

Universo Auto-organizado

CONCEITOS-CHAVE

■ A teoria quântica e a teoria da relatividade geral de Einstein são famosas pelo seu envolvimento em confrontos. Os físicos vêm tentando conciliá-las em uma teoria única, da gravidade quântica – com sucesso limitado.

■ Uma nova abordagem não introduz componentes exóticos, ao contrário, fornece um novo caminho para a aplicação das leis existentes a partículas individuais minúsculas do espaço-tempo. As partículas se organizam por conta própria, assim como as moléculas se organizam num cristal.

■ Essa abordagem mostra como um espaço-tempo tetradimensional pode emergir de ingredientes mais básicos. Também sugere que o espaço-tempo muda gradualmente de um cenário homogêneo para um fractal de aparência estranha em pequenas escalas.

– Os editores

Uma nova abordagem da gravidade quântica, que perdura há décadas, retorna à física básica e mostra como são dispostos os tijolos que constroem o espaço e o tempo

Por Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz e Renate Loll

Como o espaço e o tempo se formaram? Como criaram o vazio que serve de pano de fundo para o nosso mundo físico? Qual a aparência do espaço-tempo em distâncias minúsculas? Questões como essas permanecem nas fronteiras da ciência moderna e estão conduzindo a pesquisa na direção da teoria da gravidade quântica – a tão aspirada unificação da teoria da relatividade geral de Einstein com a teoria quântica. A teoria da relatividade descreve como o espaço-tempo, em grandes escalas, pode assumir inúmeras formas diferentes, produzindo o que percebemos como a força da gravidade. Por outro lado, a teoria quântica descreve as leis da física em escalas atômica e subatômica, ignorando completamente os efeitos gravitacionais. A teoria da gravidade quântica pretende descrever a natureza do espaço-tempo nas menores escalas possíveis – o vazio que permeia as menores partículas elementares conhecidas – segun-

do as leis quânticas e tentar explicá-la de acordo com constituintes fundamentais.

A teoria das supercordas é freqüentemente lembrada como capaz de oferecer essa explicação, mas até agora não deu respostas para nenhuma das perguntas. Ao contrário, seguindo sua própria lógica interna, cada vez mais tem revelado estratos complexos de novos ingredientes exóticos e de novas relações entre eles, levando a uma variedade de possíveis resultados.

Nos últimos anos nossa equipe desenvolveu uma alternativa promissora. Ela segue uma receita tão simples que chega a ser desconcertante: pegue alguns ingredientes básicos, junte-os de acordo com os princípios quânticos bem conhecidos – nada exóticos –, misture bem, deixe descansar, e está pronta a massa do espaço-tempo.

Olhando por outro prisma, vamos considerar o espaço-tempo vazio, como uma substância des-



Quântico

provida de matéria, formada por um número grande de peças minúsculas sem estrutura. Se deixarmos então esses tijolos microscópicos interagirem uns com os outros, de acordo com as regras simples ditadas pela gravidade e pela teoria quântica, eles se organizarão espontaneamente em um todo que, sob vários aspectos, se assemelha ao nosso Universo observado.

O espaço-tempo pode, então, se parecer mais com um bolinho de arroz que com um sofisticado bolo de casamento. Além disso, ao contrário de outras abordagens da gravidade quântica, nossa receita é muito consistente. Se alterarmos alguns detalhes em nossas simulações o resultado varia muito pouco. Essa consistência nos leva a acreditar que estamos na pista certa. Se o resultado fosse sensível à posição de cada peça desse enorme conjunto poderíamos gerar um número enorme de formas extravagantes, cada uma, *a priori*, com a mesma probabilidade de ocorrência – assim, seríamos incapazes de explicar por que o Universo se transformou naquilo que é.

Mecanismos semelhantes de autoconstrução e auto-organização ocorrem na física, na biologia e em outros campos da ciência. Um exemplo perfeito é o comportamento de grandes bandos de pássaros. Cada pássaro interage somente com um número reduzido de pássaros que estão a sua volta; eles não precisam de líderes nem de comando para

que o bando voe como um conjunto único. O bando possui propriedades coletivas – ou emergentes – que não são óbvias no comportamento de cada pássaro isoladamente.

Uma História da Gravidade Quântica

As tentativas passadas de explicar a estrutura quântica do espaço-tempo como processo de emergência tiveram somente sucesso limitado. Elas se prenderam a uma gravidade quântica euclidiana, um programa de pesquisa que teve início no final dos anos 70 e foi popularizado pela conhecida obra de Stephen Hawking, *Uma breve história do tempo*. Ela se baseia no princípio fundamental da mecânica quântica: a superposição. Qualquer objeto, clássico ou quântico, está num certo estado – caracterizado por sua posição e velocidade. Mas enquanto o estado de um objeto clássico pode ser descrito por um único conjunto de números, o estado de um objeto quântico é muito mais rico. Ele é a soma, ou a superposição, de todos os estados clássicos possíveis.

Por exemplo, uma bola de bilhar clássica se desloca segundo uma trajetória única com posição e velocidade bem definidas a cada instante. O movimento do elétron, porém, é descrito por leis quânticas que estabelecem que ele pode existir simultaneamente em uma larga faixa de posições e velocidades. Quando um elétron se desloca de um



TEORIAS DA GRAVIDADE QUÂNTICA

TEORIA DAS CORDAS

A abordagem preferida da maioria dos físicos teóricos é um conceito não exatamente da gravidade quântica, mas de toda a matéria e forças. Baseia-se na idéia de que as partículas – incluindo as hipotéticas que transmitem a gravidade – são cordas vibrando.

GRAVIDADE QUÂNTICA EM LAÇOS

A principal alternativa para a teoria das cordas invoca uma técnica nova para aplicar as leis quânticas à teoria da relatividade geral de Einstein. O espaço está dividido em “átomos” discretos de volume.

GRAVIDADE QUÂNTICA EUCLIDIANA

Elaborada pelo físico britânico Stephen Hawking, essa abordagem postula que o espaço-tempo emerge de uma grande média quântica de todas as suas possíveis formas. Ela coloca o tempo na mesma condição do espaço.

TRIANGULAÇÃO DINÂMICA CAUSAL

Essa abordagem, tema do artigo, constitui uma visão moderna da aproximação euclidiana. Ela compara o espaço-tempo a um mosaico de triângulos, com capacidade intrínseca de distinguir entre causa e efeito. Em pequenas escalas, o espaço-tempo assume uma estrutura fractal.

ponto *A* para um ponto *B*, na ausência de quaisquer forças externas, não apenas segue uma linha reta entre *A* e *B*, mas segue também todos os outros caminhos possíveis, simultaneamente. Esse cenário qualitativo de todos os trajetos possíveis do elétron, agindo em conjunto, se traduz na prescrição matemática precisa de uma superposição quântica – formulada pelo Prêmio Nobel Richard Feynman –, que é uma média ponderada de todas essas diferentes possibilidades.

Com essa formulação pode-se calcular a probabilidade de encontrar o elétron em qualquer faixa específica de posições e velocidades, além da trajetória esperada, em linha reta, que os elétrons seguiriam se obedecessem às leis da mecânica clássica. O que torna o comportamento das partículas inconfundivelmente quantum-mecânico são as diferentes trajetórias possíveis, além da direta, conhecidas como flutuações quânticas. Quanto menores as dimensões de um sistema físico, mais importantes se tornam as flutuações quânticas.

A gravidade quântica euclidiana aplica o princípio da superposição ao Universo todo. Nesse caso a superposição inclui não somente as diferentes trajetórias das partículas, mas também as diferentes formas pelas quais o Universo pode evoluir no tempo – em particular, as várias formas possíveis do espaço-tempo. Para tornarem o problema tratável, os físicos consideram basicamente somente a forma e as dimensões gerais, e não cada uma das suas possíveis contorções.

A gravidade quântica euclidiana teve um avanço enorme nas décadas de 80 e 90 graças ao desenvolvimento de simulações feitas com computadores de grande porte. Esses modelos representam geometrias curvas de espaço-tempo, utilizando pequenos tijolos que, por conveniência, são considerados triangulares. Uma malha formada por triângulos adjacentes pode se ajustar com perfeição a superfícies curvas. Por causa dessa propriedade elas são freqüentemente utilizadas em animações por computador. Para o espaço-tempo os tijolos elementares são generalizações tetradimensionais de triângulos, chamadas de simplexo 4D. Ao colarmos triângulos, um ao lado do outro, formamos uma superfície curva bidimensional. Do mesmo modo, quando colamos quatro simplexos 4D pelas suas “faces” – que são, na verdade, tetraedros tridimensional – podemos criar um espaço-tempo tetradimensional.

Os minúsculos tijolos, em si, não possuem significado físico real. Se pudéssemos examinar um verdadeiro espaço-tempo com um microscópio muito poderoso não veríamos esses pequenos triângulos. Eles são meras idealizações. A única informação fi-

[ESQUIANDO PELO ESPAÇO]

Espaço: A Última Fronteira

Embora estejamos habituados a imaginar o espaço como um simples vazio, espaço e tempo possuem uma estrutura invisível que controla o modo como nos movemos, assim como as saliências da neve – montículos – em uma encosta controlam os movimentos de um esquiador. Entendemos essa estrutura como a força da gravidade. O principal objetivo da teoria da gravidade quântica é explicar de forma detalhada o espaço e o tempo.



sicamente relevante provém do comportamento coletivo dos tijolos, com base na suposição de que cada um deles, no limite, se reduz à dimensão zero.

A insensibilidade, ou falta de percepção, de vários detalhes em pequena escala também é conhecida como “universalidade”. É um fenômeno bem conhecido em mecânica estatística, o estudo do movimento de moléculas em gases e fluidos; esses meios apresentam um comportamento muito semelhante, qualquer que seja sua composição. A universalidade está associada às propriedades de sistemas de muitos corpos e aparece em escalas maiores que as dos constituintes individuais. O análogo equivalente para um bando de pássaros é que características como cor, tamanho, envergadura das asas e idade dos pássaros individuais são totalmente irrelevantes quando se quer determinar o comportamento do voo do bando de pássaros como um todo.

Contorcendo

Com as simulações por computador os especialistas em gravidade quântica começaram a explorar os efeitos da superposição de formas do espaço-tempo que a relatividade clássica não consegue manipular – mais especificamente, aquelas extremamente curvas em escalas muito pequenas. É exatamente nesse regime, chamado não-perturbativo, que os físicos estão mais interessados, pois

ele se torna praticamente inacessível se os cálculos forem feitos na base do papel e lápis.

Infelizmente essas simulações revelaram que a gravidade quântica euclidiana está claramente deixando de colocar algum ingrediente importante nessa receita. As simulações revelaram que as superposições não-perturbativas de universos tetradimensionais são intrinsecamente instáveis. As flutuações quânticas em curvaturas de pequenas escalas, que caracterizam os diferentes universos superpostos que contribuem para a média, não se cancelam mutuamente para criar um universo clássico, homogêneo em grandes escalas. Ao contrário, elas normalmente se reforçam mutuamente para fazer o espaço todo se contorcer sobre si mesmo, como uma minúscula bola de papel amassado, com um número infinito de dimensões. Num espaço como esse, pares de pontos arbitrários nunca estão mais afastados do que uma distância mínima, mesmo que o espaço contenha um volume muito grande. Em alguns casos o espaço passa para o extremo oposto e se torna extremamente fino e esticado, como um polímero químico, com muitas ramificações. Essas possibilidades não se parecem em nada com o nosso Universo observável.

Vamos fazer uma pausa para considerar um aspecto curioso desse resultado. Os tijolos são tetradimensionais, ainda que coletivamente possam criar um espaço com um número infinito de dimensões – o universo contorcido – ou duas dimensões – o universo-polímero. Uma vez concebidas as grandes flutuações quânticas do espaço vazio, até o conceito elementar de dimensão se torna mutável. Esse resultado provavelmente não teria sido antecipado a partir da teoria clássica da gravidade, segundo a qual o número de dimensões é sempre considerado dado.

Pode surgir uma complicação adicional, considerada com certo desapontamento pelos aficionados da ficção científica. As histórias de ficção científica normalmente utilizam buracos de minhoca – tubos finos que criam atalhos entre regiões muito afastadas do Universo. O que torna os buracos de minhoca tão atraentes é que, através deles, torna-se possível viajar no tempo e transmitir sinais mais rápido que a luz. Embora esses fenômenos nunca tenham sido observados, especula-se que possam ser explicados pela teoria ainda desconhecida da gravidade quântica. Diante dos resultados negativos fornecidos pelas simulações por computador da gravidade quântica euclidiana, a viabilidade dos buracos de minhoca hoje parece extremamente improvável. Os buracos de minhoca surgem em tantas variedades que tendem a dominar a superposição e desestabilizá-la, e por isso o Universo quântico

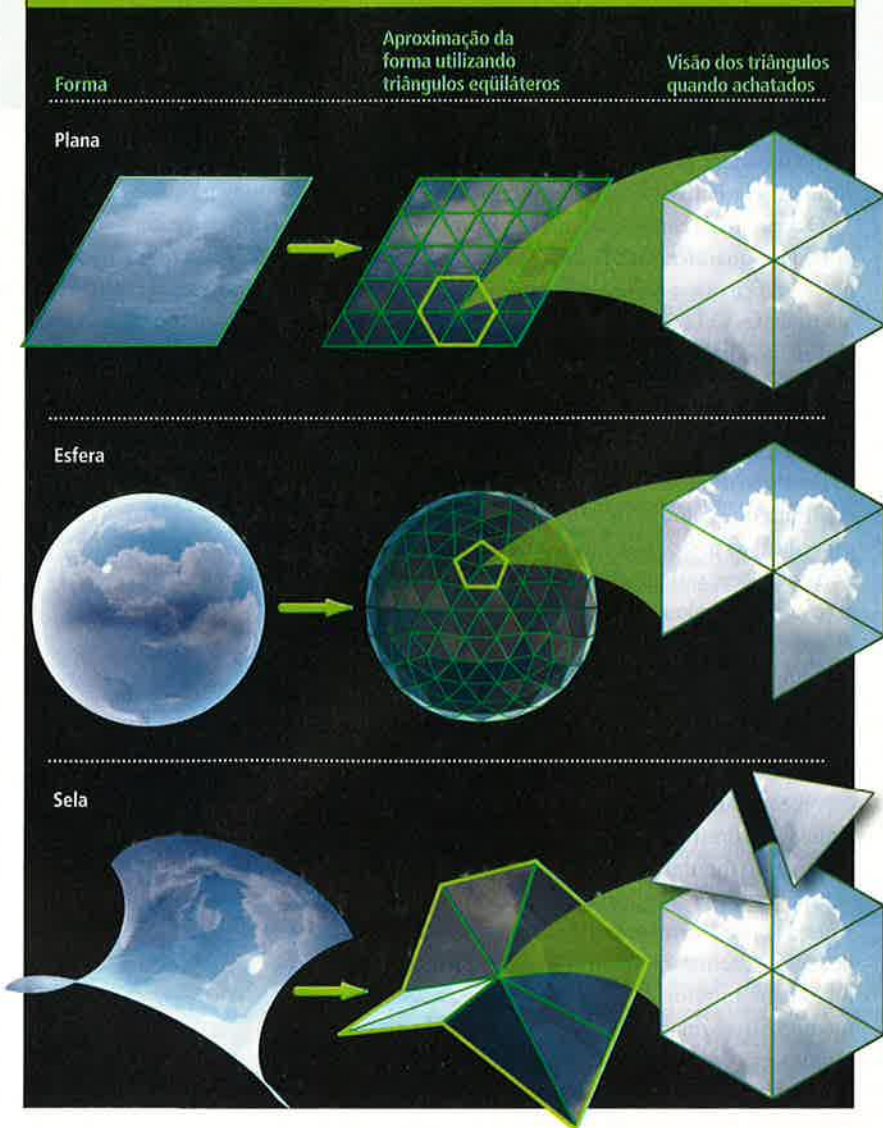
co nunca vai crescer além de uma vizinhança pequena, mas altamente interconectada.

Qual seria o problema então? Na nossa busca por buracos em laços e pontas soltas na abordagem euclidiana, finalmente atingimos o ponto nevrálgico da questão, o ingrediente absolutamente indispensável para fazer o bolinho de arroz dar certo: o Universo precisa codificar o que os físicos chamam de causalidade. Causalidade significa que o espaço-tempo vazio possui uma estrutura que nos permite distinguir causa e efeito, sem

[DESCREVENDO A FORMA DO ESPAÇO]

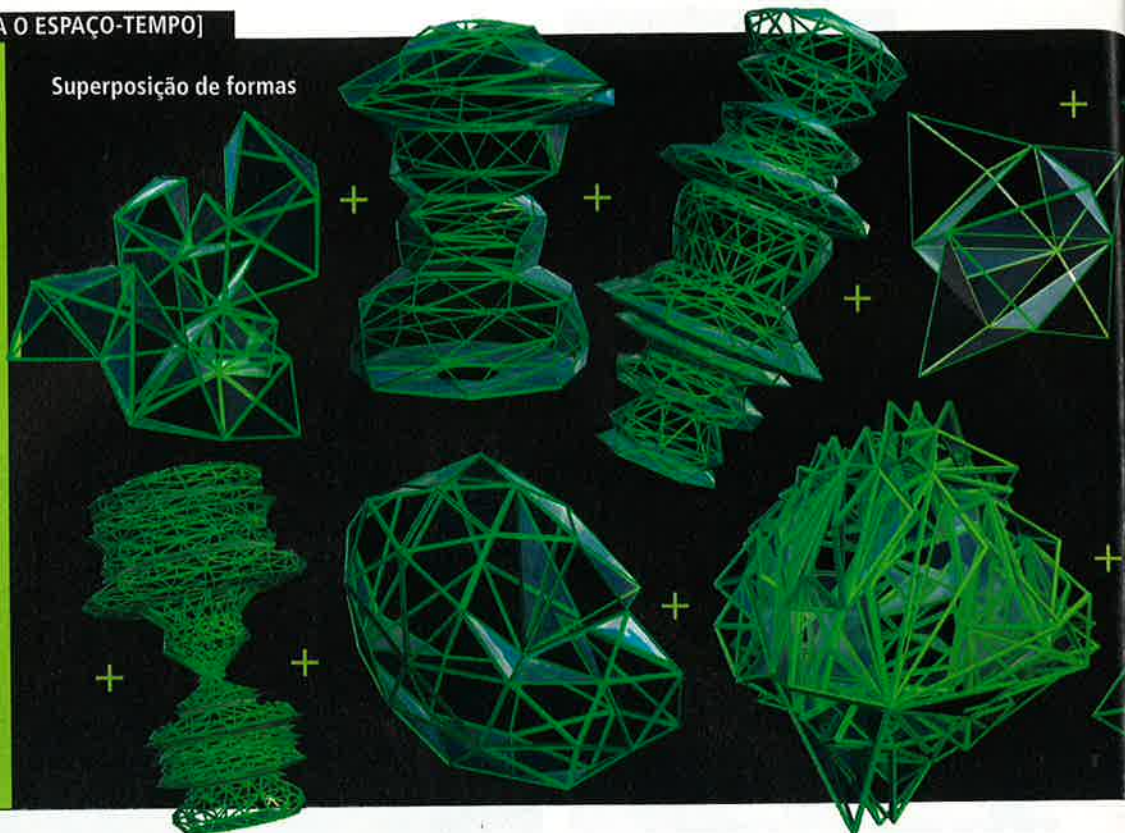
Um Mosaico de Triângulos

Para determinarem como o espaço esculpe sua própria forma, primeiro os físicos devem ser capazes de descrever essa forma. Isso é feito utilizando triângulos e seus análogos de dimensões mais altas, um mosaico que pode se adaptar facilmente a uma estrutura curva. A curvatura em um ponto é dada pelo ângulo total subentendido pelos triângulos que o rodeiam. Para uma superfície plana, o ângulo é de exatamente 360° , mas para outras superfícies pode ser maior ou menor.



Fazendo a Média

O espaço-tempo pode assumir uma variedade enorme de formas possíveis. De acordo com a teoria quântica, a forma mais provável de ser observada é uma superposição, ou a média ponderada de todas as demais possibilidades. Ao construir formas do espaço-tempo a partir de triângulos, os teóricos ponderam cada forma dependendo exatamente de como os triângulos são colados para formá-la. Os autores descobriram que os triângulos precisam obedecer a certas regras para que a média se ajuste às observações. Mais especificamente, os triângulos devem ter uma seta do tempo embutida.



Superposição de formas

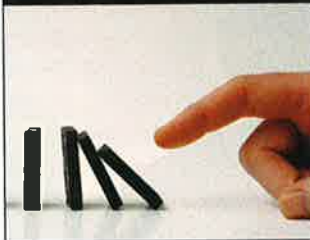
ambigüidade. Ela está implícita nas teorias clássicas da relatividade especial e geral.

O conceito de causalidade não está implícito na gravidade quântica euclidiana. O termo “euclidiano” significa que o espaço e o tempo são tratados igualmente. O Universo que admite a superposição euclidiana possui quatro dimensões no espaço, e não três dimensões no espaço e uma no tempo, como estamos habituados a considerar. Como os universos euclidianos não incluem um conceito separado de tempo, também não possuem uma estrutura que coloque os eventos em uma ordem específica; as pessoas que vivem nesses universos não conhecem o significado das palavras “causa” e “efeito”. Hawking e outros que adotaram essa abordagem afirmam que o “tempo é imaginário”, nos dois sentidos, matemático e coloquial. Eles esperavam que a causalidade pudesse emergir como uma propriedade de larga escala de flutuações quânticas microscópicas que individualmente não carregam marcas de uma estrutura causal, mas as simulações destruíram essa expectativa.

Quando montamos universos individuais, em vez de desprezar a causalidade e esperar que ela emergja do conhecimento coletivo da superposição, decidimos incorporar a estrutura causal em um estágio bem anterior. O termo técnico para nosso método é triangulação dinâmica causal. Nele, atribuímos a cada simplexo uma seta de tempo apontando do passado para o futuro. Depois, reforça-

O QUE É CAUSALIDADE?

Causalidade é o princípio pelo qual os eventos ocorrem numa sequência temporal específica de causa e efeito e não numa sucessão desordenada, aleatória. Na abordagem da gravidade quântica proposta pelos autores, a distinção entre causa e efeito é mais fundamental para a Natureza que uma propriedade deduzida.



mos as regras de colagem causal: dois simplexos devem ser mantidos juntos para que suas setas continuem apontando na mesma direção. Os simplexos devem compartilhar o conceito de tempo, que se desdobra continuamente na direção das setas e nunca fica em pé ou é orientado para trás. Com o passar do tempo, o espaço deve manter sua forma geral e não deve se dividir em fragmentos desconectados ou criar buracos de minhoca.

Depois de expormos essas idéias em 1998, demonstramos, em modelos bastante simplificados, que as regras de colagem causal levam a um universo de larga escala bem diferente daquele da gravidade quântica euclidiana. Isso foi encorajador, mas não o bastante para mostrar que essas regras são suficientes para dar estabilidade a um universo tetradimensional completo. Por isso, em 2004, ficamos com o coração na boca quando nosso computador estava prestes a fornecer os primeiros resultados de uma vasta superposição causal de simplexos 4D. Qual seria o comportamento desse espaço-tempo em grandes escalas: de um objeto tetradimensional estendido, de uma bola de papel amassado ou de um polímero?

Imagine nossa empolgação quando vimos o número de dimensões: quatro – mais exatamente: $4,02 \pm 0,10$. Era a primeira vez que alguém calculava o número observado de dimensões a partir de princípios básicos. Até hoje a inclusão da causalidade em modelos quantum-gravitacionais é a única

DUAS REGRAS QUE PERMITEM COLAR

Qualquer Coisa Passa

Ao considerar todas as formas possíveis de dispor os triângulos – com liberdade total para todos – obtêm-se como resultado um objeto compacto, como uma bola de papel amassado, com infinitas dimensões.



Restritos pelo Princípio da Causalidade

Ao acrescentar a regra de que triângulos adjacentes precisam ter uma noção consistente de tempo – de modo que causa e efeito sejam distinguidos sem ambigüidade – o resultado é um espaço-tempo tetradimensional, extremamente parecido com o nosso Universo.



solução que se conhece para explicar as instabilidades de geometrias superpostas de espaço-tempo.

Espaço-Tempo em Grandes Escalas

Essa simulação foi a primeira de uma série de experimentos por computador em andamento. Por meio deles estamos tentando extrair as propriedades físicas e geométricas do espaço-tempo quântico. O passo seguinte foi simular a forma do espaço-tempo em grandes distâncias e verificar se ele reproduz a realidade – isto é, se está de acordo com as predições da relatividade geral. Esse teste é muito desafiador em modelos não-perturbativos da gravidade quântica, que não pressupõem uma forma-padrão específica para o espaço-tempo. Na verdade, é tão difícil fazer esse teste que a maioria das abordagens da gravidade quântica – incluindo a teoria das cordas, exceto casos especiais – não está suficientemente avançada para isso.

Verificamos que para o nosso modelo funcionar é preciso incluir, desde o início, uma constante cosmológica, uma substância invisível e desprovida de matéria que o espaço-tempo contém mesmo na ausência completa de outras formas de matéria e energia. Essa exigência é promissora, já que os cosmólogos encontraram evidências observacionais desse tipo de energia. Além disso, o espaço-tempo resultante possui o que os físicos chamam de geometria de De Sitter, que é exatamente a solução das equações de Einstein para um universo

que não contenha nada, além da constante cosmológica. É realmente incrível que ao juntarmos esses tijolos microscópicos de forma totalmente aleatória – sem nenhuma preocupação com qualquer simetria ou estrutura geométrica preferencial – acabamos obtendo um espaço-tempo que em grandes escalas apresenta uma forma altamente simétrica do Universo de De Sitter.

Essa emergência dinâmica de um universo tetradimensional com uma forma física praticamente correta, a partir de princípios básicos, é o objetivo da nossa abordagem. Se esse resultado surpreendente puder ser explicado segundo as interações de alguns “átomos” fundamentais do espaço-tempo que ainda precisam ser identificados, a meta da pesquisa que estamos realizando terá sido atingida.

Convencidos de que nosso modelo da gravidade quântica tinha sido aprovado, depois de passar por uma série de testes clássicos, estava na hora de passar para outro tipo de experimento, em que pudéssemos investigar, sem ambigüidade, a estrutura quântica do espaço-tempo que a teoria clássica de Einstein não conseguiu englobar. Uma das simulações realizadas foi um processo de difusão – isto é, criar um análogo adequado de uma gota de tinta precipitando-se numa superposição de universos e observar como ela se espalha e como é misturada pelas flutuações quânticas. Medindo o tamanho do padrão da tinta depois de

[OS AUTORES]

Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz e Renate Loll desenvolveram sua abordagem da gravidade quântica em 1998. Ambjørn é membro da Academia Real Dinamarquesa e professor do Instituto Niels Bohr, em Copenhague e da Universidade de Utrecht, ambos na Holanda. Ele tem fama de ser um talentoso mestre da cozinha tailandesa, atributo que os editores levam em conta ao avaliar seus originais.

Jurkiewicz é chefe do departamento de teoria de sistemas complexos do Instituto de Física da Universidade Jagielloniana, em Cracóvia, na Polónia. Entre os diversos cargos que já ocupou um deles foi no Instituto Niels Bohr, em Copenhague, em cujo litoral conheceu o prazer de velejar.

Loll é professora da Universidade de Utrecht, onde chefia um dos maiores grupos de pesquisa em gravidade quântica da Europa. Anteriormente trabalhou no Instituto Max Planck de Física Gravitacional, em Golm, Alemanha, onde recebeu o prêmio Heisenberg. Em seus raros momentos de folga, Loll se dedica à música de câmara.

[MAS, AFINAL, O QUE É DIMENSÃO?]

Uma Dimensão Completamente Nova para o Espaço

Na vida cotidiana o número de dimensões se refere ao número mínimo de medidas necessárias para especificar a posição de um objeto, como latitude, longitude e altitude. Essa definição pressupõe que o espaço é homogêneo e obedece às leis da física clássica.

Mas o que acontece se o espaço não for assim tão bem comportado? O

que acontece se sua forma depender de processos quânticos nos quais os conceitos do dia-a-dia se tornam instáveis? Nesses casos, físicos e matemáticos devem desenvolver conceitos mais sofisticados de dimensionalidade. O número de dimensões necessárias pode não ser um número inteiro, como no caso dos fractais – padrões que parecem iguais em todas as escalas.

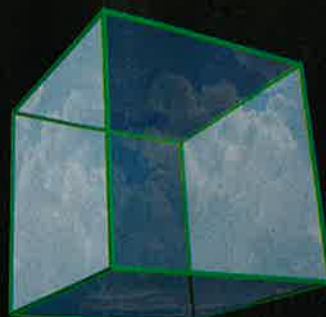
Dimensões Inteiras ▼



1 Dimensão



2 Dimensões



3 Dimensões



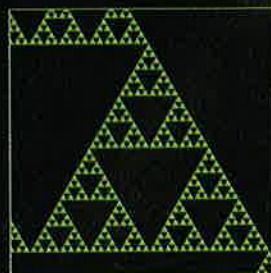
4 Dimensões

Dimensões Fractais ▼



Conjunto de Cantor

Imagine uma linha reta, recorte o terço central da linha e repita a operação infinitas vezes. O fractal resultante é maior que um ponto isolado, mas menor que uma linha contínua. Sua dimensão de Hausdorff (ver abaixo) é 0,6309.



Guarnição de Sierpinski

Um triângulo do qual foram retirados pequenos triângulos cada vez menores. Essa figura se situa numa posição intermediária entre uma linha unidimensional e uma superfície 2D. Sua dimensão de Hausdorff é 1,5850.



Esponja de Menger

Um cubo do qual foram retirados pequenos cubos menores. Esse fractal corresponde a uma superfície que cobre parcialmente um volume. Sua dimensão de Hausdorff é 2,7268, semelhante à do cérebro humano.

Definições Generalizadas de Dimensões

Dimensão de Hausdorff ▼

Formulada pelo matemático alemão Felix Hausdorff, no início do século 20, essa definição descreve como o volume V , de uma região, depende de suas extensões lineares. Para um espaço tridimensional comum, V é proporcional a r^3 . O expoente se refere ao número de dimensões. "Volume" pode significar também outras medidas do tamanho total, como as áreas. Para a guarnição de Sierpinski, V é proporcional a $r^{1,5850}$, refletindo o fato de que essa figura não chega a cobrir uma área completa.

Dimensão Espectral ▼

Essa definição descreve como as coisas se difundem por um meio com o passar do tempo, seja uma gota de tinta em um tanque com água ou uma epidemia em uma população. Cada molécula de água ou indivíduo de uma população possuem certo número de vizinhos mais próximos, o que determina a taxa com a qual a tinta ou a doença se espalha. Em um meio tridimensional, um padrão de tinta aumenta de tamanho com o tempo elevado à potência $3/2$. Na guarnição de Sierpinski, a tinta se difunde num padrão torcido, pois se espalha mais lentamente com o tempo – à potência 0,6826, o que corresponde a uma dimensão espectral de 1,3652.

Aplicando Definições

Em geral, o cálculo do número de dimensões de formas diferentes do espaço-tempo resulta em valores diferentes porque são examinados aspectos diferentes da geometria. Para certas figuras geométricas, o número de dimensões não é fixo. Por exemplo, a difusão pode ser uma função mais complexa do tempo, em vez de simplesmente o tempo elevado a uma dada potência.

As simulações da gravidade quântica se concentram nas dimensões espectrais. Elas partem do movimento de um minúsculo ser situado dentro de um tijolo do espaço-tempo quântico. O ser caminha aleatoriamente. O número total de tijolos adjacentes que ele toca em certo intervalo de tempo corresponde à sua dimensão espectral.

certo tempo pode-se determinar o número de dimensões do espaço (ver quadro na pág. 34).

O resultado é surpreendente: o número de dimensões depende da escala. Em outras palavras, se permitirmos que a difusão continue por alguns instantes apenas, o número de dimensões do espaço-tempo parece ser diferente que quando deixamos a difusão ocorrer durante um tempo mais longo. Até os especialistas em gravidade quântica não conseguem imaginar como o espaço-tempo poderia apresentar dimensões diferentes, dependendo da resolução do microscópio com que se observa. Evidentemente, um objeto pequeno sente o espaço-tempo de uma forma totalmente diferente de um objeto grande. Para esse objeto o Universo guarda certa semelhança com uma estrutura fractal. Um fractal é um tipo estranho de espaço onde o conceito de tamanho simplesmente não existe. Um fractal é auto-similar, o que quer dizer que ele tem a mesma aparência em todas as escalas. Isso implica que não há réguas nem outros objetos com uma escala característica que possa ser usada como um padrão de medida.

O que significa realmente “pequeno”? Até uma escala de 10^{-34} metros, o Universo quântico, em geral, é bem descrito pela geometria tetradimensional de De Sitter, embora o efeito das flutuações quânticas se torne significativamente crescente. É extraordinário o fato de podermos confiar na aproximação clássica em distâncias assim tão pequenas. Isso tem implicações importantes para o Universo, tanto para os primórdios da sua história quanto para o seu futuro. Nesses dois extremos o Universo é considerado completamente vazio. Bem no início, as flutuações quantum-gravitacionais podem ter sido tão grandes que a matéria mal conseguiu registrá-las; era como uma casca de noz navegando em um oceano agitado. Daqui a bilhões de anos, devido à rápida expansão do Universo, a matéria estará tão diluída que seu papel também será irrelevante. O modelo que desenvolvemos é capaz de explicar a forma do espaço nos dois casos.

Em escalas ainda menores as flutuações quânticas do espaço-tempo tornam-se tão intensas que os conceitos clássicos intuitivos da geometria são quebrados. O número de dimensões cai das quatro clássicas para duas. No entanto, até onde podemos afirmar, o espaço-tempo ainda será contínuo e não apresentará buracos de minhoca. Ele não será tão vazio como bolhas de sabão, como supunham o recém-falecido John Wheeler e mu-

[RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES]

Ampliando o Espaço-Tempo

Pelos cálculos dos autores, a dimensão espectral do espaço-tempo passa gradualmente de quatro (em grandes escalas) para duas (em pequenas escalas), e o espaço se fragmenta, passando de um contínuo homogêneo para um fractal deformado. Os físicos ainda estão discutindo se essa conclusão significa que o espaço-tempo é realmente formado por “átomos” ou por padrões complicados apenas fracamente associados aos nossos conceitos habituais de geometria.

DIMENSÃO ESPECTRAL DO ESPAÇO-TEMPO QUÂNTICO



A neve é fractal em pequenas escalas....

... mas homogênea e totalmente tridimensional em grandes escalas.



tos outros. A geometria do espaço-tempo não obedecerá às regras clássicas padronizadas, mas o conceito de distância ainda poderá ser aplicado.

Agora estamos em condições de testar escalas ainda mais reduzidas. Há uma possibilidade de que o Universo se torne auto-similar e mantenha a mesma aparência em todas as escalas abaixo de certo limiar. Se isso ocorrer o espaço-tempo não será formado por cordas ou “átomos” do espaço-tempo, mas será uma região extremamente monótona: a estrutura encontrada abaixo do limiar simplesmente se repetirá em escalas cada vez menores, *ad infinitum*.

É difícil imaginar como os físicos conseguiram progredir utilizando menos ingredientes e técnicas menos evoluídas que as que usamos para criar um universo quântico com propriedades realistas. Ainda precisamos realizar muitos testes e experimentos – por exemplo, entender como a matéria se comporta no Universo e como ela, por sua vez, influi na forma geral do Universo. O Santo Graal, que várias teorias estão tentando encontrar para a gravidade quântica, é a predição de consequências observáveis deduzidas a partir da estrutura quântica microscópica. Este será o critério final para decidir se nosso modelo realmente levará à teoria correta da gravidade quântica. ■

➔ PARA CONHECER MAIS

Deriving dimensions. Adrian Cho, em *Physical Review Focus*, 28 de setembro de 2004. <http://focus.aps.org/story/v14/st13>

Planckian birth of a quantum de Sitter Universe. J. Ambjørn, A. Görlich, J. Jurkiewicz e R. Loll, em *Physical Review Letters*, vol. 100, artigo nº 091304, 7 de março de 2008. Separatas disponíveis em: arxiv.org/abs/0712.2485

The complete idiot's guide to string theory. George Musser. Alpha, 2008.

The emergence of spacetime, or, quantum gravity on your desktop. R. Loll, em *Classical and Quantum Gravity*, vol. 25, nº 11, artigo nº 114006, 7 de junho de 2008. arxiv.org/abs/0711.0273

O site de Renate Loll é www.phys.uu.nl/~loll

