

Teoria quântica da gravitação: Cordas e teoria M

(*Quantum gravity: Strings and M-theory*)

Elcio Abdalla¹

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

Discutimos aqui a junção da relatividade geral e da mecânica quântica como necessidade tanto teórica quanto experimental da Física, e suas conseqüências na compreensão do Universo, de seu início e sua evolução.

Palavras-chave: gravitação, cosmologia e mecânica quântica.

We discuss the merging of general relativity and quantum mechanics as a theoretical as well as experimental necessity in physics, and the consequences in the comprehension of the Universe, its beginning and evolution.

Keywords: gravitation, cosmology and quantum mechanics.

1. Introdução

Desde que o homem se conhece, sua preocupação com o Universo tem sido fonte de inspiração nas ciências assim como nas artes, na filosofia e na religião. Iniciamos a jornada humana através de um misticismo que se tornou pensamento, vertendo-se primeiramente em religião, depois em filosofia e finalmente em ciência, tendo passado pelas artes. Quando nos tornamos conscientes de nossa existência, a beleza do cosmos abalou profundamente nossa mente. E desde então, a preocupação humana com o problema de nossas origens tem sido fonte de inspiração para a música, arte e religião, haja visto a enorme quantidade de lendas em sociedades mais primitivas e a sua presença em conteúdos mitológicos de várias religiões politeístas, que culminam nas gêneses das religiões monoteístas.

A busca da compreensão do cosmos motivou também gerações de pesquisadores em todas as áreas do conhecimento. O ser humano, tornado consciente, passando a viver o mito do herói e a planejar a compreensão de si mesmo e de seu mundo exterior, almeja poder descrever a criação do mundo, suas leis e conseqüências. A Arte retrata bem estas passagens. É assim que a preocupação humana tomou forma em objetos longínquos, primeiramente, desde os antigos, no macrocosmos. Não havia na época como se preocupar com o microcosmos por falta da técnica adequada. Ao final do século XVIII este caminho começou a ser trilhado e posteriormente pavimentado.

Pode-se dizer que a Mitologia tenha sido o início da ciência, como vemos nos pitagóricos, que foram o elo

de ligação entre o Orfismo e uma proto-ciência. O Orfismo, por sua vez, foi um movimento de reforma dos mitos dionisíacos. Pitágoras fez portanto uma ligação entre o místico e o racional, uma dicotomia que sempre permeou a história do pensamento humano, não tendo, todavia, uma união harmônica no Ocidente depois dos gregos antigos. Na Grécia Antiga, os mitos anteriores acerca de deuses e ritos menos civilizados foram transformados nos mitos acerca dos deuses Olímpicos por Homero, já que um povo guerreiro, de grandes heróis, necessitava de deuses condizentes com tal descrição.

Interessa-nos aqui a questão da criação. Em muitas civilizações a criação do universo tem caráter similar, com uma criação que inclui aquela do próprio tempo, o que de fato é correto na concepção da relatividade geral. A criação entre os gregos apresenta um aspecto geral bastante parecido com a criação judaica, em algumas de suas vertentes. Para os gregos, Caos juntou-se com a Noite (Nyx) com quem teve um filho, Érebo (Ecuridão). Este casou-se com a própria mãe, gerando Éter (Luz) e Hemera (Dia) que por sua vez, com a ajuda do filho Eros, gerou o Mar (Pontus) e a Terra (Gaia). Gaia gerou o Céu (Urano). Gaia e Urano geraram os doze Titãs, entre os quais Cronos e Rhea, pais de Zeus. Cronos trouxe o tempo. Comia seus filhos, em uma personificação daquele que cria para destruir. Rhea salva Zeus, que quando crescido rebela-se, salvando os irmãos do interior paterno, e gerando assim a homens e deuses.

Esta brevíssima história, que em suas versões originais foram ricas de detalhes até mesmo sobre o interior humano, mostra a preocupação do homem com a criação do mundo e seu destino. Os deuses olímpicos

¹E-mail: eabdalla@fma.if.usp.br.

preocuparam-se com os homens e suas lutas como se fossem questões deles mesmos. Foram deuses humanizados, tanto no melhor quanto no pior sentido, tal como na história bíblica de Jô. Os deuses Olímpicos nos trouxeram a preocupação com as Ciências, com as Artes e com a Medicina. Palas Atena foi a mais sábia das deusas, e Febo Apolo foi o pai de Asclépio, o fundador da Medicina. Seus filhos Macáone e Podalírio foram médicos.

A cosmologia foi uma importante peça na estrutura do pensamento humano, já que dá um caráter divino às atribuições humanas, fazendo dos céus um habitat dos deuses paralelo à Terra. Toda civilização tem alguma resposta para a pergunta sobre a estrutura do Universo e, começando da civilização helênica, o homem foi se aproximando de uma resposta a partir da observação dos céus, uma resposta que andava na direção do racional.

A ciência grega era no entanto uma proto-ciência. Conhecia-se muito, mas apesar disto, os conceitos estavam, dentro do aspecto da ciência moderna, equivocados. Foram no entanto essenciais para a posterior evolução do pensamento humano. Em particular, o conhecimento dos céus, primeiramente através da antiga crença astrológica, posteriormente através da observação direta dos céus, foi bastante grande, tendo evoluído para o Universo Ptolomaico.

Assim, já mais de 1.000 anos antes da era cristã havia observações precisas do movimento do Sol, através da variação do tamanho da sombra de uma vara vertical, durante o dia e de um dia para outro. Combinando-se com relógios d'água, havia uma marcação do tempo.

Os movimentos das estrelas são mais regulares, porém sua observação é mais difícil, pois é necessário que se reconheçam estrelas facilmente distinguíveis de noite para noite. São todavia excelentes para marcações de tempo com prazo mais longo. A maioria das constelações reconhecidas pelos antigos foram colocadas em correspondência a figuras mitológicas, de onde temos uma pré-*proto-ciência*, a Astrologia, que mistura observações precisas com elementos mitológicos.

Para que as observações feitas aqui na Terra, que hoje sabemos estar em movimento, fizessem sentido, caracterizou-se o movimento dos céus através de duas grandes esferas, que em uma interpretação moderna se referem aos movimentos da Terra. Deste modo, uma esfera contendo as estrelas move-se para oeste com uma rotação a cada 23 h e 56 min. As estrelas nascem e morrem exatamente a leste e a oeste em relação a esta esfera, respectivamente. Há um grande círculo, a eclíptica, com uma inclinação de $23\frac{1}{2}^\circ$, e o Sol se move uma vez a cada $365\frac{1}{4}$ dias pela eclíptica. Algumas estrelas tinham movimentos bastante distintos, pois em certa época do ano andavam em sentido contrário, em movimento retrógrado. Foram chamadas de *planetas*, palavra que significava movimento errante.

A descrição dos céus foi ficando mais sofisticada. Os planetas passaram a se mover em círculos em torno de outros círculos em torno da Terra, os epiciclos e os deferentes. Este sistema deu origem ao que podemos chamar de sistema ptolomaico de descrição dos céus. Recebido pelos árabes, os guardiões da ciência e da filosofia durante a Idade Média, o sistema foi aperfeiçoado a ponto de ter uma precisão de até 8 minutos de arco!

A ciência moderna teve início com a Revolução de Copérnico, acerca de nosso conhecimento sobre o cosmos. Estando as festividades da páscoa recaindo a cada ano cada vez mais distante da marcação de tempo solar baseada no calendário Juliano, a Igreja Católica encomendou ao sacerdote polonês Nicolau Copérnico um estudo detalhado. O calendário foi corrigido, eliminando-se 10 dias, ou seja, a 4 de outubro de 1582, no calendário Gregoriano, seguiu-se o dia 15 de outubro de 1582. Além disto os anos bissextos múltiplos de 100, mas não de 400, foram eliminados.

Os estudos de Copérnico basearam-se em um sistema com o Sol no centro do *Sistema Solar*, o que foi posteriormente tido como hipótese fisicamente válida (todavia não pelo próprio Copérnico). Houve também observações detalhadas do céu por Tycho Brahe, codificadas por Johannes Kepler em um conjunto de três leis a serem obedecidas pelos movimentos planetários. Galileu, por outro lado, reformulou nossos conhecimentos de mecânica, que foram recodificados por Newton na primeira descrição científica do Cosmos, já que passamos a ter poder de previsão. O Universo Newtoniano levou a novas descobertas de planetas, em uma descrição sem rival até o final do século XIX, e ainda hoje bastante geral.

No entanto, firmemos nosso objetivo em direção à ciência moderna. O espírito investigativo do homem levou-nos a trilhas sinuosas e confusas, com surpresas a cada esquina. O início do século passado marcou a história da humanidade pelo surgimento dos dois pilares do conhecimento moderno. A relatividade de Einstein e a mecânica quântica revolucionaram a maneira com que percebemos o universo e nosso papel na teia viva da criação. Toda a complexidade que vemos no mundo pode surgir do acaso, conforme previsto pela teoria quântica, enquanto nas escalas astronômicas, a própria evolução do universo pode ser descrita a partir de condições iniciais, utilizando-se a relatividade de Einstein.

Do casamento da relatividade especial com a mecânica quântica nasceu a teoria quântica de campos que, quando aplicada aos fenômenos eletromagnéticos — a eletrodinâmica quântica —, provou-se a mais bem sucedida das teorias físicas, explicando a espectroscopia atômica numa precisão de uma parte em dez bilhões! E foi o seu sucesso em descrever, de forma unificada, pelo menos em parte, as três interações fundamentais das partículas elementares — força eletromagnética, força

fraca e força nuclear forte — o que nos inspirou na busca pela compreensão da gravitação — a quarta força — neste mesmo formalismo. Ao concebermos toda a natureza em uma única teoria, buscamos a beleza.

2. Sobre a necessidade de uma teoria quântica da gravitação

A teoria da gravitação descreve a mais antiga força da natureza conhecida pelo homem. O Universo ptolomaico já se referia à estrutura do universo baseado nas antigas concepções gregas. Foi com Newton que se conseguiu a primeira descrição do universo através de princípios físicos bem definidos, com uma teoria física subjacente, que pode explicar os antigos dados, melhorados por Tycho Brahe, assim como as leis de Kepler, ali baseadas.

No entanto, foi com a relatividade geral que se pode ter uma descrição completa da natureza da interação gravitacional, já que só então uma determinada condição física, juntamente com as equações fundamentais, poderiam determinar o tipo de gravitação subjacente. Ou seja, com a distribuição de matéria e com a simetria do problema, podemos resolver as equações de Einstein obtendo-se a métrica do problema em questão.

Ao mesmo tempo em que se desenvolvia a teoria da relatividade, a mecânica quântica dava seus primeiros passos, descrevendo uma natureza que correspondia, a princípio, ao muito pequeno. Átomos, elétrons, prótons eram descritos por leis que descreviam o âmago da matéria de modo consistente, o que a mecânica clássica certamente não era capaz de fazer.

Gravitação e mecânica quântica andavam, na primeira metade do século XX a passos paralelos, mas sem jamais colocarem problemas uma à outra, já que até então diziam respeito a problemáticas diferentes, uma delas ao muito pequeno e outra ao muito grande.

Todavia, sempre se almejou descrever uma teoria unificada de todas as interações elementares. Afinal, se a Física é uma só, sendo a mesma em todos os lugares do espaço e em todo o tempo cosmológico, por que então a gravitação não estaria ligada de modo intrínseco às outras interações elementares?

Mais do que isto, o avanço da cosmologia na segunda metade do século XX colocou ainda outra peça importante no estudo da gravitação, através da descrição do universo primordial. O Universo descrito pelas equações de Einstein está em evolução, e se iniciou através de uma explosão universal, o chamado *big bang*, a grande explosão onde o universo emerge de um plasma cosmológico de temperatura altíssima requer a descrição de um fluido cuja energia média por partícula constituinte (ou seja, a temperatura) é muito alta. Assim, a interação se dá no âmago da matéria e requer uma descrição eminentemente quântica. Esta foi uma explosão diferente da explosão de uma bomba, pois esta última tem um centro do qual emanam ondas

de choque. No caso do *big bang* a explosão é universal, em todos os pontos ao mesmo tempo, e a evolução posterior é dada pela teoria das partículas elementares e dos campos, portanto uma teoria quântica.

Ainda mais que isto, a explosão inicial não pode ser compreendida apenas através da gravitação de Einstein, já que neste caso não haveria como se dar uma causa àquela explosão inicial. Juntamente com esta questão, no caso de se descrever o comportamento posterior do universo, em seus primeiros instantes, que são de fundamental importância para a evolução posterior, é necessário que se tenha uma teoria unificada de todas as interações, e portanto, sendo as outras interações obrigatoriamente quantizadas, não há como se ter uma gravitação simplesmente clássica!

Há outras linhas de argumentação equivalentemente incisivas. O comportamento de buracos negros na presença de campos quantizados também nos leva a uma obrigatoriedade da quantização dos campos gravitacionais.

A questão colocada é no entanto das tecnicamente mais difíceis dentro da física teórica. Se procedermos à quantização da gravitação da mesma maneira que o fazemos no caso dos outros campos, chegaremos a contradições visíveis, já que a gravitação, sendo uma teoria altamente não linear, gera quantidades infinitas que não podemos interpretar fisicamente. O chamado problema da renormalização de uma teoria de campos, que *cura* os infinitos que aparecem devido ao caráter operacional dos campos quantizados, não pode ser resolvido em teorias de campos que contenham a gravitação. Em termos técnicos dizemos que a gravitação é uma *teoria não renormalizável*. Isto é fatal, já que neste caso, o poder de previsão da teoria se enfraquece ao infinito.

As dificuldades em se amalgamar gravidade e mecânica quântica são muitas. De fato, apenas pensarmos em uma gravitação quântica já nos demanda uma reestruturação da geometria que poderia passar a ser descrita por números discretos, ou seja, tanto o tempo quanto o espaço passariam a ser medidos em termos de unidades fundamentais discretas. Desta maneira, a antiga meta, já antevista por Einstein, de se obter uma teoria unificada dos campos, que foi delineada para as outras interações no decorrer das últimas décadas do século XX, encontra uma alta barreira exatamente na teoria da gravitação, que podemos chamar a *menina dos olhos* da física fundamental.

Tecnicamente, há várias maneiras de se quantizar a gravitação, cada uma com problemas e consequências. Vamos nos concentrar aqui no modo que tem convencido um grande número de físicos teóricos até o momento, já que é uma via elegante e que leva também à solução de vários problemas teóricos importantes. É a chamada *teoria das cordas* que passamos a descrever. Neste caso, a Física, por seus caminhos sinuosos e confusos, pode ter encontrado a solução para a

quantização da gravidade em um acidente teórico conhecido nos dias de hoje como teoria de supercordas. Inicialmente concebida como um modelo para interações fortes, a teoria de cordas, baseada em princípios simples mas com conseqüências deveras complexas, mostrou-se, nos últimos anos, como a mais séria candidata à unificação de todas as interações elementares, ao incluir a gravidade no mesmo patamar que os demais campos de partículas, em um formalismo finito e livre de anomalias quânticas. Misturando ficção científica e realidade, criando uma nova matemática, prevendo novas dimensões para o nosso universo além daquelas que podemos ver, a teoria de cordas, segundo as palavras de um dos maiores artífices deste campo de estudo, Edward Witten, mostra-se como *a Física do século XXI que por acaso caiu no século XX*. Hoje um novo ânimo instaurou-se na comunidade científica e talvez em breve possamos estar detectando experimentalmente sinais de que todo o trabalho às cegas dos últimos anos em física teórica não tenha sido em vão e esteja, de fato, revelando os mais profundos mistérios da natureza.

3. Cordas

A teoria de cordas se iniciou ao se tentar explicar as leis da teoria de interações nucleares fortes. Era muito difícil tentar uma explicação através dos métodos de teoria quântica de campos que não permitia uma aproximação satisfatória. Tentou-se então chegar a resultados através de hipóteses gerais que satisfizessem às exigências de teoria de campos, ou seja, causalidade e propriedades gerais da teoria de espalhamento. Chegou-se por um processo quase adivinatório a uma expressão que satisfazia àquelas exigências, trazendo ao mesmo tempo uma descrição das partículas interagindo fortemente. Era a chamada fórmula de Veneziano. O grande passo posterior se configurou ao se mostrar que a fórmula de Veneziano podia ser obtida de modo simples em uma teoria descrevendo objetos extensos, a teoria das cordas.

Acredita-se que a corda fundamental, de onde todas as partículas aparecem como modos vibrantes, seja pequena, de fato, da ordem de 10^{-33} cm, para justificar a inobservância direta de sua existência. O número 10^{-33} cm significa a fração $1/1000$ do centímetro. O raio do próton tem 10^{-13} cm, portanto 20 ordens de grandeza maior!

Toda a complexidade da teoria de cordas pode ser derivada em um conceito muito simples: as entidades fundamentais da natureza, partículas constituintes da matéria e das interações, não são objetos pontuais, mas fazem parte de pequenas cordas vibrando no espaço-tempo. Diferentes partículas aparecem como diferentes formas de vibração, mas todas estão incluídas

na mesma descrição. Devemos garantir que a corda fundamental, de onde todas as partículas aparecem como modos de vibração, seja pequena o suficiente para justificar a inobservância direta de sua existência. De fato, o comprimento da corda é conhecido também como comprimento de Planck, da ordem de 10^{-33} cm, conforme dito acima. Assim, só podemos perceber sua existência com experimentos que testem distâncias muito pequenas, ou, equivalentemente, que usem energias muito grandes; tão grandes que a tentativa de detectar esses efeitos diretamente seria inviável com a tecnologia atual. Entretanto, as diferenças fundamentais entre uma corda e um ponto são as responsáveis pelas previsões revolucionárias da teoria.

Uma corda é bem diferente de um ponto: enquanto este, ao mover-se no espaço, descreve uma linha, a corda por sua vez descreve uma superfície. Assim, o princípio de mínima ação da mecânica clássica é traduzido para o formalismo bidimensional, implicando que, de todas as trajetórias possíveis no espaço-tempo, a corda realiza aquela que possui a menor área. Além disso, enquanto os pontos são únicos, cordas podem ser concebidas com as extremidades unidas (cordas fechadas), ou abertas. As cordas fechadas, por não possuírem pontos extremos, estão mais livres que as cordas abertas que precisam ser bem comportadas nas extremidades.

Se o mundo fosse clássico, não poderia surgir nenhuma revolução desta hipótese simples. Mas em um mundo quântico como este em que vivemos, é necessário que as cordas vibrem de maneira quantizada, em quantidades discretas. Cada quantum de vibração aparece como uma partícula distinta, com massa e spin distintos. Podemos compreender então que, como há infinitas formas das cordas vibrando, existiriam infinitas partículas *elementares*. Evidentemente, neste caso, *elementar* deixaria de ser o adjetivo correto. Mas se a corda for suficientemente pequena, como de fato supomos que seja, apenas as partículas sem massa² seriam observáveis nas energias que podemos atingir, pois os outros modos seriam excessivamente massivos para serem observados pelas técnicas atuais. Assim, o número de modos elementares efetivos é finito, e tais modos devem representar as partículas que conhecemos.

A primeira grande surpresa da quantização dessas pequenas cordas provém justamente da parte não massiva deste espectro. No contexto das cordas abertas, encontramos uma partícula sem massa que possui o número de componentes de um fóton — a partícula mediadora da interação eletromagnética. Por outro lado, dentre os modos de vibração de uma corda fechada, identificamos uma partícula sem massa com o número correto de componentes correspondente ao gráviton — a partícula mediadora da interação gravitacional. Assim, a gravidade e as demais interações físicas estariam

²De fato quase sem massa. As massa observadas são muito menores que as massas dos outros modos da cordas, e são descritas por outros mecanismos, que não nos interessa detalhar aqui.

naturalmente unificadas no mesmo formalismo! Como toda teoria de cordas necessariamente inclui cordas fechadas, porque uma corda aberta interagindo sempre pode unir seus pontos extremos, a gravidade não só está descrita no mesmo formalismo que os campos das demais forças como também é uma exigência da teoria. Obtemos uma descrição única de gravitação e das chamadas forças de calibre, que incluem as demais três interações, com a propriedade que caracteriza o campo gravitacional decorrendo naturalmente da teoria: todo campo interage gravitacionalmente.

4. Dimensões

Para que a teoria de cordas funcione explicando a existência de todas estas partículas e forças, é preciso aceitar mais dimensões do que aquelas que conhecemos, já que este cenário é muito restritivo. Pensa-se que várias dimensões sejam necessárias para as cordas vibrarem de modo a explicar todas as características das partículas fundamentais. Quatro dimensões são familiares para nós: comprimento, largura, altura e tempo, mas existiriam outras dimensões que são tão pequenas que não podemos vê-las. Uma visão simples seria dizer que cada ponto no universo tradicional e aparentemente quadridimensional é na realidade um volume pequeno e multidimensional. Esta idéia foi recuperada das antigas idéias propostas por Oscar Klein na década dos 20, baseada nos trabalhos prévios de Theodor Kaluza, quando ele tentava unificar gravidade e eletromagnetismo.

Assim, desde o final da década de 20, com os trabalhos de Kaluza e Klein, sabemos que dificilmente haverá possibilidade de se unificar todas as interações em apenas 4 dimensões (uma de tempo e três de espaço). Não é, portanto, nenhuma surpresa, que a teoria de cordas, candidata à unificação, exija uma alta dimensionalidade do espaço-tempo. De fato, quantizar a teoria só é possível de forma consistente em 10 dimensões do espaço-tempo e com simetrias adicionais. Novamente arte e ficção científica se fazem ciência.

Dimensões além das visíveis sempre assombraram o mundo da ficção científica e foram usadas para várias viagens místicas e até encontros com o criador. A mística da alta dimensionalidade inspirou também artistas como Picasso e Salvador Dali.

Mas o que significaria um mundo com dimensões extras? Seria, na verdade, mais uma lição de humildade para a ciência: o universo não só é infinitamente rico nas três dimensões espaciais que observamos como também é dotado de outras dimensões das quais nem tomamos conhecimento. Somos como carrapatos do universo, vivemos restritos a uma superfície que está imersa em um mundo com mais dimensões. Como seria a ciência de carrapatos? Provavelmente os *carrapatos-cientistas* teriam que apelar para efeitos fantásticos para explicar a chuva: erupções de fluidos viscosos que surgem *do*

nada sobre a superfície em que vivem. Mas seres que ocupam a terceira dimensão, como nós, sabemos porque os carrapatos parecem tão confusos.

O mesmo ocorre para as leis físicas em um universo multidimensional. Nossa visão restrita a quatro dimensões espaço-temporais torna confusos e desunidos os fenômenos que provavelmente seriam descritos de forma simples e única se pudéssemos vislumbrá-los *de fora*, das dimensões em que eles de fato vivem. É claro que, de alguma forma, a existência dessas dimensões poderia ser percebida. Em particular, para a teoria de cordas, a gravidade seria obtida pela troca de cordas fechadas que moram nas dez dimensões. Se a gravidade pode, portanto, se propagar nessas dimensões extras, a lei de Newton deveria ser alterada e não observaríamos uma força gravitacional inversamente proporcional ao quadrado da distância. Como esse efeito não é observado, essas dimensões, se de fato existem, devem ser muito pequenas, tão pequenas que, efetivamente, nosso universo parece quadridimensional. Dizemos que as dimensões extras estão compactificadas.

Quando se compactifica a teoria de cordas, os pontos extremos das cordas abertas ficam confinados às dimensões não compactas, ou seja, ao nosso universo observável; enquanto isto, as cordas fechadas continuam livres para viajarem em todas as dimensões extras. A superfície em que as cordas abertas estão confinadas são membranas imersas no universo em dez dimensões. Toda a matéria e as interações, excluindo a força gravitacional, são, dessa forma, confinadas nessa membrana e formam o nosso universo visível. Somos, portanto, moradores de uma fatia de algo muito maior. As partículas elementares, os fótons de luz e seus similares, estão confinados nesta membrana. Somente a gravidade pode viajar por todo o espaço. Somente ela pode nos trazer indícios da existência de tais dimensões extras. Note-se que há apenas 6 anos, a idéia de dimensões extras habitava a região nebulosa entre a Física e a ficção científica. Porém muito físicos já tinham começado a ver a nova *teoria de cordas* como o grande próximo passo da física teórica. A teoria de cordas é uma teoria que tenta responder a tudo aquilo que observamos no universo, tanto em larga escala como na escala subatômica. Para isto, a teoria deve dar conta de um único comportamento para todas as partículas elementares e as quatro forças fundamentais, deve unificar as teorias da Relatividade Geral e da mecânica quântica e explicar o nascimento do universo e tudo quanto vemos dentro dele. Pela primeira vez a resposta pode estar mais perto do que imaginamos.

5. O estilo teorias de cordas

As teorias de cordas só podem conter simetrias da natureza, as chamadas simetrias de calibre, em certas dimensões específicas. A teoria de cordas mais simples, contendo apenas elementos classicamente conhecidos,

chamados bósons, que descrevem o espaço-tempo, só pode ser definida em 26 dimensões. Pior que isto, ela contém *táquions*, estranhas partículas que viajam a velocidades maiores que a da luz, e foram abandonadas por estas e outras razões.

Ao mesmo tempo, a chamada supersimetria, uma simetria maiúscula que liga bósons e férmions, foi usada para redefinir a teoria de cordas. Acontece que neste caso a dimensão correta da teoria de cordas é dez. Parece melhor. Mas melhor ainda é o fato de que não há *táquions* nestas teorias.

Pois bem, continuemos. As teorias de cordas permitem que definamos certas quantidades associadas à simetria que gostaríamos de prover na própria teoria. Em princípio tal simetria é arbitrária. No entanto, deveríamos, em uma teoria com boa possibilidade de previsão, ter um número pequeno de possibilidades para não cairmos em um tipo de teoria com tanta liberdade que a previsão acabe por ser praticamente eclipsada.

Foi com surpresa que o mundo viu a chamada primeira revolução das cordas quando Michael Green e John Schwarz verificaram que a mecânica quântica coloca vínculos sérios na teoria de cordas e que, se impusermos que as teorias não sejam anômalas, a simetria que a corda deve ter poderá ser no máximo de dois tipos. Combinando com certas liberdades de definição das cordas, chega-se à conclusão de que há apenas e tão somente cinco teorias de cordas possíveis: desta maneira, a mecânica quântica passa a ter um papel fundamental na formulação da teoria universal que inclui a gravitação, levando-nos a uma formulação compacta das interações elementares.

6. M de mistério

A teoria de cordas possui uma formulação muito simples no que diz respeito às interações. Elas se mesclam e se dividem. Há um número pequeno de teorias de cordas, já que sua formulação simples termina por ser quase única. A simetria subjacente à teoria tem um número pequeníssimo de possibilidades que levem a uma teoria de campos simples, e não ao que se costumou chamar de *teorias anômalas*. Hoje, após o que se conhece como a primeira revolução da teoria de cordas, sabemos que existem cinco tipos de teorias de cordas livres de anomalias.

Mesmo havendo um número restrito de possibilidades, esta aparente não unidade conflita com uma interpretação unificadora da natureza. Como uma teoria que se propõe a explicar todas as forças de forma única pode se dividir em diferentes ramos auto-consistentes? Na década de 90, a busca pela resposta a esta questão ocasionou uma segunda revolução: existem dualidades que relacionam cada ramo da teoria de cordas entre si.

As dualidades são equivalências entre formalismos aparentemente distintos. Como um exemplo, para a teoria de cordas não há efetivamente nenhuma diferença

se as dimensões compactas possuem um determinado raio R ou se possuem um raio $1/R$. Esse tipo de dualidade, conhecida como dualidade-T, relaciona teorias compactificadas em um raio grande com compactificações em um raio muito pequeno. Acrescidas das demais dualidades (existem ainda as relações de dualidade-U e dualidade-S), tais identificações revelam vínculos entre os diversos tipos de teorias de cordas sugerindo que todas elas possam ser derivadas de uma teoria fundamental em 11 dimensões (novamente uma unificação maior exige uma dimensionalidade ainda maior). Lembramos então de uma antiga citação de um grande Sufi de nome Rumi, que em um contexto completamente diferente disse: *Even though you tie a hundred knots - the string remains one.*

Essa teoria fundamental é conhecida como Teoria-M: M de *matriz* ou de *mãe*. Como muito pouco se conhece a respeito desse formalismo, o mais provável é que a teoria denomine-se dessa forma com M de *mistério*.

Mesmo que o quadro pareça promissor por estarmos possivelmente no rumo correto, a teoria de cordas possui graves problemas. Por um lado há problemas graves em um nível teórico. Só conseguimos trabalhar com o modelo no que se chama de tratamento perturbativo: é como se conhecêssemos apenas os remanescentes de uma grande explosão nuclear e precisássemos descrever o mundo antes dela. O conhecimento dessa teoria misteriosa que unifica as cordas está longe de ser atingido.

Além disso, a aparente unidade da teoria é quebrada ao compactificarmos as dimensões extras. Diferentes maneiras de compactificar implicam em diferentes resultados e devemos entender qual é a forma correta de compactificação para que a teoria preveja resultados testáveis em laboratório. A questão experimental também é grave, já que o teste experimental da teoria de cordas ainda não foi feito: suas previsões são de caráter muito difícil de serem detectadas por experiências factíveis com a tecnologia atual.

É certo porém que há um problema com o cenário em dez dimensões. A teoria de cordas veio em cinco diferentes formas, até que o físico matemático Edward Witten repensou a teoria de cordas em 1995. Ele sugeriu que as cinco formas matemáticas diferentes da teoria eram simplesmente maneiras distintas de se olhar para o mesmo problema através da teoria M, com uma nova dimensão. Mas logo foi notado que temos então uma outra implicação: pode existir mais de um universo!

7. Cosmologia de Branas

Mesmo que estejamos engatinhando na compreensão dos mistérios por trás da teoria de supercordas, suas implicações na cosmologia podem estar associadas a uma nova revolução.

Inspirados na teoria de cordas, os novos modelos cosmológicos para o nosso universo são construídos justamente para a exploração dos efeitos físicos das di-

mensões extras que a teoria prevê. O quadro dessa nova forma de entender a estrutura e evolução do universo, conhecida também como *cosmologia de branas*, caracteriza-se por estarmos vivendo em uma fatia (uma membrana) de um espaço-tempo com dimensões extras. Somente a gravidade, sendo mediada por cordas fechadas que não possuem pontos extremos fixos nessa brana, pode viajar através dessas dimensões extras. Portanto, apenas utilizando sinais gravitacionais podemos perceber a existência de tais dimensões.

Nesse modelo, é possível até que as dimensões não sejam tão pequenas quanto se esperava. Basta que a gravidade esteja de alguma forma confinada a um espaço suficientemente restrito em torno da brana para que não haja violações da conhecida lei de Newton até as escalas de distâncias em que ela é bem testada (cerca de 1mm). De fato, recentemente, mostrou-se que, se as dimensões forem suficientemente curvadas para confinar a gravidade perto da membrana, elas podem não ser compactas: podem ser infinitas!

Entretanto, mesmo que tais dimensões sejam infinitas, como a gravidade penetra muito pouco nas direções extras, não podemos hoje utilizar sinais gravitacionais para percebermos essa existência. É como se morássemos na superfície de uma mesa muito fina: como estamos acostumados com a grande extensão da mesa, não percebemos sua pequena espessura e efetivamente a mesa aparenta possuir apenas duas dimensões.

Mas a superfície de nossa *mesa* está evoluindo no tempo. O universo está de fato expandindo. Assim, se olharmos para trás, haverá um tempo em que tal superfície é tão pequena que a mesa assemelha-se mais a um cubo: a espessura e largura agora são da mesma ordem de grandeza. Sinais gravitacionais dessa época poderiam carregar a informação de que essas dimensões extras realmente existem!

8. Testando a gravidade na brana

Assim, podemos perguntar se existem outras branas, ou ainda, se talvez exista uma brana do lado daquela que chamamos de nosso universo, uma brana paralela que pode ser chamada de universo paralelo. Porém, tais questões tão complexas fizeram os cientistas pensarem em caminhos para testar a realidade destas predições.

A gravidade é uma das quatro forças fundamentais, mas se distingue das outras três (fraca, forte e eletromagnética) no fato de ser muito mais fraca. Se o nosso universo é de fato uma brana, acredita-se que cada brana deve ter suas próprias leis físicas ditadas pelas cordas que estão ancoradas nela. Mas o que aconteceria se algumas destas cordas forem livres de se movimentar para fora da brana? As cordas responsáveis por controlar o comportamento do gráviton (a partícula que transmite a gravidade) podem ser imaginadas como laços fechados, que por sua forma não estão atados a nenhum universo em particular. São livres para per-

mear outras branas. Assim, a gravidade pode bem ser tão forte quanto as outras forças fundamentais mas, devido à sua habilidade de permear os universos paralelos, ela fica diluída e sua intensidade aparente em nosso universo é muito mais reduzida. Se a teoria estiver correta, então a gravidade poderia ser a única forma que temos para nos comunicarmos com outros universos paralelos, já que é uma força comum a todos os universos e dimensões.

As dimensões extras também podem ser medidas em termos da energia necessária para sondá-las. Uma partícula acelerada a um trilhão de elétron volts (1 TeV) tem, de acordo com a mecânica quântica, um aspecto de onda com um comprimento de aproximadamente 2×10^{-19} m. Portanto, ela pode explorar facetas do mundo subatômico nesta escala. Dobrar a energia significa ver características de um mundo da metade do tamanho anterior, e assim sucessivamente. Em um acelerador é possível fazer colidir partículas de altas energias e esperar ocasionalmente a produção de um gráviton de uma grande energia que possa escapar às dimensões extras e explorá-las, desaparecendo do nosso mundo. Este é o tipo de experimento mais simples que pode ser feito, e se puderem ser eliminadas outras causas para essa perda de energia, então seremos capazes de dizer que achamos uma evidência para a existência das dimensões extras do espaço.

Em um estudo com antenas, Penzias e Wilson, em 1965, observaram a existência de uma radiação de fundo em todo o céu que obedece à distribuição de Planck, com um parâmetro de temperatura T tendo um valor de aproximadamente 3 K. Esta descoberta foi fundamental para que se pudesse confirmar experimentalmente a teoria do *big bang*. A radiação aqui descrita é chamada de radiação cósmica de fundo e é o resquício dessa grande explosão ocorrida há bilhões de anos.

As evidências que buscamos da alta dimensionalidade podem justamente estar escondidas nas inhomogeneidades desses sinais. As observações do satélite COBE, que nos dá a estrutura da radiação cósmica de fundo, 300.000 anos após a explosão inicial, podem portanto revelar os indícios que comprovariam a existência de dimensões extras, já que tal radiação carrega informação de uma era remota, quando os efeitos gravitacionais da alta dimensionalidade eram macroscópicos.

A detecção de eventos relacionados com a existência de um número maior de dimensões sem dúvida seria uma das maiores descobertas da humanidade. Não só colocaria a teoria de cordas e suas implicações em um patamar mais concreto como teoria física, como seria forte indício de que a natureza talvez conheça e faça uso de nossos próprios ideais de beleza!

Se há uma essência por trás de tanta simetria, não sabemos. Provavelmente saberemos apenas que sentido tal beleza pode conferir às nossas próprias vidas. Afinal, como certa vez Henri Poincaré afirmou, *o cientista não estuda a natureza porque ela é útil; estuda-a porque*

se delicia com ela, e se delicia com ela porque ela é bela. Se a natureza não fosse bela, não valeria a pena conhecê-la e, se não valesse a pena conhecer a natureza, não valeria a pena viver.

9. Outros modelos e idéias

Um dos modelos pioneiros do mundo brana é aquele pensado por Nima Arkani-Hamed, Savvas Dimopoulos e Gia Dvali. Eles se concentraram em procurar uma forma que a gravidade se tornasse comparável em intensidade às outras forças à energia de 1 TeV. Conseguiram este objetivo supondo dimensões extras do tamanho de 1 mm. Existe um fato no registro científico que faz esta suposição factível. Enquanto que as outras forças da natureza têm sido verificadas até a ordem de 10^{-19} m, a gravidade só tem sido verificada até a ordem milimétrica.

Como foi dito anteriormente, a teoria de cordas dita que qualquer dimensão extra fora da brana afeta somente a gravidade. Em outras palavras, somente a força mediada pelos grávitons pode viajar no espaço-tempo além da brana deixando o resto das forças confinadas à brana. Qualquer dimensão extra afetando a gravidade deve então alterar a lei do inverso do quadrado de Newton, que diz que todos os objetos são atraídos um pelo outro com uma força que é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. O grupo de Arkani-Hamed, Dimopoulos e Dvali estimou que uma só dimensão extra modificaria a lei de Newton na escala de 100 milhões de quilômetros, aproximadamente a distância entre a Terra e o Sol. Mas sabemos que esta opção não é possível já que a órbita da Terra obedece à lei do inverso do quadrado. Se existissem duas dimensões extras, porém, elas modificariam a lei de Newton na escala de 0,1 a 1 mm, comprida o suficiente para ser detectada, mas pequena demais para ser testada hoje pela lei do inverso do quadrado. Com mais dimensões extras, a escala vai se encolhendo abaixo da escala milimétrica.

Outro modelo importante descrevendo uma dimensão extra foi proposto por Lisa Randall e Raman Sundrum. Eles consideraram uma só dimensão extra e que pode ser ainda infinita. O argumento é que a tal dimensão seja curva o suficiente para confinar a gravidade por perto da brana. Mas sendo assim, hoje não seria possível utilizar sinais gravitacionais para percebermos a dimensão extra. No entanto podemos usar o fato do universo estar se expandindo. Assim, se olharmos para trás, haverá um tempo em que todas as dimensões tinham um comprimento comparável e os sinais gravitacionais daquela época poderiam carregar a informação de que essas dimensões extras, seja uma única ou sejam várias, realmente existem.

10. Atalhos gravitacionais

Como sabemos, a luz é de radiação eletromagnética e, em um modelo de branas, as cargas e os campos devem se propagar somente na brana. Assim, não existiria forma de sondar as dimensões extras usando a luz, mesmo que essas dimensões fossem infinitas. Como foi dito anteriormente, o único caminho seria olhar para qualquer comportamento suspeito da gravidade.

Na cosmologia usual, devido à expansão do universo e ao fato de a velocidade da luz ser finita, escalas que hoje estão em contato causal não estiveram assim no passado. O alto grau de homogeneidade do universo visível em larga escala é conhecido como problema do horizonte. Já que a fração do universo hoje observável foi maior que o alcance dos fótons em um tempo anterior, como explicar que o universo hoje seja homogêneo mesmo sem nunca ter estado em contato causal? Na cosmologia padrão introduz-se uma fase de expansão acelerada conhecida como *inflação* para contornar esta dificuldade. Na cosmologia do mundo-brana, sinais gravitacionais encontrariam atalhos através das dimensões extras suficientemente efetivos para que seu alcance fosse maior que a fração do universo observável, levando desta forma informação entre pedaços não conectados por sinais de luz.

11. O *big bang*

A teoria de cordas, que hoje se tornou teoria M, está dando lugar a uma revolução na forma como concebemos o Cosmos. Mas o que ela tem a dizer sobre como tudo começou? A teoria do *big bang* é até hoje a mais aceita para descrever o começo do universo.

Atualmente, alguns cientistas acreditam na idéia de que o *big bang* seja uma manifestação da colisão de branas. Desta maneira, o *big bang* está longe de ser único. Os *big bangs* são somente um produto dos ciclos sem fim dentro do cosmos. Eles aconteceram antes, e acontecerão de novo.

Há poucos anos Paul Steinhardt e Neil Turok propuseram uma teoria descrevendo esta colisão de branas sob o nome de *universo cíclico*. Neste cenário, o espaço e o tempo existiram sempre. O *big bang* não é o começo do tempo, é somente uma ponte a uma era anterior de contração. O universo sofre uma seqüência interminável de ciclos nos quais ele se contrai em um *big crunch* e reemerge em um *big bang* de expansão, com trilhões de anos de evolução.

O modelo cíclico recupera todas as predições de sucesso das teorias do *big bang* e inflação, e ainda tem suficiente poder preditivo para direcionar muitas questões que estes modelos não souberam responder: o que aconteceu na singularidade inicial? Qual o destino do universo? O tempo existiu antes do *big bang* ou depois do *big crunch*?

Neste modelo cada ciclo prossegue através de um

período de domínio da radiação e outro da matéria, consistente com a cosmologia padrão. Para os próximos trilhões de anos ou mais, o universo sofre um período de lenta aceleração cósmica e provoca os eventos que conduzem à contração e ao *big crunch*. A transição do *big crunch* ao *big bang* automaticamente preenche o universo criando nova matéria e radiação. A gravidade e a transição do *big crunch* ao *big bang* mantém os ciclos eternamente. Esta transição é devida ao colapso, oscilação e re-expansão de uma das dimensões extras. Por exemplo, numa variante da teoria M, o universo consiste de duas branas que limitam a dimensão extra, e a singularidade corresponde a uma colisão e o pulo sucessivo das duas branas. Este cenário foi precedido pelo *modelo ekpirótico*, proposto pelos mesmos autores junto a J. Khoury e B. Ovrut, que falava da possibilidade de criar o universo do colapso único da dimensão extra. O modelo cíclico é construído sobre estas idéias para produzir uma nova visão com um grande poder preditivo e explicativo.

Dispersando o mito de que o *big bang* é o começo do espaço e do tempo, a teoria de cordas abre novas possibilidades para a história cosmológica do universo.

12. Conclusão

É claro que, para que a teoria de cordas seja um sucesso matemática e experimentalmente, é necessário haver uma mudança radical da forma como vemos o universo. Porém, é importante ter em mente que a teoria de cordas com todas suas conseqüências bizarras, está baseada mais no pensamento que no experimento.

No entanto, ela não é diferente das idéias revolucionárias de Einstein há quase um século, e suas idéias foram logo demonstradas como fato científico. Naquele tempo, a relatividade especial e a geral foram formas científicas de pensar bastante novas e excitantes que nos empurraram dentro de novos mundos do entendimento. A teoria de cordas bem poderia fazer o mesmo em um

futuro não muito longínquo.

O certo, no entanto, é que a busca por uma teoria que inclua os dois grandes pilares da física moderna, a relatividade geral e a mecânica quântica, não pode parar, e apenas uma formulação conjunta destas vertentes teóricas poderá dar à Física o caráter de uma ciência presente em todos os aspectos físicos do Universo.

Agradecimentos

Agradeço pelo apoio financeiro da FAPESP e do CNPq, assim como discussões e idéias de Bertha Cuadros Melgar e Adenauer Casali.

Referências

- [1] M. Rees. *Before the Beginning* (Touchstone Book, 1998).
- [2] M. Rees, *Apenas Seis Numeros* (Editora Rocco, Rio de Janeiro, 2000).
- [3] E. Abdalla e A.G. Casali. *Cordas, Dimensões e Teoria M*, Scientific American, Brasil, março 2003.
- [4] S. Hawking, *O Universo numa Casca de Noz* (ARX, 2002).
- [5] B. Greene, *O Universo Elegante* (Cia das Letras, 2001).
- [6] M. Kaku, *Hiperespaço* (Editora Rocco, 2000).
- [7] A.H. Guth, *The Inflationary Universe* (Perseus Books, 1997).
- [8] E. Abdalla, *Supercordas*, Revista da Universidade de São Paulo **5** (1990).
- [9] E. Abdalla, *Revista da Universidade de São Paulo* **62** (2004).
- [10] B. Cuadros-Melgar, *Revista da Universidade de São Paulo* **62** (2004).
- [11] P. Davies e J. Brown, *Superstrings - A Theory of Everything?* (Cambridge Univ. Press, 1988).