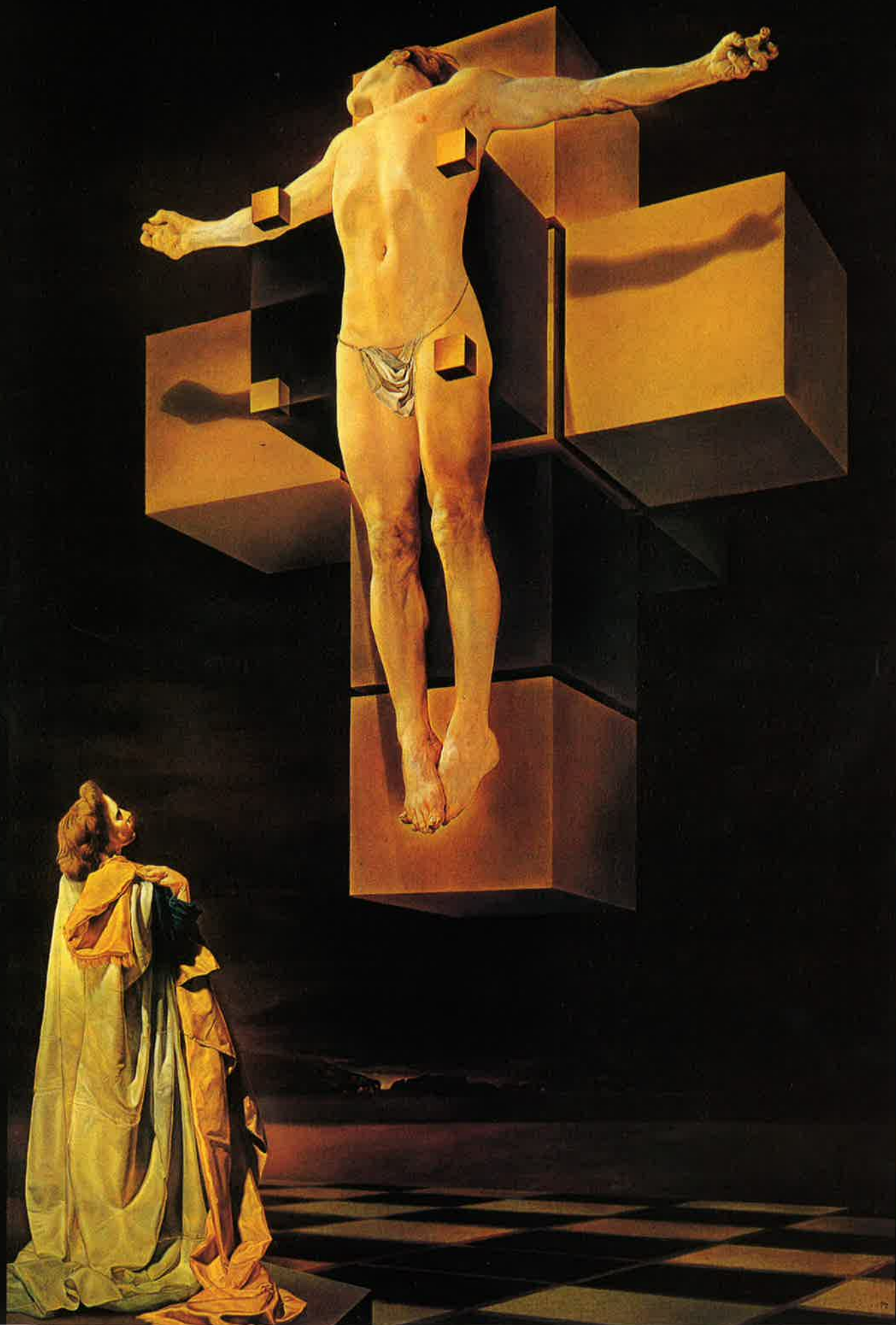


# Cordas, Dimensões e Teoria M

Entidades fundamentais da natureza, partículas constituintes da matéria e das interações, não são objetos pontuais, mas pequenas cordas vibrando no espaço-tempo

POR ELCIO ABDALLA E ADENAUER GIRARDI CASALI

**VISLUMBRE DA QUARTA DIMENSÃO:** uma cruz em duas dimensões, ao ser dobrada, forma um cubo em três dimensões. Uma cruz no espaço tridimensional formaria um hipercubo em quatro dimensões



SALVADOR DALÍ, CRUCIFIXIÓN DU CORPUS HÍPERCÚBICUS. ÓLEO SOBRE TELA, 1954. METROPOLITAN MUSEUM OF ART, NEW YORK

# QUANDO NOS TORNAMOS CONSCIENTES DE NOSSA EXISTÊNCIA, A BELEZA

do cosmo abalou profundamente nossa mente. E desde então, a preocupação humana com o problema de nossas origens é fonte de inspiração para a música, arte e religião. Evidência disso é a enorme quantidade de lendas, especialmente em sociedades primitivas, e a presença destes conteúdos em narrativas mitológicas de várias religiões politeístas, que culminam na gênese das religiões monoteístas.

A busca da compreensão do Cosmo motivou também gerações de pesquisadores em todas as áreas da ciência. O ser humano, tornado consciente, passando a viver o mito do herói e a planejar a compreensão da natureza, almeja descrever a criação do mundo, suas leis e conseqüências. É assim que a preocupação humana tomou forma em objetos longínquos no macrocosmo, desde os antigos. Não havia na época como se preocupar com o microcosmo por falta da técnica adequada, mas já ao final do século 18 este caminho começou a ser trilhado e, posteriormente, pavimentado.

O espírito investigativo da nossa espécie 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 como 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 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 um bilhão. E foi o seu sucesso em descrever, de forma unificada, as três interações fundamentais das partículas elementares – força eletromagnética, força nuclear fraca e nuclear forte – que nos inspirou na busca pela compreensão da gravitação – a quarta força – neste mesmo formalismo. Ao concebermos toda a natureza em uma única teoria, sonhamos com a beleza.

Mas para que este sonho se torne real, devemos quantizar a gravidade. Tal necessidade advém de vários pontos na descrição do Universo. O principal deles é o fato de que uma teoria do tipo *Big Bang*, onde o Universo que emerge de um plasma cosmológico de temperatura altíssima, requer a descrição de um fluido cuja energia média por partícula constituinte (ou seja, a temperatura) seja muito alta. Assim, a interação se dá no âmbito da matéria e requer uma descrição eminentemente quântica. Todavia, 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. Ademais, uma teoria de campos gravitacionais quantizados não é consistente devido a quantidades infinitas que não podem ser absorvidas em constantes experimentais. O cha-

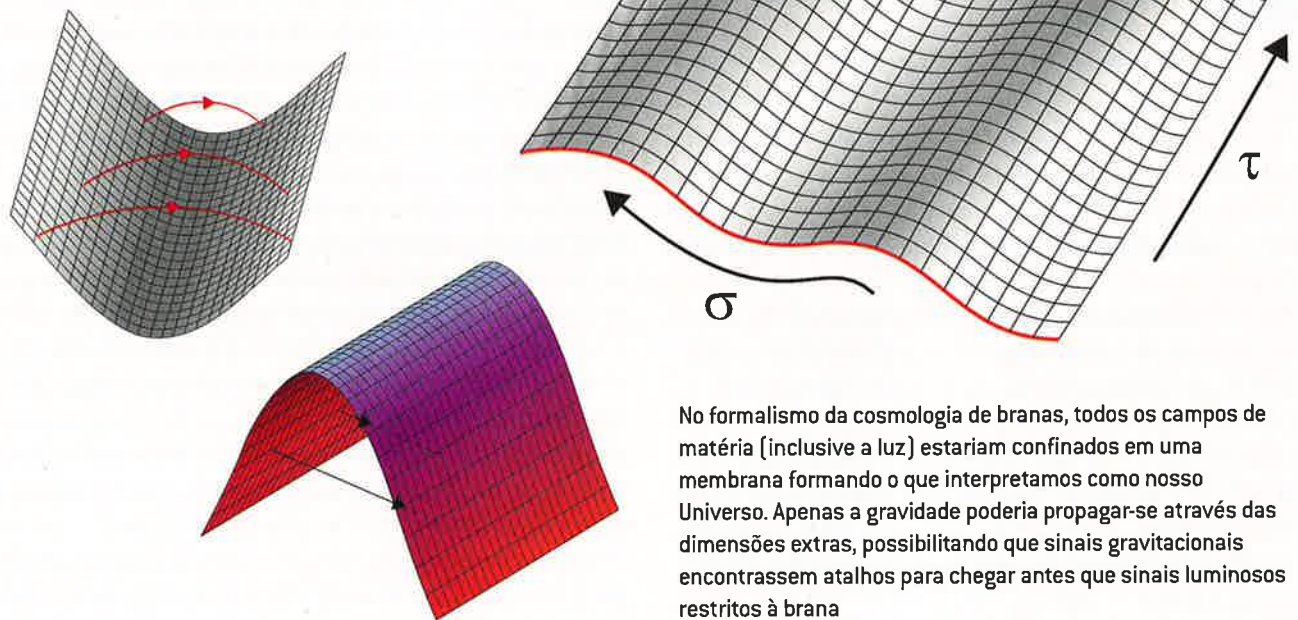
## Resumo/ *Vibração das Cordas*

- Ao concebermos toda a natureza em uma única teoria, sonhamos com a beleza. A Teoria de Cordas iniciou-se com a tentativa de explicar as leis da teoria das interações fortes, as interações nucleares.
- 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.
- Uma corda é bem diferente de um ponto. Enquanto um ponto, ao mover-se no espaço, descreve uma linha, a corda define uma superfície.
- 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 quatro dimensões (uma de tempo e três de espaço).



## EXCITAÇÃO DE CORDAS GERA PARTÍCULAS

**UM OBJETO UNIDIMENSIONAL** como uma corda descreve uma superfície ao deslocar-se no espaço-tempo. Além de sua dimensão temporal ( $\tau$ ), a descrição da evolução de uma corda envolve sua extensão ( $\sigma$ ). Mesmo estando em repouso em um ponto do espaço, diferentes formas de oscilação estarão associadas a diferentes energias (massas) e graus de liberdade (spins). As partículas que interpretamos como elementares surgem como os graus de excitação da corda quântica.



No formalismo da cosmologia de branas, todos os campos de matéria (inclusive a luz) estariam confinados em uma membrana formando o que interpretamos como nosso Universo. Apenas a gravidade poderia propagar-se através das dimensões extras, possibilitando que sinais gravitacionais encontrassem atalhos para chegar antes que sinais luminosos restritos à brana

mado 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. Diz-se que a gravitação é uma teoria não renormalizável.

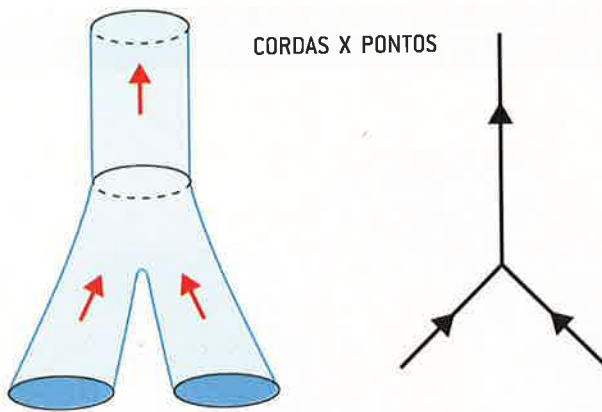
Desta maneira, a antiga meta, já antevista por Einstein, de se obter uma teoria unificada dos campos, que foi delineada para as outras interações no decorrer das últimas décadas do século 20, encontra uma barreira exatamente na teoria da gravitação, que podemos chamar a “menina dos olhos” da física fundamental.

Mas 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 complexas, mostrou-se, nos últimos anos, como a mais séria candidata à unificação, 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 da-

quelas que podemos ver, a teoria de cordas, segundo as palavras de um dos maiores contribuintes para este campo de estudo, Edward Witten, mostra-se como “a física do século 21 que por acaso caiu no século 20”. Hoje um novo ânimo instaurou-se na comunidade científica. Vivemos em uma era pré-revolucionária e, em breve, poderemos estar detectando experimentalmente sinais de que todo o trabalho às cegas dos últimos anos em física teórica não foi em vão e esteja, de fato, revelando os mais profundos mistérios da natureza.

### Cordas

A TEORIA DE CORDAS SE INICIOU ao se tentar explicar as leis da teoria de interações fortes, as interações nucleares. Era muito difícil se tentar ma explicação através dos métodos de teoria quântica de campos, que não permitia uma aproximação satisfatória. Tentou-se então se chegar a resultados através de hipóteses gerais que satisfizessem às exigências da teoria de Campos, ou seja, causalidade e propriedades gerais de espalhamento. Chegou-se por um processo quase de adivinhação a uma expressão que satisfazia àquelas exigências, trazendo ao mesmo tempo uma descrição das partículas interagindo fortemente. Era a chamada fór-



**CORDAS INTERAGINDO DIFEREM** de pontos pela suavidade de seus diagramas. Um objeto com extensão espacial não possui a estrutura singular de um ponto com dimensão zero

ARTES REPRODUZIDAS POR PAULO ZILBERMAN

mula de Veneziano. O grande passo posterior configurou-se ao se mostrar que a fórmula de Veneziano podia ser obtida de modo simples em uma teoria descrevendo objetos extensos, a Teoria de Cordas.

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. 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 me-

cânica clássica é traduzido para o formalismo bidimensional, implicando que, de todas as trajetórias possíveis no espaço-tempo, a corda realiza aquela que possui a mínima 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 vivemos, é necessário que as cordas vibrem de maneira quantizadas 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 de cordas estarem 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 massa (de fato, quase sem massa. As massas observadas são muito menores que as massas dos outros modos das cordas, e são descritas por outros mecanismos, que não nos interessa detalhar aqui.) 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 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.

## Dimensões

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 quatro dimensões (uma de tempo e três de espaço). Não é, portanto, nenhuma surpresa, que a

### OS AUTORES

**ELCIO ABDALLA**, professor titular do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, no Departamento de Física-matemática, escreveu mais de uma centena de trabalhos em revistas especializadas, além de 30 outras colaborações. Entre seus escritos estão dois livros envolvendo teoria quântica de campos e teoria da gravitação e cosmologia. Em 1992 recebeu medalha do Centro Abdus Salam de Física Teórica. Por longo período foi professor visitante em Copenhague (Dinamarca), CERN (Genebra, Suíça) Trieste (Itália) e Hamburgo (Alemanha). Visitou e deu seminários, além de colaborações, em universidades em diferentes países.

**ADENAUER GIRARDI CASALI** é estudante de doutorado com área de interesse em cosmologia, gravitação e Teoria de Cordas.





## 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? Eles deveriam apelar para efeitos fantásticos para explicar a chuva

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 novamente arte e ficção científica fazem ciência.

Já desde o romance de Edwin Abbot, de 1884, *Flatland: A Romance of Many Dimensions by a Square*, dimensões além das visíveis 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 Dalí que, com sua arte, quase permite o vislumbre de uma quarta dimensão do espaço.

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 de apelar para efeitos fantásticos para explicar a chuva: erupções de fluidos viscosos que surgem “do nada” sobre a superfície em que vivem.

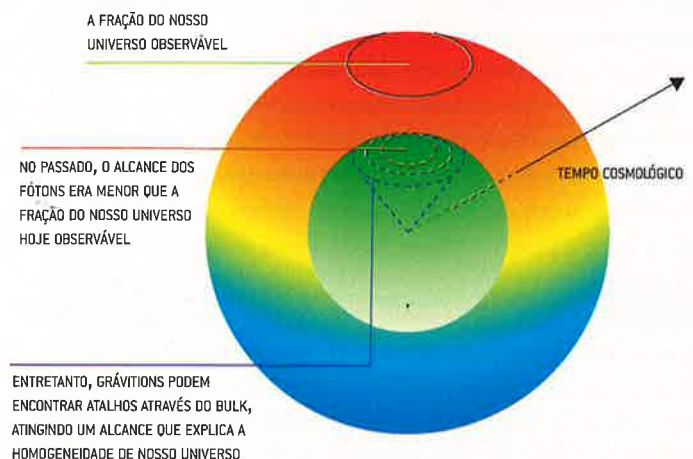
Mas seres que ocupam a terceira dimensão, como nós, sabemos por que os carrapatos parecem tão confusos.

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.

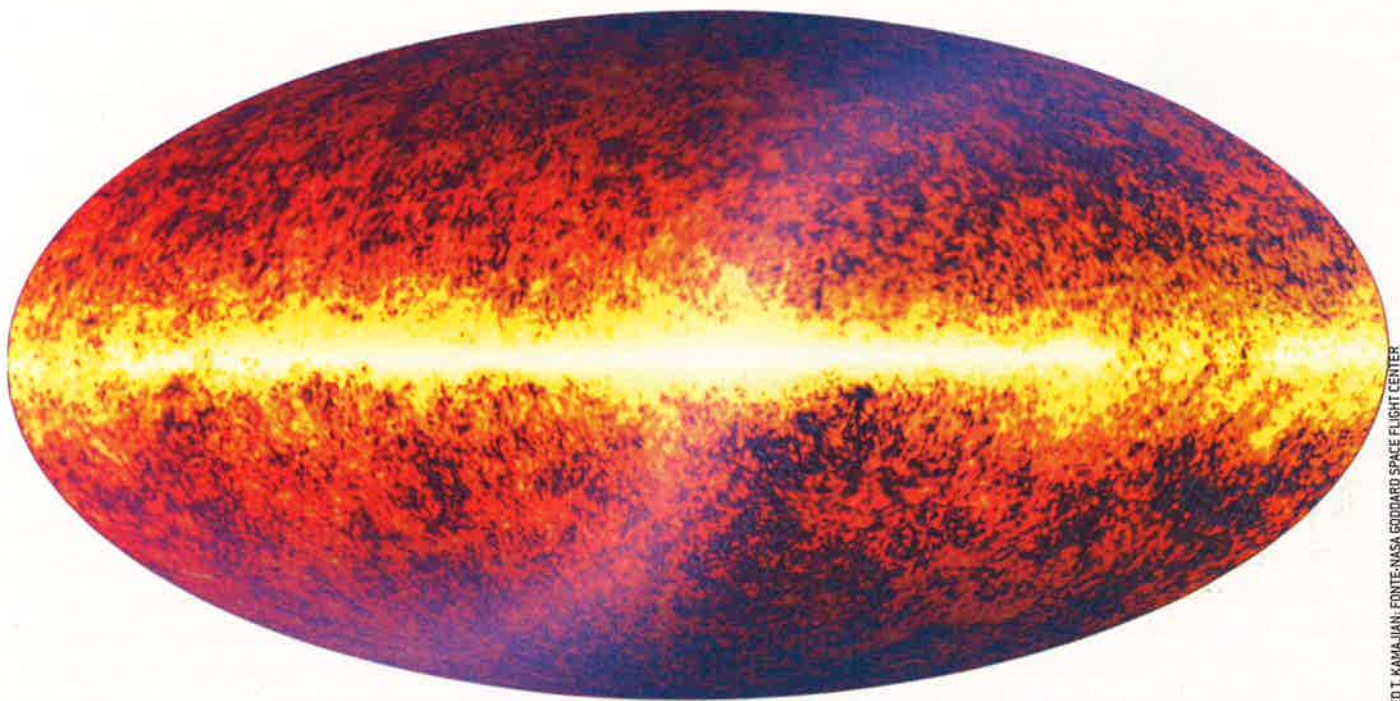
Quando se compactifica a Teoria de Cordas, os pontos extremos das cordas abertas ficam confinados às dimensões não compactas: ao nosso Universo observável; enquanto isto, as cordas

### RUPTURA COM O PASSADO

**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 traduz-se no conhecido problema do horizonte. Já que a fração do Universo hoje observável (círculo preto na esfera superior) foi maior que o alcance dos fótons (círculo vermelho) 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 inflacionária de expansão para contornar esta dificuldade. Com dimensões extras, sinais gravitacionais encontrariam atalhos suficientemente efetivos para que seu alcance (círculo em azul) fosse maior que a fração do Universo observável. Assim, em princípio, a cosmologia de branas justifica a formação de estruturas mesmo sem inflação



ARTE REPRODUZIDA POR PAULO ZILBERMAN



ALFRED T. KAJAJIAN-FONTE-NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

IMAGEM PRODUZIDA PELO SATÉLITE COBE, com um universo de 300 mil anos de idade, pode revelar indícios de dimensões extras

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 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. Partículas, luz, tudo está confinado nesta membrana, somente a gravidade pode viajar por todo o espaço. Somente ela pode nos trazer indícios da existência de tais dimensões extras.

## M de Mistério

A TEORIA DE CORDAS POSSUI uma formulação muito simples no que diz respeito às interações. Elas se mesclam e se dividem, tal como sugerimos na pág. 33.

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-unicidade 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.

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 T-dualidade, 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). Lembremos 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 e justifique uma euforia por estarmos possivelmente no rumo correto, a Teoria de Cordas possui graves problemas. Para muitos, o problema mais grave ainda reside 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.





“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 conhecê-la, não valeria a pena viver”

Além disso, a aparente unidade da teoria é quebrada ao compactificarmos as dimensões extras. Diferentes maneiras de compactificar implicam diferentes resultados e devemos entender qual é a forma correta de compactificação para que a teoria preveja resultados testáveis em laboratório.

## Cosmologia de Brana

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 dimensões 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 e 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 espera. 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 1 mm).

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 se 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!

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 3K. 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 mil 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.”

### PARA CONHECER MAIS

O Universo numa Casca de Noz, S. Hawking. Arx, 2002.

O Universo Elegante. B. Greene. Cia. das Letras, 2001

Hiperespaço. M. Kaku. Rocco, 2000

The Inflationary Universe. A. H. Guth. Perseus Books, 1997

Supercordas. E. Abdalla. Revista da Universidade de São Paulo, 5 (1990).

Superstrings- A Theory of Everything? P. Davies e J. Brown. Cambridge Univ. Press, 1988