

DESCOBRINDO a TEORIA das CORDAS

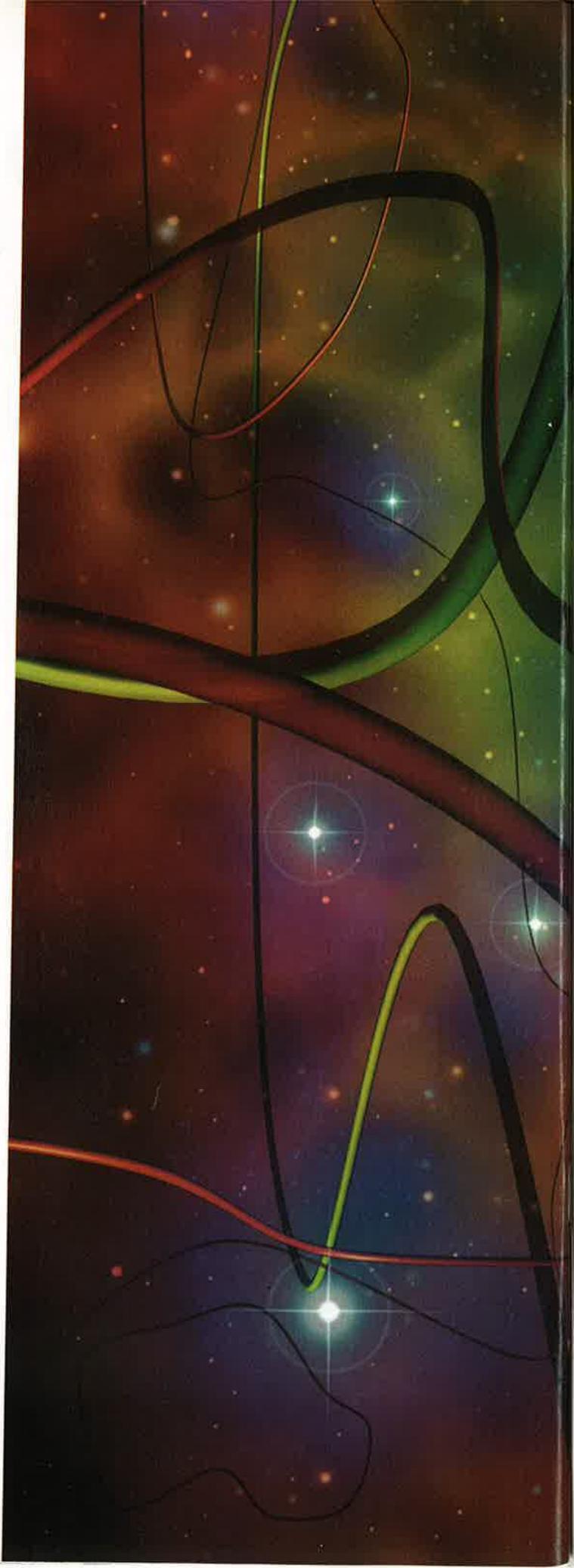
POR NATHAN JACOB BERKOVITS

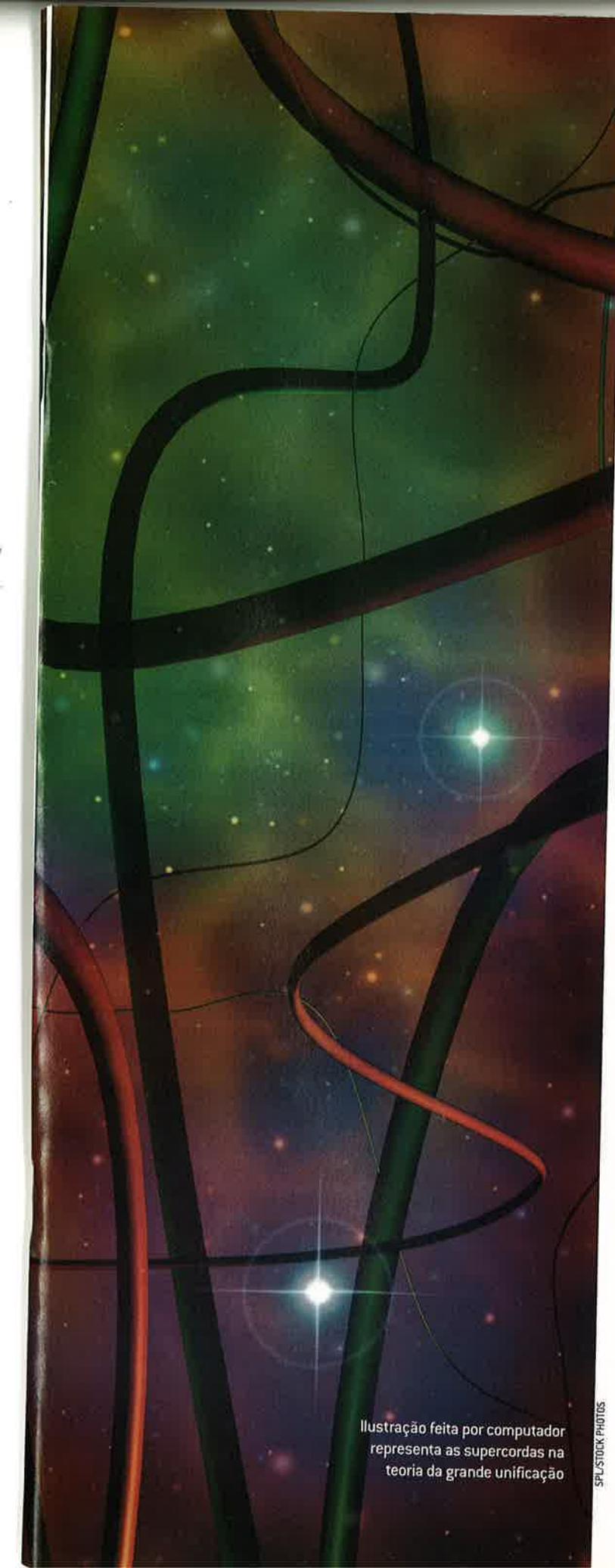
Estrutura básica envolvendo a natureza da matéria é comparável ao encontro de um tesouro. Promessas dos primeiros indícios poderão ser confirmadas por escavações mais profundas

Existem dois tipos de teorias para descrever as leis físicas de nosso Universo – as teorias “construídas” e as teorias “descobertas”. Uma teoria “construída” é como um prédio que começa com uma base sólida e onde são colocadas paredes e janelas em posições que dependem da função do edifício. Se houver desejo de modificá-lo posteriormente, poderá ser feita uma mudança nas paredes e janelas sem afetar sua estabilidade. Da mesma forma, uma teoria “construída” pode ser modificada para concordar com novos resultados experimentais, supondo que estes resultados não discordem da “base” da teoria.

Outra possibilidade é a teoria “descoberta”, comparável a um tesouro enterrado. O tesouro é achado por acaso quando alguém percebe, digamos, algumas moedas no chão e, após escavar por algum tempo, descobre a magnitude do tesouro. Ao contrário de uma teoria “construída”, uma teoria “descoberta” é dificilmente modificada porque não se pode avaliar o tesouro antes de encontrá-lo. Mas devido ao fato de a “escavação” ser baseada em pesquisa teórica e não em experiências, uma teoria “descoberta” pode ser desenvolvida na ausência de novos resultados experimentais, o que é difícil de fazer com uma teoria “construída”.

Um bom exemplo de uma teoria construída é o “modelo padrão” das interações fundamentais, que descreve três das quatro forças conhecidas. Essas três forças são: a força eletromagnética,





a força fraca (responsável por radioatividade) e a força forte (responsável pela estabilidade do próton), mas o modelo padrão não descreve a quarta força, a gravitacional. A “base” do modelo padrão é a teoria quântica da força eletromagnética. Porque a teoria quântica de eletromagnetismo já foi testada (e verificada com a incrível precisão de uma parte em um bilhão), a base do modelo padrão é extremamente sólida. As outras duas forças no modelo padrão, a fraca e forte, são descritas usando generalizações dos conceitos presentes na teoria quântica do eletromagnetismo. Embora alguns aspectos do modelo padrão (ex.: o “bóson de Higgs”) ainda não tenham sido verificados experimentalmente, a maioria dos físicos acredita que a estrutura básica do modelo padrão descreve corretamente a física subatômica. Posteriormente, se surgirem discrepâncias entre o modelo padrão e experiências (ex.: neutrinos massivos), será possível fazer modificações (as paredes e janelas do modelo) sem demolir o prédio.

Uma propriedade essencial do modelo padrão é que todas as partículas fundamentais (ex.: elétron, fóton, quark etc.) são objetos pontuais. Porque a força entre duas partículas depende inversamente da distância ao quadrado entre elas, a força diverge para o infinito quando duas partículas pontuais se aproximam. Felizmente, no caso das três forças no modelo padrão, este infinito é “curado” pelos efeitos quânticos. Mas no caso da força gravitacional, o infinito persiste ainda depois de incluir os efeitos quânticos. Por esta razão não é possível incluir a gravitação no modelo padrão sem derrubar o edifício inteiro.

Mas nos anos 70 descobriu-se a possibilidade de as partículas fundamentais serem ressonâncias de um objeto unidimensional chamado uma “corda” fundamental. Esta descoberta foi feita por acaso, investigando uma fórmula para espalhamento de partículas e percebendo que a fórmula somente faria sentido se as partículas fossem interpretadas como ressonâncias de uma corda vibrando. Cada ressonância diferente da corda corresponderia a uma partícula fundamental específica, da mesma maneira que ressonâncias diferentes de uma corda de violino correspondem a notas musicais diferentes. Investigando as ressonâncias de uma corda fundamental, foi descoberto que uma das ressonâncias descreve a partícula chamada “gráviton”, responsável pela força gravitacional. E outras ressonâncias da corda descrevem partículas muito semelhantes aos elétrons, fótons e quarks do modelo padrão. Além disso, as interações de objetos unidimensionais são mais suaves que as interações de objetos pontuais, implicando que a força entre duas cordas não diverge para o infinito quando elas se aproximam. Então existe a possibilidade de que a teoria de cordas unifique o modelo padrão com a gravitação, sem enfrentar o problema dos infinitos quânticos.

Como mencionado na entrevista com Greene (pág. 52) existem outras teorias que também tentam unificar a gravitação com as outras forças. O primeiro passo para isso é a eliminação dos

Ilustração feita por computador
representa as supercordas na
teoria da grande unificação

SPL/STOCK PHOTOS



ILUSTRAÇÕES: WANDUIR DURANT

OS CINCO TIPOS de supercordas estão relacionados entre si por meio de “dualidades” e também com a “teoria-M”

infinitos que aparecem quando a gravitação é quantizada da mesma maneira como as outras forças. Uma teoria alternativa chamada “gravitação quântica de laços” sugere que a maneira correta de quantizar a gravitação deveria ser diferente da maneira como se quantizam as outras três forças. Esta teoria alternativa, como a relatividade geral de Einstein, tem a propriedade de todas as escolhas possíveis do espaço-tempo serem tratadas igualmente, pois a teoria é independente da escolha do “fundo”. Embora esta propriedade seja desejável, significa que todas as escolhas do fundo são igualmente difíceis de descrever. Por exemplo, na teoria de cordas, um espaço-tempo plano é muito mais fácil de descrever que um espaço-tempo curvo. Embora não se possa calcular as propriedades da teoria de cordas em qualquer fundo, ao menos se pode calcular as propriedades da teoria num espaço-tempo plano. Já na “gravitação quântica de laços” é muito difícil calcular propriedades da teoria até num espaço-tempo plano. Outro problema desta teoria alternativa é que a gravitação é tratada diferentemente das outras três forças, o que torna difícil entender como ela pode ser usada para unificar a gravitação ao modelo padrão.

A teoria de cordas está sendo “descoberta” e não “construída”, então as propriedades da teoria não podem ser ajustadas para coincidir com as propriedades desejadas. Por exemplo, no caso em que os objetos fundamentais sejam pontuais, não existe restrição sobre o número de dimensões do espaço-tempo do Universo. Mas a relatividade restrita proíbe que dois pontos distintos troquem informação com velocidade superior à da luz, o que pode causar uma contradição quando os dois pontos estão na mesma corda fundamental. Para evitar esta contradição é necessário que as cordas vibrem em dez dimensões (nove dimensões de espaço e

uma de tempo) em vez de quatro dimensões (três dimensões de espaço e uma de tempo), que nos são familiares.

A exigência de dez dimensões representaria um problema sério para a teoria, a menos que seis das dimensões fossem pequeníssimas. É preciso lembrar que a energia de uma onda de luz é inversamente proporcional ao comprimento da onda, então, se as seis dimensões forem pequeníssimas, seriam necessárias enormes quantidades de energia para observá-las. A idéia de que nosso Universo possa ter mais de quatro dimensões é antiga e, de fato, Einstein utilizou-a para tentar unificar gravitação e eletromagnetismo. Existe a possibilidade de que observações cosmológicas do Universo jovem dêem informações se o Universo tem dimensões adicionais ou não.

Para a teoria de cordas conter partículas semelhantes às partículas do modelo padrão, estas seis dimensões deveriam ser compactadas na forma de um espaço “Calabi-Yau” (*ver capa desta edição*). Mas, infelizmente, o tesouro ainda não deu pistas sobre a forma da compactação que a teoria de cordas prefere. Alguns físicos abandonaram a esperança de que o tesouro possa determinar essa forma e adotaram o princípio “antrópico”. Esse princípio diz que as leis da física do nosso Universo devem ser compatíveis com a existência dos seres humanos e isto implicaria que a forma da compactação seja Calabi-Yau. Mas a maioria dos físicos, incluindo Greene, considera esta atitude precipitada e recomenda paciência com as “escavações” do tesouro.

Outra descoberta escavada nos anos 80 é que os infinitos quânticos que dificultam a unificação de gravitação com o modelo padrão são eliminados somente se a teoria de cordas tiver uma característica chamada supersimetria. As partículas da Natureza são divididas em dois tipos, bósons (ex.: o fóton e o bóson de Higgs) e férmions (ex.: elétrons e quarks), e a supersimetria implicaria uma relação entre as massas dos bósons e as massas dos férmions. Embora ainda não exista evidência direta

O AUTOR

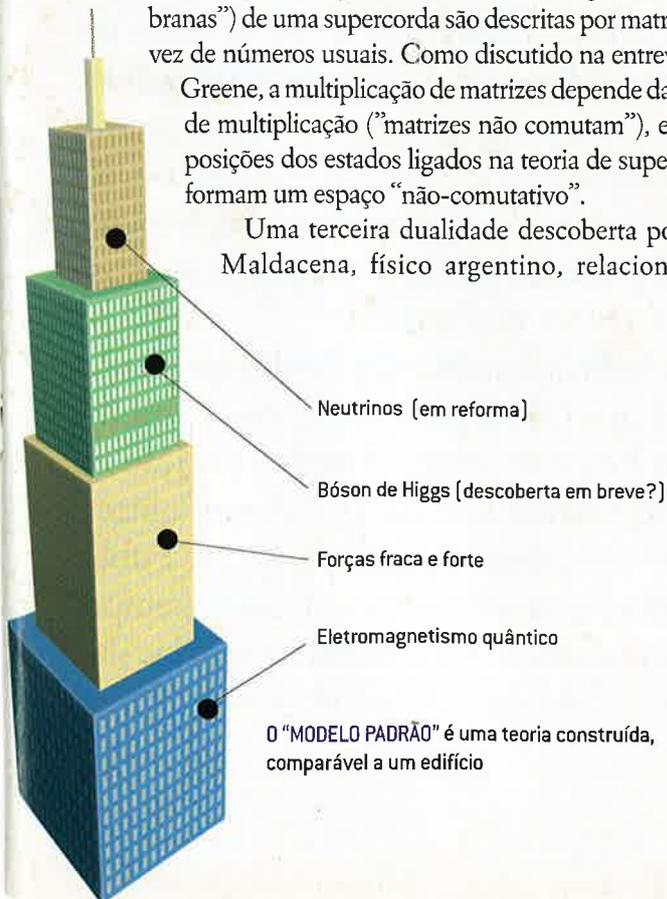
NATHAN J. BERKOVITS recebeu o doutorado em 1988 na Universidade da Califórnia em Berkeley, e mantém colaborações com físicos importantes como Maldacena e Witten. Desde 1996 é professor no Instituto de Física Teórica (IFT) da Universidade Estadual Paulista (Unesp).

de que a Natureza tenha de fato esta simetria, existe evidência indireta disso. Em cinco anos deverão ser iniciadas experiências num acelerador em Genebra que irão procurar evidência direta de supersimetria. Se sua existência for confirmada, aumentará a confiança de que a teoria de cordas descreva corretamente a unificação de gravitação com o modelo padrão.

Cordas com supersimetria são chamadas supercordas. E as escavações dos anos 80 revelaram cinco tipos de supercordas que aparentemente são tesouros independentes. Nos anos 90 foi descoberto que todos os cinco tipos de supercordas estão relacionados entre si por meio de simetrias chamadas “dualidades”, então eles são cinco elementos do mesmo tesouro. Dualidades são relações entre teorias aparentemente diferentes, mas que descrevem a mesma física. Por exemplo, uma dualidade descoberta relaciona uma supercorda vibrando num espaço com tamanho R com outra supercorda vibrando num espaço com tamanho $1/R$. Esta dualidade se chama “simetria espelho”, e é discutida amplamente na entrevista a seguir com Greene porque está relacionada com sua pesquisa. Ela implica que dois espaços diferentes podem descrever a mesma física.

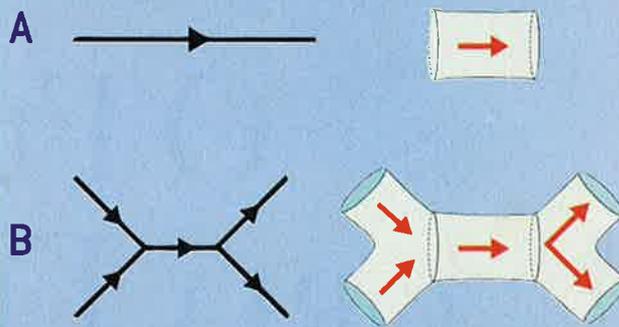
Outra dualidade descoberta relaciona uma supercorda interagindo fortemente com outra supercorda interagindo fracamente. Esta dualidade se chama “dualidade-S” e implica que estados “livres” em uma supercorda estão relacionados com estados “ligados” em outra supercorda. Os estados livres são mais fáceis de estudar que os estados ligados. Então dualidade-S é útil para descrever um sistema complicado em termos de um sistema mais simples. As posições dos estados ligados (ou “D-branas”) de uma supercorda são descritas por matrizes em vez de números usuais. Como discutido na entrevista de Greene, a multiplicação de matrizes depende da ordem de multiplicação (“matrizes não comutam”), então as posições dos estados ligados na teoria de supercordas formam um espaço “não-comutativo”.

Uma terceira dualidade descoberta por Juan Maldacena, físico argentino, relaciona uma



O “MODELO PADRÃO” é uma teoria construída, comparável a um edifício

PARTÍCULAS E CORDAS



A) Trajetórias de um objeto pontual e de um objeto unidimensional
B) As interações de objetos unidimensionais são mais suaves que as interações de objetos pontuais

supercorda em D dimensões com uma teoria em $D-1$ dimensões. Esta dualidade está baseada no princípio “holográfico”, que tem este nome porque um holograma é uma foto bidimensional que carrega informação sobre o ambiente tridimensional de onde a foto foi tirada (ver *O Universo é um Holograma?*, SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, setembro 2003). Uma aplicação importante deste princípio é descrever o interior de um buraco negro em D dimensões em termos do horizonte do buraco negro em $D-1$ dimensões, que é útil para entender a entropia associada a um buraco negro.

Além de serem relacionadas entre si, existe uma conjectura de que as cinco teorias de supercordas também estão relacionadas com uma teoria, vivendo em onze dimensões, chamada “teoria M ”. A letra M no nome desta teoria foi escolhida pelo físico Edward Witten para representar as palavras “mistério”, “mágica” ou “mãe”. Mais tarde foi sugerida que a letra M também possa representar as palavras “matriz” ou “membrana”. A verdade é que as escavações do tesouro até agora não revelaram todos os segredos sobre esta teoria M .

Hoje, a teoria de cordas é uma das áreas mais ativas da física teórica. Embora existam poucos físicos no Brasil pesquisando a teoria de cordas, o grupo maior trabalha no Instituto de Física Teórica (Universidade Estadual Paulista), localizado próximo à Avenida Paulista, em São Paulo. O tópico da pesquisa do grupo nesse instituto é entender o papel da supersimetria na teoria de cordas e vários avanços já foram feitos aqui. No mês passado, o Centro Internacional de Física Teórica (Trieste, Itália) apoiou uma escola de cordas de três semanas nesse instituto paulista para 90 alunos originários de todos os países da América Latina. SA

PARA CONHECER MAIS

O Universo Elegante – Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva. Brian Greene. Companhia das Letras. 2001.

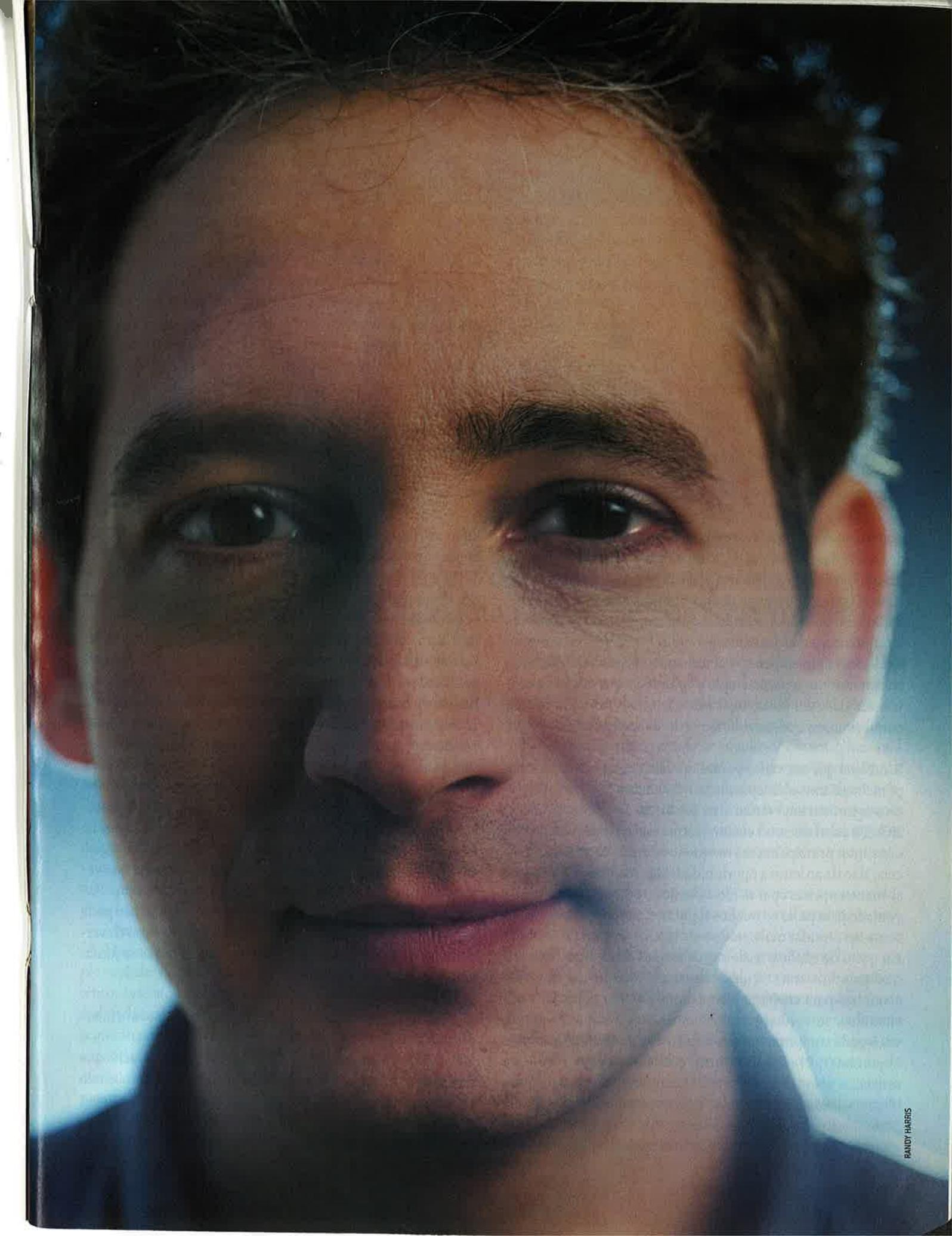
Supercordas: A Física do Futuro. Nathan J. Berkovits, em *O Universo sem Mistérios*. A. A. Natale e C. L. Vieira [organizadores]. Editora Vieira & Lent. 2003.

O FUTURO de uma TEORIA DESCOBERTA

Uma conversa com Brian Greene, professor de física da Columbia University. Ele tem dado uma significativa contribuição na teoria das cordas. Seu livro *O Universo Elegante* foi um dos mais vendidos em anos recentes

A teoria das cordas emaranhou durante um bom tempo seus adeptos mais determinados. Mesmo os que estão familiarizados com ela se preocupavam com sua complexidade e muitos físicos duvidaram da sua capacidade de fazer previsões experimentais. O mundo exterior à ciência a desconhecia por completo. Os cientistas tinham poucas oportunidades de expor seu entusiasmo sobre a teoria das cordas – por que ela poderia vir a realizar o sonho de Albert Einstein da teoria da unificação, como ela poderia fornecer certos insights sobre questões bastante filosóficas – como, por exemplo, por que existe o Universo? Em meados dos anos 90, a teoria começou a fazer sentido conceitualmente. Ela fez algumas previsões que puderam ser verificadas. As pessoas leigas no assunto começaram a prestar atenção a ela. Woody Allen satirizou-a recentemente numa coluna do *New Yorker* – provavelmente pela primeira vez alguém utilizou os espaços de Calabi-Yau para chamar atenção sobre um romance no escritório.

Poucas pessoas têm mais autoridade para desmistificar a teoria das cordas que Brian Greene, professor de física da Columbia University que tem dado uma grande contribuição para essa área. Seu livro de 1999, *O Universo Elegante* atingiu a quarta posição na lista dos best sellers do *New York Times* e foi finalista na indicação para o Prêmio Pulitzer. Greene agora é apresentador de uma série de três programas da série *Nova* na Public Broadcasting System (PBS) e concluiu um livro sobre a natureza do espaço e do tempo. George Musser, da equipe de editores da SCIENTIFIC AMERICAN, conversou com ele durante almoço em que foi servido um prato de espaguete emaranhados. A seguir, uma versão condensada e editada desse encontro.





NOVA

SCIENTIFIC AMERICAN: Às vezes, quando os leitores ouvem falar de “teoria das cordas” ou de “cosmologia”, fazem um gesto de desconsolo e dizem “eu nunca vou entender isso”.

BRIAN GREENE: Eu realmente encontrei um certo grau de intimidação bem no início, quando começaram a surgir as primeiras idéias sobre a teoria das cordas e sobre a cosmologia, mas conversando com algumas pessoas, percebi que, em geral, elas demonstravam um interesse tão amplo e profundo que você fica com vontade de ir um pouco mais além do que deveria ao tratar de outros assuntos que são mais fáceis de compreender.

SA: Notei que em vários pontos do *The elegant universe*, você primeiro dá uma idéia aproximada dos conceitos físicos e depois prossegue com uma versão mais detalhada.

BG: Eu achei que essa era uma forma mais adequada de tratar o assunto, principalmente no que se refere às partes mais difíceis. Isso dá ao leitor a oportunidade de escolher. Se ele quiser se manter apenas com as idéias básicas, ótimo, ele fica mais à vontade para pular os trechos seguintes. Se, ao contrário, quiser se aprofundar mais, pode seguir adiante, sem pular nada. Eu gosto de explicar as coisas de modos diferentes. Acredito que quando se trata de idéias abstratas, você precisa de vários caminhos para chegar a compreendê-las. Do ponto de vista científico, se você seguir por um único caminho, acho que você pode comprometer sua capacidade ao fazer descobertas importantes. Na minha opinião é exatamente para isso que servem as grandes descobertas. Todo mundo observa um problema sob um único ângulo, e, de repente, você chega pela porta dos fundos. Esse jeito diferente de chegar revela, de alguma forma, coisas que a outra abordagem não permite ver. A

diferença entre fazer uma grande descoberta ou não pode depender apenas de uma certa percepção.

SA: Quais poderiam ser alguns exemplos dessa abordagem pela porta dos fundos?

BG: Bem, talvez os maiores exemplos sejam as descobertas de Ed Whitten. Ed (do Institute for Advanced Studies de Princeton, nos Estados Unidos) simplesmente subiu a montanha, olhou para baixo e viu conexões que ninguém tinha sido capaz de ver antes e assim estavam unidas as cinco teorias das cordas, que até então eram consideradas totalmente desvinculadas. Estava tudo lá; ele simplesmente olhou de uma perspectiva diferente, e pimba! Tudo se encaixou como num passe de mágica. Isso é que é ser um gênio. Para mim isso mostra o que realmente significa uma descoberta fundamental. Em certo sentido, o Universo nos conduz na direção da verdade, porque essas verdades são as leis que regem o que vemos. Se todos nós estamos sendo regidos pelo que vemos, estamos todos sendo conduzidos na mesma direção. Assim, a diferença entre fazer uma grande descoberta ou não pode depender apenas de uma certa percepção, da percepção da verdade, ou de percepção matemática, que faz as peças se juntarem de forma diferente.

SA: Você acha que estas descobertas teriam ocorrido sem a intervenção de um gênio?

BG: Bem, é difícil dizer. No caso da teoria das cordas, acho que sim, porque as peças do quebra-cabeça estavam se encaixando cada vez melhor. Poderia ter sido uns cinco ou dez anos mais tarde, mas eu acho que teria acontecido. Já com a relatividade geral eu não sei. A relatividade geral foi um salto tão grande, uma

forma fantástica de repensar o espaço, o tempo e a gravidade, e eu não tenho certeza de que isso pudesse ter acontecido se Einstein não tivesse existido.

SA: Existem exemplos na teoria das cordas que você considera análogos a esse enorme salto?

BG: Acho que ainda estamos esperando por um salto desses na teoria das cordas. A teoria foi construída a partir de uma série de pequenas idéias de várias pessoas que foram surgindo e paulatinamente criando um edifício teórico impressionante. Agora, saber que idéia se encontra no topo do edifício, ainda não sabemos. Quando realmente tivermos certeza dessa idéia, acredito que será como um farol iluminando o edifício, e acredito também que surgirão respostas para questões críticas que ainda permanecem obscuras.

SA: No caso da relatividade, você tem o princípio da equivalência e a covariância geral no papel do farol. No Modelo Padrão, existe a invariância dos padrões. No *The Elegant Universe* você sugeriu que o princípio holográfico pudesse ser esse farol para a teoria das cordas (ver *O Universo é um holograma?* SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, setembro 2003). O que você pensa disso agora?

Um ponto fraco é que a teoria depende do fundo. Precisamos assumir um espaço-tempo prévio, onde as cordas se movem

BG: Bem, os últimos anos viram o princípio holográfico ganhar maior destaque e credibilidade. Voltando a meados da década 90, logo depois das idéias holográficas terem sido sugeridas, as concepções que sustentavam essa proposta eram ainda mais vagas e abstratas, todas baseadas em características dos buracos negros. A entropia dos buracos negros situa-se na superfície. Então, talvez os graus de liberdade devam estar na superfície. Logo, isso talvez possa valer para todas as regiões que tenham horizonte. Assim, isso talvez valha também para horizontes cosmológicos. Talvez estejamos vivendo numa região cosmológica que tenha seus verdadeiros graus de liberdade muito distantes. Essas idéias eram maravilhosamente surpreendentes, mas as evidências para a sua sustentação eram muito frágeis.

Mas esse quadro mudou com o trabalho de Juan Maldacena (da Harvard University). Nele, Maldacena encontrou em exemplo explícito dentro da teoria das cordas, onde esse mundo hipotético, a essência da física, isto é, a arena que achávamos que seria real, seria exatamente refletida pela física que estava acontecendo numa superfície limítrofe. Não haveria diferença em termos da capacidade de cada descrição revelar de fato o que estava acontecendo, ainda que nos detalhes as descrições pudessem ser amplamente diferentes. Uma seria em cinco dimensões e a outra em quatro. Assim, até o número de dimensões parecia não ser confiável, pois poderia haver descrições alternativas que refletiriam

com maior precisão a física que você estivesse observando. Então, isso agora torna concretas as idéias que para mim eram abstratas. Faz você acreditar nas idéias abstratas. E mesmo que os detalhes da teoria das cordas variem, eu acho, como muitos outros também achavam, que a idéia holográfica vai persistir e será nosso guia. Se essa realmente será a idéia, eu não sei. Talvez não. Mas acho que poderia bem ser uma das principais etapas para encontrar as idéias fundamentais da teoria. Ela deixa de lado os detalhes da teoria e simplesmente afirma: Aqui está um aspecto bem geral de um universo em que se aplicam as leis da mecânica quântica e da gravidade.

SA: Talvez este seja um bom momento para falarmos um pouquinho sobre a gravidade quântica em *loops* e algumas das outras abordagens. Ao tratar da gravidade quântica, você sempre descreveu a teoria das cordas como a única coisa divertida. Você ainda é desta opinião?

BG: Bem, eu acho que é a única diversão! Mas para ser justo, a comunidade da gravidade quântica em *loop* realizou enormes progressos. Há várias questões básicas, que a meu ver ainda não foram respondidas, pelo menos não de forma satisfatória. Mas são abor-

dagens viáveis, e é fantástico que haja um número tão grande de pessoas extremamente talentosas trabalhando nisso. A minha expectativa – que também foi defendida por Lee Smolin (do Perimeter Institute de Waterloo, Canadá) – é que finalmente estamos desenvolvendo a mesma teoria a partir de ângulos diferentes. É bem provável que nós, seguindo o nosso caminho para a gravidade quântica, e eles, seguindo o caminho deles, nos encontremos em algum ponto. Percebemos que muitos dos pontos fortes deles são os nossos pontos fracos e vice-versa. A relatividade é um fantástico repensar do espaço e do tempo. Ainda estamos esperando por outro salto daqueles na teoria das cordas.

Um ponto fraco da teoria das cordas é que ela é considerada dependente do fundo. Nós precisamos assumir um espaço-tempo preexistente onde as cordas se movem. Você esperaria então que uma verdadeira teoria quântica da gravidade utilizasse um espaço-tempo que emergisse das suas próprias equações fundamentais. Na abordagem defendida pelos pesquisadores da gravidade quântica em *loop*, no entanto, é apresentada uma formulação independente do fundo, onde o espaço-tempo decorre basicamente da teoria. Por outro lado, somos capazes de estabelecer um contato muito direto com a relatividade geral de Einstein em grandes escalas. Isso pode ser visto nas nossas equações. Os pesquisadores da gravidade quântica em *loop* têm algumas dificuldades para estabelecer contato com a gravidade co-

mum. Assim, seria natural pensar que juntando os pontos positivos de cada abordagem resultaria então algum progresso.

SA: Esse esforço já foi feito?

BG: Vem sendo feito lentamente. Há poucas pessoas que estão realmente por dentro das duas teorias. Estes dois assuntos são tremendamente vastos. Você pode passar a vida toda, cada minuto do seu dia de trabalho, envolvido com seu próprio tema de pesquisa e ainda assim não ter o domínio de tudo o que está acontecendo. Muitas pessoas, no entanto, estão trilhando esses caminhos e começando a pensar nessas idéias. Já houve algumas reuniões conjuntas específicas com esse intuito.

SA: Se você tiver essa dependência do fundo, há alguma esperança de se entender realmente, no sentido mais profundo, o que são o espaço e o tempo?

BG: Bem, você pode fragmentar o problema. Por exemplo, mesmo com a dependência de fundo, aprendemos coisas como a simetria especular – pode haver dois espaço-tempo e uma física. Aprendemos sobre mudanças de topologia – o espaço pode evoluir em formas que nunca imaginamos que fossem possíveis. Aprendemos que o microcosmo deve ser regido por uma geometria não-comutativa, onde as coordenadas, ao contrário dos números reais, dependem da ordem em que são multiplicadas. Assim, você pode obter dicas. Você pode ter percepções isoladas sobre o que realmente está acontecendo. Mas eu acho que sem o formalismo independente do fundo, vai ser difícil fazer as peças se juntarem por si mesmas.

SA: A simetria especular é incrivelmente profunda, porque ela dissocia a geometria do espaço-tempo da física. A conexão entre elas sempre foi a base do programa einsteiniano.

BG: É verdade. Agora, a simetria especular não dissocia totalmente a geometria do espaço-tempo da física. A simetria especular simplesmente diz que você está perdendo metade da história. A geometria está fortemente atrelada à física, mas é uma configuração de dois para um. Não é física e geometria. É física e geometria-geometria e cabe a você decidir que geometria escolher. Às vezes, utilizando uma certa geometria, você consegue um insight maior que utilizando outra. Novamente aqui estão duas formas diferentes de olhar um mesmo sistema físico: duas geometrias diferentes e uma física. Alguns pesquisadores perceberam que há questões matemáticas sobre certos sistemas físicos e geométricos que não são respondidas utilizando uma certa geometria. Ao introduzir a geometria especular, que não era considerada anteriormente, de repente, questões extremamente difíceis, quando reavaliadas, se tornam surpreendentemente simples.

SA: Como funciona uma geometria não-comutativa?

BG: Desde a época de Descartes, achamos formidável designar



NOVA

os pontos pelas suas coordenadas, seja na superfície da Terra através da latitude e longitude, seja no espaço tridimensional pelas coordenadas cartesianas x , y e z que aprendemos na escola. Sempre imaginamos esses números como números comuns, que seguem a propriedade comutativa do produto, isto é, quando os multiplicamos – o que é uma operação bastante freqüente na física – a resposta não depende da ordem dos fatores envolvidos na operação: 3 vezes 5 é igual a 5 vezes 3. Parece que o que estamos descobrindo, é que quando você considera coordenadas do espaço em escalas muito pequenas, os números envolvidos não se comportam mais como 3 e 5, que não dependem da ordem em que são multiplicados. Eles formam uma nova categoria de números que *dependem* da ordem em que são multiplicados.

Esse números, na verdade, não são assim tão novos, porque há muito tempo já se conhece o conceito de matriz. Irremediavelmente, o produto de matrizes depende da ordem em que estas são multiplicadas. Se A e B forem matrizes, A vezes B não é igual a B vezes A . A teoria das cordas parece indicar que os pontos descritos por números simples são substituídos por objetos geométricos descritos por matrizes. Em grandes escalas verifica-se que essas matrizes se tornam cada vez mais diagonais e estas, quando multiplicadas, comutam. Se as matrizes forem matrizes diagonais, não importa a ordem em que você multiplique A e B . No entanto, se você se aventurar pelo microcosmo, os elementos não diagonais das matrizes se tornam cada vez maiores até o ponto de se tornarem extremamente significativos.

A geometria não-comutativa é um campo inteiramente novo da geometria que vem sendo desenvolvido há alguns anos sem nenhuma aplicação específica na física. O matemático francês Alain Connes escreveu um livro bastante extenso, chamado *Geometrie non commutative*. Euclides, Gauss, Riemann e vários outros geométricos famosos trabalharam no contexto da geometria comutativa. Agora Connes e outros estão deco-

lando no desenvolvimento de estruturas mais novas da geometria não-comutativa.

SA: É surpreendente para mim – talvez *devesse* ser surpreendente – o fato de você ter de designar um ponto por meio de uma matriz ou outro tipo de número não puro. O que isso significa?

BG: Pense no seguinte: não existe conceito de ponto. O ponto é uma aproximação. Se houvesse um ponto você poderia identificá-lo através de um número. Mas a questão é que em escalas suficientemente pequenas, essa linguagem de pontos se torna uma aproximação tão pobre que simplesmente deixa de ser relevante. Quando falamos de pontos em geometria, na verdade, estamos nos referindo a como alguma coisa se move através dos pontos. O que importa é o movimento dos objetos. O movimento dos pontos, como vimos, pode ser muito mais complicado que simplesmente deslizar para frente e para trás. Todos os movimentos possí-

SA: A teoria das cordas e a física moderna de modo geral parecem estar se aproximando de uma única estrutura lógica que *teria* de ser do jeito que é: a teoria é como é porque não há outro jeito de ser. De um lado, isto poderia ser um argumento contra a direção antrópica. Por outro lado, há uma flexibilidade da teoria que a coloca a favor da direção antrópica...

BG: A flexibilidade pode realmente estar lá ou não. Isto poderia, de fato, ser uma decorrência da nossa falta de compreensão. Mas se eu tivesse de seguir adiante tendo por base o que conhecemos hoje, a teoria parece ser capaz de criar muitos universos diferentes, dos quais o nosso pode ser um dos prováveis, mas não necessariamente um universo muito especial. Portanto, é verdade que há uma divergência com as metas da inflexibilidade rígida, absoluta.

SA: Se você tivesse outros alunos de graduação interessados em iniciar um novo trabalho, em que direção você os encaminharia?

Pelo princípio antrópico as coisas são como são, porque se não fossem assim, não estaríamos aqui para tentar respondê-las

veis são traduzidos por uma matriz. Assim, em vez de identificar um objeto pelo ponto onde ele está passando você deve identificar o seu movimento através de uma matriz de graus de liberdade.

SA: Como você definiria hoje antrópico e multiverso? Você se refere a isso no *The Elegant Universe* ao discutir se há algum limite para a energia que explicaria a teoria das cordas.

BG: Eu e vários outros colegas nunca estivemos tão contentes com essas idéias antrópicas, principalmente porque me parece que, em qualquer ponto da história da ciência, você pode dizer “OK, chegamos ao fim, não podemos ir adiante”, e a resposta final para cada questão não respondida atualmente é: “As coisas são como são, porque se não fossem assim, não estaríamos aqui para tentar respondê-las”. Assim, é como se fosse uma saída de emergência. Talvez esta não seja a palavra certa. Não necessariamente uma saída; me parece um pouco perigoso, porque talvez com mais uns cinco anos de trabalho duro seja possível responder a essas questões, em vez de ficar fazendo elucubrações. É exatamente isso. Eu acho o seguinte: não se deve parar de pesquisar por causa de uma idéia que não possa ser repensada.

Mas, você sabe, certamente as idéias antrópicas se desenvolveram muito. Agora há propostas reais que afirmam que se poderia haver muitos universos e esses vários universos teriam propriedades diferentes e poderia muito bem acontecer de estarmos neste Universo, simplesmente porque suas propriedades são favoráveis a nossa presença aqui, e não estamos em qualquer outro universo porque não sobreviveríamos lá. É uma questão muito simples (ver *O jogo de espelho dos universos paralelos*, SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, junho 2003).

BG: As questões mais importantes, acredito eu, são aquelas que acabamos de discutir. Somos capazes de entender de onde vêm o espaço e o tempo? Somos capazes de perceber as idéias básicas da teoria das cordas ou da teoria-M? Somos capazes de mostrar que esta idéia fundamental leva a uma única teoria com uma única solução, que acaba sendo o mundo que conhecemos? Será que é possível testar essas idéias através de observações astronômicas ou por meio de experimentos realizados com aceleradores de partículas?

Será que podemos voltar um pouco atrás e entender por que a mecânica quântica teve de fazer parte do Universo e “empacotá-lo” tal como o conhecemos? Quantas das coisas que aceitamos num nível bastante profundo, em qualquer teoria física que tenha a chance de estar certa – tal como espaço, tempo, mecânica quântica – são mesmo essenciais e como muitas delas podem ser relaxadas e ainda produzir potencialmente um universo parecido com o nosso?

A física poderia ter seguido outro caminho que teria sido experimentalmente tão bem-sucedido, mas completamente diferente? Eu não sei. Esta é uma questão realmente interessante a ser colocada. Quanto do que acreditamos ser verdadeiro decorre realmente de uma única possibilidade através de dados e de consistência matemática, e quanto disso poderia ter desaparecido, de uma forma ou de outra, e seguimos esse caminho, porque por acaso foi esse o que descobrimos? Será que os seres de outros planetas possuem um conjunto completamente diferente de leis que por alguma razão funcionam tão bem quanto as nossas? ■

Na Internet...

A transcrição completa desta entrevista, com comentários sobre tudo, da televisão à seta do tempo, está disponível em www.sciam.com