BRASIL

ALTAS ENERGIAS • Na pesquisa mundial, a teoria de supercordas talvez seja o tópico mais ativo deste início de século na área de física teórica de altas energias. No Brasil, há grupos pequenos trabalhando com supercordas na Universidade de São Paulo, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Universidade Federal de Itajubá (MG), no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), na Universidade Federal de Campina Grande (PB), na Universidade Federal de Pernambuco, entre outras instituições. O grupo de supercordas com mais participantes e colaboradores internacionais está no Instituto de Física Teórica, da Universidade Estadual Paulista.