

# A teoria de cordas e a unificação das forças da natureza

Victor O. Rivelles

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

São Paulo, SP, Brasil

E-mail: [rivelles@fma.if.usp.br](mailto:rivelles@fma.if.usp.br)

<http://fma.if.usp.br/~rivelles/>

## Unificação

Se Newton vivesse em um país católico, certamente seria condenado a morrer na fogueira. No século XVII, corpos celestes, como a Lua e os planetas, pareciam comportar-se de forma bastante diferente dos corpos terrestres. Enquanto na superfície da Terra os corpos em movimento tendem a parar, os astros celestes estão em movimento incessante pelos céus. Afinal, como se acreditava na época, a Terra era o local dos pecadores e das coisas imperfeitas, enquanto o céu representava o paraíso e a perfeição. E os astros assim o demonstravam. Quando Newton descobriu que os corpos celestes e terrestres obedecem às mesmas leis do movimento, houve uma unificação na descrição desses fenômenos. Isso gerou uma revolução na ciência então incipiente. E se Newton não vivesse em um país protestante, certamente seria condenado à morte por aproximar o céu e a terra.

Outra grande unificação ocorreu no século XIX. Nossa experiência mostra que fenômenos elétricos são completamente

**O conceito de unificação tem-se mostrado extremamente útil quando tentamos compreender a estrutura última da matéria**

distintos dos fenômenos magnéticos. O comportamento de um pedaço de plástico eletricamente carregado é bastante diferente do comportamento de uma bússola. Ao escrever suas famosas equações para o eletromagnetismo, Maxwell mostrou que o campo elétrico e o campo magnético estão intimamente conectados e são diferentes manifestações de uma mes-

ma entidade, o campo eletromagnético. Além disso, com a descoberta de que a luz é uma onda eletromagnética, a óptica também passou a ser descrita pelas equações de Maxwell. Eletricidade, magnetismo e óptica foram unificadas na teoria eletromagnética de Maxwell.

## Partículas elementares

Hoje em dia, o conceito de unificação tem-se mostrado extremamente útil quando tentamos compreender a estrutura última da matéria. Um grande caminho foi percorrido desde quando Demócrito propôs que tudo é composto de átomos. Sabemos que os átomos são compostos por um núcleo e por elétrons. Também sabemos que o núcleo é formado por prótons e nêutrons. Mais ainda, sabemos que os prótons e nêutrons são constituídos por quarks.

As partículas que não possuem estrutura interna e que não são compostas por outras mais elementares, são apresentadas na Fig. 1. Esses são os verdadeiros átomos indivisíveis, no sentido de Demócrito. O que é importante ressaltar é que as

partículas dessa tabela estão divididas em dois grupos distintos. Um deles é formado exclusivamente por férmions (partículas de spin  $\frac{1}{2}$ ). São os quarks e léptons. Eles formam toda a matéria que conhecemos, como os elétrons, os neutrinos, os prótons (formados por dois quarks  $u$  e um quark  $d$ ), os nêutrons (formados por um quark  $u$  e dois quarks  $d$ ), e assim por diante.

A Natureza, em toda sua exuberância e complexidade, apresenta uma enorme variedade de fenômenos. Um dos principais objetivos da física é tentar compreendê-los da forma mais simples possível. Sempre que fenômenos diferentes conseguem ser descritos de uma maneira unificada, temos um salto qualitativo em nosso corpo de conhecimento. É isso que gera os grandes avanços na física. Hoje em dia, o conceito de unificação é essencial para a compreensão das partículas elementares e do próprio universo. E, como veremos, a teoria de cordas é a teoria unificada por excelência.

**Partículas elementares**

Quarks	u <small>up</small>	c <small>charm</small>	t <small>top</small>	$\gamma$ <small>photon</small>
	d <small>down</small>	s <small>strange</small>	b <small>bottom</small>	g <small>gluon</small>
Léptons	$\nu_e$ <small>electron neutrino</small>	$\nu_\mu$ <small>muon neutrino</small>	$\nu_\tau$ <small>tau neutrino</small>	Z <small>Z boson</small>
	e <small>electron</small>	$\mu$ <small>muon</small>	$\tau$ <small>tau</small>	W <small>W boson</small>
	I	II	III	
<b>Três gerações de matéria</b>				

"Carregadores" de força

Figura 1. Tabela das partículas elementares.

O outro grupo é formado por bósons (partículas de spin 1) e são conhecidos como bósons de calibre. Eles representam as partículas que transportam as forças de interação entre os quarks e léptons. Os elétrons, por exemplo, possuem carga elétrica e sofrem repulsão eletrostática. A partícula que transporta a força eletromagnética responsável pela repulsão entre os elétrons é o fóton. Os glúons, por sua vez, transportam um novo tipo de força entre os quarks, a força forte. Já os W e Z transportam a força fraca entre quarks e léptons.

Essas partículas que transportam as forças mostram que na Natureza existem três forças fundamentais. A força eletromagnética transportada pelos fótons, a força forte transportada pelos glúons e a força fraca transportada pelos W e Z. Qualquer outra força pode ser compreendida como uma combinação dessas forças fundamentais, à exceção da força gravitacional que é considerada em separado.

Apesar das forças forte e fraca serem menos conhecidas do que a força eletromagnética, elas são extremamente importantes. A força forte é a responsável pela estabilidade dos núcleos. Como em um núcleo existem prótons e nêutrons, os prótons sentem uma força de repulsão eletrostática por terem a mesma carga elétrica. É necessária uma força mais forte que a força eletromagnética para manter o núcleo coeso. Essa é a força forte. A força fraca, por sua vez, é responsável pelo decaimento beta do nêutron, um processo

que causa a transmutação dos elementos químicos.

Para descrever o comportamento dessas partículas e de suas interações, foi construída uma teoria ao longo dos anos 60 e 70. Tal teoria é denominada modelo padrão das partículas elementares. Nela, as forças eletromagnética e fraca são unificadas na chamada força eletro-fraca. A força forte permanece separada das outras duas. O modelo padrão é então uma teoria parcialmente unificada. Ele é extremamente bem sucedido em explicar o comportamento das partículas elementares. Testes do modelo padrão podem ser feitos com uma precisão impressionante. É uma das teorias mais bem verificadas da física. Os grandes aceleradores de partículas elementares produzem colisões entre elétrons, pósitrons (a antipartícula do elétron), prótons, antiprótons, etc, e estudando o resultado desses choques de altíssimas energias pode-se investigar em detalhe o modelo padrão. Atualmente, o maior acelerador em operação é o Tevatron, localizado nos Estados Unidos. Está em construção, na Suíça, o *Large Hadron Collider* (LHC), o grande colisor de hádrons, que deverá iniciar suas operações no final de 2007. Sua inauguração é aguardada ansiosamente, pois ele certamente fornecerá informações valiosas para compreendermos melhor o modelo padrão e descobriremos se ele requer modificações.

Apesar do sucesso do modelo padrão, existem vários indícios de que ele não representa toda a verdade sobre as partículas elementares. Por exemplo, foi descoberto recentemente que os neutrinos possuem uma massa muito pequena. No modelo padrão, entretanto, assume-se que os neutrinos não possuem massa. Quando olhamos detalhadamente a Fig. 1, temos, provavelmente, o mesmo sentimento que os físicos e químicos do final do século XIX tinham quando contemplavam a tabela periódica dos elementos químicos. As regularidades e diferenças

entre os vários elementos só encontraram uma explicação com o advento da mecânica quântica. O mesmo deve acontecer com a tabela das partículas elementares conhecidas atualmente. O modelo padrão é incapaz de explicar a estrutura dessa tabela e uma teoria mais geral se faz necessária. Existem também várias outras evidências de que é necessário estender o modelo padrão.

Uma possibilidade bastante natural seria unificar as forças eletro-fraca com as forças fortes. Isso foi feito na década de 80, e as teorias resultantes são genericamente conhecidas como teorias de grande unificação. Uma previsão comum a elas é que o próton deve ser instável, com uma vida média bastante elevada. Experiências foram

montadas para se observar o decaimento do próton, porém nada foi detectado. Tais modelos tiveram então que ser abandonados. Hoje em dia, entretanto, a grande motivação para a extensão do modelo padrão não está

**A força forte é a responsável pela estabilidade dos núcleos, já que os prótons tendem a se repelir devido à força eletromagnética. A força fraca é responsável pelo decaimento beta do nêutron, um processo que causa a transmutação dos elementos químicos**

vindo dos aceleradores de partículas, mas da cosmologia.

## Cosmologia

É impressionante o que sabemos sobre o nosso universo. Ele foi criado há cerca de 13,7 bilhões de anos em uma grande explosão conhecida como big bang. Temos uma descrição bastante precisa da evolução do universo fornecida pela teoria cosmológica baseada na relatividade geral. Apesar do grande sucesso da teoria cosmológica ao explicar a formação dos elementos no universo primordial, a formação das galáxias, a radiação cósmica de fundo e vários outros fenômenos cosmológicos, ela não permite compreender o que aconteceu perto do instante inicial, quando ocorreu o big bang. Isso significa que se existia algo antes do big bang não temos como obter essa informação. A razão para isso é que logo após o big bang, nos instantes iniciais do universo, a energia era tão grande que todas as forças

devem ser tratadas quanticamente, inclusive a força gravitacional.

Ocorre que a gravitação, descrita pela relatividade geral, não pode ser quantizada. Isso acontece porque em algumas teorias as flutuações quânticas tornam-se infinitas e não podem ser tratadas por nenhum método matemático convencional e, portanto, essas flutuações fogem de nosso controle. Teorias em que isto acontece são chamadas de teorias não-renormalizáveis, isto é, não são passíveis de ser quantizadas. Esse é um fato impressionante. Duas das maiores teorias da física do século XX, a mecânica quântica e a relatividade geral, são incompatíveis entre si. Podemos estudar os efeitos da gravitação a longas distâncias, onde os efeitos quânticos são desprezíveis. Também podemos compreender os processos quânticos desprezando-se a força gravitacional, já que ela é muito fraca. Porém, se quisermos estudar os efeitos de uma teoria de gravitação quântica, não há como fazê-lo. Não existe uma teoria de gravitação quântica baseada na relatividade geral.

Esse conflito foi bem caracterizado a partir da década de 50, e muitos físicos famosos trabalharam nesse problema. Modifica-se ou a mecânica quântica ou a relatividade geral. Não há saída. Como veremos, a teoria de cordas apresenta uma solução para esse dilema. Uma saída surpreendente.

Apesar da inexistência de uma teoria de gravitação quântica antes do advento da teoria de cordas, foi cunhado um nome para o *quantum* do campo gravitacional; a partícula responsável por essa interação foi batizada de gráviton. Diferentemente dos outros bósons de calibre, o gráviton possui spin 2. A busca de uma teoria de gravitação quântica deve resultar em uma teoria que seja capaz de descrever os grávitons e sua interação com as outras partículas elementares.

Devido ao fato de não existir uma gravitação quântica com base na relatividade geral, a força gravitacional não pode ser incorporada ao modelo padrão, onde as outras três forças são tratadas quanticamente. Esse é um outro grande motivo que nos leva a crer que é necessário modificar o modelo

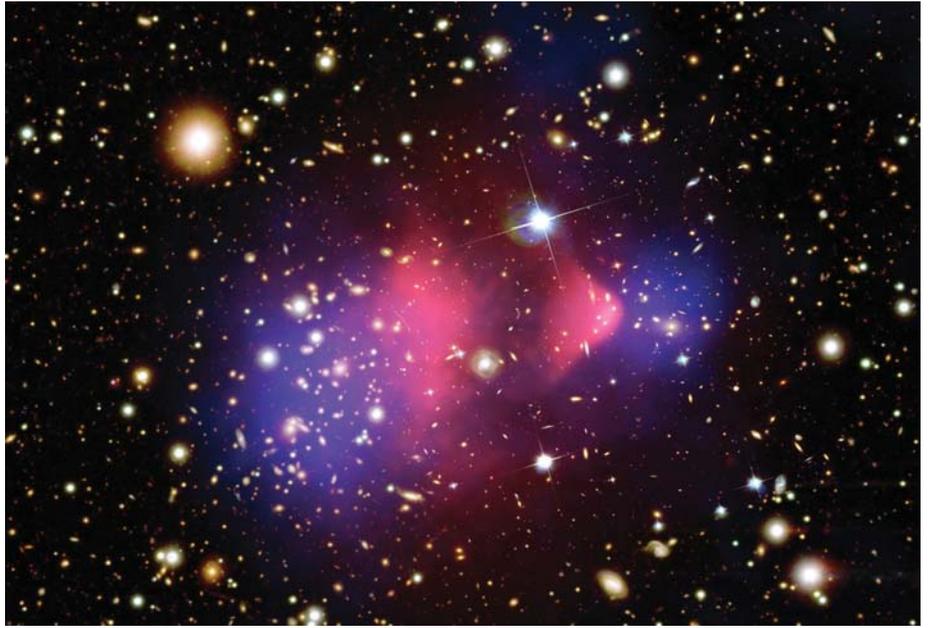


Figura 2. A colisão de dois aglomerados de galáxias revela a matéria escura. A região colorizada em vermelho representa o gás das galáxias emitindo raio-X e a região em azul representa a matéria escura. Fonte: <http://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/>.

padrão; temos que incorporar a força gravitacional na descrição quântica de forma consistente.

### Quando se pensava que sabíamos tudo...

No final do milênio, quando se acreditava que conhecíamos todos os constituintes básicos da natureza, nosso quadro mudou radicalmente. Satélites que foram lançados para buscar informações sobre a radiação cósmica de fundo mostraram que as partículas da Fig. 1 representam muito pouco daquilo que existe na natureza. Na verdade, elas representam apenas 4% do conteúdo do nosso universo.

Já há vários anos sabia-se que as galáxias possuíam muito mais massa do que aquela que era vista através dos telescópios. Aglomerados de galáxias e estrelas na borda das galáxias tinham um comportamento estranho. O movimento desses objetos, que é de origem

puramente gravitacional, só pode ser explicado se assumirmos que as

galáxias possuem uma massa muito maior do que aquela medida através da luz que elas emitem. Essa massa extra é composta por algum tipo de matéria que não absorve e nem emite luz. Ela não interage com o campo eletromagnético e só pode ser detectada através de seus efeitos gravitacionais. É chamada, de forma bastante apropriada, de matéria escura (ver Fig. 2). Os dados cosmológicos indicam que ela representa 22% do conteúdo do universo. Hoje em dia, há vários experimentos tentando detectar a matéria escura presente na Terra e nas suas vizinhanças. São detectores extremamente

sensíveis colocados em minas bastante profundas. Até agora, nenhum desses experimentos teve sucesso. Entretanto, os efeitos da matéria escura continuam sendo encontrados através de medidas astronômicas cada vez mais precisas.

E os 74% restantes? Não são compostos nem de

matéria comum e nem de matéria escura. Estão na forma de energia

**Podemos estudar os efeitos da gravitação a longas distâncias, onde os efeitos quânticos são desprezíveis. Podemos compreender processos quânticos desprezando-se a força gravitacional, pois ela é muito fraca. Porém, se quisermos estudar os efeitos de uma teoria de gravitação quântica, não há como fazê-lo. A teoria de cordas apresenta uma solução para esse dilema**

escura, um tipo de energia que faz o universo expandir-se de forma acelerada. Sabemos que o big bang gerou a expansão do universo, e essa expansão é detectada na forma de um deslocamento para o vermelho das linhas espectrais das galáxias mais distantes. No final do milênio, descobriu-se que tais galáxias estão em expansão acelerada, algo não esperado pela cosmologia padrão.

Para explicar essa aceleração, é necessária uma forma de energia que produza uma pressão negativa. Uma forma de incorporar esse efeito na relatividade geral é acrescentar a famosa constante cosmológica nas equações de Einstein. Na época em que Einstein propôs sua teoria da relatividade geral, acreditava-se que o universo fosse quase estático. Entretanto, a relatividade geral previa que o universo estaria em expansão. Para corrigir isso, Einstein inseriu uma constante cosmológica na relatividade geral. Ela contrabalançava a expansão do universo com uma desaceleração, de forma que a relatividade geral pudesse gerar soluções estáticas. Depois de alguns anos, quando foi descoberto que o universo estava em expansão, Einstein rapidamente eliminou a constante cosmológica de suas equações e afirmou que ela constituía o maior erro de sua vida. Talvez Einstein não estivesse tão errado assim. Talvez a energia escura tenha sua origem em uma constante cosmológica como indicam resultados recentes de análise de galáxias distantes.

Se quisermos usar essa explicação para a energia escura, vamos encontrar algo surpreendente. Os dados cosmológicos mostram que a constante cosmológica deve ser muito pequena. Em unidades de massa de Planck,  $m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$  (onde  $\hbar$  é a constante de Planck,  $c$  a velocidade da luz e  $G$  a constante da gravitação Newtoniana), seu valor é de aproximadamente  $10^{-120} m_p^4$ . Por outro lado, a constante cosmológica está associada às flutuações quânticas do vácuo, que usualmente são desprezadas na teoria quântica de campos, o tipo de teoria que descreve o modelo padrão. Tais flutuações são ignoradas porque os efeitos gravitacionais são muito pequenos. Se fossem

levados em conta, o valor da constante cosmológica deveria ser de  $1 m_p^4$ , isto é, um erro de 120 ordens de grandeza. Mais um exemplo de como a gravitação e a mecânica quântica não conseguem andar juntas. Essa discrepância é conhecida como o problema da constante cosmológica, talvez a maior discrepância já encontrada em toda história da física.

Existem outros problemas, de caráter mais técnico, que também não encontram solução dentro do modelo padrão. Um deles é o motivo pelo qual existe mais matéria do que antimatéria no universo. Se nada existia antes dele, o big bang deve ter criado uma quantidade igual de matéria e antimatéria. O que se esperaria é que à medida que o universo fosse se expandindo a matéria e a antimatéria iriam se aniquilar mutuamente, deixando um universo apenas com radiação e sem nenhuma matéria ou antimatéria. Sabemos que as interações fracas violam essa simetria entre matéria e antimatéria, e que alguns processos podem gerar mais matéria ou mais antimatéria. Se esse processo conhecido das interações fracas for utilizado, podemos prever a quantidade de matéria que restaria depois da aniquilação. Estima-se que no nosso universo visível deveríamos ter matéria equivalente a apenas uma galáxia! Novamente, outra flagrante contradição com a natureza quando gravitação e mecânica quântica estão presentes simultaneamente.

### Teoria de cordas

Há, portanto, um consenso geral de que o modelo padrão deva ser estendido e que a força gravitacional deva ser incluída no nível quântico. Várias propostas foram feitas ao longo dos anos mas a única que sobrevive até hoje é a teoria de cordas.

Trata-se da extensão mais conservadora possível. Nela, a relatividade especial e a mecânica quântica não são modificadas. Afinal, não há nenhum indício de que estas duas teorias devam ser reformuladas. O que há de novo é que ao invés de considerarmos os obje-

tos fundamentais como sendo pontuais, como é feito com os quarks ou os fótons no modelo padrão, assumimos, ao invés disso, que os objetos básicos são estendidos. Podem ser cordas, membranas ou superfícies de dimensões maiores. Historicamente, a teoria foi descoberta como uma teoria de cordas, objetos estendidos unidimensionais, mas, hoje em dia, membranas e outros objetos extensos foram incorporados à teoria de cordas. Por razões históricas, o mesmo nome foi mantido.

A quantização da corda permite associar seus modos de vibração quantizados às partículas conhecidas (Fig. 3). Uma corda aberta vibrando no estado de energia mais baixa

**Há um consenso geral de que o modelo padrão deva ser estendido e que a força gravitacional deva ser incluída no nível quântico**

podem descrever um fóton ou um dos bósons de calibre do modelo padrão. Se for uma corda fechada, pode descrever um gráviton (Fig. 4). As cordas podem interagir entre si. Existe um processo de cálculo análogo ao dos diagramas de Feynman das teorias de campo convencionais, onde amplitudes de espalhamento podem ser obtidas. Com isso, podemos calcular o espalhamento de grávitons, algo impossível na relatividade geral. Obtemos, portanto, uma teoria quântica da gravitação. Esse é o maior sucesso da teoria de cordas, pois não há nenhuma outra teoria que permita realizar esses cálculos. Infelizmente, não é possível montar uma experiência que confirme essa previsão da teoria de cordas. O espalhamento de grávitons só pode ser detectado em energias extremamente altas e não há nenhum acelerador de partículas em funcionamento ou projetado que atinja essas energias. Nem em um futuro próximo seria possível construí-lo. Portanto, não é possível verificar experimentalmente a teoria de cordas dessa

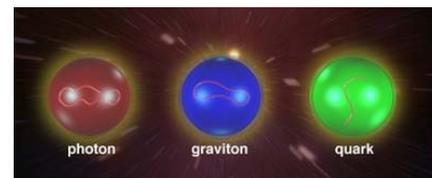


Figura 3. As partículas elementares correspondem a modos de vibração de cordas.

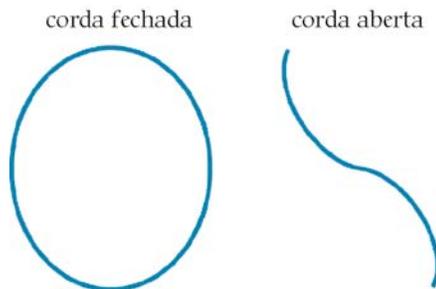


Figura 4. Cordas abertas e cordas fechadas.

maneira.

## Supersimetria

Um outro fato surpreendente é que a teoria de cordas requer a existência de outras simetrias na Natureza, além daquelas do modelo padrão. Uma delas é a supersimetria, uma simetria entre bósons e férmions. Ela prevê a existência de um companheiro supersimétrico para toda partícula elementar. Como exemplo, o companheiro supersimétrico do elétron é chamado de selétron, e possui todas as características do elétron, exceto seu spin, que agora é zero. Já o companheiro supersimétrico do fóton é o fotino, e possui spin  $\frac{1}{2}$ . Existem experimentos montados no LHC para detectar partículas supersimétricas e nos próximos anos teremos dados experimentais a nos revelar se partículas supersimétricas existem ou não.

Infelizmente a teoria de cordas não está suficientemente desenvolvida para prever que tipo de supersimetria deve existir em quatro dimensões. Devido à existência de outros modelos supersimétricos, que não correspondem a nenhuma teoria de cordas, a descoberta da supersimetria não confirmará a teoria de cordas; apenas fornecerá uma evidência bastante forte de que ela encontra-se no caminho certo.

A supersimetria também deu origem ao nome supercordas. Quando se fala em teoria de cordas, na verdade quer-se dizer teoria de supercordas, já que a supersimetria é um ingrediente essencial na construção da teoria. Por isso, ambos os nomes são utilizados para se designar a mesma teoria.

## Dimensões extras

Uma outra consequência bastante notável da teoria de cordas é que ela só pode existir em dez dimensões. Ela prevê

a existência de seis dimensões extras, além das quatro que vivenciamos. Note que as quatro dimensões que conhecemos referem-se às três dimensões espaciais mais uma dimensão temporal.

Estamos tão acostumados em nosso dia a dia com as três dimensões espaciais que nunca foi questionada a existência de outras dimensões. Inicialmente, muita gente zombava da teoria de cordas devido a esse resultado. Mas aos poucos se começou a perceber que de fato o número de dimensões em que vivemos deve ser questionado de maneira científica. Afinal, se queremos saber em quantas dimensões vivemos, devemos fazer uma experiência para determiná-las.

**A teoria de cordas requer a existência de outras simetrias na Natureza, além daquelas do modelo padrão. Uma delas é a supersimetria, que prevê a existência de um companheiro supersimétrico para toda partícula elementar**

A lei da gravitação universal de Newton prevê que a força de atração entre duas massas diminui com o inverso do quadrado da distância. Porém, isso é válido se existirem três dimensões espaciais. Se o número de dimensões espaciais for  $d$  então a lei da gravitação é modificada e a força comporta-se como  $1/r^{d-1}$ . Portanto, basta fazer experiências de balança de torção, como a de Cavendish, para determinar o número de dimensões. A lei de Newton foi testada na Terra e no sistema solar e mostra-se que  $d = 3$ . Entretanto, por mais incrível que pareça, ela nunca foi testada em distâncias submilimétricas. A pequenas distâncias, as forças eletromagnéticas atrapalham a detecção da força gravitacional porque esta última é extremamente fraca. A força de van der Waals, por exemplo, apesar de pequena, é de várias ordens de grandeza superior à força gravitacional e mascara os efeitos gravitacionais. Hoje em dia estão sendo feitos experimentos de balança de torção extremamente sofisticados para isolar apenas o efeito gravitacional e descobrir se existe algum desvio da lei Newtoniana. Por enquanto, nenhuma anormalidade foi encontrada.

Outra maneira de se detectar dimensões extras é através da colisão de partículas elementares. É possível que no LHC algumas partículas fujam

para essas dimensões extras, o que daria a impressão de que em quatro dimensões a lei da conservação da energia foi violada. O LHC está preparado para detectar eventos desse tipo e descobrir as dimensões extras.

## Branas

Como a teoria de cordas também envolve outros objetos extensos, podemos considerar membranas ou, em geral, hipersuperfícies espaciais de  $p$  dimensões imersas no espaço-tempo de dez dimensões. Tais objetos são genericamente chamados de  $p$ -branas. Uma corda seria uma 1-brana enquanto uma membrana seria uma 2-brana, por exemplo (Fig. 5)

Isso significa que talvez nosso universo quadrimensional possa ser um 3-brana dentro do universo em dez dimensões da teoria de cordas. Tais modelos cosmológicos são conhecidos como modelo de branas. Eles fornecem uma descrição alternativa para o big bang. Podemos imaginar uma situação em que alguma outra  $p$ -brana colide com a 3-brana que constitui nosso universo. Essa colisão produziria muitos dos efeitos que são atribuídos ao big bang.

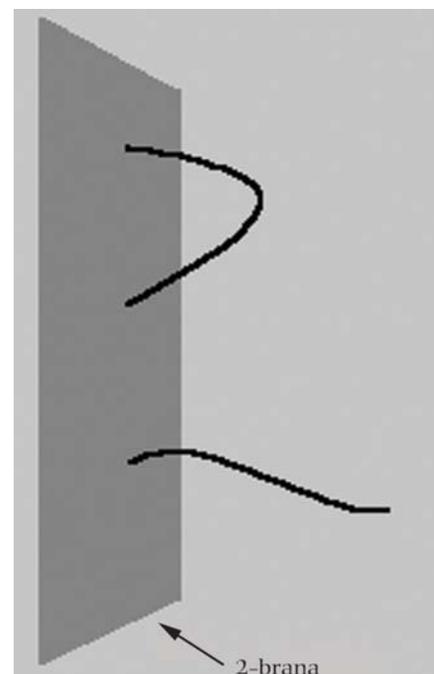


Figura 5. Uma 2-brana com cordas.

A cosmologia das branas é uma área bastante fértil. O fato de a força gravitacional ser tão fraca quando comparada às outras forças da natureza talvez tenha sua explicação no fato de vivermos em uma 3-brana. Nesse caso, as outras forças fundamentais, a eletromagnética, a fraca e a forte, estariam confinadas à 3-brana e não poderiam afetar qualquer coisa fora de nossa brana. Por

**Cinco(!) teorias de cordas descobertas nos anos 80 inicialmente desencorajaram os físicos. Mas aos poucos foram sendo descobertas relações entre essas teorias, e nos anos 90 sabia-se que todas elas eram conectadas entre si por dualidades**

outro lado, a teoria de cordas permite que a gravitação saia da nossa brana e afete o que está fora dela. Isso implicaria que a força gravitacional sentida na brana seria muito mais fraca que as outras forças. É uma possibilidade muito interessante.

### A entropia de buracos negros

Um outro sucesso da teoria de cordas tem a ver com a entropia de buracos negros. Já há vários anos, sabe-se que os buracos negros podem ser tratados do ponto de vista termodinâmico. Isso significa que eles possuem atributos como temperatura e entropia. Pode-se mostrar que a entropia de um buraco negro é proporcional à sua área. Isto é surpreendente, pois sendo a entropia uma grandeza extensiva, deveria ser proporcional ao volume do buraco negro, e não à sua área. Tal resultado é tão surpreendente que levou físicos famosos a proporem um novo princípio que justificasse esse resultado. É o chamado princípio holográfico. Ele afirma que em um sistema gravitacional como um buraco negro, toda informação contida em seu interior estaria codificada em sua superfície, de maneira análoga a um holograma que contém em sua superfície a informação tridimensional do objeto que foi holografado.

A única maneira de verificar se a entropia é realmente proporcional à área é tratar o buraco negro quanticamente e calcular sua entropia contando-se o número de estados disponíveis no buraco negro. Para isso, é necessário uma teoria quântica da gravitação. A teoria de cordas permite mapear um

buraco negro, que possui um campo gravitacional forte nas suas vizinhanças, em uma determinada  $p$ -brana que está fracamente acoplada. Dessa forma, é possível computar o número de estados da  $p$ -brana e por conseguinte a entropia do buraco negro. O resultado desse cálculo é que ele confirma que a entropia é proporcional à área. Sem dúvida um grande sucesso para a teoria de cordas.

### Dualidade

Na década de 80 foram descobertas cinco teorias de cordas diferentes. Isso foi algo desencorajador, pois se a teoria de cordas é a teoria unificada que descreve o universo, ela deveria ser única. Aos poucos, foram sendo descobertas relações entre essas cinco teorias. Em meados da década de 90, o quadro estava mais claro: todas as cinco teorias estavam conectadas entre si através de dualidades (Fig. 6).

A dualidade é um conceito derivado do fato que um dado sistema físico poder ser descrito de diversas maneiras. Sob certas condições, podemos usar um determinado conjunto de variáveis para descrevê-lo. Noutro regime, outro conjunto de variáveis pode ser mais conveniente. Um exemplo típico é a mecânica quântica. Em determinadas condições, um elétron pode ser descrito como uma partícula e noutras é melhor descrevê-lo como uma onda. Essa é a famosa dualidade onda-partícula da mecânica quântica.

O que se descobriu na década de 90 é que existe apenas uma única teoria, batizada de teoria-M, que pode ser

descrita pelas cinco teorias de cordas em dez dimensões então conhecidas, ou por uma teoria em 11 dimensões. Todas essas teorias são duais entre si e descrevem o mesmo objeto, a teoria-M. Como foi possível incorporar uma teoria em 11 dimensões, isso indica que

o conceito de dimensionalidade do espaço-tempo não é absoluto. Ele depende das variáveis escolhidas para descrever o sistema. Às vezes é melhor descrevê-lo como uma teoria em dez dimensões e outras vezes a melhor descrição é em onze dimensões.

A teoria-M ainda não está completamente formulada. Sabemos apenas os limites em que ela reduz-se à teoria de cordas em 10 dimensões ou à teoria em 11 dimensões. As branas possuem um papel essencial tanto na teoria-M quanto nas dualidades. A construção dessa teoria é um dos grandes desafios atuais.

### Correspondência entre gravitação e teorias de calibre

Uma descoberta extremamente interessante ocorreu na década de 90. O conceito de dualidade entre cordas levou à conclusão que existe uma relação muito íntima entre teorias de gravitação e teorias de calibre, as teorias que descrevem os bósons de calibre. Essas duas teorias descrevem forças completamente diferentes, como a força gravitacional e a força eletromagnética, por exemplo. Em geral, essas teorias são estudadas no regime perturbativo, isto é, quando é possível encontrar um parâmetro pequeno e aplicar a teoria de perturbações fazendo-se expansões nesse parâmetro. Quando o parâmetro é grande, diz-se que se está no regime não-perturbativo. Em tal regime, obter informações sobre a teoria é muito difícil, já que não é possível utilizar técnicas perturbativas.

O que foi descoberto é que existe uma dualidade entre teorias de gravitação e teorias de calibre, mas a dualidade é tal que relaciona uma teoria no regime perturbativo com a outra no regime

não-perturbativo. Com isso, podemos estudar o regime não-perturbativo das teorias de calibre, um sonho dos que trabalham nessa área, utilizando uma teoria gravitacional perturbativa.

A relação mais famosa é a correspondência AdS/CFT que trata de uma

**O modelo de branas fornece uma descrição alternativa para o big bang: uma  $p$ -brana colide com uma 3-brana que constitui nosso universo. Essa colisão produziria muitos dos efeitos que são atribuídos ao big bang**

teoria gravitacional em um espaço de anti-de Sitter (AdS), que é um espaço com curvatura negativa, e um teoria de campos conforme (em inglês, conformal field theory, CFT), uma teoria de campos que possui simetria por transformações de escala. Essa foi uma das descobertas mais espetaculares da teoria de cordas e que atraiu muita atenção. Essa correspondência também é uma realização do princípio holográfico mencionado anteriormente. A teoria de campos vive na borda do espaço descrito pela teoria gravitacional. Quando a teoria de calibre vive em um espaço de  $d$  dimensões, a teoria gravitacional correspondente é definida em um espaço de  $d + 1$  dimensões. Portanto, através da correspondência, podemos estudar o interior de um espaço em  $d + 1$  dimensões analisando a teoria de campos em sua borda de  $d$  dimensões.

Usualmente a correspondência é formulada para teorias altamente supersimétricas. Recentemente, tem-se conseguido extrapolar a correspondência para teorias menos supersimétricas. O objetivo, é claro, é descrever o modelo padrão, que não possui nenhuma supersimetria. Será um grande feito quando conseguirmos descrever o modelo padrão através de uma teoria gravitacional.

## Integrabilidade

Em geral, quando se estuda um sistema físico, não é possível resolver as equações que o descrevem de forma exata. Como explicado acima, alguma técnica perturbativa é necessária. Entretanto, existem alguns poucos sistemas que possuem soluções exatas. Tais sistemas são ditos integráveis e usualmente aparecem em modelos

## Glossário

**Bósons de calibre:** as partículas bosônicas, com spin 1, que transportam as forças fundamentais da natureza. O fóton é o responsável pelas forças eletromagnéticas, os  $W$  e  $Z$  pelas forças fracas, e os glúons pelas forças fortes. Os bósons de calibre são descritos pelas teorias de calibre.

**Teorias de calibre:** formam uma classe da teoria quântica de campos que é fundamentada na idéia de transformações de simetria que podem ser aplicadas localmente, isto é, em cada ponto do espaço-tempo. As transformações de simetria formam o grupo de calibre. O modelo padrão das partículas elementares é uma teoria deste tipo.

**Grupo de calibre:** é o grupo formado pelas transformações de simetria de uma teoria de calibre. O grupo de calibre do modelo padrão das partículas elementares é  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ .

**Corda Tipo 1:** uma das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por cordas abertas com grupo de calibre  $SO(32)$ .

**Corda Heterótica E8 X E8 e SO(32):** duas das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por uma mistura peculiar de cordas fechadas e abertas com grupo de calibre  $E8 \times E8$  e  $SO(32)$ .

**Corda Tipo IIA e IIB:** duas das cinco teorias de cordas existentes em 10 dimensões. É formada por cordas fechadas que apresentam simetria esquerda-direita (tipo A) e não apresentam tal simetria (tipo B).

**p-brana ou D-p-brana:** objeto estendido com  $p$  dimensões espaciais onde as extremidades das cordas abertas estão fixas. Nesta situação a corda obedece condições de contorno de Dirichlet, daí o nome D-branas.

**Supersimetria:** simetria de uma teoria quântica de campos que requer que a cada partícula bosônica exista uma companheira supersimétrica fermiônica e vice-versa.

**Supergravitação:** teoria de gravitação que é supersimétrica. O companheiro supersimétrico do gráviton é o grávitino que possui spin  $3/2$ .

**Espaço de anti-De Sitter ou AdS:** é um espaço que apresenta curvatura negativa. Pode ser obtido a partir das equações de Einstein com uma constante cosmológica negativa.

simplificados construídos em poucas dimensões.

Recentemente, descobriu-se que a teoria de cordas na correspondência AdS/CFT é um modelo desse tipo. Isso significa que a teoria de campos correspondente também deve ser integrável. Isto é surpreendente, pois nunca se imaginou que teorias de calibre em dimensões maiores que duas pudessem apresentar esse tipo de propriedade. Nestes últimos anos, muita atividade tem se desenvolvido em torno desse tópico, novamente levando a resultados bastante notáveis.

## Conclusão

Ao longo do século XX, descobriu-se que o conceito de unificação é essencial na construção de teorias que descrevem o comportamento das partículas elementares. O modelo padrão, que deu origem a vários prêmios Nobel, é extre-

mamente eficaz nessa tarefa e tem sido testado exaustivamente. Infelizmente, ele não incorpora a força gravitacional e começa a apresentar sinais de que deve ser estendido. A única forma de incorporar a força gravitacional em uma teoria quântica leva, necessariamente, à teoria de cordas. Ela faz diversas previsões, como a existência de dimensões extras, supersimetria, dualidades, etc. Até o momento, porém, não há nenhuma forma de comprovar experimentalmente que a teoria esteja correta. Por falta de alternativas, e pela beleza intrínseca que ela apresenta, é a teoria mais estudada atualmente. Por enquanto, só podemos torcer para que sejam encontrados alguns indícios de que a Natureza realmente utiliza as cordas. Talvez os primeiros sinais apareçam no LHC. Vamos aguardar.

## Para saber mais

Existem vários livros e artigos que discutem a teoria de cordas, o modelo padrão e a relatividade geral. Dentre eles recomendamos:

Brian Greene, *O Universo Elegante* (Cia. das Letras, São Paulo, 2001).

L. Susskind, *Physics World* **November**, 29 (2003).

S. Hawking, *O Universo Numa Casca de Noz* (Editora ARX, São Paulo, 2002).

S. Weinberg, *Scientific American* **December**, 36 (1999).

Victor O. Rivelles, *Ciência Hoje* **23**:138, 46 (1998).

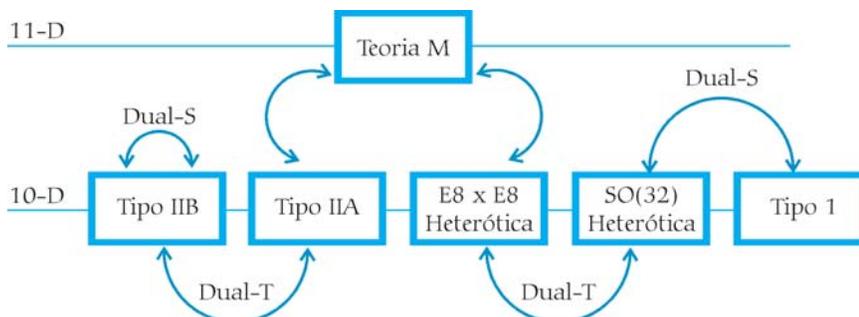


Figura 6. Dualidades entre as 5 teorias de cordas e a teoria-M. A seta entre duas teorias indica que elas estão relacionadas pela dualidade.