

o enigma sobre
O INÍCIO DO
TEMPO



Por Gabriele Veneziano

A teoria das cordas sugere que o **UNIVERSO** não nasceu de uma grande explosão primordial, mas é apenas a continuação de outros cosmos anteriores

Será que o tempo realmente começou com o Big Bang

Ou será que o Universo já existia antes dele? Uma pergunta como essa era quase uma blasfêmia há apenas uma década. Muitos cosmólogos insistiam que ela simplesmente não fazia sentido – que observar um tempo anterior ao Big Bang era como pedir informações sobre um lugar ao norte do pólo Norte. Mas os desenvolvimentos da física teórica, particularmente a ascensão da teoria das cordas, mudaram essa perspectiva. O Universo pré-Big Bang tornou-se a última fronteira da cosmologia.

A vontade renovada de conjecturar sobre o que poderia ter acontecido antes do Big Bang é o último balanço de um pêndulo intelectual que oscila para frente e para trás há milênios. De uma forma ou de outra, a questão sobre o início do tempo atraiu filósofos e teólogos de praticamente todas as culturas. Ela está entrelaçada com uma grande variedade de conceitos, um deles capturado magnificamente numa tela de Paul Gauguin de 1897: “*D’où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?*” (“De onde viemos? Quem somos? Para onde vamos?”). A obra descreve o ciclo do nascimento, de vida e morte – origem, identidade e destino de cada ser humano – e estas questões pessoais se conectam diretamente com as questões cósmicas. Podemos traçar nossa linhagem por gerações, a nossos ancestrais irracionais, a formas de vida e de protovida mais primitivas, aos elementos sintetizados no Universo primordial, à energia amorfa depositada no espaço antes disso. Será que nossa árvore genealógica retrocede indefinidamente no passado? Ou suas raízes terminam? O Cosmos é tão efêmero quanto nós?

Os gregos antigos discutiam calorosamente a origem do tempo. Aristóteles, partidário do tempo sem início (eterno), invocava o princípio de que do nada, nada vem. Se o Universo não poderia nunca ter passado do não ser para o ser, deveria ter existido sempre. Por essa e outras razões, o tempo deve se expandir eternamente pelo passado e pelo futuro.

Os teólogos cristãos costumavam adotar ponto de vista contrário. Santo Agostinho defendia a existência de Deus fora do espaço e do tempo, capaz de dar vida a esses construtos da mesma forma como podia forjar outros aspectos de nosso mundo. Quando lhe perguntaram “O que Deus estava fazendo *antes* de criar o Universo?”, Santo Agostinho respondeu: “Como o próprio tempo faz parte da criação de Deus, simplesmente não existia *antes*”.

A teoria da relatividade geral de Einstein levou os cosmólogos modernos, basicamente, à mesma conclusão. A teoria afirma que o espaço e o tempo são entidades maleáveis, flexíveis. Em escalas maiores, o espaço é dinâmico, expandindo-se ou contraindo-se ao longo do tempo. Os astrônomos confirmaram, na década de 1920, que o Universo está atualmente se expandindo: galáxias distantes estão se afastando umas das outras. Uma consequência disso, como provaram os físicos Steven Hawking e Roger Penrose nos anos 1960, é que o tempo não pode se estender indefinidamente na direção do passado. Ao retroceder na história cósmica, todas as galáxias se concentram num único ponto infinitesimal, conhecido como singularidade – quase como se estivessem penetrando em um buraco negro. Grandezas como densidade, temperatura e curvatura do espaço-tempo se tornam infinitas. A singularidade passa a ser o cataclismo final. Além dela, nossa ancestralidade cósmica não pode se estender.

Estranha Coincidência

A SINGULARIDADE INEVITÁVEL apresenta um problema sério para os cosmólogos. Em particular, ela não se adequa ao alto grau de homogeneidade e isotropia que o Universo exhibe em grandes escalas. Para que o Universo mantenha características praticamente iguais em todos os pontos, deve existir algum tipo de comunicação transmitida entre regiões distantes do espaço e que coordena suas propriedades.

Mas isso contradiz o antigo paradigma.

Imagine o que aconteceu durante os 13,7 bilhões de anos desde a liberação da radiação cósmica de fundo em microondas. A distância entre galáxias aumentou por um fator de 1.000 (por causa da expansão), enquanto o raio do Universo observável cresceu por um fator de cerca de 100 mil (porque a velocidade da luz ultrapassa a de expansão). Vemos hoje partes do Universo que não poderíamos ter visto há 13,7 bilhões de anos.

No entanto, as propriedades da Via Láctea são basicamente as mesmas das galáxias distantes. É como se uma pessoa fosse a uma festa e lá percebesse que pelo menos dez amigos seus estavam vestindo exatamente as mesmas roupas. Se somente duas pessoas fossem, o fato poderia ser atribuído a uma coincidência, mas dez sugere que esses amigos combinaram ir vestidos assim.

Uma possibilidade é que todas essas regiões do espaço tivessem sido dotadas com propriedades idênticas ao nascer – em outras palavras, a homogeneidade seria apenas uma coincidência. Os físicos, no entanto, pensaram em dois outros jeitos naturais de sair desse impasse: o Universo primordial seria muito menor ou muito mais antigo do que supõe a cosmologia convencional. Uma dessas alternativas (ou ambas, agindo em conjunto) teriam permitido a intercomunicação.

A linha mais comumente aceita segue a primeira opção. Ela afirma que o Universo passou por um período de expansão

acelerada, conhecido como inflação, bem no começo de sua história. Antes dessa fase, as galáxias ou suas precursoras estavam tão fortemente concentradas que podiam facilmente coordenar suas propriedades. Durante o processo de inflação, foram perdendo contato, porque a luz não conseguia acompanhar a expansão frenética. Depois que a inflação terminou, a expansão começou a se desacelerar, e as galáxias passaram gradativamente a ser vistas umas pelas outras novamente.

Os físicos associam o surto inflacionário à energia potencial armazenada em um novo campo, o inflaton, cerca de 10^{-35} segundos depois do Big Bang. A energia potencial, ao contrário da massa de repouso ou da energia cinética, leva à repulsão gravitacional. Em vez de desacelerar a expansão, como faria a gravitação sobre a matéria comum, o inflaton a acelerava. Proposta em 1981, a inflação explica uma ampla variedade de observações com precisão (ver “Quatro Chaves da Cosmologia”, SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, março de 2004). No entanto, um grande número de problemas teóricos ainda permanece: o que foi exatamente o inflaton e o que lhe conferiu essa enorme energia potencial inicial?

Outra forma menos conhecida de resolver esse quebra-cabeça segue a segunda opção, que descarta a singularidade. Se o tempo não começou com o Big Bang, se uma longa era precedeu o início da atual expansão cósmica, a matéria teria tido tempo suficiente para se organizar. Assim, os pesquisadores reexaminaram a razão que os levou a inferir a singularidade.

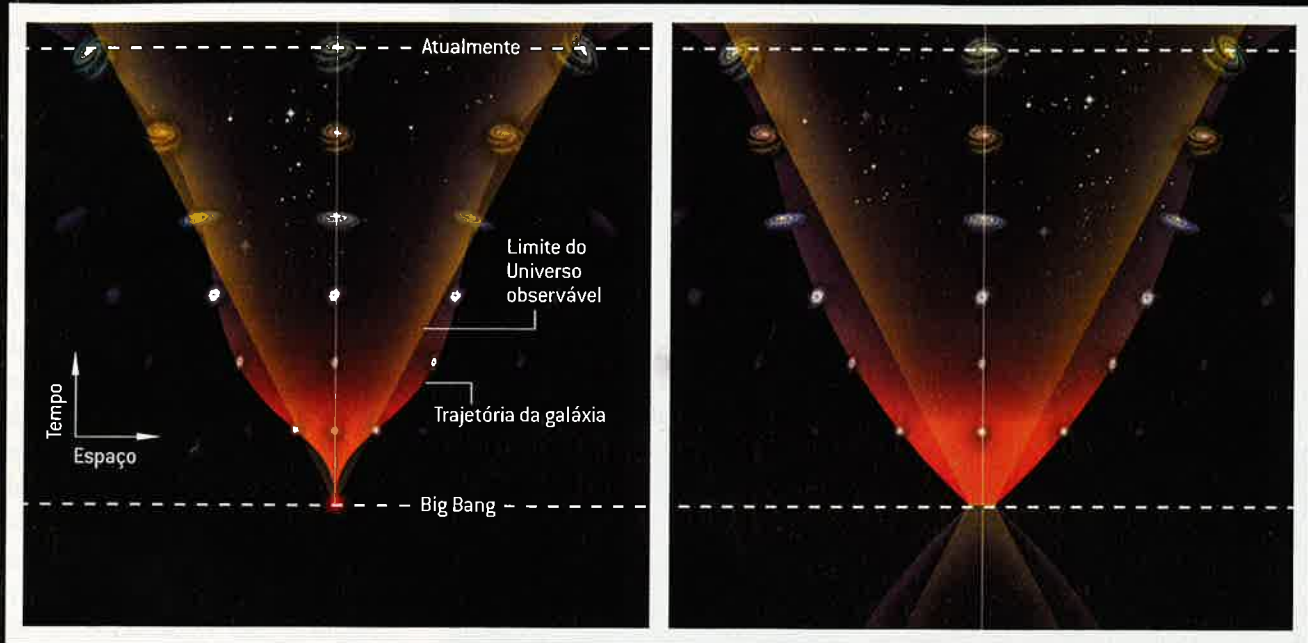
Uma das hipóteses – a de que a teoria da relatividade sempre é válida – é questionável. Nas proximidades da suposta singularidade, os efeitos quânticos devem ter sido importantes, até mesmo dominantes. A relatividade convencional não leva em conta esses efeitos e por isso, aceitar a inevitabilidade da singularidade significa confiar cegamente na teoria. Para saber o que realmente aconteceu, os físicos precisam submeter a relatividade a uma teoria quântica.

Resumo/Cosmologia das Cordas

- Filósofos, teólogos e cientistas há muito discutem se o tempo é finito ou eterno – isto é, se o Universo sempre existiu ou se teve origem definida. A teoria da relatividade geral de Einstein implica finitude. Um Universo em expansão teria se originado com o Big Bang.
- A relatividade geral deixa de ser válida nas vizinhanças do Big Bang, porque a mecânica quântica entra em jogo. A teoria das cordas, atualmente a mais cotada para uma teoria quântica da gravidade, introduz um *quantum* mínimo de comprimento como nova constante fundamental da Natureza, tornando insustentável o conceito de uma gênese a partir do Big Bang.
- O Big Bang teria acontecido, mas sem envolver um instante de densidade infinita. O Universo pode ser mais antigo do que ele. As simetrias da teoria das cordas sugerem que o tempo não teve início e não terá fim. O Universo poderia ter começado praticamente vazio e ter se construído até o Big Bang, ou poderia ter passado por um ciclo de morte e renascimento.

DUAS VISÕES DO PRINCÍPIO

Em nosso Universo em expansão, as galáxias se afastam rapidamente umas das outras, a uma velocidade proporcional à distância entre elas: duas galáxias separadas por uma distância de 500 milhões de anos-luz se afastam a uma velocidade duas vezes maior do que duas galáxias separadas por uma distância de 250 milhões de anos-luz. Por isso, todas as galáxias que vemos devem ter se originado em um mesmo ponto e ao mesmo tempo — o Big Bang. A conclusão é válida mesmo quando a expansão cósmica passou por períodos de aceleração e desaceleração; em diagramas de espaço-tempo (abaixo), as galáxias seguem trajetórias sinuosas que as levam para dentro e para fora da região observável do espaço (*triângulo amarelo*). No entanto, a situação torna-se incerta no instante exato em que as trajetórias das galáxias (ou suas predecessoras) começaram a divergir.



Na cosmologia do Big Bang convencional, que se baseia na teoria da relatividade geral de Einstein, a distância entre quaisquer duas galáxias era zero há um tempo finito. O tempo perde significado antes desse instante.

Nos modelos mais sofisticados, que incluem efeitos quânticos, quaisquer duas galáxias devem ter surgido a uma certa distância mínima uma da outra. Esses modelos abrem a possibilidade de um Universo pré-Big Bang.

tica da gravidade. A tarefa manteve físicos teóricos ocupados desde a época de Einstein, mas o progresso foi praticamente nulo até a metade da década de 1980.

Evolução de uma Revolução

HOJE EM DIA, DUAS ABORDAGENS parecem promissoras. A primeira delas, denominada de gravidade quântica em *loop*, mantém praticamente intacta a teoria de Einstein, mas altera o procedimento para implementá-la na mecânica quântica. Partidários da gravidade quântica em *loop* fizeram grandes avanços nos últimos anos. Ainda assim, sua abordagem pode não ser tão revolucionária a ponto de resolver os problemas fundamentais da gravidade quantizada. Questão semelhante foi enfrentada pelos físicos de partículas, depois que Enrico Fermi introduziu a teoria básica sobre a força nuclear fraca em 1934. Todas as tentativas de dar sentido

à versão quântica da teoria de Fermi fracassaram. Era necessário não uma nova técnica, mas mudanças profundas que só vieram com a teoria das forças eletrofracas na década de 60.

A segunda abordagem, que considero a mais promissora, é a da teoria das cordas — modificação realmente revolucionária na teoria de Einstein. Este artigo se concentrará nela, embora os adeptos da gravidade quântica em *loop* afirmem que cheguem a muitas das mesmas conclusões.

A teoria das cordas surgiu de um modelo proposto por mim em 1968 para descrever o mundo das partículas subatômicas (como prótons e nêutrons) e

suas interações. Apesar do entusiasmo inicial, o modelo fracassou. Foi abandonado cerca de cinco anos depois em prol da cromodinâmica quântica, que descreve as partículas nucleares em termos de constituintes mais elementares, os quarks. Os quarks estão confinados dentro do próton ou do nêutron, e presos por cordas elásticas. A teoria das cordas original capturou esses aspectos de cordas do mundo nuclear. Só mais tarde foi retomada como candidata promissora a combinar relatividade e teoria quântica.

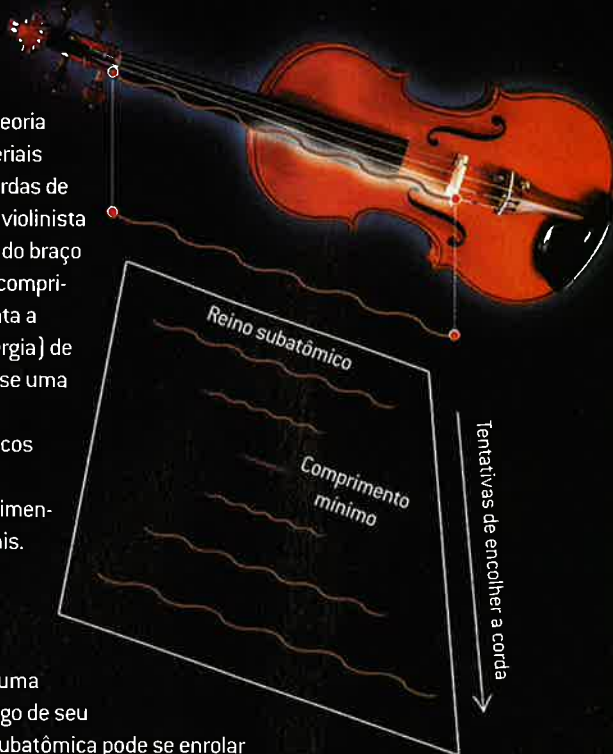
A idéia básica é a de que as partículas elementares não são objetos pontuais, mas entidades unidimensionais infinitamente

O AUTOR

GABRIELE VENEZIANO, físico teórico do CERN, foi o pai da teoria das cordas no final da década de 1960 — o que o levou a receber o Prêmio Heineman da Sociedade Americana de Física e do Instituto Americano de Física neste ano. Na época, a teoria foi um fracasso; ela não conseguia explicar o núcleo atômico, e Veneziano desviou sua atenção para a cromodinâmica quântica, para a qual contribuiu bastante. Depois que a teoria das cordas retornou como teoria da gravidade nos anos 1980, Veneziano tornou-se um dos primeiros físicos a aplicá-la aos buracos negros e à cosmologia.

INTRODUÇÃO À TEORIA DA CORDAS

A teoria das cordas é a líder (mas não a única) a tentar descrever o que aconteceu no instante do Big Bang. As cordas que a teoria descreve são objetos materiais muito parecidos com as cordas de um violino. À medida que o violinista move seus dedos ao longo do braço do instrumento, diminui o comprimento das cordas e aumenta a frequência (e portanto energia) de suas vibrações. Se reduzisse uma corda a um comprimento subatômico, efeitos quânticos assumiriam o controle e impediriam que seu comprimento fosse reduzido ainda mais.



Além de se deslocar como uma unidade ou de vibrar ao longo de seu comprimento, uma corda subatômica pode se enrolar como uma mola. Imagine que o espaço tenha forma cilíndrica. Se a circunferência for maior do que o comprimento mínimo de corda permitido, cada aumento da velocidade de deslocamento exigirá um pequeno incremento de energia, enquanto cada volta extra exigirá um grande incremento. Mas se a circunferência for menor do que o comprimento mínimo, uma volta extra custará menos do que um pouco mais de velocidade. A energia líquida – que é o que realmente importa – é a mesma tanto na circunferência pequena quanto na grande. Na verdade, a corda não se encolhe. Essa propriedade impede que a matéria chegue a uma densidade infinita.



Corda deslocando-se em trajetória em espiral

CILINDRO GRANDE

Pequena quantidade de energia necessária para aumentar a velocidade



Corda deslocando-se em volta de um cilindro

Grande quantidade de energia necessária para adicionar uma volta



CILINDRO PEQUENO

Grande quantidade de energia necessária para aumentar a velocidade



Pequena quantidade de energia necessária para adicionar uma volta

finas, chamadas de cordas. O vasto zoológico das partículas elementares, cada uma com suas propriedades específicas, reflete os inúmeros padrões de vibração de uma corda. Como uma teoria tão simples poderia descrever o mundo complicado das partículas e suas interações? A resposta pode ser encontrada no que poderíamos chamar de mágica das cordas quânticas. Quando as regras da mecânica quântica são aplicadas a uma corda em vibração – exatamente como as cordas de um violino em miniatura, exceto que as vibrações se propagam pela corda à velocidade da luz – surgem novas propriedades.

Primeiro, as cordas quânticas têm tamanho finito. Se não fosse pelos efeitos quânticos, uma corda de violino poderia ser cortada pela metade, indefinidamente, até se tornar uma partícula pontual desprovida de massa. Mas o princípio da incerteza de Heisenberg impede que as cordas mais leves sejam reduzidas a cordas menores do que cerca de 10^{-34} m. Esse *quantum* de comprimento irreduzível, designado por l_s , é uma nova constante da Natureza introduzida pela teoria das cordas junto com a velocidade da luz, c , e com a constante de Planck, h . Ele desempenha papel crucial em quase todos os aspectos da teoria das cordas, impondo um limite finito a quantidades que de outra forma tenderiam a zero ou infinito.

Segundo, as cordas quânticas podem ter momento angular mesmo que não tenham massa. Na física clássica, o momento angular é uma propriedade de um objeto em rotação em torno de um eixo. A fórmula do momento angular multiplica conjuntamente a velocidade, a massa e a distância do eixo; assim, um objeto sem massa não pode ter momento angular. Mas as flutuações quânticas alteram esse quadro. Uma corda minúscula pode adquirir até duas unidades de h de momento angular sem ganhar nenhuma massa. Essa característica se ajusta perfeitamente às propriedades das portadoras de todas as forças fundamentais conhecidas, como o fóton (para o eletromagnetismo) e o grávi-

SAMUEL VELASTO

ton (para a gravidade). Historicamente, o momento angular foi a pista que levou os físicos às implicações *quantum*-gravitacionais da teoria das cordas.

Terceiro, as cordas quânticas sugerem a existência de dimensões extras do espaço, além das três convencionais. Se uma corda clássica de violino vibra independentemente das propriedades do espaço e do tempo, uma corda quântica é mais sensível. As equações que descrevem a vibração se tornam inconsistentes, a menos que o espaço-tempo seja ou altamente curvo (o que contradiz as observações) ou contenha seis dimensões espaciais extras.

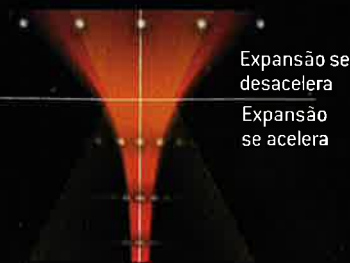
Quarto, as constantes físicas – como as de Newton e de Coulomb, que aparecem nas equações da física e determinam as propriedades da Natureza – não possuem mais valores arbitrários fixos. Elas aparecem na teoria das cordas como campos, similares ao campo eletromagnético, que podem ajustar seus valores dinamicamente. Esses campos podem ter adquirido valores diferentes em diferentes épocas cosmológicas ou em regiões remotas do espaço, e ainda hoje as “constantes” físicas podem variar um pouco. A observação de qualquer uma dessas variações forneceria enorme impulso para a teoria das cordas.

Um campo como esse, chamado de dilaton, é a chave-mestra para a teoria das cordas, pois determina a intensidade global de todas as interações. O dilaton fascina os especialistas em teoria das cordas porque seu valor pode ser reinterpretado como o tamanho de uma dimensão extra do espaço, atribuindo um total fantástico de 11 dimensões para o espaço-tempo.

Por último, as cordas quânticas apresentaram aos físicos algumas simetrias novas e surpreendentes da Natureza conhecidas como dualidades, que vão contra a intuição no que diz respeito a objetos extremamente pequenos. Já mencionei uma forma de dualidade: normalmente, uma corda curta é mais leve do que uma longa, mas se tentarmos reduzi-la aquém de seu comprimento fundamental l_s , ela volta a se tornar pesada.

CENÁRIO PRÉ-BIG BANG

Uma tentativa pioneira de aplicar a teoria das cordas à cosmologia foi o chamado cenário pré-Big Bang, segundo o qual o bang não foi a origem fundamental do Universo, mas uma transição. Antes dele, a expansão se acelerou. Depois dele, desacelerou (ao menos no início). A trajetória de uma galáxia através do espaço-tempo (*direita*) tem a forma de um cálice de vinho.



O Universo sempre existiu. No passado distante, estava praticamente vazio. Forças como a gravitação eram inerentemente fracas.



As forças gradualmente se intensificaram, e a matéria começou a se aglutinar. Em algumas regiões, tornou-se tão densa que formou um buraco negro.



O espaço dentro do buraco expandiu-se a uma taxa cada vez mais acelerada. A matéria interior foi separada da matéria exterior.



Dentro do buraco, a matéria caiu para o centro e aumentou em densidade até atingir o limite imposto pela teoria das cordas.



Quando a matéria atingiu a densidade máxima permitida, os efeitos quânticos fizeram com que ela transbordasse em um Big Bang. Externamente, outros buracos começaram a se formar – cada um, na realidade, um universo distinto.

Outra forma de simetria, a dualidade-T, sustenta que tamanhos pequenos e grandes de dimensões extras são equivalentes, porque as cordas podem se mover de forma mais complicada do que as partículas pontuais. Imagine uma corda fechada (um *loop*) localizada em um espaço cilíndrico, cuja secção transversal circular

represente uma dimensão extra finita. Além de vibrar, a corda pode dar uma volta completa em torno do cilindro ou se enrolar em torno dele, uma ou várias vezes, como um elástico em torno de um canudo de papel (*ver ilustração na página 44*)

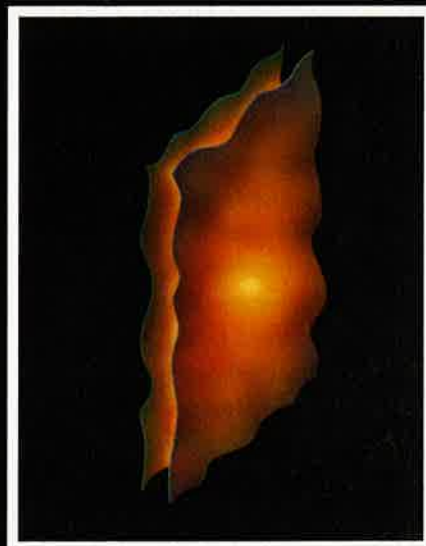
O custo energético desses dois estados da corda depende do tamanho do cilin-

CENÁRIO ECPIRÓTICO

Se nosso Universo é uma membrana multidimensional, ou simplesmente uma "brana", viajando por um espaço de dimensão superior, o Big Bang pode ter sido a colisão de nossa brana com outra paralela. As colisões podem ocorrer ciclicamente. Cada galáxia segue uma trajetória, na forma de ampulheta, através do espaço-tempo (abaixo).



Duas branas praticamente vazias atraem-se. Cada uma está se contraindo em direção perpendicular a seu movimento.



As branas colidem, convertendo sua energia cinética em matéria e radiação. Essa colisão é o Big Bang.



As branas entram em rebote. Começam a se expandir a um ritmo desacelerado. A matéria se aglomera em estruturas como os grupos de galáxias.



No modelo cíclico, enquanto as branas se afastam, a força atrativa entre elas faz com que se movam mais devagar. A matéria se afina.



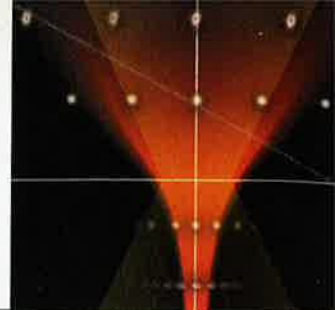
As branas param de se afastar e começam a se aproximar uma da outra. Durante a reversão, cada brana se expande a uma taxa acelerada.

dro. A energia de enrolamento é diretamente proporcional ao raio do cilindro: cilindros maiores exigem que a corda se estique mais à medida que se enrola em torno dele, e portanto as espirais contêm mais energia do que em um cilindro menor. A energia associada ao movimento em torno do círculo, por outro lado, é inversamente proporcional ao raio: cilindros mais largos admitem comprimentos de onda maiores (frequências menores) que con-

têm menos energia do que os comprimentos de onda mais curtos. Se um cilindro maior for substituído por um menor, os dois estados do movimento podem se inverter. As energias que foram produzidas por movimento circular serão então produzidas por enrolamentos e vice-versa. Um observador externo percebe somente os níveis de energia, e não a origem desses níveis. Para esse observador, os raios maior e menor são fisicamente equivalentes.

Embora a dualidade-T seja normalmente descrita em termos de espaços cilíndricos, nos quais uma dimensão (a circunferência) é finita, uma variante dela se aplica às nossas três dimensões normais, que parecem se distender indefinidamente. É preciso ter cautela ao falar sobre a expansão de um espaço infinito. Seu tamanho total não pode variar; ele permanece infinito, mas ainda pode se distender no sentido de que os corpos mergulhados

A cordas detestam o infinito. Não podem encolher até um ponto infinitesimal, por isso evitam os paradoxos que o colapso implicaria



nele, como as galáxias, se afastam uns dos outros. A variável mais importante não é o tamanho do espaço como um todo, mas seu fator de escala – o fator pelo qual varia a distância entre as galáxias, manifestando-se como o *redshift* galáctico observado pelos astrônomos. De acordo com a dualidade-T, universos com fatores de escala pequenos são equivalentes àqueles com fatores de escala grandes. Nenhuma simetria dessas aparece nas equações de Einstein. Ela surge da unificação que a teoria das cordas incorpora, onde o dilaton desempenha papel central.

Durante anos, os estudiosos da teoria das cordas achavam que a dualidade-T se aplicava somente às cordas fechadas, em oposição às cordas abertas, com extremidades livres que não podem se enrolar. Em 1995, Joseph Polchinski, da Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara, percebeu que a dualidade-T se aplicava também a cordas abertas, desde que a mudança entre raios maiores e menores fosse acompanhada por uma alteração nas condições de contorno nas extremidades das cordas. Até então, os físicos impunham condições de contorno que não previam a existência de forças agindo nas extremidades das cordas, que ficavam soltas para se movimentar. Sob a dualidade-T, essas condições tornam-se condições de contorno de Dirichlet, nas quais as extremidades ficam paradas.

Qualquer corda pode conter uma mistura dos dois tipos de condições de contorno. Por exemplo, os elétrons podem ser cordas cujas extremidades se deslocam livremente em três das dez dimensões espaciais, mas que ficam fixas nas outras sete dimensões. Essas três dimensões formam um subespaço conhecido como membrana de Dirichlet, ou brana-D. Em 1996, Petr Horava, da Universidade da Califórnia, em Berkeley, e Edward Witten, do

Instituto de Estudos Avançados de Princeton, propuseram que o nosso Universo está situado em uma brana como essa. A mobilidade parcial dos elétrons e de outras partículas explica por que somos incapazes de perceber a decadimensionalidade do espaço.

Domando o Infinito

TODAS AS PROPRIEDADES MÁGICAS das cordas quânticas apontam numa direção: as cordas abominam o infinito. Elas não podem colapsar até um ponto infinitesimal, por isso evitam os paradoxos que o colapso implica. Seu tamanho reduzido não-nulo e as novas simetrias estabelecem ligações superiores com quantidades físicas que aumentam sem limite nas teorias convencionais, e ligações inferiores, com quantidades que diminuem indefinidamente. Os especialistas em teoria das cordas esperam que, ao retroceder no tempo, em direção ao passado do Universo, o raio de curvatura do espaço-tempo comece a diminuir. Mas, em vez de retornar até o zero (na singularidade tradicional do Big Bang), ele finalmente sofra um rebote e comece a aumentar outra vez.

As condições perto do instante zero no Big Bang eram tão extremas que ninguém ainda sabe como resolver as equações. Mas existem dois modelos bastante populares. O primeiro, conhecido como cenário pré-Big Bang, que eu e meus colegas começamos a desenvolver em 1991, combina a dualidade-T com a simetria da inversão temporal, na qual as equações da física funcionam igualmente bem, quer sejam aplicadas para trás ou para a frente no tempo. O Universo teria se expandido, digamos, cinco segundos antes do Big Bang, no mesmo ritmo que teria se expandido cinco segundos depois. A taxa de variação da expansão seria oposta nos dois instantes; se depois o Universo estava se desacelerando,

antes ele estaria se acelerando. Em resumo, o Big Bang pode não ter sido a origem do Universo, mas uma transição violenta da aceleração para a desaceleração.

Esse quadro incorpora automaticamente o grande *insight* da teoria inflacionária convencional – isto é, que o Universo tinha de passar por um período de aceleração para se tornar tão homogêneo e isotrópico. Na teoria convencional, a aceleração ocorre depois do Big Bang devido a um campo inflaton. No cenário pré-Big Bang, ela ocorre antes como resultado natural das novas simetrias da teoria das cordas.

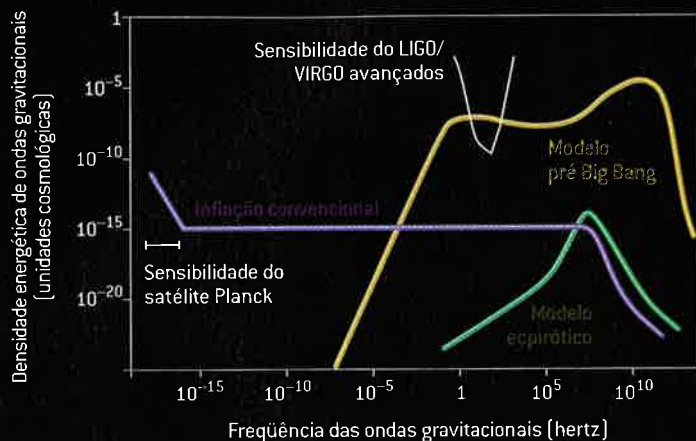
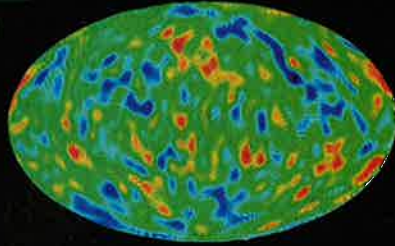
O Universo pré-Big Bang seria uma imagem espelhada quase perfeita do Universo pós-Big Bang (ver *ilustração na página 45*). Se o Universo for eterno na direção do futuro, seu conteúdo se diluindo como um mingau ralo, ele também é eterno na direção do passado. Num passado infinitamente distante, ele seria praticamente vazio, preenchido somente com um gás de radiação e matéria tênues, caótico e amplamente disperso. As partículas do gás mal conseguiriam interagir.

Conforme o tempo foi passando, as forças teriam se tornado mais intensas e fizeram a matéria se concentrar. Aleatoriamente, algumas regiões foram acumulando matéria à custa de suas vizinhanças. Finalmente, a densidade dessas regiões ficou tão alta que começaram a se formar buracos negros. A matéria dentro dessas regiões foi então separada da parte externa, dividindo o Universo em partes desconexas.

Dentro de um buraco negro, o espaço e o tempo trocam de papéis. O centro do buraco negro não é um ponto do espaço, mas um instante no tempo. À medida que a matéria, atraída para dentro, aproximava-se do centro, atingia densidades cada vez maiores. Mas quando densidade, tem-

EFEITO DE FUNDO

Observar o Universo pré-Big Bang pode parecer uma tarefa sem futuro, mas uma forma de radiação poderia sobreviver desde aquela época: a radiação gravitacional. Essas variações periódicas na campo gravitacional poderiam ser detectadas indiretamente, por seu efeito na polarização do fundo cósmico de microondas (*vista simulada, abaixo*), ou diretamente, em observatórios terrestres. Os cenários pré-Big Bang e ecpirótico prevêem mais ondas gravitacionais de alta frequência e menos de baixa frequência do que os modelos convencionais de inflação (*abaixo*). Medidas existentes de vários fenômenos astronômicos não conseguem fazer a distinção entre esses modelos, mas futuras observações do satélite Planck, assim como dos observatórios LIGO e VIRGO, devem ser capazes disso.



NASA (ACIMA); GABRIELE VENEZIANO (CIMA)

peratura e curvatura atingiram os valores máximos permitidos pela teoria das cordas, essas quantidades sofreram um rebote e começaram a diminuir. O instante dessa reversão é o que chamamos de Big Bang. O interior de um desses buracos negros tornou-se nosso Universo.

Como era de esperar, um cenário tão pouco convencional provocou controvérsias. Andrei Linde, da Universidade Stanford, afirma que, para esse modelo se ajustar às observações, o buraco negro que deu lugar a nosso Universo teria de ter se formado com um tamanho incomum – muito maior do que a escala de comprimento da teoria das cordas. Uma resposta a esta objeção é que as equações predizem buracos negros de todos os tamanhos possíveis. Nosso Universo simplesmente se formou dentro de um buraco negro suficientemente grande.

Outra objeção mais séria, levantada por Thibault Damour, do Instituto de Altos

Estudos Científicos em Bures-sur-Yvette, França, e por Marc Henneaux, da Universidade Livre de Bruxelas, Bélgica, é que a matéria e o espaço-tempo teriam se comportado caoticamente em instantes próximos ao Big Bang, em possível contradição com a regularidade observada no Universo primordial. Recentemente, propus que tal estado caótico seria capaz de produzir um gás denso de “buracos de cordas” em miniatura – cordas que seriam tão pequenas e maciças que estariam prestes a se tornar buracos negros. O comportamento desses buracos poderia resolver o problema identificado por Damour e Henneaux. Proposta análoga foi apresentada por Thomas Banks, da Universidade Rutgers, e por Willy Fischler, da Universidade do Texas, em Austin.

Outro modelo para o Universo pré-Big Bang é o cenário ecpirótico (“conflagração”). Desenvolvido três anos atrás por um grupo de cosmólogos e teóricos das cor-

das – Justin Khoury, da Universidade Columbia, Paul J. Steinhardt, da Universidade Princeton, Burt A. Ovrut, da Universidade da Pensilvânia, Nathan Seiberg, do Instituto de Estudos Avançados, e Neil Turok, da Universidade de Cambridge –, o cenário ecpirótico se baseia na idéia de que nosso Universo é apenas uma de muitas branas-D fluando dentro de um espaço com dimensões superiores. As branas exercem forças atrativas umas sobre as outras e ocasionalmente colidem. O Big Bang poderia ser o impacto de uma outra brana com a nossa (*ver ilustração na página 46*).

Choques de Branas

EM UMA VARIANTE DESSE CENÁRIO, AS COLISÕES ocorrem em ciclos. Duas branas podem se chocar, afastar-se uma da outra, atrair-se mutuamente, chocar-se novamente e assim por diante. Nos intervalos entre as colisões, as branas se expandiriam enquanto recedem, contraindo-se um pouco quando se aproximam novamente. Durante o retorno, a taxa de expansão se acelera; na realidade, a expansão acelerada atual do Universo pode ser indício de uma nova colisão.

Os cenários pré-Big Bang e ecpirótico compartilham algumas características. Começam com um Universo imenso, frio, praticamente vazio, e têm em comum um problema difícil (e ainda não resolvido): ajustar a transição entre as fases pré e pós-Big Bang. Matematicamente, a principal diferença entre os dois está no comportamento do dilaton. No pré-Big Bang, o dilaton começa com um valor baixo – de modo que as forças da Natureza são fracas – e aumenta de intensidade continuamente. No caso do cenário ecpirótico, as colisões ocorrem quando as forças estão mais fracas.

No início, os adeptos da teoria ecpirótica esperavam que a fragilidade das forças permitiria que o rebote fosse analisado mais facilmente, mas eles ainda se confrontam com um problema bastante difícil: a grande curvatura. Por isso, ainda não é

Vestígios da era pré-Big Bang podem aparecer em campos magnéticos galácticos e intergalácticos



certo se a singularidade pode ser evitada. Além disso, o cenário ecpirótico precisa incluir condições muito especiais para resolver as pendências cosmológicas existentes. Por exemplo, as branas prestes a colidir precisariam estar quase paralelas, caso contrário a colisão poderia não dar origem a um Big Bang suficientemente homogêneo. Na versão cíclica, sucessivas colisões permitiriam que as branas fossem se ajustando cada vez mais.

À primeira vista, os dois cenários podem ser vistos como um exercício não de física, mas de metafísica – idéias interessantes que os observadores jamais poderão provar. Essa atitude é bastante pessimista. Como a fase inflacionária, uma possível época pré-Big Bang também poderia ter conseqüências observáveis, especialmente nas pequenas variações na temperatura da radiação cósmica de fundo em microondas.

Primeiro, as observações mostram que as flutuações de temperatura foram moldadas por ondas acústicas durante várias centenas de milhares de anos. A regularidade das flutuações indica que as ondas estavam sincronizadas. Os cosmólogos descartaram vários modelos porque não conseguiam explicar essa sincronia. Os cenários inflacionário, pré-Big Bang e ecpirótico passaram nesse primeiro teste. Nos três, as ondas foram acionadas por processos quânticos amplificados durante a época da aceleração cósmica. As fases das ondas estavam alinhadas.

Segundo, cada modelo prediz uma distribuição diferente de flutuações de temperatura em relação ao tamanho angular. Os observadores descobriram que as flutuações de todos os tamanhos têm aproximadamente a mesma amplitude. (Desvios discerníveis ocorrem somente em escalas muito pequenas, para as quais as flutuações primordiais foram alteradas por

processos posteriores). Os modelos inflacionários reproduzem perfeitamente essa distribuição. Durante a inflação, a curvatura do espaço variou de forma relativamente lenta, e flutuações de diferentes tamanhos foram geradas sob condições muito parecidas. Em ambos os modelos das cordas, a curvatura evoluiu rapidamente, aumentando a amplitude das flutuações de pequena escala, mas outros processos produzem flutuações de grande escala, deixando todas as flutuações com a mesma intensidade. No cenário ecpirótico, estes outros processos envolvem a dimensão extra do espaço, aquela que separava as branas em colisão. No cenário pré-Big Bang, eles envolvem um campo quântico, o áxion, relacionado ao dilaton.

Em terceiro lugar, variações de temperatura podem surgir de dois processos distintos no Universo primordial: flutuações na densidade da matéria e ondulações causadas pelas ondas gravitacionais. A inflação envolve ambos os processos, ao passo que os cenários pré-Big Bang e ecpirótico envolvem predominantemente variações de densidade. Ondas gravitacionais de certos tamanhos deixariam uma assinatura própria na polarização do fundo em microondas (ver “Echoes from the Big Bang,” por Robert R. Caldwell e Marc Kamionkowski; *Scientific American*, janeiro de 2001). Observatórios futuros, como o satélite Planck, da Agência Espacial Européia, devem ser capazes de mos-

trar essa assinatura, se de fato existir.

Um quarto teste se encontra nos domínios da estatística das flutuações. Na inflação, as flutuações seguem uma curva em forma de sino, conhecida como gaussiana. O mesmo pode ser verdade no caso ecpirótico, enquanto o cenário pré-Big Bang permite desvios consideráveis da gaussiana.

Análise do fundo em microondas não é a única forma de testar essas teorias. O cenário pré-Big Bang também deveria produzir um fundo aleatório de ondas gravitacionais em uma faixa de frequências que, embora irrelevante para o fundo em microondas, deveria ser detectado por futuros observatórios de ondas gravitacionais. Além disso, como os cenários pré-Big Bang e ecpirótico envolvem variações no campo dilaton, que está acoplado ao campo eletromagnético, os dois cenários levariam a flutuações de larga escala do campo magnético. Vestígios dessas flutuações poderiam ser vistos nos campos magnéticos galácticos e intergalácticos.

E então, quando o tempo começou? A ciência não tem uma resposta conclusiva ainda, mas pelo menos duas teorias que podem, em princípio, ser testadas sustentam que o Universo – e conseqüentemente o tempo – existiam bem antes do Big Bang. Se qualquer um dos cenários estiver certo, o Cosmos sempre existiu e mesmo que entre em colapso novamente, nunca deixará de existir. SM

PARA CONHECER MAIS

The Elegant Universe. Brian Greene. W.W. Norton, 1999.

Superstring Cosmology. James E. Lidsey, David Wands e Edmund J. Copeland em *Physics Reports*, Vol. 337, Nº. 4–5, páginas 343–492; outubro de 2000. [hep-th/9909061](#)

From Big Crunch to Big Bang. Justin Khoury, Burt A. Ovrut, Nathan Seiberg, Paul J. Steinhardt e Neil Turok em *Physical Review D*, Vol. 65, Nº. 8, Artigo nº 086007; 15 de abril, 2002. [hep-th/0108187](#)

A Cyclic Model of the Universe. Paul J. Steinhardt e Neil Turok em *Science*, Vol. 296, nº 5572, páginas 1436–1439; 24 de maio, 2002. [hep-th/0111030](#)

The Pre-Big Bang Scenario in String Cosmology. Maurizio Gasperini e Gabriele Veneziano em *Physics Reports*, Vol. 373, Nº. 1–2, páginas 1–212; janeiro 2003. [hep-th/0207130](#)