

Estamos acostumados a considerar o espaço e o tempo como grandezas contínuas, mas se a fantástica teoria da gravidade quântica estiver certa, espaço e tempo poderão existir em pacotes discretos

Por Lee Smolin

Há pouco mais de 100 anos, a maioria das pessoas — inclusive muitos cientistas — pensava que a matéria fosse contínua. No entanto, desde os tempos mais remotos já havia especulações de alguns filósofos e cientistas de que se a matéria fosse fragmentada em pedacinhos suficientemente pequenos, ela deveria ser constituída de partículas minúsculas, os átomos. Poucos achavam que a existência dos átomos um dia seria provada. Hoje já conseguimos obter imagens de átomos individuais e já estudamos até as subpartículas que os compõem. A idéia da natureza granular da matéria já foi ultrapassada.

Nas décadas mais recentes, físicos e matemáticos têm questionado se o espaço também não seria formado por quantidades discretas. O espaço é contínuo, como aprendemos na escola, ou se parece mais com um pedaço de tecido formado por fios separados? Se nossas observações permitissem chegar a escalas de dimensões infinitesimais, poderíamos “ver” os átomos do espaço, pequenos volumes indivisíveis que não poderiam ser reduzidos a nada me-



Átomos de espaço e tempo

nor? E o tempo: a Natureza muda continuamente, ou o Universo evolui através de uma série de degraus minúsculos, comportando-se de forma semelhante a um computador digital?

Nos últimos 16 anos testemunhamos um grande progresso nas respostas a estas questões. Uma teoria conhecida pelo nome estranho de “gravidade quântica em loop” pressupõe que o espaço e o tempo são de fato formados por pacotes discretos. O quadro revelado pelos cálculos desenvolvidos nesse âmbito é simples e maravilhoso. Essa teoria ampliou muito a nossa compreensão de fenômenos intrigantes relacionados a buracos negros e ao Big Bang. E o melhor de tudo é que ela pode ser testada. Os experimentos previstos para um futuro próximo permitirão detectar os átomos do espaço se eles realmente existirem.

Meus colegas e eu desenvolvemos a teoria da gravidade quântica em loop ao mesmo tempo em que tentávamos desvendar um problema que a física ainda não conseguiu solucionar: é possível desenvolver uma teoria quântica da gravidade? Para explicar por que esta é uma questão importante – e qual a sua relação com a

estrutura granular do espaço e do tempo – antes preciso falar um pouco sobre a teoria quântica e a teoria da gravidade.

A teoria da mecânica quântica foi formulada no primeiro quarto do século 20, um desenvolvimento que dependia fortemente da confirmação de que a matéria era formada por átomos. As equações da mecânica quântica requerem que certas quantidades, como a energia de um átomo, existam somente em unidades específicas, discretas. A teoria quântica explica satisfatoriamente as propriedades e o comportamento dos átomos, das partículas elementares e das forças que as compõem. Nenhuma outra teoria na história da ciência foi tão bem-sucedida quanto a teoria quântica. É nela que se fundamenta o nosso conhecimento sobre química, física atômica e subatômica, eletrônica e até biologia.

No mesmo período em que a mecânica quântica era formulada, Albert Einstein elaborou sua teoria geral da relatividade que é na verdade, uma teoria da gravidade. Nessa teoria a força gravitacional surge como consequência de o espaço e o tempo (que juntos formam o espaço-tempo) serem curvados pela presença da maté-

ria. Como analogia, podemos pensar numa bola de boliche colocada sobre uma superfície elástica e uma bolinha de gude que está rolando livremente nas imediações. As bolas podem representar o Sol e a Terra, respectivamente e a superfície elástica, o espaço. A bola de boliche cria uma profunda depressão na superfície elástica e essa deformação faz com que a bolinha de gude seja desviada em direção à bola maior, como se alguma força – a gravidade – a puxasse naquela direção. Analogamente, qualquer porção de matéria ou concentração de energia distorce a geometria do espaço-tempo, fazendo com que outras partículas e raios de luz sejam desviados em direção a ela, fenômeno que chamamos de gravidade.

A teoria quântica e a teoria da relatividade geral de Einstein foram exaustivamente confirmadas através de experimentos – mas nenhum deles explorou as condições em que as duas teorias fazem previsões significativas. O problema é que os efeitos quânticos são mais evidentes em pequenas escalas, enquanto os da relatividade geral requerem massas enormes. Dessa forma, é preciso dispor de circunstâncias muito especiais para combinar essas condições.

Além desta lacuna nos dados experimentais existe um enorme problema conceitual: a teoria da relatividade geral de Einstein é totalmente clássica, ou seja, não-quântica. Para manter a consistência lógica da física como um todo seria necessário uma teoria que unificasse a mecânica quântica e



DUSAN PETRIC

O ESPAÇO é tecido por fios distintos

a relatividade geral. Essa teoria tão sonhada é chamada gravidade quântica. Como a relatividade geral trata da geometria do espaço-tempo, uma teoria quântica da gravidade deveria ser também uma teoria quântica do espaço-tempo.

Os físicos desenvolveram uma série enorme de procedimentos matemáticos para fazer uma teoria clássica transformar-se numa teoria quântica. Vários físicos teóricos e matemáticos tentaram aplicar técnicas convencionais à relatividade geral. Os resultados iniciais não foram nada encorajadores. Cálculos desenvolvidos nos anos 60 e 70 pareciam indicar que a teoria quântica e a relatividade geral nunca seriam combinadas com sucesso. Conseqüentemente,

era preciso que algo novo surgisse, como princípios ou postulados adicionais não incluídos na teoria quântica e na relatividade geral, ou talvez algum novo tipo de entidade. Quem sabe, através de ajustes corretos ou de uma nova estrutura matemática, fosse possível desenvolver uma teoria semelhante à mecânica quântica capaz de fazer a relatividade geral se aproximar de um regime não-quântico.

Para evitar que fossem destruídas as previsões bem-sucedidas da teoria quântica e da relatividade geral, o exotismo contido nessa teoria completa deveria passar por um teste experimental, exceto na situação em que se esperava que ambas as teorias tivessem grandes efeitos. Seguindo essa linha, várias abordagens foram tentadas, com denominações diversas como teoria do tissor, geometria não-comutativa e supergravidade.

Uma abordagem muito popular entre os físicos é a teoria das cordas, que postula a existência de seis ou sete dimensões no espaço – nenhuma delas observada até agora – além das três com as quais estamos familiarizados. A teoria das cordas também prevê a existência de uma grande quantidade de forças e partículas elementares novas, para as quais não há evidências observáveis. Alguns acreditam que a teoria das cordas está subentendida em uma nova teoria chamada de teoria M (ver *Cordas, Dimensões e Teoria M*, Elcio Abdalla e Adenauer Casali, SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, março de 2003), mas infelizmente nunca foi proposta uma definição precisa para essa teoria que aparentemente não passa de conjectura. Assim, muitos pesquisadores estão convencidos de que novas alternativas devem ser cuidadosamente estudadas. Nossa teoria da gravidade quântica parece ser a alternativa mais viável.

Resumo/ Espaço-tempo Quântico

- Para entender a estrutura do espaço na menor escala possível precisamos nos voltar para uma teoria quântica da gravidade. A gravidade está envolvida porque a teoria da relatividade geral de Einstein mostra que a gravidade é causada pela deformação do espaço e do tempo.
- Combinando cuidadosamente os princípios fundamentais da mecânica quântica e da relatividade geral os físicos acabaram criando a teoria da "gravidade quântica em loop". Nessa teoria os estados quânticos do espaço permitidos estão relacionados a diagramas de linhas e de nós chamados de *redes de spin*. O espaço-tempo quântico corresponde a diagramas similares chamados de *espumas de spin*.
- A gravidade quântica em loop considera que o espaço surge em volumes discretos, o menor dos quais é um comprimento de Planck cúbico 10^{-99} cm³. O tempo transcorre em intervalos discretos de cerca de um intervalo de Planck, ou seja, 10^{-43} segundos. Os efeitos dessa estrutura discreta poderão ser confirmados experimentalmente num futuro próximo.

Uma Grande Brecha

NA METADE DA DÉCADA DE 80 alguns de nós – incluindo Abhay Ashtekar, atualmente na Pennsylvania State University, Ted Jacobson da University of Maryland e Carlo Rovelli, hoje na Université de La Méditerranée, em Marselha, na França – de-

cidimos reexaminar a possibilidade de a mecânica quântica poder ser combinada de forma consistente com a relatividade geral utilizando as técnicas convencionais. Nós sabíamos que os resultados negativos obtidos nos anos 70 continham uma brecha importante. Os cálculos feitos supunham que o espaço deveria ter uma geometria contínua e suave, independentemente dos intervalos de tempo com que o examinássemos, exatamente como alguns vislumbraram a matéria antes da descoberta do átomo. Nossos orientadores mostraram que se as suposições estivessem erradas os cálculos anteriores não seriam confiáveis. Assim, começamos a procurar uma forma de refazer os cálculos sem impor as condições de um espaço suave e contínuo. Insistíamos em não fazer nenhuma suposição que fosse além dos princípios da relatividade geral e da teoria quântica, já testados experimentalmente. Particularmente, mantivemos dois princípios-chave da relatividade geral sempre presentes em nossos cálculos.

O primeiro é conhecido como o princípio da independência do fundo. Este princípio afirma que a geometria do espaço-tempo não é fixa. Ao contrário, ela é uma quantidade dinâmica que evolui. Para determinar a geometria, é preciso resolver algumas equações que incluem todos os efeitos da matéria e energia. A propósito, a teoria das cordas, tal qual está formulada atualmente, não é independente do fundo; as equações que descrevem as cordas são estabelecidas num espaço-tempo clássico predeterminado (isto é, não-quântico).

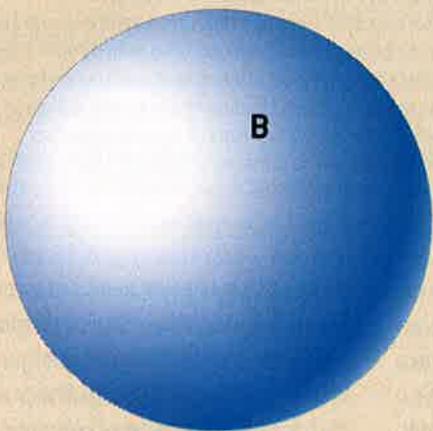
O segundo princípio, conhecido pelo nome extravagante de princípio de invariância de difeomorfismo, está relacionado às coordenadas. Para fazer cálculos no espaço-tempo curvo, geralmente se adota um sistema de coordenadas, algo parecido com a latitude e a longitude na Terra, mas generalizado para as quatro dimensões do espaço-tempo curvo. Este princípio afirma que as equações teóricas são as mesmas em qualquer sistema de coordenadas escolhido e foi

uma das linhas mestras seguidas por Einstein no desenvolvimento original da sua teoria da relatividade geral.

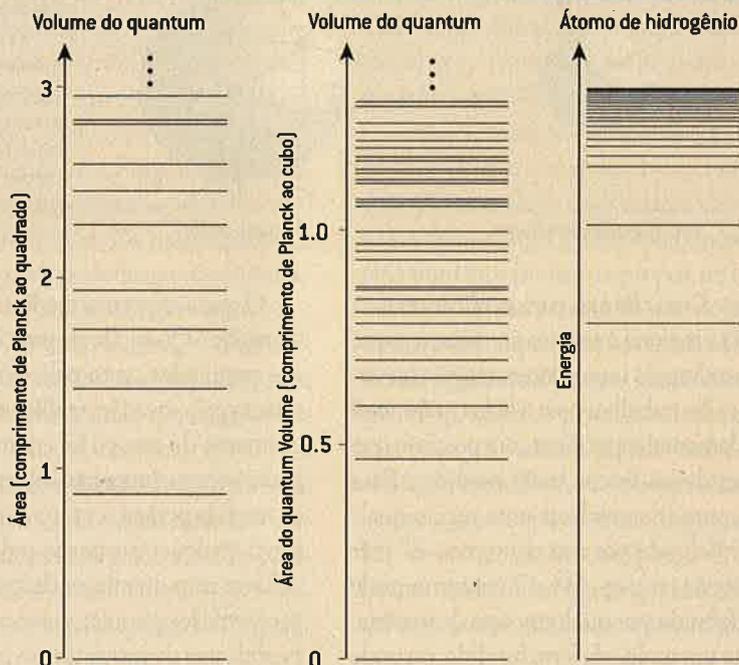
Combinando cuidadosamente estes dois princípios com as técnicas convencionais da mecânica quântica, desenvolvemos uma linguagem matemática que permitiu determinar se o espaço é contínuo ou discreto. Os resultados revelaram que o espaço é quantizado. Tínhamos conseguido formalizar as bases de nossa teoria da gravidade quântica em loop. O termo "loop" foi introduzido porque os cálculos teóricos se desenvolvem em pequenos loops definidos pelo espaço-tempo. Os cálculos foram refeitos com diferentes métodos. Desde então o estudo da gravidade quântica em loop tem vicejado nos campos férteis da pesquisa, com contribuições pelo mundo todo; esses esforços garantiram a confiança na formalização do espaço-tempo que descrevemos a seguir.

Nossa teoria é uma teoria quântica da estrutura do espaço-tempo em escalas in-

ESTADOS QUÂNTICOS DE VOLUME E DE ÁREA



Uma conceituação básica da teoria da gravidade quântica em loop está relacionada aos volumes e áreas. Vamos considerar uma casca esférica que delimite uma região do espaço, B, contendo um certo volume (*acima*). De acordo com a física clássica (não-quântica), o volume poderia ser indicado por um número real positivo qualquer. A teoria da gravidade quântica em loop, no entanto, afirma que existe um volume absoluto mínimo não-nulo (cerca de 10^{99} centímetros cúbicos, ou um comprimento de Planck cúbico) e ele restringe o conjunto de volumes maiores a uma série discreta de números. Da mesma forma, a área da superfície deve ter no mínimo 10^{66} centímetros quadrados (um comprimento de Planck quadrado)



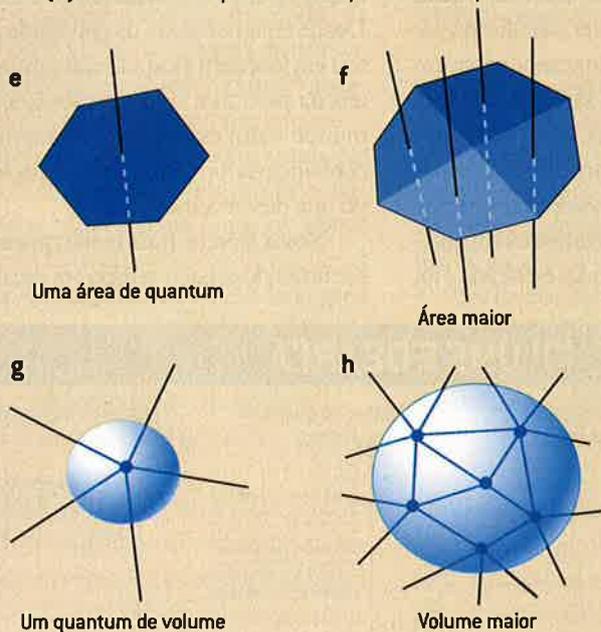
ou uma de uma série discreta de áreas maiores. O espectro discreto de áreas (*esquerda*) e volumes (*centro*) quânticos permitidos é bastante similar aos níveis quânticos discretos de energia do átomo de hidrogênio (*direita*).

FONTE: ROBERTO DE PIETRI E CARLO ROVELLI (HTTP://ARXIV.ORG/ABS/GR.GC/9602023); NADIA STRASSE

VISUALIZANDO VOLUMES DE ESTADO QUÂNTICO

DIAGRAMAS CHAMADOS REDES DE SPIN são usados por físicos que estudam a gravidade quântica em loop para representar estados quânticos do espaço em escalas minúsculas. Alguns desses diagramas correspondem a volumes de formas poliédricas. Por exemplo, um cubo (a) consiste em um volume encerrado em seis faces de um quadrado. A rede de spin correspondente (b) tem um ponto, ou nó, representando o volume, e seis linhas que correspondem às seis faces. A rede completa de spin tem um número no nó para indicar o volume do cubo e um número em cada linha para designar a área da face correspondente. Aqui o volume tem comprimento de oito Plancks cúbicos e as faces têm, cada uma, quatro comprimentos de Planck quadrados. (As regras da gravidade quântica em loop restringem os volumes e áreas permitidos a quantidades específicas: apenas certas combinações de números são permitidas nas linhas e nós.)

Se a pirâmide se assenta sobre a face superior do cubo (c), a linha representando essa face na rede de spin conecta o nó do cubo ao nó da pirâmide (d). As linhas correspondentes às quatro faces expostas da



Uma área de quantum

Área maior

Um quantum de volume

Volume maior

pirâmide e às cinco faces expostas do cubo se destacariam de seus respectivos nós. (Os números foram omitidos por simplificação.)

Em geral, em uma rede de spin, um área de quantum é representada por uma única linha (e), enquanto uma área composta de muitos quanta é representada por várias linhas (f). Da mesma forma, um volume de quantum é representado por um nó (g), enquanto um volume maior tem vários nós (h). Se tivermos uma região do espaço definida por uma concha esférica, o volume no interior da concha é determinado pela soma de todos os nós incluídos e a área de superfície é dada pela soma de todas as linhas que a atravessam.

As redes de spin são mais fundamentais que o poliedro: qualquer arranjo do poliedro pode ser representado por uma rede de spin dessa maneira, mas algumas redes de spin válidas representam combinações de volumes e áreas que não podem ser desenhadas como poliedros. Essas redes de spin ocorrem quando o espaço é curvado por um intenso campo gravitacional ou no curso das flutuações quânticas da geometria do espaço na escala Planck.

fimas. Dessa forma, para explicar como a teoria funciona é preciso considerar o que ela prediz para uma pequena região ou volume. Ao trabalhar com a física quântica é fundamental especificar com precisão que quantidades físicas serão medidas. Para isso, vamos considerar uma região qualquer definida por um contorno "B" (ver ilustração na pág. 59). O contorno pode ser definido por qualquer tipo de matéria, como um molde de ferro fundido, ou pode ser definida pela própria geometria do espaço-tempo, como o horizonte de eventos de um buraco negro (uma superfície da qual nem mesmo a luz pode escapar).

O que acontece se medirmos o volume da região? Quais são os prováveis resultados permitidos tanto pela teoria quântica quanto pela invariância difeomórfica? Se a geometria do espaço for contínua a região poderá ter qualquer tamanho e o resultado da medida poderá ser um número real positivo qualquer e estar tão próximo de um volume zero quanto se desejar. Mas se a geometria for granular, então o resultado da medida terá de provir de um conjunto discreto de números e não poderá assumir valores menores que um determinado volume mínimo. Seria o mesmo que perguntar: qual a quantidade de energia armazenada

pelos elétrons que orbitam em torno de um átomo? A mecânica clássica afirma que esses elétrons podem conter qualquer quantidade de energia, mas a quântica só admite determinados valores de energia.

A diferença entre essas teorias pode ser comparada à diferença entre um fluido que escoar constantemente, como era considerada a água no século 19, e algo possível de ser contado, como os átomos de oxigênio e hidrogênio presentes na água. A teoria da gravidade quântica em loop afirma que o espaço se comporta como os átomos: quando se realiza um experimento para medir seu volume, só podemos ter como resulta-

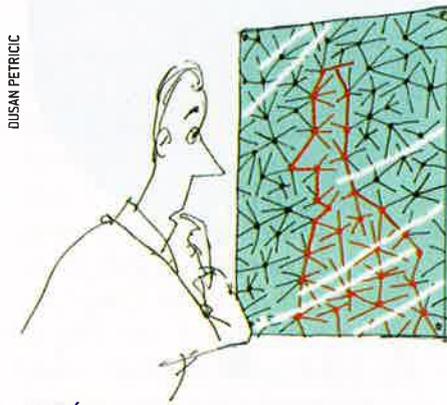
do um conjunto discreto de números. Os volumes se apresentam em pacotes discretos. Uma outra quantidade que pode ser medida é a área do contorno B. Novamente, os cálculos teóricos levam a um resultado não-ambíguo: a área da superfície também é discreta, ou seja, o espaço não é contínuo. Ele se apresenta somente em unidades quânticas específicas de área e volume.

Os valores possíveis de área e volume são medidos em uma unidade chamada de comprimento de Planck. Esse comprimento depende da intensidade da gravidade, das dimensões dos quanta e da velocidade da luz. Mede a escala para a qual a geometria do espaço não é mais contínua. O comprimento de Planck é muito pequeno: 10^{-33} cm. A menor área possível não nula é a de um comprimento de Planck quadrado, ou 10^{-66} cm². O menor volume não nulo possível é um comprimento de Planck cúbico, 10^{-99} cm³. Assim, a teoria afirma que existem cerca de 10^{99} átomos de volume em cada cm³ do espaço. O quantum de volume é tão pequeno que existem mais quanta de volume em um cm³ que centímetros cúbicos no Universo visível (10^{85}).

Redes de Spin

O QUE MAIS A NOSSA TEORIA PREVÊ em termos de espaço-tempo? Para começar, com o que se parecem esses estados quânticos de volume e área? O espaço é formado por uma grande quantidade de pequenos cubos ou esferas? A resposta é não – não é tão simples assim. No entanto, podemos elaborar diagramas que representam os estados quânticos de volume e de área. Para aqueles que estão familiarizados com o tema, esses diagramas são maravilhosos porque estão relacionados a um elegante ramo da matemática.

Para entender como esses diagramas funcionam imagine que temos uma região do espaço em forma de cubo (*ver box na pág. oposta*). Nos nossos diagramas poderíamos desenhar esse cubo como um ponto, que representa o volume e com seis linhas de fixação, cada uma delas representando uma das faces do cubo. A cada ponto pre-



A MATÉRIA existe nos nós da rede de spin

cisamos atribuir um número que especifique o volume nele contido e cada linha precisa ter um número que especifique a face que a linha está representando.

A seguir, suponhamos que no topo de cada cubo seja colocada uma pirâmide. Estes dois poliedros, que compartilham uma face comum, seriam descritos como dois pontos (dois volumes) ligados por uma das linhas (a face que une os dois sólidos geométricos). O cubo tem cinco outras faces (cinco linhas de fixação) e a pirâmide tem quatro (quatro linhas de fixação). Não é difícil imaginar como seria complicado descrever outros arranjos envolvendo poliedros que não fossem cubos e pirâmides, através destes diagramas de pontos e linhas: cada poliedro de volume é representado por um ponto ou um nó e cada face plana de um poliedro por uma linha e as linhas ligam os nós de modo que as faces mantêm os poliedros unidos. Os matemáticos os chamam de gráficos de diagramas de linhas.

Agora, deixemos de lado os desenhos de poliedros na nossa teoria. Os matemáticos que descrevem os estados quânticos de volume e de área criaram um conjunto de regras para podermos conectar os nós e as linhas e atribuir valores aos elementos de um diagrama. Cada estado quântico corresponde a um desses gráficos e cada gráfico, produzido de acordo com as regras, corresponde a um estado quântico. Os gráfi-

cos são uma representação simplificada muito conveniente para todos os estados quânticos possíveis do espaço. Eles representam melhor os estados quânticos que os poliedros. Em particular alguns gráficos se conectam de formas estranhas que não podem ser convertidas numa estrutura organizada de poliedros. De fato, podemos escolher um gráfico e a partir dele calcular quanto o espaço foi distorcido. Como a gravidade é produzida pela distorção do espaço, é assim que os diagramas estabelecem uma teoria quântica da gravidade.

Para simplificar, geralmente desenhemos os gráficos em duas dimensões, mas é melhor imaginá-los num espaço tridimensional, porque é esse espaço que eles representam. No entanto, aqui existe uma armadilha conceitual: as linhas e os nós de um gráfico não se encontram em locais específicos do espaço. Cada gráfico é definido somente pela forma como seus elementos se conectam entre si e se relacionam com limites bem definidos, como os do contorno B. O espaço contínuo, tridimensional imaginário que os gráficos representam *não existe* como uma entidade separada. Tudo o que existe são as linhas e os nós; eles *criam* o espaço, e a forma como se conectam define a geometria do espaço.

Estes gráficos são chamados de redes de spin porque os valores neles contidos estão relacionados a quantidades denominadas spins. Roger Penrose da University of Oxford foi o primeiro a propor, no início dos anos 60, que as redes de spin deveriam ter um papel importante nas teorias da gravidade quântica. Ficamos felizes quando, em 1994, cálculos precisos confirmaram essa intuição. Leitores familiarizados com os diagramas de Feynman podem notar que nossas redes de spin *não* são diagramas de Feynman, apesar da semelhança. Os diagramas de Feynman representam interações quânticas entre partículas, que ocorrem de

O AUTOR

LEE SMOLIN é pesquisador no Perimeter Institute for Theoretical Physics em Waterloo, Ontario, e professor adjunto de física na University of Waterloo. Além de seu trabalho sobre gravidade quântica, ele tem interesse em física de partículas elementares, cosmologia e nas bases da teoria quântica. Seu livro *The life of the Cosmos* (Oxford University Press), de 1997, explora as implicações filosóficas do desenvolvimento da física contemporânea e da cosmologia.

um estado quântico para outro. Os nossos correspondem a estados quânticos fixos de volumes e áreas do espaço.

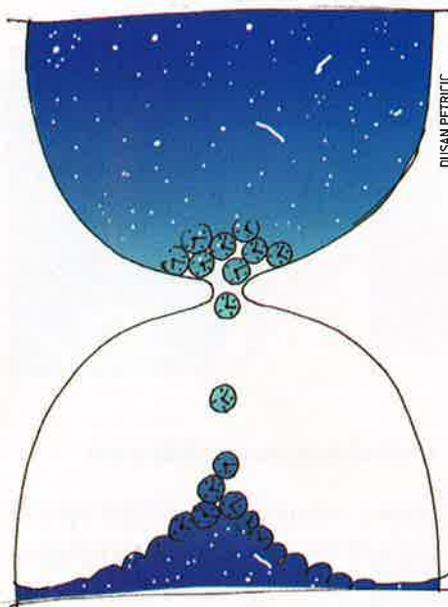
Os nós individuais e as bordas dos diagramas representam regiões extremamente pequenas do espaço: normalmente, um nó representa um volume de cerca de um comprimento de Planck cúbico e uma linha representa uma área de cerca de um comprimento de Planck quadrado. Em princípio, não há limites para o tamanho e a complexidade de uma rede de spin. Se pudéssemos desenhar um quadro detalhado do estado quântico do nosso Universo — a geometria de seu espaço, curvado e distorcido pela gravitação de galáxias e de buracos negros e de tudo mais — poderia ser uma rede gigantesca de spins, com aproximadamente 10^{184} nós.

Estas redes de spin descrevem a geometria do espaço. Mas como são descritas toda a matéria e energia contidas no espaço? Como representamos as partículas e os campos que permeiam todas as regiões do espaço? Partículas como os elétrons correspondem a certos tipos de nós, que são representados acrescentando-se mais rótulos aos nós. Campos, como o campo eletromagnético, são representados adicionando-se mais rótulos às linhas do gráfico. Representamos as partículas e os campos que se movem pelo espaço por esses rótulos que se movem em passos discretos nos gráficos.

Movimentos e Espumas

AS PARTÍCULAS E OS CAMPOS NÃO SÃO as únicas coisas que se movem por lá. De acordo com a relatividade geral, a geometria do espaço varia com o tempo. As distorções e curvaturas do espaço variam à medida que a matéria e a energia se deslocam e as ondas conseguem se propagar através dele como as ondulações na superfície de um lago. Na gravidade quântica em loop esses processos são representados por mudanças nos gráficos. Eles evoluem no tempo através de uma sucessão de certos “movimentos” através do que a conectividade dos gráficos se modifica (ver ilustração na pág. 63).

Ao descrever fenômenos quantum-



DUSAN PETRIC

O TEMPO flui como tiques de incontáveis relógios

mecânicos os físicos precisam calcular probabilidades para os diferentes processos. Fazemos o mesmo quando aplicamos a teoria da gravidade quântica em loop para descrever fenômenos, sejam eles partículas e campos movendo-se nas redes de spin ou a própria geometria do espaço evoluindo no tempo. Em particular, Thomas Thiemann do Perimeter Institute for Theoretical Physics de Waterloo calculou com precisão as probabilidades quânticas para os movimentos da rede de spin. Com isto, a teoria ficou completamente caracterizada: temos um procedimento bem definido para calcular a probabilidade de qualquer processo que possa ocorrer em um mundo que obedece às regras ditadas pela nossa teoria. Só ficou faltando fazer os cálculos e desenvolver previsões para um tipo ou outro de fenômeno, a ser observado experimentalmente.

A teoria da relatividade geral e especial de Einstein funde o espaço e o tempo numa única entidade chamada de espaço-tempo. As redes de spin, que representam o espaço na teoria da gravidade quântica em loop, acomodam o conceito de espaço-tempo, transformando-se no que chamamos de “espumas” de spin. Ao acrescentarmos uma outra dimensão — o tempo — as linhas das redes de spin se estendem para se tornar superfícies bidimensionais e os nós aumentam para se tornar linhas. As transições, onde as redes de spin mudam são agora re-

presentados por nós, sendo que as linhas se encontram na espuma.

Do ponto de vista do espaço-tempo, observar um dado instante como um instante fotográfico, equivale a cortar uma fatia do espaço-tempo. Essa fatia, vista através da espuma de spin reproduz uma rede de spin. Não seria correto pensar que essa fatia estaria se movendo continuamente produzindo um fluxo suave do tempo. Ao contrário, como o espaço é definido por uma geometria discreta de uma rede de spin, o tempo é definido pela seqüência de movimentos distintos que reorganizam a rede (ver box na pág. ao lado). Dessa forma, o tempo também se torna discreto. O tempo flui não como um rio, mas como o tique-taque de um relógio, cujos “tiques” têm valores próximos do intervalo de Planck: 10^{-43} segundos. Ou mais precisamente, o tempo no nosso universo flui através do tique-taque de incontáveis relógios — o que significa que, em cada local da espuma de spin onde ocorrer um “movimento” quântico, um relógio aí colocado teria marcado um tic uma vez.

Previsões e Testes

DESCREVI O QUE A GRAVIDADE QUÂNTICA em loop tem a informar sobre o espaço e o tempo na escala de Planck, mas não podemos verificar a teoria diretamente examinando apenas o espaço-tempo nessa escala. Ela é pequena demais. Então, como podemos testar a teoria? Um teste importante é verificar se é possível deduzir uma teoria da relatividade geral clássica como uma aproximação da gravidade quântica em loop. Em outras palavras, se as redes de spin forem como a trama dos fios de um pedaço de tecido, resta perguntar se é possível calcular as propriedades elásticas corretas de uma peça desse tecido, fazendo a média sobre os milhares de fios que a compõem. De forma análoga, quando se faz a média sobre vários comprimentos de Planck, as redes de spin descreveriam a geometria do espaço e a sua evolução de modo a concordar aproximadamente com o “tecido suave” da teoria clássica de Einstein? Este é um problema complicado, mas recentemente pesqui-

sadores fizeram alguns progressos relacionados a certas configurações do material.

Um outro teste promissor consiste em verificar o que a teoria da gravidade quântica tem a dizer sobre um dos mistérios mais discutidos pela física gravitacional e pela teoria quântica: a termodinâmica dos buracos negros, em particular sobre a sua entropia, que está relacionada à desordem. Os físicos calcularam as previsões relativas à termodinâmica dos buracos negros utilizando uma teoria híbrida aproximada onde a matéria é tratada pela mecânica quântica, mas o espaço-tempo não. Uma teoria quântica completa da gravidade, como a gravi-

dade quântica em loop, deveria ser capaz de reproduzir essas previsões. Nos anos 70, Jacob D. Bekenstein, atualmente na Hebrew University de Jerusalém, inferiu que deve-se atribuir aos buracos negros uma entropia proporcional à área de sua superfície (ver *Informação no Universo Holográfico*. Jacob D. Bekenstein. SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, setembro de 2003). Logo depois, Stephen Hawking deduziu que os buracos negros, principalmente os menores, deveriam emitir radiação. Estas afirmações estão incluídas entre os maiores resultados da física teórica dos últimos 30 anos.

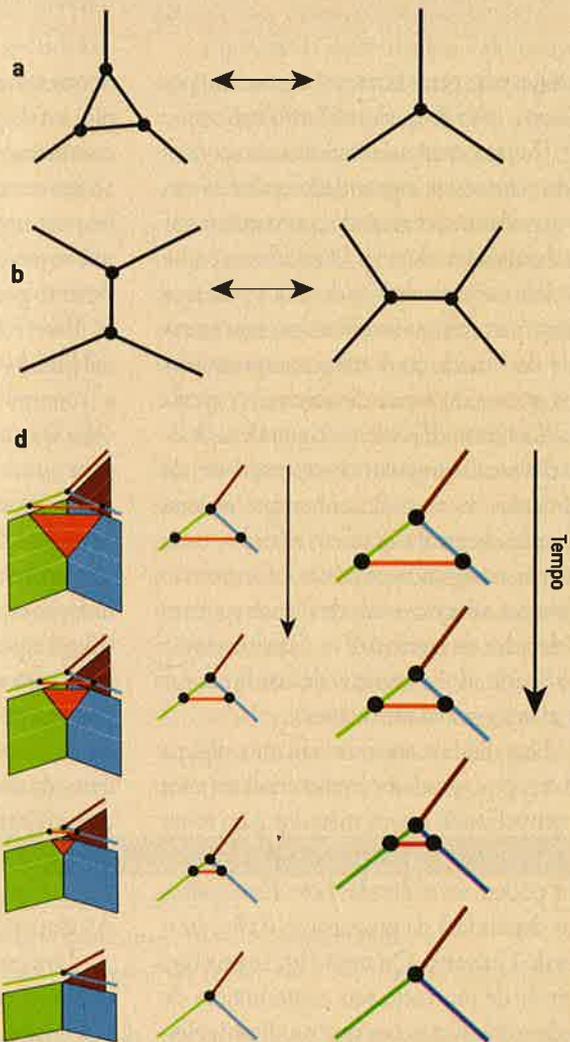
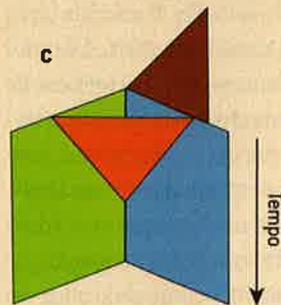
Para fazer os cálculos na gravidade qu-

ântica em loop, escolhamos o contorno B como sendo o horizonte de eventos de um buraco negro. Quando analisamos a entropia dos estados quânticos relevantes, obtemos *exatamente* a previsão de Bekenstein. Da mesma forma, a teoria reproduz a previsão de Hawking da radiação do buraco negro. Na verdade, ela vai além das previsões para a estrutura fina da radiação de Hawking. Se fosse observado um buraco negro microscópico, esta previsão poderia ser testada analisando-se o espectro de radiação emitida pelo buraco negro. Isto no entanto ainda pode estar muito longe de ser conseguido, porque não dispomos de tec-

EVOLUÇÃO TEMPORAL DA GEOMETRIA

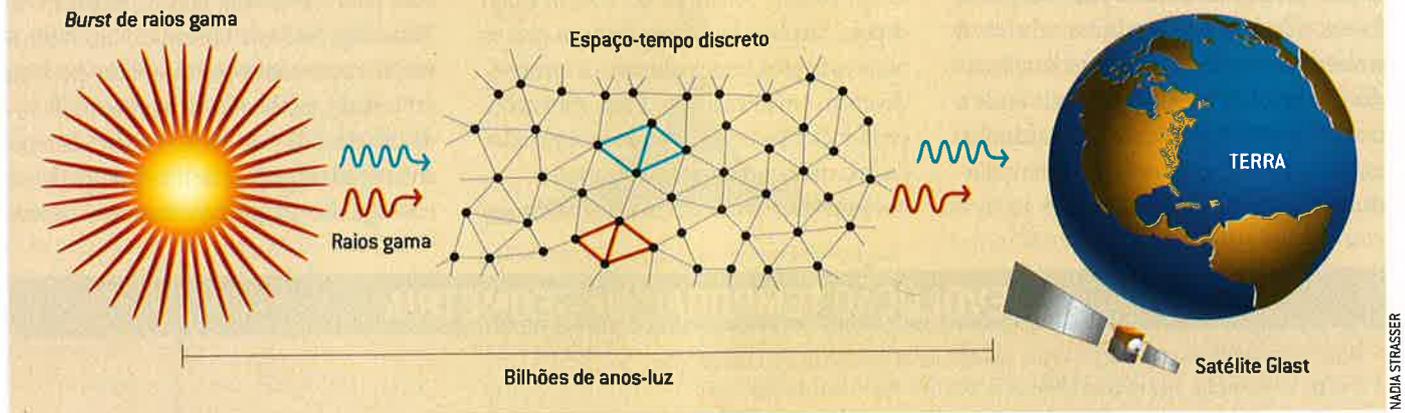
MUDANÇAS NA FORMA DO ESPAÇO – como aquelas que acontecem quando a matéria e energia se deslocam e quando as ondas gravitacionais fluem através dele – são representadas por rearranjos discretos, ou movimentos da rede de spin. Em (a), um grupo de três quanta de volume ligados entre si fundem-se para formar um único quantum de volume; o processo inverso também pode ocorrer. Em (b), dois volumes compartilham o espaço e se unem a volumes adjacentes de forma diferente. Representados por poliedros, os dois poliedros se fundem na sua face comum e em seguida se subdividem em um plano diferente. Os movimentos destas redes de spin ocorrem não somente quando há mudanças de larga escala na geometria do espaço, mas também continuamente, como flutuações quânticas na escala de Planck.

Uma outra forma de representar movimentos é adicionar a dimensão tempo a uma rede de spin – o resultado é chamado de espuma de spin (c). As linhas da rede de spin se tornam planos e os nós se tornam linhas. O corte de uma fatia de uma espuma de spin num dado instante mostra uma rede de spin; o corte de uma série de fatias em diferentes instantes resulta numa seqüência de quadros de um filme que mostra a evolução temporal da rede de spin (d). Mas observe que a evolução, que à primeira vista parece ser suave e contínua, é descontínua. Todas as redes de spin que incluem a linha laranja (primeiros três quadros) representam exatamente a mesma geometria do espaço. O comprimento da linha laranja não vem ao caso – tudo o que importa para a geometria é como as linhas estão conectadas e que número rotula cada linha. Isto define como estão distribuídos os quanta de volume e de área e quais as suas dimensões. No diagrama (d), a geometria permanece constante durante os primeiros três quadros, com três quanta de volume e seis quanta de área. Depois a geometria muda de forma descontínua, tomando-se um único quantum de volume e três quanta de área, como mostra o último quadro. Dessa forma, o tempo, definido por uma espuma de spin, transcorre através de uma série de movimentos abruptos, discretos. Embora falar dessas seqüências como cenas de um filme ajude na sua visualização, a forma mais correta de entender a evolução da geometria é como “tiques” discretos de um relógio. Num “tique”, o quantum de área (laranja) está presente; no próximo “tique” ele já se foi – na verdade, o desaparecimento do quantum de área laranja define o “tique”. A diferença temporal de um “tique” para o seguinte é de aproximadamente o intervalo de Planck, isto é, 10^{-43} segundos. Mas o tempo *não existe* entre os “tiques”; não há nada *entre* eles, da mesma forma que não há “água” entre duas moléculas de água adjacentes.



UM TESTE EXPERIMENTAL

A RADIAÇÃO LIBERADA POR EXPLOSÕES CÔSMICAS DISTANTES, chamadas de *bursts* de raios gama, pode ser o laboratório para testes da consistência da teoria da gravidade quântica em loop. Explosões de raios-gama ocorrem a bilhões de anos-luz de distância e emitem uma enorme quantidade de energia em curto espaço de tempo. De acordo com a teoria de gravidade quântica, cada fóton ocupa uma região de linhas a cada instante enquanto desloca-se pela rede de spin que forma o espaço (na realidade, um enorme número de linhas e não apenas as cinco descritas aqui). A natureza discreta do espaço faz com que radiação gama de alta energia viaje ligeiramente mais rápido que as de baixa energia. A diferença é mínima, mas seus efeitos são notáveis ao longo de uma viagem de bilhões de anos. Se um pulso de radiação gama chega à Terra, uma diferença de tempo provocada por suas diferentes energias pode evidenciar a gravidade quântica em loop. O satélite *Glast*, previsto para ser lançado em 2006, deverá ter a sensibilidade exigida para esse experimento.



nologia para gerar buracos negros nem pequenos, nem de qualquer outro tamanho.

De fato, qualquer experimento concebido para testar a gravidade quântica em loop poderia ser encarado como um imenso desafio tecnológico. O problema é que os efeitos característicos descritos pela teoria tomam-se significativos somente na escala de Planck, as dimensões minúsculas dos quanta de área e de volume. A escala de Planck está 16 ordens de grandeza abaixo das escalas testadas nos aceleradores de partículas de mais altas energias (quanto menores as escalas a serem testadas, mais altas as energias necessárias). Como não podemos atingir a escala de Planck com um acelerador de partículas, os cientistas estão perdendo as esperanças de confirmar as teorias da gravidade quântica.

Nos últimos anos, no entanto, alguns jovens pesquisadores muito criativos vêm desenvolvendo novos métodos para testar as predições da gravidade quântica em loop que podem ser realizadas hoje. Estes métodos dependem da propagação da luz através do Universo. Quando a luz se propaga através de um meio seu comprimento de onda sofre distorções que produzem efeitos como a refração (que desvia a imagem

de objetos mergulhados em água, por exemplo) e a dispersão (separação de diferentes comprimentos de onda ou cores, como acontece nos arco-íris). Estes efeitos também ocorrem com a luz e com partículas que se deslocam através do espaço discreto descrito por uma rede de spin. Infelizmente, a intensidade desses efeitos é proporcional à razão entre o comprimento de Planck e o comprimento de onda. Para a luz visível, essa razão é menor que 10^{-28} . Mesmo para os raios cósmicos mais energéticos já observados, essa razão é de cerca de um bilionésimo. Para qualquer radiação que possamos observar, os efeitos da estrutura granular do espaço são muito pequenos. O que os jovens pesquisadores demonstraram é que esses efeitos se acumulam quando a luz se propaga por grandes distâncias. A luz e as partículas que detectamos se originam a bilhões de anos-luz de distância, em eventos como *bursts* de raios gama (ver *As mais Fantásticas Explosões no Universo*, Neil Gehrels, Luigi Piro e Peter J.T. Leonard. SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, janeiro de 2003).

Um *burst* de raios gama lança no espaço fótons numa certa faixa de energia. Cálculos feitos com a gravidade quântica em loop mostram que os fótons de diferentes

energias devem deslocar-se com velocidades ligeiramente distintas e chegar em instantes ligeiramente diferentes. Podemos tentar encontrar esses efeitos em dados de *bursts* de raios gama obtidos por satélites. Até agora a precisão é de um fator de 1.000 abaixo do necessário, mas um novo observatório espacial a bordo de satélite, o chamado *Glast*, deverá fornecer a precisão desejada, em 2005.

O leitor poderia perguntar se este resultado significa que a teoria da relatividade especial de Einstein está errada ao estabelecer que a velocidade de propagação da luz é uma constante universal. Várias pessoas, incluindo Giovanni Amelino-Camelia da Università di Roma e João Magueijo do Imperial College de Londres, e até eu mesmo, desenvolvemos versões modificadas da teoria de Einstein para acomodar os fótons de alta energia que se deslocam com diferentes velocidades. Nossa teoria propõe que a velocidade universal seja a velocidade de fótons de energia muito baixa ou seja, luz de comprimentos de onda mais longos.

Um outro efeito plausível para a verificação do espaço-tempo discreto envolve raios cósmicos de energia muito alta. Há mais de 30 anos, alguns pesquisadores

previram que raios cósmicos (prótons com energia maior do que 3×10^{19} elétrons-volts) espalhariam a radiação cósmica de fundo em microondas que preenche o espaço e dessa forma jamais atingiriam a Terra. Curiosamente, um experimento japonês conhecido como Agasa detectou mais de 10 raios cósmicos com energia superior a esse limite. Posteriormente verificou-se que a estrutura discreta do espaço poderia aumentar a energia necessária para a reação de espalhamento, permitindo que prótons de alta energia como os raios cósmicos chegassem até a Terra. Se as observações da Agasa persistirem, e não for encontrada nenhuma explicação viável, então se poderá anunciar que a quantização do espaço já está sendo observada.

O Cosmos

ALÉM DE FAZER PREVISÕES SOBRE fenômenos específicos como os raios cósmicos de alta energia, a gravidade quântica em loop lançou novas luzes sobre questões cosmológicas profundas como aquelas relacionadas às origens do Universo.

Se ignorarmos a física quântica (porque a relatividade geral não é uma teoria quântica), podemos afirmar com base nessa teoria que houve um instante inicial na formação do Universo. Cálculos recentes da gravidade quântica em loop desenvolvidos por Martin Bojowald da Penn State University indicam que o BigBang é na verdade um ponto de retorno antes do que o Universo estava se contraindo rapidamente. Os teóricos estão agora trabalhando com afincos no desenvolvimento de hipóteses para o universo primordial que poderão ser testadas em observações cosmológicas futuras. Nada impede que ainda no decurso de nossas vidas possamos ver evidências dos instantes anteriores ao BigBang.

Uma questão igualmente profunda diz respeito à constante cosmológica — uma densidade de energia positiva ou negativa que poderia permear o espaço “vazio”. Observações recentes de supernovas distantes e da radiação cósmica de fundo em microondas, revelaram fortes indícios de

AINDA ESTÁ EM DISCUSSÃO como a realidade clássica surge do espaço-tempo quântico



DUSAN PETRICIC

que esta energia realmente existe e é positiva, acelerando a expansão do Universo. A gravidade quântica em loop não opõe nenhuma resistência à incorporação da densidade de energia positiva.

Muitas questões permanecem em aberto, esperando para serem respondidas através da gravidade quântica em loop. Gostaríamos de entender também, na medida do possível, como a relatividade especial poderá ser modificada para energias extremamente altas. Até agora nossas especulações sobre este assunto não estão muito fortemente vinculadas aos cálculos da gravidade quântica em loop. Além disso, gostaríamos de saber se a relatividade geral clássica é uma descrição aproximada suficientemente boa da teoria para distâncias muito maiores que o comprimento de Planck, em qualquer situação. (No momento só sabemos que a aproximação é boa para certos estados que descrevem ondas gravitacionais muito mais fracas que se propagam em quaisquer outros espaço-tempo planos.) Finalmente, gostaríamos de saber se a gravidade quântica em loop poderá contribuir para a unificação dos campos: será que todas as forças, in-

cluindo a gravidade, são aspectos diferentes de uma única força fundamental? A teoria das cordas se baseia numa idéia específica sobre a unificação. Nós também temos idéias de como conseguir a unificação com a gravidade quântica em loop.

A gravidade quântica em loop ocupa um lugar muito importante no desenvolvimento da física. Ela é, sem dúvida, a teoria quântica da relatividade geral porque não se utiliza de nenhuma outra suposição adicional além dos princípios básicos da teoria quântica e da teoria da relatividade. A discrepância mais marcante — ao propor um espaço-tempo descontínuo descrito pelas redes de spin e pelas espumas de spin — emerge da matemática da própria teoria, em vez de ser inserida como um postulado *ad hoc*. No entanto, tudo o que discuti é essencialmente teórico. Seria isso: apesar de tudo o que descrevi aqui, o espaço é realmente contínuo, não importa quão pequena seja a escala em que estejamos fazendo os testes. Então os físicos teriam de se voltar para postulados mais radicais, como os da teoria das cordas. Como isto é ciência, o experimento final decidirá. A boa notícia é que essa decisão poderá acontecer logo. ■

PARA CONHECER MAIS

Three Roads to Quantum Gravity. Lee Smolin. Basic Books, 2001.

The Quantum of Area? John Baez in *Nature*, Vol. 421, pags. 702–703; Fevereiro 2003.

How Far Are We from the Quantum Theory of Gravity? Lee Smolin. Março 2003. Disponível em (<http://arxiv.org/hep-th/0303185>)

Welcome to Quantum Gravity. Special section. *Physics World*, Vol. 16, No. 11, pags. 27–50; Novembro 2003.

Loop Quantum Gravity. Lee Smolin. Online at www.edge.org/3rd_culture/smolin03/smolin03_index.html