



Supercordas

O sonho da unificação das quatro forças da natureza



Pouca gente sabe que só existem quatro tipos de forças 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?

- 160. | CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO | INCONSISTENTES ENTRE SI | FORÇA INFINITA | AS OUTRAS FORÇAS | MODIFICAÇÃO CONSISTENTE**
- 162. | EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO | DIMENSÃO CIRCULAR | OBJETOS UNIDIMENSIONAIS**
- 163. | DIMENSÕES EXTRAS | DE PERTO E DE LONGE | COMO PLANTAS E PEIXES**
- 164. | BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO | SUGADOR DE LUZ E DE MATÉRIA | SUMIÇO DE ELEFANTES | SOLUÇÃO DO PARADOXO**
- 166. | PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO | ESCAPAR OU NÃO | ÁREA DO HORIZONTE | SUPERFÍCIE BIDIMENSIONAL**
- 167. | TEORIA DAS SUPERCORDAS | CORDA FUNDAMENTAL | MODOS DE VIBRAÇÃO | TESTE DE PROPRIEDADES | COMPACTAÇÃO DAS DIMENSÕES**
- 169. | SUPERSIMETRIA | BÓSONS E FÉRMIONS | PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO | SIMETRIAS ESTABELECIDAS | O GRANDE ACELERADOR**
- 171. | PESQUISA NO BRASIL | ALTAS ENERGIAS**

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 padrão. 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).



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 cinquenta 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.

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.

BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO

SUGADOR DE LUZ E DE MATÉRIA

Quando uma estrela colapsa, depois de chegar ao final de sua vida, ela pode formar um objeto cósmico ultramaciço, 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 desaparecer por evaporação? É perdida para sempre? A resposta parece ser não, pois a

NASA

Concepção artística de um buraco negro

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

Concepção artística de matéria estelar sendo sugada por um buraco negro

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.

LHC/CERN



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 um ingrediente necessário para dar consistência 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 dividi-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 realizada 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); e 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.

				0
				2 4.0026 He Hélio
1 1.00794 H Hidrogênio	2 15.9994 Li Lítio	3 18.9984 Be Berílio	4 19.0000 B Boro	5 20.1898 C Carbono
6 30.9738 N Nitrogênio	7 15.9994 O Oxigênio	8 18.9984 F Fluor	9 18.9984 Ne Neônio	10 20.1898 Na Sódio
11 39.0983 Mg Magnésio	12 30.9738 Al Alumínio	13 35.453 Si Silício	14 39.0983 P Fósforo	15 39.0983 S Enxofre
16 78.9724 Cl Cloro	17 35.453 Ar Argônio	18 78.9724 K Potássio	19 78.9724 Ca Cálcio	20 78.9724 Sc Escândio
21 85.4678 Ti Titânio	22 88.9062 V Vanádio	23 92.9064 Cr Cromo	24 95.94 Mn Manganês	25 97.903 Fe Ferro
26 101.07 Co Cobalto	27 102.9055 Ni Níquel	28 106.42 Cu Cúprico	29 107.8682 Zn Zinco	30 112.411 Ga Gálio
31 114.424 Ge Germânio	32 118.710 As Arsênio	33 121.757 Se Selênio	34 127.60 Br Bromo	35 127.60 Kr Criptônio
36 132.905 Rb Rubídio	37 137.327 Sr Estrôncio	38 138.905 Y Ítrio	39 138.905 Zr Zircônio	40 138.905 Nb Níbio
41 138.905 Mo Molibdênio	42 140.908 Tc Técnetio	43 146.905 Ru Ródio	44 150.919 Rh Ródio	45 151.964 Pd Paládio
46 157.25 Ag Prata	47 158.907 Cd Cádmio	48 162.57 In Índio	49 164.930 Sn Estanho	50 167.25 Sb Antimônio
51 175.077 Te Telúrio	52 183.84 Bi Bismuto	53 186.207 Po Polônio	54 188.084 At Astato	55 188.084 Rn Radônio
56 200.59 Fr Francium	57 223.019 Ra Rádium	58 223.019 Ac Actínio	59 227.028 Th Tório	60 232.0377 Pa Protáctio
61 232.0377 U Urânio	62 238.02891 Np Neptúlio	63 244.04187 Pu Plutônio	64 247.07125 Am Americônio	65 251.08688 Cm Curvônio
66 252.08322 Bk Berquélio	67 257.10375 Cf Califórnia	68 261.10888 Es Einsteinônio	69 265.10544 Fm Fermíbio	70 269.10154 Md Mendelevíbio
71 273.10369 No Nobelíbio	72 277.10369 Lr Lawrêncio	73 281.10369 Rf Rutherfordíbio	74 285.10369 Db Dubnônio	75 289.10369 Sg Seaborgíbio
76 293.10369 Bh Bohríbio	77 297.10369 Hs Hassium	78 301.10369 Mt Meitneríbio	79 305.10369 Ds Darmstádio	80 309.10369 Cn Copernício
81 313.10369 Nh Nihônio	82 317.10369 Fl Fleróvio	83 321.10369 Mc Moscóvio	84 325.10369 Lv Livermório	85 329.10369 Ts Tenessíbio
86 333.10369 Og Oganessíbio	87 337.10369 Lr Lawrêncio	88 341.10369 Rf Rutherfordíbio	89 345.10369 Db Dubnônio	90 349.10369 Sg Seaborgíbio
91 353.10369 Bh Bohríbio	92 357.10369 Hs Hassium	93 361.10369 Mt Meitneríbio	94 365.10369 Ds Darmstádio	95 369.10369 Cn Copernício
96 373.10369 Nh Nihônio	97 377.10369 Fl Fleróvio	98 381.10369 Mc Moscóvio	99 385.10369 Lv Livermório	100 389.10369 Ts Tenessíbio
101 393.10369 Og Oganessíbio	102 397.10369 Lr Lawrêncio	103 401.10369 Rf Rutherfordíbio	104 405.10369 Db Dubnônio	105 409.10369 Sg Seaborgíbio
106 413.10369 Bh Bohríbio	107 417.10369 Hs Hassium	108 421.10369 Mt Meitneríbio	109 425.10369 Ds Darmstádio	110 429.10369 Cn Copernício
111 433.10369 Nh Nihônio	112 437.10369 Fl Fleróvio	113 441.10369 Mc Moscóvio	114 445.10369 Lv Livermório	115 449.10369 Ts Tenessíbio
116 453.10369 Og Oganessíbio	117 457.10369 Lr Lawrêncio	118 461.10369 Rf Rutherfordíbio	119 465.10369 Db Dubnônio	120 469.10369 Sg Seaborgíbio

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 foi finalizado pelo Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, em Genebra (Suíça), em 2008.

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 (RJ), na Universidade Federal de Campina Grande (PB) e 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.