

O futuro do espaço-tempo

Stephen W. Hawking

Kip S. Thorne

Igor Novikov

Timothy Ferris

Alan Lightman

Richard Price



COMPANHIA DAS LETRAS

DADOS DE COPYRIGHT

Sobre a obra:

A presente obra é disponibilizada pela equipe [X Livros](#) e seus diversos parceiros, com o objetivo de disponibilizar conteúdo para uso parcial em pesquisas e estudos acadêmicos, bem como o simples teste da qualidade da obra, com o fim exclusivo de compra futura.

É expressamente proibida e totalmente repudiável a venda, aluguel, ou quaisquer uso comercial do presente conteúdo

Sobre nós:

O [X Livros](#) e seus parceiros disponibilizam conteúdo de domínio público e propriedade intelectual de forma totalmente gratuita, por acreditar que o conhecimento e a educação devem ser acessíveis e livres a toda e qualquer pessoa. Você pode encontrar mais obras em nosso site: xlivros.com ou em qualquer um dos sites parceiros apresentados neste link.

Quando o mundo estiver unido na busca do conhecimento, e não lutando por dinheiro e poder, então nossa sociedade enfim evoluirá a um novo nível.

O FUTURO DO ESPAÇO-TEMPO

STEPHEN W. HAWKING
KIP S. THORNE
IGOR NOVIKOV
TIMOTHY FERRIS
ALAN LIGHTMAN

O futuro do espaço-tempo

Introdução
Richard Price

Tradução
José Viegas Filho

1ª reimpressão



COMPANHIA DAS LETRAS

© 2002 by California Institute of technology

"Bem-vindo ao espaço-tempo" © 2002 by Richard Price

"Pode-se mudar o passado?" © 2002 by Igor Novikov

"Proteção cronológica" © 2002 by Stephen W. Hawking

"As dobras do espaço-tempo e o mundo quântico" © 2002 by Kip S. Thorne

"Da popularização da ciência" © 2002 by Timothy Ferris

"O físico como romancista" © 2002 by Alan Lightman

Proibida a venda em Portugal

Título original

The future of spacetime

Capa

Angelo Venosa

Revisão técnica

Rogério Rosenfeld

(Instituto de Física Teórica/Unesp)

Preparação

Bernardo Esteves

Índice remissivo

Luciano Marchiori

Revisão

Ana Maria Barbosa

Olga Cafalcchio

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

O futuro do espaço-tempo / Stephen W. Hawking... [et al.] ; introdução Richard Price; tradução José Viegas Filho. — São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

Outros autores: Kip S. Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferris, Alan Lightman

Título original: The future of spacetime.

Bibliografia.

ISBN 85-359-0608-8

1. Espaço e tempo 2. Física 3. Relatividade (Física) I. Hawking, Stephen W. II. Thorne, Kip S. III. Novikov, Igor. IV. Ferris, Timothy, V. Lightman, Alan. VI. Price, Richard.

05-0127 CDD-530.11

Índice para catálogo sistemático:

1. Espaço e tempo: Teoria da relatividade: Física 530.11

[2005]

Todos os direitos desta edição reservados à

EDITORA SCHWARCZ LTDA.

Rua Bandeira Paulista 702 cj. 32

04532-002 — São Paulo — SP

Telefone (11) 3707-3500

www.companhaidasletras.com.br

Sumário

Prefacio

Introdução: Bem-vindo ao espaço-tempo — Richard Price

Pode-se mudar o passado? — Igor Novikov

Proteção cronológica:

Um mundo mais seguro para os historiadores — Stephen W. Hawking

As dobras do espaço-tempo e o mundo quântico:

Especulações sobre o futuro — Kip S. Thorne

Da popularização da ciência — Timothy Ferris

O físico como romancista — Alan Lightman

Notas

Glossário

Sobre os autores

Prefácio

Este livro não é puro. Em primeiro lugar, é um amálgama de ensaios curiosamente diferentes que foram reunidos deixando-se as marcas de soldagem bem aparentes. O editor original, Ed Barber, da W. W. Norton, deu todo apoio ao trabalho de edição, mas várias vezes pareceu-me que ele murmurava a palavra “mis-celânea” com certo nervosismo (embora de maneira positiva). Na verdade, o livro é o que tinha que ser: uma coleção eclética e deliciosamente heterogênea. Assim são a ciência e os cientistas — entidades complexas, nem sempre fáceis de controlar ou de organizar.

Naturalmente, o livro segue certos princípios de organização. As contribuições são excelentes e de leitura fácil. Praticamente não há equações. Todos os ensaios estão relacionados com a física moderna do espaço e do tempo. E o que é mais importante: são adaptações de palestras proferidas no dia 3 de junho de 2000, para homenagear o sexagésimo aniversário de Kip Thorne, do Califórnia Institute of Technology (Caltech). Admitimos que o conteúdo cria algumas justaposições singulares. Três ensaios fazem comunicação científica, um fala sobre a comunicação da ciência e outro sobre a diferença entre ciência e comunicação.

Este livro impuro nasceu de um engodo. Faz parte da tradição celebrar os sessenta anos de importantes cientistas. Kip Thorne não é só um importante cientista: ele também é importante para todos nós no nível pessoal. Queríamos transformar seus sessenta anos em algo verdadeiramente especial, mas sua modéstia nos atrapalhava. Tivemos então que recorrer a uma espécie de mentira, até mesmo à fraude, para conseguir que Kip aderisse e participasse. Arranjamos tudo sem que ele percebesse. Cinco autores famosos concordaram em fazer palestras. Reservamos o Auditório Beckman, o centro das atividades públicas do Caltech. Quando Kip soube de toda a verdade, era tarde demais para recuar.

Aqui estão apresentadas adaptações das palestras feitas naquele dia. Os palestrantes eram todos famosos e realizados e, ao

mesmo tempo, capazes de atrair o grande público. Não tínhamos nenhum outro palestrante em lista de reserva, o que dá uma indicação do prestígio de Kip na nossa comunidade. Todos os que convidamos para falar aceitaram. E não aceitaram remuneração, nem para as palestras, nem para sua edição neste livro. No sábado, dia 3 de junho de 2000, as palestras foram gratuitas, e os direitos deste livro irão para um fundo de bolsas de estudo no Caltech, com o nome de Kip.

Um evento suficientemente interessante para atrair um grande público a um auditório também deve ser interessante para muitos de vocês, que não puderam estar no lugar certo na hora certa. A este volume pode faltar a emoção viva da presença física dos palestrantes, mas em compensação sua leitura permite uma digestão mais fina de alguns dos pratos mais apetitosos, que não devem ser deglutidos com pressa.

Em um dos ensaios que se seguem, Igor Novikov, diretor do Centro de Astrofísica Teórica do Instituto Nórdico de Física Teórica (Nordita), da Dinamarca, nos fala a respeito das viagens no tempo, assunto que tem a sua estranheza e o seu encantamento mesmo para os membros de uma comunidade científica em que os buracos negros são tão triviais quanto uma calça de pijama. O tema é exposto a partir de explicações e modelos mecânicos simples sobre como evitar paradoxos ao fazermos viagens ao passado. Mesmo que não seja paradoxal, a viagem no tempo pode ser impossível. Stephen Hawking, professor lucasiano de matemática em Cambridge e um dos cientistas mais famosos do mundo, nos dá os resultados das suas pesquisas em torno da pergunta "mas quão impossível?". Veremos que a pergunta requer uma viagem aos limites do que pode ser entendido como física e que a resposta requer uma viagem ainda maior. Kip Thorne, no seu ensaio, tenta viajar para o futuro. (Isso é o que todos nós fazemos, mas Kip quer chegar primeiro.) A astronomia das ondas gravitacionais será uma realidade no futuro próximo, e Kip expõe o seu entusiasmo a respeito das descobertas extraordinárias que ela nos propiciará em um futuro não tão próximo.

Os dois últimos ensaios compõem um conjunto algo diferente das explicações científicas dos demais. Um é de autoria de Timothy Ferris, destacado jornalista e escritor especializado em ciência, que elevou o padrão da literatura sobre astronomia e cosmologia com livros como *The red limit*, *The whole shebang* e *O despertar na Via Láctea*. Ele nos fala da necessidade e das dificuldades inerentes aos textos de divulgação científica e inclui parte do texto de uma peça de teatro que pode pertencer tanto aos domínios da ciência quanto aos da arte. Alan Lightman vive também nesses dois mundos. De físico de vanguarda que adora escrever, transformou-se em escritor de vanguarda que adora a física. Para os que não estão familiarizados nem com a física nem com o Programa para Escritores do Massachusetts Institute of Technology (MIT), Alan pode ser lembrado sobretudo pelo seu êxito com o livro *Sonhos de Einstein*, de 1993. Com a sua experiência em dois tipos tão diversos de criatividade, como a artística e a científica, ele contribui com grande autoridade por meio do seu ensaio em que faz a comparação entre ambos.

Além das adaptações dos cinco ensaios, o livro contém uma breve introdução a respeito das ideias da física sobre o espaço-tempo e da história dessas ideias, escrita por Richard Price, teórico do Departamento de Física da Universidade de Utah. A introdução abre o cenário para os textos em que Timothy Ferris, Stephen Flawking, Alan Lightman, Igor Novikov e Kip Thorne fazem as suas revelações, crônicas e observações científicas.

AGRADECIMENTOS

Este livro deve a sua existência à celebração denominada Kipfest, no Caltech, em junho de 2000. Ele tem, portanto, uma dívida para com muitas pessoas que participaram da organização do evento. Nós sete compusemos o comitê organizador, mas formamos apenas um pequeno subconjunto dentre todos os que prestaram sua contribuição. Alguns desses devem ser mencionados.

Nem o livro nem o evento teriam acontecido sem o apoio financeiro e logístico da direção do Caltech e em particular graças a David Baltimore, presidente do Caltech, e Thomas Tombrello, diretor da Divisão de Física, Matemática e Astronomia da universidade. David Goodstein, vice-diretor do Caltech, merece agradecimentos especiais por ter sido o mestre-de-cerimônias das palestras.

Além do apoio financeiro do Caltech, o Kipfest contou com o financiamento muito bem-vindo de David Lee e sua companhia, Global Crossing. Obrigado, David.

Muitos ajudaram de diversas maneiras: o pessoal do Auditório Beckman, das relações públicas do Caltech, do Ateneu da universidade, Lynda Williams (a “*chanteuse* da física”) e todos aqueles que acorreram de todo o mundo ou de todo o campus do Caltech para participar. Obrigado a todos!

Eanna Flanagan

Bernard Schütz

Sandor Kovaks

Clifford Will

Richard Price

Leslie Will

Elizabeth Wood

Introdução

Bem-vindo ao espaço-tempo

Richard Price

UM EVENTO NO ESPAÇO-TEMPO

É engraçado como as pessoas demoram a fazer perguntas fundamentais, mesmo a respeito de sua própria vida. Às vezes é preciso esperar por um evento que nos leve a uma atitude de distanciamento e reflexão. Um desses eventos foi a celebração do sexagésimo aniversário de Kip Thorne. Kip (ele não se sente à vontade com nenhum outro título) é um dos mais conhecidos teóricos americanos da física do espaço-tempo e um grande divulgador dessa estranha ciência. É também uma pessoa cujo valor humano é tão singular quanto o seu intelecto, uma pessoa que afetou a vida de muitos dos que trabalharam com ele. O simpósio comemorativo dos sessenta anos de um grande cientista é algo tradicional no mundo da física, mas sem dúvida havia um sentimento mais forte no ar do Caltech em junho de 2000. A celebração foi caracterizada por uma avalanche tanto de homenagens quanto de afeto.

Movidos pela vontade e pelo sentimento do dever, cientistas que participaram de toda a carreira de Kip, de meados dos anos 60 ao momento atual, compareceram ao auditório do Caltech, de modo que os estudantes da física do espaço-tempo que ali estavam, nos intervalos das palestras de 2 e 3 de junho, tinham diante de si um museu vivo da ciência da nossa era. As peças do museu incluíam companheiros que se reconciliavam depois de antigas disputas, físicos que apresentavam desajeitadamente as suas novas esposas, assim como novos colegas, antes professor e aluno, que o passar do tempo colocava agora em pé de igualdade. O fato de que o evento coincidia com um novo milênio terá impressionado os mais impressionáveis, mas para mim havia algo mais portentoso: a

iminente inauguração de um sistema mundial de detectores destinados a mapear as ondas gravitacionais — as oscilações do espaço-tempo.

O evento em si mesmo era um testemunho da passagem do tempo. A reunião de velhos amigos e velhos rivais criava o sentimento monocromático de um filme sueco, apesar das palmeiras que compunham o ambiente externo. Era hora de fazer perguntas adiadas, como: o que leva certas pessoas racionais (será que são mesmo?) a passar a vida estudando a natureza do espaço-tempo?

Esta introdução está sendo escrita ao final de um século caracterizado pela ciência, em particular pela física. Afinal, Albert Einstein foi o nome escolhido pela revista *Time* (registre-se o significado deste título) como o homem do século. Einstein deu um início impressionante aos últimos cem anos com suas miraculosas proezas de 1905. Nesse mesmo ano ele demonstrou estatisticamente a natureza atômica da matéria e ajudou, com a explicação do efeito dos fótons sobre superfícies de metal (que lhe valeu um prêmio Nobel), a futura formulação da revolução quântica, com a qual, aliás, nunca logrou sintonizar-se. Mas tanto para os cientistas quanto para os não-cientistas, a associação que se faz com o nome Einstein refere-se ao seu terceiro milagre de 1905: a *relatividade*— a teoria da estrutura do espaço e do tempo.

Por que terá sido essa parte da sua obra, e não seu trabalho mais relevante e “útil” sobre átomos e fótons, que tornou Einstein um herói célebre? Provavelmente o fato de termos familiaridade com o espaço-tempo e pensarmos que sabemos do que se trata. Os átomos são pequenos demais e os fótons são demasiado abundantes na natureza; não temos opiniões formadas sobre essas espécies de coisas. Quando aprendemos algo a respeito delas, aceitamos o fato como parte do progresso constante e ordenado da ciência. A matéria compõe-se de (um tipo de) unidades indivisíveis; a natureza da luz é ao mesmo tempo de partícula e de onda. Quem não é cientista não tem razões para contestar a primeira afirmação nem sabe muito bem do que trata a segunda. Mas em 1905 Einstein também nos disse que o tempo não é um relógio universal que marca o tempo com a mesma velocidade para todos e que um irmão

gêmeo que faça uma viagem espacial a altíssima velocidade envelhecerá menos do que o outro que ficou na Terra. *Isso* todos sabem o que significa — e é muito estranho. O que afeta a percepção geral é que é impossível, mas é verdade.

Sentimos fascínio pelo erro. Aprendemos com o erro a respeito de nós mesmos. Não só há coisas que desconhecemos, como as que conhecemos podem estar erradas.

A relatividade, a física do espaço-tempo, com sua aura de buracos negros e de um universo em expansão, chama a nossa atenção porque torna exóticos temas da vida diária, como o espaço e o tempo. Como se o padeiro aparecesse na nossa porta dirigindo uma Ferrari e vestindo um sarongue. Acho que isso explica o fascínio que não-profissionais cientificamente letrados exercem permanentemente sobre o público. Explica também a atração que a relatividade exerce sobre pessoas de pouca paciência e muita autoconfiança. Todo professor de relatividade passa pela experiência de receber, algumas vezes por ano, uma nova teoria da relatividade apresentada por um pensador não tradicional com pendores técnicos, que não chegou a ler “todos os livros” mas sabe bem onde foi que Einstein errou.

A resposta ao “por quê” não é tão clara para aqueles de nós que são alunos, colegas ou colaboradores de Kip. Nós, sim, lemos “todos os livros” e trabalhamos com os detalhes. A pesquisa que eu faço, por exemplo, tem muito a ver com matemática aplicada, a mesma utilizada em trabalhos simples e honestos como hidrodinâmica e engenharia química. O fato extraordinário de que ela seja utilizada no contexto de colisões de buracos negros logo se torna familiar. O mesmo acontece com relação ao avião. Quando estamos dentro dele, com o cinto de segurança apertado, não nos impressionamos por termos abandonado a superfície da Terra. Mas se estamos em uma colina e vemos um avião decolar silenciosamente a partir do aeroporto distante, podemos ficar profundamente admirados. Do mesmo modo, por vezes levanto a vista dos meus cálculos e me dou conta de que estou tratando de resolver problemas que ocorrem em áreas do universo das quais é

impossível escapar. E esse é o meu trabalho de cada dia! (Mais estranho ainda: sou pago para fazer isso.)

As contribuições reunidas neste volume ilustram diversos temas diferentes que fazem parte de um tema maior. Stephen Hawking e Igor Novikov nos falam de viagens no tempo — assunto que parece estranho e iconoclástico mesmo em uma comunidade científica para a qual oá buracos negros são tão triviais quanto uma calça de pijama. Já Kip Thorne toma o caminho bem diferente das ondas gravitacionais, as oscilações do espaço-tempo que serão detectadas no futuro por meio de experiências globais, e faz previsões sobre o que está por ser descoberto. Enquanto os devaneios sobre viagens no tempo tratam de coisas que parecem impossíveis à luz das leis da natureza, os devaneios de Kip referem-se a coisas que a tecnologia tornará possíveis. Outros tipos bem diferentes de devaneios aparecem nos outros capítulos. Alan Lightman conta-nos sobre suas percepções a respeito das diferenças entre os atos criativos de escrever e de resolver um problema científico. Como comunicar as maravilhas desse tipo de ciência aos que não têm o conhecimento técnico? Tim Ferris, que alcançou grande êxito fazendo isso, nos oferece algumas respostas em sua contribuição.

Esta introdução destina-se a armar o palco onde nossos ensaístas se apresentarão. Pretendo, assim, expor minimalisticamente os contornos daquilo que os físicos fazem quando dizem que estão trabalhando sobre o espaço-tempo. Como a minha introdução perderia inevitavelmente se confrontada com outras introduções já escritas a respeito do tema, permitam-me reduzir as expectativas do leitor. Não descreverei aqui a interação entre o lado técnico e o lado humano da história, como Kip fez, de maneira tão linda, no seu recente livro *Black holes and time warps: Einsteins outrageous legacy* [Buracos negros e dobras temporais: a herança afrontosa de Einstein].¹ Tampouco explicarei as ideias introdutórias com a mesma clareza matemática e o mesmo rigor com que Edwin Taylor e John Wheeler o fizeram no seu delicioso livrinho *Spacetime physics* [Física do espaço-tempo].² Caso o leitor se interesse particularmente por esta introdução, a leitura de tais

livros será excelente. Aqui me limitarei aos aspectos superficiais e a pequenos voos ocasionais a baixa altura. Meu principal objetivo é a brevidade e isso eu consegui. Espero que esse não tenha sido meu único êxito. Acho que este texto adiciona alguma substância a certas ideias que aparecem nos textos aqui compilados.

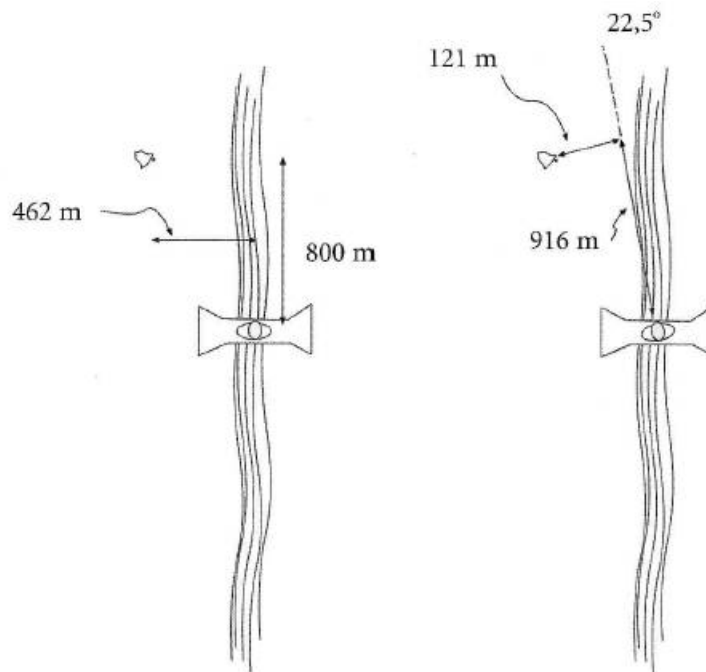
Essas questões não são novas. O interesse — talvez a obsessão — pela natureza do espaço e do tempo é tão antiga quanto o pensamento humano. Os clássicos já tinham opiniões formadas sobre o tema.³ Algumas parecem hoje claramente ingênuas e outras impressionantemente profundas. (A de Zenão, em particular, me parece ter se sustentado muito bem.) Aqui, a discussão deve limitar-se às ideias modernas, ideias que levaram milhares de anos para se desenvolver e que encontram sua implementação precisa na matemática. É uma surpresa agradável que as questões que compõem a discussão atual estejam acessíveis às pessoas que não têm um conhecimento profundo de física e matemática. O que é importante nesse ponto é considerar certas palavras-chave que têm um sentido na linguagem cotidiana e outro, mais específico e preciso, no contexto do espaço-tempo. Nesse aspecto a física não é muito diferente de outros campos. Se você não souber o que é *comer mosca*, poderá acabar comendo uma; se não souber o que é um *evento*, não poderá entender a geometria do espaço-tempo.

OBSERVADORES EM DESACORDO

A apresentação de palavras especiais não tem de ser necessariamente abstrata e aborrecida. Prova disso é o livro de Taylor e Wheeler, que apresenta palavras, ideias e raciocínios matemáticos de maneira bem clara. Prestarei a eles a mais sincera das homenagens valendo-me, com algumas modificações, das imagens que aparecem no início do seu livro.

A história começa com uma pessoa parada no meio de uma ponte que atravessa um rio estreito e retilíneo em uma planície. Ela está olhando para a direção rio acima e quer dar uma descrição *quantitativa* da localização de alguns pontos de interesse, como o sino de uma velha igreja. Há múltiplas maneiras de fazê-lo. Ela

pode dizer, por exemplo, que o sino está a 924 metros de distância, na direção que fica 30 graus à esquerda do ponto para o qual está olhando. Alternativamente, ela pode dizer que o sino está 800 metros “para a frente” (na direção rio acima) e 462 metros “para a esquerda” (à esquerda do rio — veja a figura 1). O que acontece nos dois métodos descritivos (assim como em qualquer outro) é que é necessário especificar dois números. Por essa razão, dizemos que o conjunto das localizações em uma paisagem é um mundo bidimensional. Na física costuma-se dizer que as medições são feitas por um *observador* e que o método para determinar a localização de pontos é um *sistema de referência* ou *referencial* associado ao observador. Os números específicos a que o nosso observador chegaria (como 800 e 462 metros) denominam-se *coordenadas* da localização.



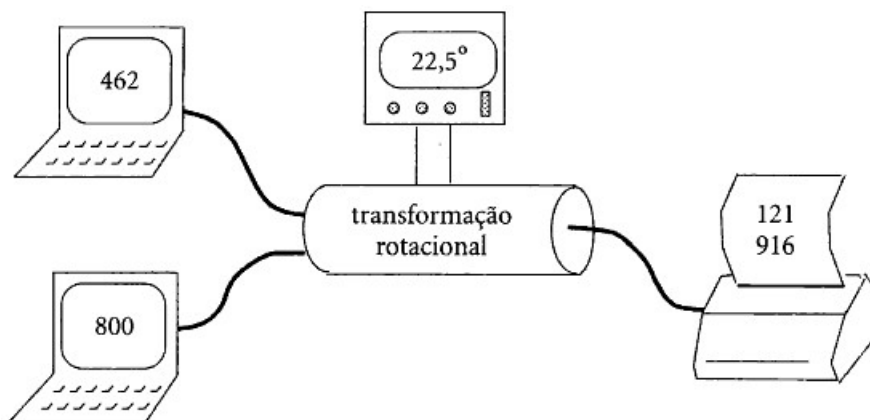
1. A mesma localização com coordenadas diferentes.

A existência e a importância dessas palavras especiais sugerem corretamente que pode haver outros observadores e outros referenciais. Este é, na verdade, o cerne da relatividade: a relação entre as medições (ou seja, as coordenadas) obtidas em diferentes

referenciais. É, portanto, crucial que exista um outro observador e que ambos estejam em desacordo quanto às medições. Digamos que o segundo observador esteja parado no meio da ponte, bem ao lado do primeiro observador. Ele também está compilando uma descrição quantitativa da paisagem, o mundo bidimensional das localizações, e também emprega o método “para a frente e para a esquerda”. Isso não causaria nenhum impacto se ele estivesse olhando rio acima: obteria os mesmos resultados do primeiro observador e não decorreria daí nenhum desacordo. Vamos supor, então, que ele esteja olhando para uma direção diferente da do primeiro observador. Essa direção será a quarta parte da diferença entre os pontos que para o primeiro observador são a “frente” e a “esquerda”. Ou seja, ele estará olhando para uma direção que está a um ângulo de 22,5 graus à esquerda da direção rio acima. Isso lhe dá um referencial diferente e coloca sua visão mais próxima à direção do sino da igreja velha. Em consequência, ele medirá coordenadas diferentes: o sino estará 916 metros à frente e 121 metros à esquerda.

Sabemos que estamos falando de um único sino em um único lugar e que os dois observadores não estão em desacordo quanto à sua localização, mas sim apenas quanto aos números (as coordenadas) que a caracterizam. Sabemos também que deve haver uma relação entre as coordenadas estabelecidas por ambos os observadores. Essa relação entre as coordenadas de quaisquer dos observadores denomina-se *transformação* — uma nova palavra especial. Trata-se da expressão matemática de um tipo de relatividade, a relação entre coordenadas medidas por dois observadores diferentes. Essa relação é dada por meio de fórmulas que se estudam nas aulas de matemática do curso secundário. Não são difíceis, mas as fórmulas matemáticas costumam desviar a atenção das ideias básicas que elas representam. Em vez de enunciá-las, na figura 2 apresento o instrumental matemático que toma como entrada as coordenadas marcadas pelo primeiro observador e dá como resultado os valores marcados pelo segundo. Logicamente deve haver outro tipo de entrada nessa máquina: a maneira pela qual especificamos a relação entre os dois referenciais.

No nosso caso, isso significa que temos de introduzir a especificação “22,5 graus”.



2. As fórmulas da transformação rotacional apresentadas como uma máquina.

A máquina da figura 2 consiste, na verdade, apenas nas fórmulas, as quais, tomadas em conjunto, seriam chamadas por um professor de matemática de *transformação rotacional*. A máquina poderia ser um chip *muito* simples, feito para executar apenas as computações triviais da transformação rotacional. Na época maravilhosa em que vivemos, construir uma máquina assim custa apenas alguns centavos.

O sistema de referenciais que nossos observadores usam tem uma característica importante. Para compreendermos esse ponto, consideremos uma maneira bem diferente de identificar estruturas: cartões para o pagamento de imposto territorial. Suponhamos que todas as estruturas da cidade sejam identificadas por números com o propósito de arrecadar taxas e impostos. Os números são designados de acordo com algum método conveniente para a contabilidade. Suponhamos também que o sistema pelo qual os números dos cartões são designados tenha mudado (talvez a prefeitura tenha comprado um computador novo). É preciso criar uma tabela para relacionar os números novos com os antigos; abaixo estão dois itens dessa tabela.

LOCALIDADE	N ^o ANTIGO	N ^o NOVO
sino	50070	CX23-004
celeiro	34210a	BX48-213

A tabela é uma relação entre dois sistemas de coordenadas e, em certo sentido, um tipo de transformação.

A intuição nos indica que esse tipo de transformação é bem diferente da transformação rotacional, mas qual é a verdadeira diferença? A intuição insiste em dizer que tanto os cartões quanto a relação entre eles são arbitrárias: eles são designados segundo a conveniência dos computadores da prefeitura. Qualquer sistema de identificação pode ser usado e “transformado” em outro sistema de identificação. Por outro lado, as distâncias para a frente e para a esquerda medidas pelos observadores na ponte não são arbitrárias. Mas qual é a instituição ou autoridade superior que garante que elas não são arbitrárias? Qual a garantia de que a transformação rotacional está correta? Em última análise, é o fato de que o local onde estão as estruturas tem uma geometria própria: a geometria (normalmente chamada *euclidiana*) do plano. Quaisquer pontos desse plano, como o sino e o celeiro, têm uma distância que os separa. Essa distância é uma verdade imutável, ainda que as coordenadas usadas para descrever os pontos sejam variáveis. Como existe uma verdade imutável que não se subordina às incertezas dos referenciais, as relações entre as coordenadas de distância dos diferentes referenciais não podem ser aleatórias.

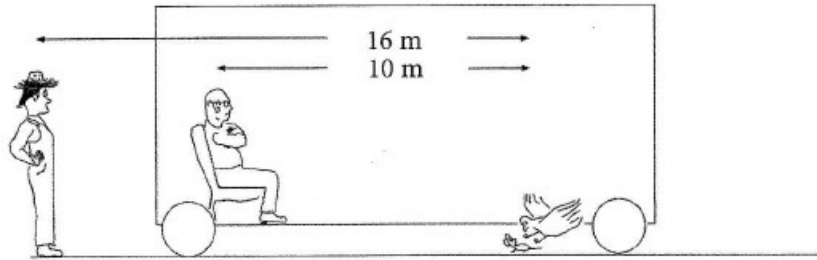
Armados *já* com nossas palavras especiais, podemos tentar uma pequena incursão no espaço-tempo. Assim como as localizações são lugares em uma paisagem, os *eventos* são lugares no espaço-tempo. Um evento é um certo lugar e um certo tempo. É uma localização tanto no tempo quanto no espaço. Evidentemente, o mundo desses eventos — o mundo que denominamos espaço-tempo — tem quatro dimensões. São necessárias três coordenadas para especificar o *onde* e uma para especificar o *quando* do evento.

Para compreender melhor esse ponto, teremos que examinar o desacordo entre os observadores, e para isso necessitaremos de

pelo menos dois observadores diferentes, com dois referenciais diferentes. Um deles será um fazendeiro parado no seu campo enquanto um trem passa vagorosamente por ele. E o segundo observador será o trem, ou um passageiro dentro dele. Nossos observadores da ponte encontraram um desacordo nas coordenadas que empregaram porque olhavam para direções diferentes e atribuíam, portanto, significados diferentes para as palavras *frente* e *esquerda*. Mas agora estamos interessados em outro tipo de relação e vamos evitar o desacordo frente/esquerda fazendo com que fazendeiro e passageiro olhem para a mesma direção. Para gerar o desacordo, faremos com que o trem desloque-se para a frente a 3 m/s. (A partir de agora, usaremos abreviaturas para metros (m), quilômetros (km) e segundos (s). Desse modo, 3 m/s significa uma velocidade de três metros por segundo.)

Há duas características importantes no cenário que estamos construindo. Uma é que simplificamos a ação considerando apenas uma dimensão espacial como importante. Só nos interessam as localizações que estão na direção dos trilhos; as distâncias perpendiculares aos trilhos são dispensáveis porque todos os eventos ocorrerão ao longo da linha férrea. Eliminamos, assim, duas coordenadas. Mais importante ainda, acrescentamos uma coordenada. Ao introduzirmos o movimento em nossa história, abrimos a porta para a entrada da coordenada do tempo.

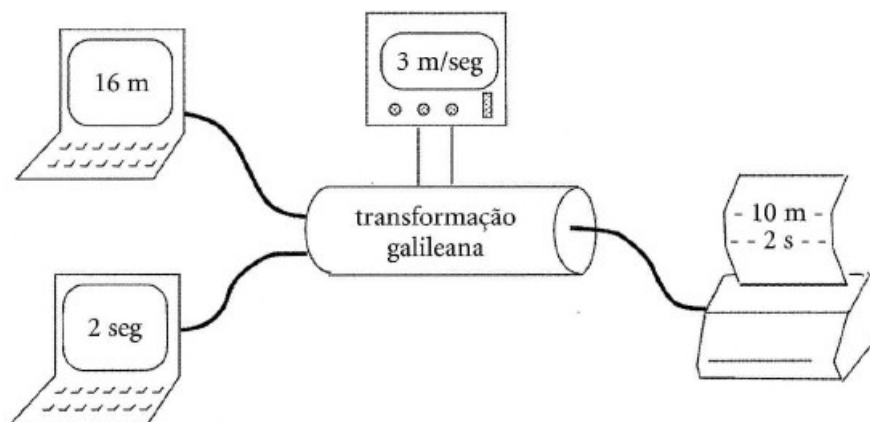
Por razões de simplicidade, diremos que o tempo $t = 0$ é o momento em que o passageiro passa pelo fazendeiro. É o momento em que eles estariam de acordo quanto às observações de um evento. É crucial que possamos observar desacordos a respeito de eventos, e para isso precisamos criar um incidente interessante no tempo $t = 2$ s. Suponhamos que nesse incidente um gavião apanhe um rato no ponto localizado dezesseis metros à frente do fazendeiro. Como o passageiro (que se move a 3 m/s) deslocou-se seis metros adiante do fazendeiro no tempo $t = 2$ s, a captura do rato acontecerá em uma localização apenas dez metros à frente do passageiro. Essa situação simples está descrita na figura 3.



3. Evento observado em dois esquemas referenciais diferentes.

O fazendeiro e o trem constituem dois referenciais diferentes, nos quais são marcadas as coordenadas de localização e tempo. A relação entre as coordenadas é evidentemente uma transformação e toma o nome de *transformação galileana*. A ideia geral da relação que ela estabelece entre as coordenadas medidas em referenciais em movimento toma o nome de *relatividade galileana*.

Na figura 4, a matemática da transformação galileana (duas equações muito simples) está representada por uma máquina. As localizações medidas pelo fazendeiro no espaço-tempo são colocadas como entrada e as localizações do referencial do trem são o resultado. Evidentemente, a máquina tem de ser adequada à relação correta entre os referenciais. Isso é fornecido pela velocidade, 3 m/s, à qual o trem passa pelo fazendeiro. Esse especificador de relação é introduzido no painel de controle da máquina.



4. Transformação galileana entre esquemas referenciais que se movem, um com relação ao outro.

Essa transformação deve ser comparada com a transformação entre as coordenadas medidas pelos dois observadores da ponte (figura 2). Ambas as transformações têm aproximadamente a mesma forma, mas apresentam diferenças importantes. Para os observadores da ponte, havia uma mistura completa entre frente e esquerda. A frente e a esquerda do primeiro observador determinavam a frente e a esquerda do segundo. Na nossa transformação entre o trem e o fazendeiro, a mistura é apenas parcial. A coordenada de distância medida pelo fazendeiro é afetada tanto pela coordenada de distância quanto pela coordenada de tempo medidas pelo passageiro, embora o tempo medido pelo fazendeiro não seja influenciado pela coordenada de distância do evento. A segunda fórmula incorporada na nossa máquina de transformação diz simplesmente que dois segundos são iguais a dois segundos. O espaço não se mistura com o tempo.

Com efeito, o que ela diz parece óbvio; demasiado óbvio para merecer um título pomposo. A expressão *relatividade galileana* é, na verdade, uma expressão moderna que só *agora* é empregada, para distinguir as noções clássicas e óbvias de espaço e tempo das noções nunca óbvias da relatividade einsteiniana. Essas noções, assim como a estética e a psicologia, constituem o pano de fundo do desenvolvimento das revoluções científicas. Muitas vezes é a história da evolução do que é e do que não é óbvio.

Embora óbvia, a relatividade galileana teve importância decisiva na física de Newton. Newton dera ao mundo o mandamento $F = m a$; a aceleração é proporcional à força. Todos os observadores (fazendeiros, trens e assim por diante) vêem as mesmas fontes de força. Todos vêem, por exemplo, a mesma curvatura de um arco e, portanto, a mesma força que impele uma flecha. Quando a corda do arco é liberada, todos concordam quanto à aceleração que a flecha ganha. Se assim não fosse, o mandamento de Newton só funcionaria em alguns referenciais; não poderia funcionar em todos. Mas a aceleração é uma medida da maneira segundo a qual a localização espacial se modifica em função da passagem do tempo. A comparação das acelerações em dois referenciais diferentes

depende das regras de transformação que se estabeleçam entre eles. Verifica-se que uma consequência da transformação galileiana é que a aceleração é *a mesma* em todos os referenciais. Ao determinar as localizações da flecha em uma sequência de tempos, o fazendeiro e o passageiro do trem chegam ao *mesmo* número para a aceleração da flecha enquanto a corda do arco o empurra. O mandamento de Newton *funciona* em todos os referenciais.

E isso incomodava Newton! Por suas próprias razões filosóficas, psicológicas ou estéticas, ele ansiava por um universo físico em que um referencial especial — o do fazendeiro, talvez — fosse o único verdadeiro para toda a física. Mas na sua física não havia razões para que ele acreditasse na existência desse referencial “correto”. Talvez a atitude de Newton se devesse à necessidade humana de encontrar algo sólido e absoluto, um esquema único e verdadeiro. Sendo assim, é interessante observar que a atitude filosófica ou psicológica dos físicos mudou muito. Às mentes e aos olhos modernos, a democracia dos referenciais é uma qualidade apreciada da mecânica newtoniana.

MAXWELL CRIA UMA CRISE

Se descontarmos o mal-estar de Newton, o mundo físico parecia fazer sentido nos séculos XVIII e XIX. O conhecimento não avança de maneira uniforme, como patins no gelo. Ele avança em impulsos, ou de repente, como uma rolha ao ser retirada de uma garrafa. Quanto mais tempo a garrafa tenha estado fechada, mais grudada nela fica a rolha. Ideias como a de que a Terra era o centro do universo tornaram-se fixas no pensamento da humanidade porque se mantiveram vigentes durante muito tempo. Passaram-se séculos sem que nenhum astrônomo questionasse essa crença, até que Copérnico o fez. Quando surgiam dificuldades, eles buscavam remediar a situação sem desacreditar o sistema. Esses astrônomos construíram um método de cálculo extraordinariamente complexo para prever e explicar os movimentos dos corpos celestes. O método original e simples de previsão teve de ser abandonado quando as condições de observação dos movimentos planetários se

aperfeiçoaram. Construções matemáticas como os *epiciclos* tiveram que ser invocadas para adaptar as previsões, e a teoria básica teve de ser remodelada para ter uma aparência de correção. Esse ciclo de aperfeiçoamentos prosseguiu para levar em conta novas observações astronômicas, por vezes com a inclusão de características extravagantes no método.

Quando vemos o que foi feito, quase não acreditamos. Como pode ser que não enxergassem que a ideia simples e elegante de que o Sol estava no centro do universo explicava tudo? Eles não conseguiram ver o que agora nos parece óbvio sobretudo por terem sido seduzidos passo a passo pelo caminho que seguiam. O começo do caminho parecia razoável e, à medida que avançavam, ficava cada vez mais difícil reconhecer que podia haver caminhos alternativos. Na ciência, há momentos críticos em que o acúmulo de pressões chega a ponto de fazer a rolha se soltar, mas a transformação desses momentos em realidade requer mentes especiais. Os ensinamentos que nos chegam consistem em fatos e erros de percepção. Os que conheciam os pormenores dos movimentos planetários foram levados pelo caminho que considerava que a Terra estava no centro do universo. Os momentos especiais requerem um gênio (certamente uma palavra apropriada aqui) para separar os fatos robustos dos dogmas frágeis. O momento crítico para o entendimento do sistema solar ocorreu no fim do século xvi, e Copérnico foi o gênio que apareceu na hora certa e no lugar certo.

Outro momento crítico surgiu no começo do século XX e dessa vez Albert Einstein foi o homem certo que apareceu na hora certa e no lugar certo. Todos temos a fantasia de recuar no tempo já possuindo o conhecimento de um fato crucial, algo que hoje é amplamente conhecido, mas que no passado era ignorado. O material correto para criar o filamento de uma lâmpada elétrica, a percepção de que as nebulosas são distantes ilhas de estrelas, a estrutura nuclear do átomo — nos momentos certos do passado, a concretização dessa intuição bastaria para que o homem que a concebeu fosse considerado um gênio. A intuição genial que ocorreu no início do século XX foi um ato simples de percepção, que

a maioria dos estudantes de física do nosso tempo conhece mais ou menos bem. Ela é matematicamente singela, sua expressão é sucinta e teve por base o trabalho de um outro gênio.

Ao final do século XIX, James Clerk Maxwell acrescentou um elemento que faltava em uma equação denominada *lei de Ampère* e, ao fazê-lo, atingiu tudo o que se sabia sobre eletromagnetismo (eletricidade e magnetismo). Quem faz matemática conhece a beleza dessa criação. A teoria de Maxwell não só explicava tudo o que se sabia sobre eletromagnetismo, como o fazia de modo tão belo que até hoje é um modelo para outras teorias.

A teoria de Maxwell consiste em quatro equações, que tratam de forças elétricas e magnéticas e que também envolvem o espaço e o tempo. Em uma das equações de Maxwell, um termo típico multiplica a força magnética em algum ponto do espaço pela coordenada espacial desse ponto. Outro termo típico representa a taxa segundo a qual a força elétrica se modifica à medida que se modifica o tempo. As equações de Maxwell são relações entre esses termos: o primeiro termo mais $4u$ vezes o segundo é igual ao terceiro, algo tão simples como dizer que $A + B = C$. Suponhamos que nosso fazendeiro, parado junto aos trilhos, tivesse que calcular todos os termos de uma das equações de Maxwell. Ele multiplicaria a força magnética em determinado ponto pela coordenada espacial desse ponto no seu referencial (do fazendeiro); verificaria as alterações na força elétrica para cada milissegundo do seu tempo; e assim por diante. Em seguida, veria se os termos calculados “somam-se”: se satisfazem a equação de Maxwell.

Suponhamos que os termos se somem e que para o fazendeiro a equação de Maxwell esteja correta. Nossa curiosidade volta-se então para o passageiro do trem. A maneira segundo a qual ele atribui as coordenadas de localização aos eventos será diferente da utilizada pelo fazendeiro, de modo que os valores dos termos da equação de Maxwell serão diferentes dos que foram calculados pelo fazendeiro. Temos então de fazer uma pergunta crucial. Os termos de Maxwell podem “somar-se” tanto para o passageiro quanto para o fazendeiro? Todas as alterações nos termos conspiram de tal

maneira que a teoria de Maxwell funciona para ambos os observadores?

A resposta é não. Se relacionarmos os termos com a relatividade galileana, as equações de Maxwell não podem funcionar em ambos os casos. Elas só podem ser válidas em um único referencial. A teoria de forças e movimentos de Newton funciona em qualquer referencial; a teoria do eletromagnetismo de Maxwell só funciona em um. Ao final do século XIX parecia que a velha suspeita de Newton estava correta. Havia, sim, um referencial especial para as leis físicas — o referencial no qual as leis de Maxwell funcionam. Como negar que esse seria o verdadeiro referencial do mundo físico?

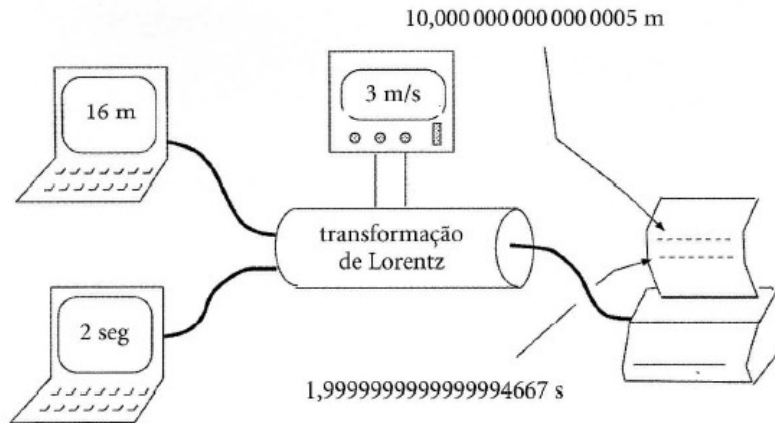
Mas, afinal, qual é esse referencial verdadeiro? Os experimentos necessários para encontrá-lo requeriam grande precisão e eram de execução difícil. A história dessa pesquisa é conhecida, assim como o resultado final: não se encontrou o referencial especial. A teoria de Maxwell funcionava tanto para o fazendeiro quanto para o passageiro. Os experimentos assim apontavam, embora a matemática indicasse que isso era impossível. Tal impossibilidade, é claro, baseava-se em determinada maneira de relacionar as coordenadas espaciais e os tempos do fazendeiro e do passageiro. Ou seja, a impossibilidade baseava-se na relatividade galileana. Sherlock Holmes, o cientista-detetive da ficção, disse ao dr. Watson que, diante de um mistério, a pessoa deve descartar as alternativas mais implausíveis até que persista apenas uma possibilidade; e essa possibilidade — não importa quão implausível — deve corresponder à verdade. Mas a priorização das plausibilidades é uma questão subjetiva. Para a maioria dos cientistas, a única conclusão possível era modificar a bela teoria de Maxwell. Acrescentar-lhe algo como os epiciclos. Ora, essas modificações, além de desajeitadas, não funcionavam: contradiziam as evidências experimentais.

A REVOLUÇÃO DE EINSTEIN

Albert Einstein, um funcionário do Departamento de Patentes de Berna, Suíça, tinha outras prioridades. Para ele, o plausível era que a relatividade galileana não estivesse correta. Para ele, o plausível era

que as coordenadas de localização e de tempo do fazendeiro e do passageiro se relacionassem de outra maneira que não a da relatividade galileana. Era necessário estabelecer outra relação entre as coordenadas. Ironicamente, a nova relação já havia sido elaborada pelo físico holandês Hendrik Lorentz. Tal relação tomou hoje o nome de transformação das coordenadas de Lorentz, e não de Einstein. A transformação de Lorentz para a captura do rato, o evento que descrevemos anteriormente por meio da transformação galileana, está ilustrada na figura 5.

A diferença entre esses resultados numéricos e os da transformação galileana (da figura 4) são mínimos, mas isso ocorre porque o painel de controle da transformação foi posto a 3 m/s. Se aumentarmos esse valor, as diferenças aumentam. Se o trem estivesse passando pelo fazendeiro a uma velocidade extremamente alta, as diferenças poderiam ser substanciais. A maneira como se revela essa dependência da transformação de Lorentz com relação à velocidade mostra um aspecto curioso. Se aumentarmos a velocidade até as proximidades de 300000 km/s, a transformação passa a fazer previsões bem exóticas. Na verdade, não poderíamos indicar uma velocidade superior a 300000 km/s. (Em termos matemáticos, isso envolveria operar com a raiz quadrada de um número negativo.) Esse limite superior da velocidade relativa que pode ser trabalhada na transformação de Lorentz é tão especial que a ele é atribuído um símbolo especial. A velocidade de 300 000 km/s é denotada por c . (O valor exato é 299 792,458 km/s, mas nós o arredondamos ligeiramente.)⁴



5. Transformação de Lorentz entre esquemas referenciais que se movem, um em relação ao outro.

Lorentz acreditava que o tempo e a distância assim descritos matematicamente não eram *verdadeiros*, mas sim o tempo e a distância que seriam medidos por instrumentos inevitavelmente distorcidos por efeitos eletromagnéticos. Se o fazendeiro representasse o referencial de repouso absoluto no universo físico, o passageiro do trem teria, necessariamente, que estar se movendo e — de acordo com Lorentz — o material dos seus instrumentos de medição seria afetado por campos magnéticos, de tal maneira que não poderia deixar de dar resultados falsos para o espaço e o tempo. Se esses valores falsos para o espaço e o tempo fossem usados nas equações de Maxwell, as equações aparentemente funcionariam. Desse modo, as equações sempre funcionavam *aparentemente*. Olhando para isso a partir da nossa perspectiva atual, é difícil não pensar em epículos, mas devemos recordar-nos de que os erros de distância e tempo eram óbvios demais e de que a rolha tinha estado na garrafa por tempo demasiado.

Einstein arrancou a rolha mostrando ao mundo que a transformação de Lorentz não era uma descrição de medições distorcidas, mas sim dos valores reais de distância e tempo. Não se tratava de algo que dissesse respeito apenas à teoria do eletromagnetismo, mas sim à natureza básica do mundo físico. A transformação de Lorentz, que Einstein utilizaria para substituir a relatividade galileana, é um conjunto simples de equações. As

equações estão no nível da matemática do segundo grau e não têm nada mais sofisticado do que operações de raiz quadrada. É por isso que o passe de mágica de Einstein teve um sabor diferente em comparação com os avanços conceituais anteriores. Era descaradamente fácil — em certo sentido — e desprovido de complexidade. Copérnico precisou de anos de observações do sistema solar e Newton teve de inventar o próprio cálculo matemático para demonstrar a aplicabilidade de suas leis do movimento. Einstein necessitou apenas de um conjunto de equações simples para ensinar o mundo a pensar de um modo novo.

Foi a enormidade do salto conceitual, e não a complexidade do seu contexto, que revelou o gênio de Einstein. Outros saltos demandaram modificações revolucionárias nas visões de mundo: o Sol, e não a Terra, estava no centro do sistema solar. Mas essas modificações implicavam a substituição de conhecimentos aprendidos. A revolução einsteiniana requeria que abandonássemos o que nossos olhos, nossa mente e nosso coração nos diziam ser a verdade.

DIAGRAMAS DO ESPAÇO-TEMPO

Misturar uma medida de distância com uma medida de tempo parece algo semelhante à maneira como um dos observadores da figura 1 misturou os dois tipos de distância — “frente” e “esquerda” — para obter novos valores para a frente e a esquerda. Não existe um significado absoluto para “frente” e “esquerda”. Se você se vira um pouco para a direita, sua nova visão de “frente” mistura a velha ideia de “frente” com uma proporção da antiga ideia de “direita”. Se você se virar completamente (ou seja, 90 graus) para a direita, haverá uma mudança total nos dois tipos de direção. Sua nova esquerda será sua antiga frente, e sua nova frente será o contrário de sua antiga esquerda.

Em certo sentido, a relação entre dois referenciais para os eventos corresponde a virar um dos referenciais no espaço-tempo com relação ao outro. Em um novo referencial, o tempo e a distância do antigo referencial misturam-se com os novos dados de tempo e

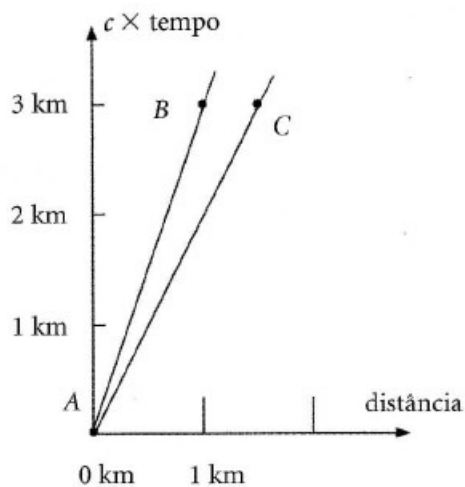
distância, tal como acontece com o observador que se vira na ponte. *A analogia, evidentemente, não pode ser perfeita!* Afinal, para os observadores da ponte, frente e esquerda referiam-se efetivamente ao mesmo tipo de coisa: distâncias. Apenas lhes demos nomes diferentes, associados às direções em que olhamos. No espaço-tempo da transformação de Lorentz, por outro lado, tempo e espaço não são efetivamente o mesmo tipo de coisa. Com efeito, uma das diferenças é que com a transformação de Lorentz não se pode converter completamente o tempo em distância e vice-versa.

O significado disso fica bem ilustrado por meio de um “diagrama do espaço-tempo”, um tipo de mapa para a localização dos eventos no espaço-tempo, no qual são marcados os valores numéricos das localizações e dos tempos dos eventos. O eixo horizontal é o *eixo das localizações*, e suas unidades são expressas em quilômetros, medida adequada para as distâncias. O eixo vertical, que é o *eixo do tempo*, requer que acrescentemos um grão de complexidade à explicação, o que nos ajudará muito na utilização do diagrama. O tempo também é denotado em unidades de quilômetros. Para isso, simplesmente multiplicamos a coordenada de tempo do evento por $c = 300000 \text{ km/s}$. Assim, se o tempo de um evento for 1 segundo, anotamos no diagrama o tempo equivalente a 300 000 quilômetros. Se um evento tiver uma coordenada de tempo de 1 quilômetro, isso significa que a coordenada de tempo será $1/300000$ de segundo.

Como estamos anotando coordenadas particulares de localização e tempo, precisamos empregar um referencial particular. Um diagrama de espaço-tempo sempre corresponde a um referencial particular. A localização de eventos em um referencial diferente requer um diagrama de espaço-tempo diferente.

Tomemos um exemplo específico, não muito distante da história do fazendeiro e do trem. Suponhamos que o diagrama da figura 6 corresponda ao referencial do fazendeiro. Tornemos as coisas mais interessantes e suponhamos que o nosso trenzinho vagaroso seja substituído por dois trens *extremamente* rápidos, que correm em trilhos paralelos. Seja B o evento em que um apito é tocado em um dos trens e C o mesmo evento no outro trem. Por uma feliz coincidência, os dois eventos ocorrem ao mesmo tempo, tempo que

o fazendeiro diz ser de 3 quilômetros, o que equivale a $1/100000$ de segundo. O evento *A* acontece quando os dois trens estão no mesmo lugar; o lugar onde está o fazendeiro e que ele próprio diz ser o "quilômetro zero". Um mínimo de conhecimento de aritmética nos informa que o evento *B* acontece . em um trem que se move à velocidade de 100 000 km/s. Como o outro trem, onde ocorre o evento *C*, percorre uma distância 50% maior no mesmo tempo, este trem se move à velocidade de 150000 km/s.



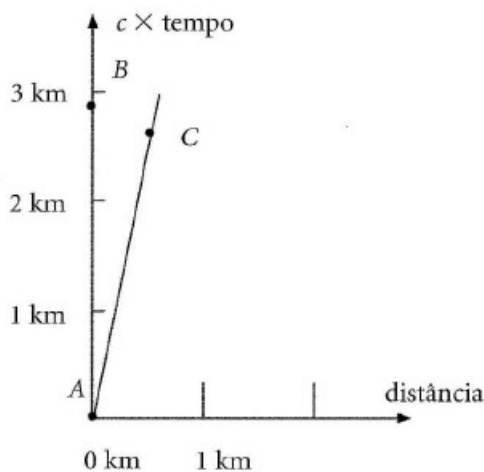
6. Diagrama do espaço-tempo para o esquema referencial do fazendeiro.

6. *Diagrama do espaço-tempo para o esquema referencial do fazendeiro.*

Na figura 6, uma linha contínua liga os eventos *A* e *B*. Todos os pontos dessa linha poderiam representar eventos que ocorrem no trem mais vagaroso. Em certo sentido, é o lugar de todos os eventos relativos à existência desse trem. Essa história do trem denomina-se *linha de mundo* do trem. O trem mais rápido tem uma outra linha de mundo, a linha *AC*, mais inclinada em direção à horizontal. Tal inclinação significa que "mais espaço é percorrido em determinada quantidade de tempo". Essa é uma maneira mais lenta de dizer "mais rápido". Qual a inclinação máxima dessa linha? Suponhamos que a inclinação seja de 45 graus. Isso significa que uma distância de 1 quilômetro é percorrida para cada quilômetro de tempo ($1/300\ 000$ de segundo). Em outras palavras, a velocidade do deslocamento

será de 300 000 km/s: a velocidade da luz — c / Assim, a inclinação máxima possível para uma linha de mundo é de 45 graus. Deslocar-se a uma velocidade superior à da luz seria uma violação das leis da física. Portanto, é fisicamente ilegal inclinar uma linha de mundo mais do que 45 graus. Esta é a bela recompensa visual que colhemos ao empregar “quilômetros de tempo” nos nossos diagramas do espaço- tempo.

O diagrama do espaço-tempo da figura 6 não é, evidentemente, uma verdade absoluta. É apenas a história vista pelo referencial do fazendeiro. A figura 7 mostra a maneira pela qual os eventos se apresentam em um diagrama de espaço-tempo que use o referencial do trem mais vagaroso. Não chega a surpreender que nesse referencial o trem permaneça no mesmo lugar, o chamado *quilômetro zero* nesse referencial. Os dois eventos, A e B , ocorrem nesse lugar, mas — é lógico — em tempos diferentes. O evento C ocorre a 2,83 quilômetros de tempo, ou 0,00000943 segundos depois do evento A . Esse número é um pouco menor do que $1/100000$ de segundo, que é o tempo que separa os eventos no referencial do fazendeiro, mas já sabemos que o tempo entre os eventos é diferente em diferentes referenciais. As coordenadas do evento C também são mostradas. Tal como no caso de B , elas foram computadas por meio do uso da transformação de Lorentz, a *rotação no espaço-tempo*.



7. Diagrama do espaço-tempo para o esquema referencial do trem mais vagaroso.

A chave para a compreensão dessa mistura entre o espaço e o tempo está na comparação das figuras 6 e 7. Na figura 7 a linha AB (ou seja, de A a B) tem uma direção unicamente temporal: não há componente espacial. Na figura 6, AB está inclinada: há um componente espacial. Valendo-nos de referenciais que se movem, um com relação ao outro, podemos inclinar as direções verticais dos diagramas de espaço-tempo um pouco para a esquerda ou um pouco para a direita, mas só um pouco. Há um limite. Se uma linha estiver predominantemente na direção do tempo (ou seja, mais para a vertical do que para a horizontal), nunca poderemos encontrar um referencial em que a linha esteja predominantemente na direção do espaço (ou seja, mais horizontal do que vertical). Uma direção predominantemente temporal pode ser inclinada, mas não pode ser transformada em uma direção predominantemente espacial.

Do mesmo modo, uma direção predominantemente espacial não pode ser transformada em uma direção predominantemente temporal. Veja bem na figura 6 a direção do evento B para o evento C . Como ambos acontecem ao mesmo tempo (no referencial do fazendeiro), a direção de B para C é unicamente espacial: É horizontal. Na figura 7, a linha entre os eventos B e C já não é horizontal. Agora há uma diferença de tempo entre os eventos, mas a linha ainda é mais horizontal do que vertical. Se uma direção é predominantemente espacial em um diagrama de espaço-tempo, ela será predominantemente espacial em todos os diagramas.

A maneira mais simples de visualizar essas coisas é lembrar-se de que as linhas de 45 graus nos diagramas de espaço-tempo são barreiras absolutas à rotação do espaço e do tempo.

MÁQUINAS DO TEMPO

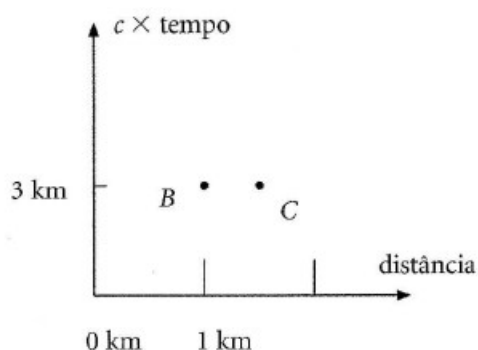
Todos nós viajamos no tempo. Sem esforço e provavelmente sem escolha, avançamos sempre. Contudo, a expressão *viagem no tempo* é associada à ideia de que nos desviemos do caminho normal e andemos em direção ao passado. Explorando o vocabulário que acabamos de desenvolver, podemos descrever essa situação de

maneira mais útil. Suponhamos que você esteja presente em um evento E . Será possível voltar à mesma localização no espaço em um tempo ligeiramente anterior? Naturalmente, essa possibilidade parece maravilhosa. Você poderia voltar no tempo e colocar um esparadrapo na boca antes de dizer aquela besteira que disse. Poderia impedir que você próprio investisse naquela companhia de alta tecnologia que parecia tão promissora um ano antes. Não nos ocuparemos aqui das questões de consistência lógica que tais fantasias suscitam; Igor Novikov dará a elas o tratamento capital que devem ter. Aqui nos ocuparemos de algo menor: estabelecer as ideias básicas, assim como o vocabulário do assunto. O que descrevemos aqui na introdução será apenas um mecanismo para viajar no tempo — provavelmente o mais simples de todos, ou o mais simples de descrever. Novikov descreverá um mecanismo correlato mas diferente, que usa um campo gravitacional forte. Stephen Hawking mencionará um terceiro mecanismo, que envolve cordas cósmicas.

Podemos identificar desde o princípio uma característica que interessa a todos os mecanismos. Se você pudesse voltar à localização de E alguns momentos antes de o evento E ocorrer, bastaria esperar alguns momentos e estaria de volta a E . Você teria visitado o mesmo evento duas vezes. Seria como se começasse a andar em algum ponto da linha do Equador sempre na direção leste até retornar ao ponto de partida. O seu caminho seria fechado. A viagem no tempo do evento E de volta a E ocorreria por um caminho similar no espaço-tempo, caminho que os físicos do espaço-tempo denominam "curva ou caminho fechado de tipo temporal". Por que "de tipo temporal"? Porque quem se desloca ao longo desse caminho está sempre avançando no tempo. O seu relógio estará sempre marcando a progressão das horas em direção ao futuro. Os poucos átomos radioativos que estão no seu corpo continuarão a desintegrar-se, e os fragmentos radioativos não voltarão a unir-se. O seu coração estará batendo da maneira usual, e não "de frente para trás", injetando sangue venoso nas artérias. Você, lamentavelmente, estará envelhecendo e não rejuvenescendo. E será seu eu mais

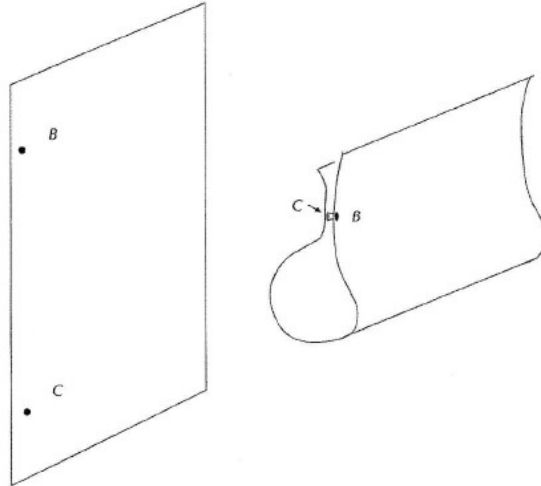
velho quem regressará (se esta for a palavra correta) para o evento E no espaço-tempo.

O que é preciso para viajar em uma curva fechada de tipo temporal? A ideia essencial para um mecanismo básico é a que aparece na figura 6. Por razão de simplicidade, o diagrama está repetido na figura 8, que mostra apenas os eventos B e C . B e C ocorrem ao mesmo tempo (no referencial do fazendeiro, que construiu este diagrama de espaço-tempo), mas C está meio quilômetro à direita de B . Suponhamos então que haja um túnel secreto, um atalho no espaço, para ir da localização do evento B para a do evento C . Suponhamos também que ao longo dos trilhos, na marca de 1 quilômetro (a localização do evento B), haja algo que se assemelhe a um poço. E suponhamos que se você pular dentro do poço estará instantaneamente na marca de 1,5 quilômetro (a localização do evento C).



8. Dois eventos que ocorrem ao mesmo tempo em um esquema referencial.

É possível ter uma ideia do significado desse atalho. Provavelmente é mais fácil ter uma noção desse atalho do que da geometria do espaço-tempo, que logo vamos encontrar. Pelo menos, estamos tratando aqui apenas de um atalho no espaço, e não no espaço-tempo. Afinal, bem ou mal, somos capazes de imaginar o espaço.



9. Atalho do tipo buraco de minhoca entre dois pontos em uma geometria planar.

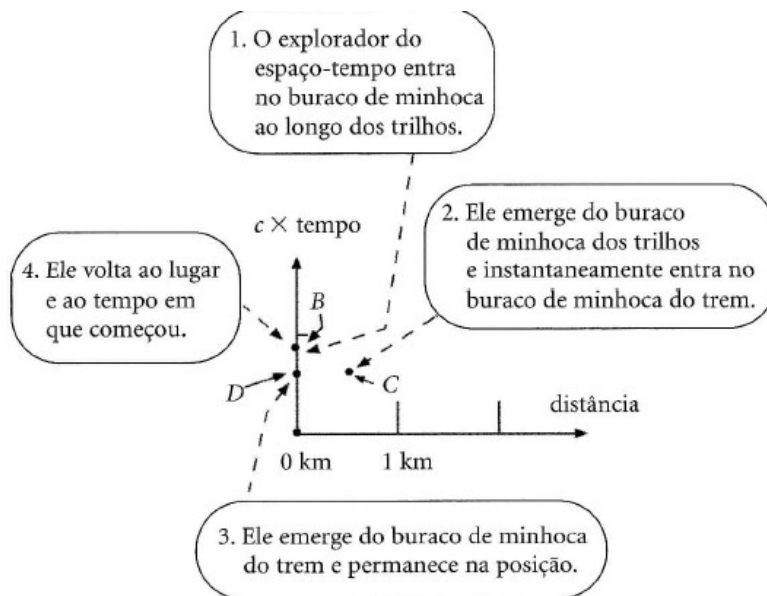
Consideremos uma folha LISA de papel de extensão infinita, embora só possamos ilustrar uma porção finita dela. No pedaço de papel que aparece à esquerda, na figura 9, estão marcados dois pontos negros, B e C. A distância (ou seja, a distância mais curta) entre esses dois pontos é, digamos, 1 metro. Mas suponhamos que o papel esteja dobrado como aparece à direita na figura, e que exista um túnel muito pequeno, como uma ponte, ou um buraco de minhoca, que vai do ponto B ao ponto G. À parte essa possibilidade de introduzir o buraco de minhoca, o papel não passa por nenhuma outra modificação importante ao ser dobrado. Em particular, as distâncias que se medem ao longo do papel (por exemplo, o comprimento de uma linha nele desenhada) permanecem constantes quando o papel é dobrado, de modo que a geometria do papel não se modifica. Mas o buraco de minhoca nos proporciona um atalho de B para C, e ele pode ser tão pequeno quanto desejemos. Esse é o tipo de buraco de minhoca que queremos ter entre as marcas de 1 quilômetro e 1,5 quilômetro ao longo dos trilhos. O modelo do papel dobrado evidentemente não é perfeito. A superfície é bidimensional, e o que nos interessa é um buraco de minhoca entre dois pontos no mundo espacial tridimensional do fazendeiro e dos trilhos. (Nos nossos diagramas de espaço-tempo usamos apenas uma dimensão

espacial, mas o buraco de minhoca entre dois pontos ao longo dos trilhos tem de existir em três dimensões.)

Até recentemente, os cientistas do espaço-tempo não pensavam muito em buracos de minhoca que ligam diferentes lugares no espaço. Em meados da década de 80, Kip Thorne começou a interessar-se por estudar a maneira pela qual se poderiam usar buracos de minhoca espaciais para construir máquinas do tempo. Em seguida, muitos físicos estudiosos do espaço-tempo decidiram participar das discussões sobre os buracos de minhoca. Se você quiser saber como tudo isso começou, com uma história de ficção científica de Carl Sagan, veja o capítulo 14 do famoso livro de Kip intitulado *Black holes and time warps*.

Mas como é que esses buracos de minhoca espaciais possibilitam as viagens no tempo (ou melhor, para empregar uma expressão mais sofisticada, as curvas fechadas de tipo temporal)? Para examinar essa matéria, suponhamos que um explorador do espaço-tempo testemunhe o evento B e que, mergulhando em um buraco de minhoca espacial entre B e C , encontre-se, de repente, no evento C . No evento C , passa um trem à velocidade de 100000 km/s. É interessante observar como os eventos B e C aparecem no referencial desse trem. Já apresentamos esse diagrama do espaço-tempo, na figura 7. A parte relevante da figura aparece de novo na figura 10.

Até aqui, nosso explorador do espaço-tempo viajou de B a C . Suponhamos agora que o trem seja bem longo e que *também* tenha um buraco de minhoca espacial. Estamos realmente com sorte: uma das pontas (ou "bocas") do buraco de minhoca do trem está justamente na marca de 1,5 quilômetro quando o explorador reemerge do buraco de minhoca dos trilhos (evento C).



10. O espaço-tempo para o esquema referencial do trem em movimento

Sem perda de tempo, ele toma o trem e entra na boca do buraco de minhoca do trem que está bem à sua frente. Toda essa atividade ocorre no evento C. Por uma sorte ainda mais incrível, a outra boca está bem na marca do quilômetro zero, no trem. O explorador reemerge, quase ao mesmo tempo, por essa boca do buraco de minhoca, que é bem curto. Na figura 10, o evento do seu reaparecimento nessa boca é indicado como evento D. Observe que os eventos C e D estão na mesma posição vertical na figura 10. Essa é a representação gráfica do fato de que praticamente não transcorre nenhum tempo entre a entrada no buraco de minhoca do trem e a saída dele, que acontecem, portanto, essencialmente ao mesmo tempo (no referencial do trem). A figura 10, afinal de contas, é uma descrição de eventos que ocorrem nesse referencial.

Ele viajou pelo caminho B—C—D. É fácil imaginar que a sua cabeça esteja rodando, e por isso ele trata de manter o equilíbrio dentro do trem, parado na mesma localização no referencial do trem, mas não no mesmo tempo. Sem se mover no espaço, ele se “move”, na figura 10, do evento D para o B. Ele completou uma curva fechada de tipo temporal e voltou para B, o lugar e o tempo em que começou.

Bastam duas coisas para essa viagem “de ida e volta” pelo espaço-tempo: em primeiro lugar, é necessário fazer certa rotação nas direções do espaço-tempo. Essa é uma consequência imediata da transformação de Lorentz, e poucos são os físicos que contestariam a operação. Em segundo lugar, precisamos de buracos de minhoca espaciais, e estes, sim, têm sido contestados por muitos físicos. Não se sabe ainda com certeza, mas parece que as leis da física não permitem buracos de minhoca espaciais, assim como também não permitem máquinas do tempo. Stephen Hawking descreve no seu ensaio como os efeitos da mecânica quântica (provavelmente) destruiriam qualquer buraco de minhoca em formação.

POR QUE O ESPAÇO-TEMPO TEM UMA GEOMETRIA?

Embora haja claras diferenças de detalhes entre diagramas de espaço-tempo, mapas de eventos e mapas com pontos em um plano bidimensional, também existem semelhanças fascinantes. As duas perguntas que se podem fazer aqui são: (1) Será que eles são de fato a mesma coisa? e (2) o que quer dizer “a mesma coisa”?

A matemática da rotação — as equações da transformação rotacional — são uma expressão do fato de que o plano tem uma *geometria*. Existe uma relação ordenada de distâncias que se mantém inviolável, e a maneira de descrever as distâncias tem de ser compatível com essa realidade geométrica subjacente. A matemática rotacional é simplesmente a ponta de um inescapável iceberg. A geometria é que é o iceberg: a realidade sólida e grande.

E a transformação de Lorentz? Também existe um iceberg abaixo dela? Será a transformação de Lorentz apenas a descrição de uma relação garantida por uma geometria de eventos subjacente? Não há resposta para isso, uma vez que não existe um significado destituído de ambigüidade para a realidade subjacente à matemática. Suponhamos que a matemática rotacional nos seja dada como algo que descreve precisamente a relação entre as medições feitas em diferentes referenciais (os observadores da ponte). Um metafísico poderia afirmar tranqüilamente que a

existência da geometria é simplesmente uma construção mental que nos ajuda a lembrar a matemática rotacional. Não é preciso supor que a geometria seja real.

A maior parte dos físicos não tem paciência para esse tipo de argumentação. No caso da geometria do plano, parece carecer de sentido pretender que a geometria não seja real. Mas a defesa apropriada da geometria não pode ser do tipo “eu sei o que estou vendo”. Ela deriva do fato de que a geometria é extraordinariamente útil, pois não só nos ajuda a lembrar a matemática rotacional como também nos ajuda a manipular a matemática e a identificar novas relações. Ainda que a geometria não fosse real, sua utilidade é tal que isso basta para torná-la real.

Quando Einstein propôs que a transformação de Lorentz descreve a relação entre as coordenadas de eventos em diferentes referenciais, ele *não se referiu* a nenhuma geometria em particular. No seu documento original de 1905, que estabeleceu a relatividade, Einstein apresentou a transformação de Lorentz como a única realidade. Foi Hermann Minkowski quem o advertiu para o fato de que tais transformações poderiam ser vistas como expressões de uma geometria subjacente, que chamaríamos agora de 'geometria de Minkowski para o espaço-tempo dos eventos'. A geometria de Minkowski baseava-se na maneira pela qual ele identificou um novo tipo de distância que separa os eventos, combinando o espaço e o tempo. Em diferentes referenciais haverá desacordo a respeito do tempo que separa os eventos e a respeito da distância espacial entre eles, mas haverá acordo a respeito da distância de Minkowski.

A princípio, a geometria de Minkowski parecia uma construção interessante, mas rapidamente ela se tornou tão útil que a ideia de que fosse apenas uma construção foi se apagando. Hoje, a relatividade einsteiniana é vista universalmente como a descrição de um espaço-tempo de eventos em conjugação com a geometria de Minkowski, enquanto a transformação de Lorentz é uma espécie de rotação nessa geometria do espaço-tempo.

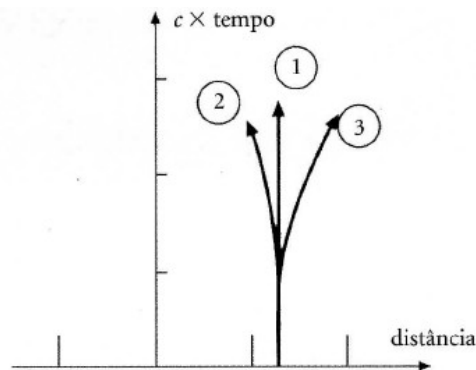
POR QUE A GEOMETRIA DO ESPAÇO-TEMPO É “CURVA”?

Uma das razões da importância da apresentação da ideia de geometria do espaço-tempo por Minkowski está em que ela permitiu a Einstein a concepção de uma geometria curva do espaço-tempo para descrever a gravidade. A própria expressão *espaço-tempo curvo* provoca de tal maneira a imaginação que com notável frequência é tida como incompreensível. Sob certo ângulo, contudo, a argumentação de que a gravidade encurva o espaço - tempo não só é compreensível mas até mesmo obrigatória. O que efetivamente *temos* de abandonar é a esperança de visualizar o espaço-tempo curvo com a clareza com que visualizamos superfícies espaciais curvas bidimensionais. Não pense o leitor que os teóricos que estudam o espaço-tempo constituem algum tipo de seita formada por aqueles que conseguem *visualizar o* espaço-tempo quadridimensional curvo. Não podem. (Espero não estar falando aqui apenas em meu nome.) Afinal, trata-se do *espaço-tempo*! E quadridimensional! Podemos desenhar diagramas, mas eles serão apenas sugestivos, muitas vezes metafóricos e de vez em quando potencialmente enganadores. A incapacidade de visualizar o espaço-tempo curvo retarda, mas não limita a capacidade de compreendê-lo. Podemos contar com a matemática. E com as palavras.

As ideias começam com a consideração das linhas de mundo, as linhas que mostram os eventos de um objeto que avança no tempo. As linhas de mundo das figuras 6 e 7 referem-se a trens em dois referenciais diferentes. Elas têm uma inclinação constante (o ângulo que marca seu desvio da vertical). Isso significa que a variação das distâncias é sempre proporcional à variação dos tempos: são linhas de mundo de velocidade constante. Mas os objetos não permanecem em velocidade constante quando estão sob a ação de alguma força. Suponhamos que na região do espaço-tempo ilustrada na figura 11 ocorra uma forte influência elétrica. Digamos que ela seja causada por uma forte presença de carga elétrica positiva no lado direito da figura.

Um objeto eletricamente carregado que esteja na área da figura 11 sofrerá uma aceleração (ou seja, mudará de velocidade) devido à influência elétrica. Essa modificação de velocidade — essa aceleração — aparecerá no diagrama de espaço-tempo como a

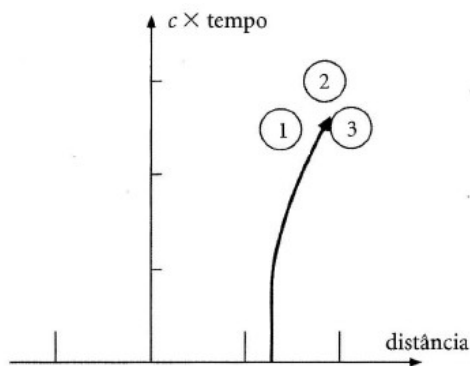
variação da inclinação da linha de mundo. Como a linha de mundo 1 da figura é vertical, ela tem de contar a história de um objeto sem carga elétrica, que, portanto, não sofre aceleração. (Além de ser reta, essa linha de mundo é vertical, o que significa que o objeto não só não sofre aceleração, mas também permanece em uma mesma localização nesse referencial.) A forma da linha de mundo 2 nos diz que a partícula por ela representada tem carga positiva, pois está acelerando em direção oposta à da carga positiva (escondida em algum lugar à direita) que cria a influência elétrica. Do mesmo modo, a linha de mundo 3 ilustra os eventos de uma partícula com carga negativa. Observando bem, vê-se que a linha de mundo 3 está mais inclinada do que a 2; sua partícula está experimentando uma aceleração maior. As duas linhas podem representar um próton e um elétron. Eles têm cargas elétricas de valor igual e sentido oposto, e o elétron tem massa muito menor, o que explicaria a maior inclinação da linha de mundo 3.



11. Linhas de mundo de partículas em uma região do espaço-tempo sujeita a influência elétrica.

A figura 11 contém um ponto crucial: cada linha de mundo nos diz algo a respeito das propriedades físicas da partícula que representa. Comparemos essa situação com as linhas de mundo que representam a influência gravitacional. Suponhamos que a região do espaço-tempo que aparece na figura 12 sofra uma influência gravitacional devida a uma grande massa, no lado direito da figura. As linhas de mundo 1, 2 e 3 representam uma bola de boliche, um lenço e um *oquá*, respectivamente. A bola de boliche e o lenço,

livres da resistência do ar, sofrem exatamente a mesma aceleração sob a ação de uma influência gravitacional; elas se inclinam na mesma proporção. O *oquá* é empregado aqui para designar “um objeto qualquer”. Qualquer que seja sua natureza, sua inclinação será proporcionalmente igual à da bola de boliche e à do lenço.



12. Linhas de mundo de partículas em uma região do espaço-tempo sujeita a influência gravitacional.

O que nos interessa na figura 12 é que as linhas de mundo inclinadas informam tudo a respeito da influência da gravidade nessa região do espaço-tempo e que uma única linha de mundo descreve a influência da gravidade sobre todo e qualquer objeto. O ponto de vista de Einstein, muito razoável, aliás, era que a própria forma da linha de mundo — e não uma “força” — seria a descrição adequada da gravidade. Segundo a descrição de Einstein, os objetos que sofrem apenas influência gravitacional só se movem em linhas de mundo especiais. Os detalhes dessas linhas de mundo contêm os detalhes da influência gravitacional.

O que são essas linhas especiais no espaço-tempo? Em uma região do espaço-tempo — o espaço-tempo de Minkowski — que esteja livre da gravidade, os objetos que estejam também livres de outras influências movem-se sempre em uma direção fixa e a velocidade constante. Suas linhas de mundo são retas. Conhecemos, portanto, um exemplo de linha especial, o que nos dá uma pista sobre os aspectos globais do que queremos saber. Acontece que as linhas retas não existem em qualquer geometria. Se tentamos construir curvas com todas as propriedades das linhas retas,

normalmente fracassamos. Consideremos um exemplo comum (e bastante bom): a superfície de uma Terra perfeitamente esférica. É possível construir duas linhas que conservam sempre a mesma distância entre elas, como acontece com as linhas retas paralelas entre si? Se verificarmos que sim, que é possível traçar uma linha reta em uma direção qualquer a partir de um ponto qualquer, diremos que estamos trabalhando em um espaço (ou espaço-tempo) “plano”. Em outra hipótese, o espaço-tempo será curvo.

Em um espaço ou espaço-tempo curvo há uma generalização simples do conceito de linha reta: é a curva mais reta possível que pode ser desenhada. Tal curva toma o interessante nome de *geodésica*. Se atentarmos para uma região diminuta de uma geometria curva, ela nos parecerá quase plana. Se essa região contiver uma linha geodésica, essa linha será quase reta.

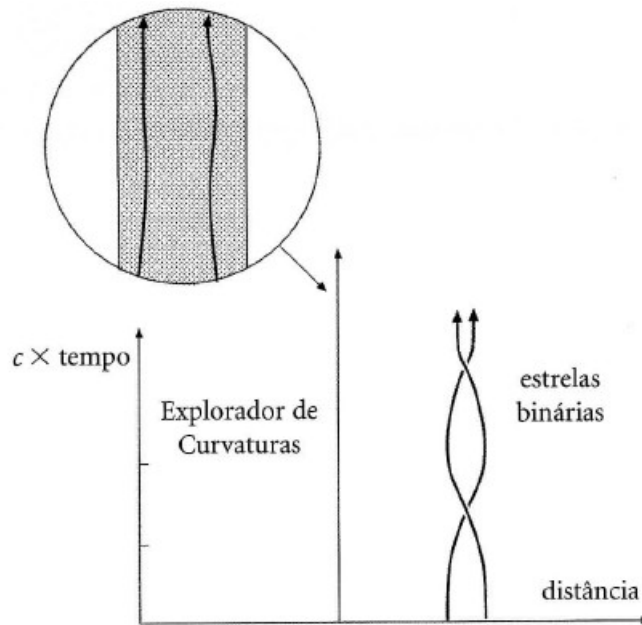
Para que a gravidade possa ter suas propriedades familiares, as linhas de mundo dos objetos que sofrem a influência da gravidade não podem ser linhas verdadeiramente retas. Consideremos um exemplo simples: dois satélites em órbita em volta da Terra quase sofrem uma colisão. Algumas órbitas depois, o mesmo volta a ocorrer. Isso significa que as linhas de mundo dos satélites tocam-se (ou quase se tocam) em dois lugares. Para as linhas retas isso é impossível. A conclusão é inevitável: para que o espaço-tempo possa apresentar efeitos gravitacionais, ele tem de ser curvo.

Embora a matemática das curvas especiais, as geodésicas, não seja trivial, tampouco chega a ser terrivelmente difícil. Uma vez especificada uma geometria — ou seja, uma vez definida uma fórmula que nos informe as distâncias entre os pontos de determinado espaço ou espaço-tempo —, obter as geodésicas é relativamente fácil. Na maioria dos cursos de pós-graduação universitária sobre a teoria de Einstein, a matemática das curvas especiais é ensinada logo no início. O que se ensina muito mais tarde é a parte difícil da teoria: a maneira como o conteúdo do espaço-tempo (as estrelas, os planetas etc.) determina a geometria do espaço-tempo. Felizmente, podemos saltar essa parte sem perder muito da compreensão da teoria. Basta ter em mente que

existe uma receita matemática para determinar a geometria do espaço-tempo.

ONDAS GRAVITACIONAIS

Mesmo sem conhecer em detalhe a maneira como a matéria encurva a geometria do espaço-tempo, conhecemos algumas características inerentes à conexão matéria-curvatura. Uma distribuição desigual de matéria produz curvaturas desiguais. A figura 13 é uma ilustração sugestiva das linhas de mundo de um par de estrelas binárias — duas grandes estrelas que orbitam muito próximas, uma ao redor da outra. Observemos que à medida que o tempo passa (ou seja, à medida que seguimos as linhas de mundo de baixo para cima no diagrama), as posições das estrelas modificam-se durante o seu trajeto orbital e, portanto, a “fonte” da gravitação também se modifica. Isso significa que haverá variações na geometria do espaço-tempo nas proximidades das estrelas binárias. Suponhamos que uma nave espacial de ficção científica, o *Explorador de Curvaturas*, esteja nesse mesmo rincão da galáxia, sujeito, portanto, às mesmas variações da curvatura do espaço-tempo. Que *significa* isso? Qual a percepção que os “curvonautas” terão dessas variações?



13. Ondas gravitacionais produzidas por estrelas binárias.

A primeira resposta que vem à cabeça é errada. Os curvonautas não sentirão que a nave espacial fica balançando e jogando para um lado e para o outro à medida que passa pelas variações do espaço-tempo curvo. A razão disso deriva da seguinte pergunta: “balançando e jogando com relação a quê?”. As variações do movimento da nave espacial se dariam com relação a qual referencial supostamente “fixo”? Se a nave não estiver acionando os seus jatos de correção e se não estiver sendo bombardeada por micrometeoros, a única influência que se exerce sobre ela será a da gravidade. E ela se moverá pela linha mais direta possível (uma geodésica). De certa maneira, estará navegando no espaço-tempo do mesmo modo que um balão de gás navega no ar. Os passageiros do balão podem perceber seu movimento com relação ao solo, mas para os curvonautas não existe um solo fixo, e sim apenas o espaço-tempo.

A razão pela qual os curvonautas não logram perceber as oscilações da nave espacial dá uma ideia do que eles *podem* ver. Eles só podem perceber o movimento de alguma coisa com relação a algo mais. Façamos com que focalizem cuidadosamente a atenção em dois pequenos objetos dentro (ou fora) da nave espacial.

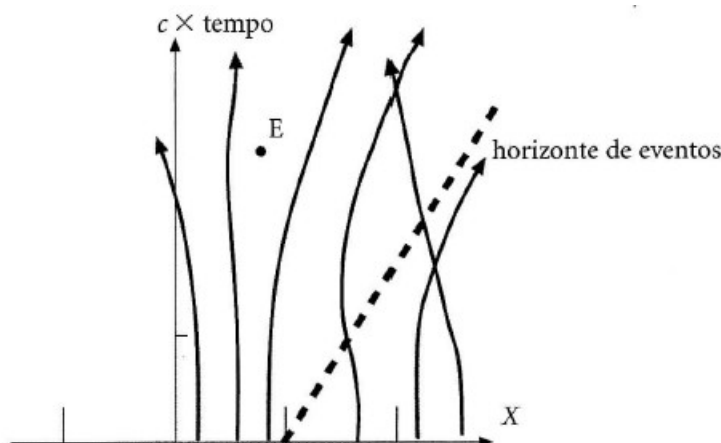
Façamos também com que os curvonautas isolem os objetos, com cuidado obsessivo, de todas as influências, exceto a inevitável e sempre presente influência da gravidade. Em princípio, os curvonautas poderão então detectar oscilações na distância entre os dois objetos. O que estarão observando será o equivalente, no espaço-tempo, das oscilações de distância que ocorrem entre duas linhas, as mais diretas possíveis, em uma superfície ondulada.

Nos detalhes da teoria, há muitas similaridades entre os efeitos devidos às estrelas binárias e os devidos a cargas elétricas oscilantes. As cargas criam influências elétricas e magnéticas variáveis que têm certas propriedades "ondulatórias". Em especial, a força das ondas eletromagnéticas causadas pelas oscilações decresce, de uma maneira muito particular e simples, com o aumento da distância com relação às cargas oscilantes. Se a distância das cargas aumenta duas vezes, a influência oscilatória será duas vezes menor. Outra propriedade importante é a de que as influências oscilatórias se propagam à velocidade c . As oscilações do espaço-tempo, devido às estrelas binárias ou a qualquer outra fonte gravitacional variável, também têm essas duas propriedades e denominam-se ondas gravitacionais.

HORIZONTES E BURACOS NEGROS

Logo passaremos a considerar campos gravitacionais muito fortes e regiões do espaço-tempo intensamente recurvadas, mas as coisas ficarão mais claras se começarmos com gravidade zero em um espaço-tempo de Minkowski. A figura 14 é um diagrama de espaço-tempo para um espaço-tempo de Minkowski, desenhado segundo a convenção usual, de modo que uma linha de mundo com 45 graus de inclinação move-se à velocidade c . As múltiplas linhas de mundo que aparecem na figura não se destinam a representar objetos que se movam apenas sob a influência da gravidade. Como as curvas especiais do espaço-tempo de Minkowski são retas, as linhas de mundo da figura têm de representar objetos que estão sob a ação de forças não-gravitacionais. Poderíamos supor, por exemplo, que as forças não-gravitacionais que causam o encurvamento das

linhas de mundo sejam o empuxo dos motores de foguetes e que as linhas de mundo sejam as linhas dos foguetes.



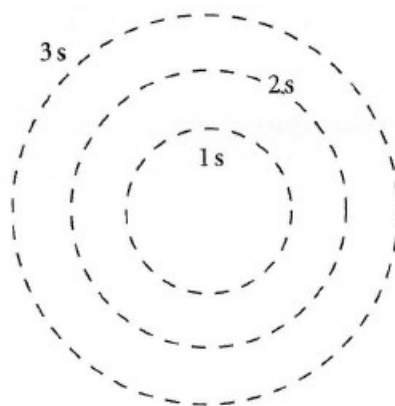
14. Horizonte de evento simples em um espaço-tempo de Minkowski.

A figura 14 contém outro aspecto interessante: uma linha tracejada de 45 graus. Podemos pensar que essa linha representa uma parede que é infinita nas direções y e z (que não aparecem na figura) e se move com a velocidade c na direção x . O interessante é que as linhas de mundo só podem cruzar essa linha da direita para a esquerda, e nunca da esquerda para a direita. Isso tem a ver com o fato de que as linhas de mundo nunca podem desviar-se mais de 45 graus da vertical. É também uma necessidade decorrente de que a "parede" representada pela linha tracejada move-se da esquerda para a direita à velocidade c . Para atravessar a parede da esquerda para a direita, um objeto teria que estar se movendo a uma velocidade superior a c . Assim, a linha tracejada é uma barreira de mão única que divide o espaço-tempo em duas regiões. Quaisquer objetos que estejam do lado esquerdo da linha nunca poderão passar para o lado direito.

A linha tracejada tem uma propriedade ainda mais estranha: Nenhum objeto que esteja do lado direito dela pode ter qualquer informação a respeito de qualquer evento que ocorra do lado esquerdo. Consideremos o evento E , que ocorre no lado esquerdo. A linha de mundo de qualquer sinal emitido a partir do evento E , seja pelo correio, seja por via eletrônica, nunca poderá cruzar a linha

tracejada e chegar a um observador no lado direito. Por essa razão, a linha tracejada é denominada horizonte de eventos. Assim como os navegadores não conseguem ver navios além do horizonte, também os observadores do lado direito do horizonte não conseguem “ver” (receber informações sobre) os eventos que ocorrem no lado esquerdo.

Um horizonte de eventos com a forma algo diferente aparece na figura 15. Os círculos tracejados representam três tempos diferentes de uma superfície esférica cujo raio aumenta 300 000 quilômetros a cada segundo. A superfície esférica expande-se, portanto, à velocidade c . Já sabemos que um objeto que esteja no interior da esfera em expansão não pode cruzar o limite da esfera. Vemos também que um observador que esteja fora da esfera em expansão não pode receber informações a respeito de eventos que ocorram dentro da esfera. Portanto, a esfera divide o espaço-tempo em duas regiões, tal como o faz a linha tracejada da figura 14.

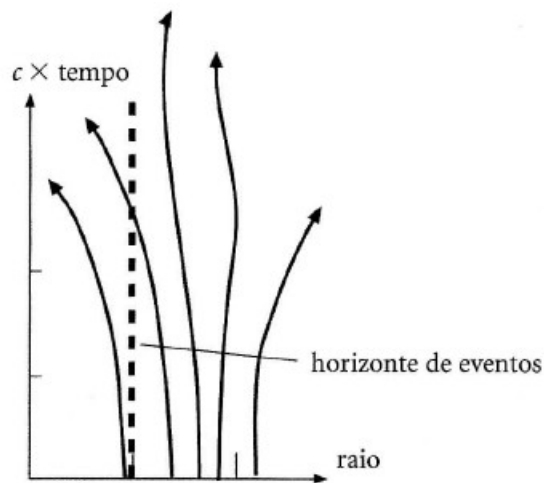


15. Horizonte de uma esfera em expansão no espaço-tempo de Minkowski.

Vimos dois exemplos de horizontes de eventos, mas eram construções matemáticas que não nos dizem nada a respeito da gravidade. Consideremos agora um campo gravitacional esfericamente simétrico e muito forte, no qual a gravidade exerça uma atração em direção a um ponto central, com força igual em todas as direções e sem se alterar no tempo. O espaço-tempo correspondente é denominado *espaço-tempo de Schwarzschild* na teoria de Einstein.⁵ A figura 16 nos mostra um novo tipo de

diagrama de espaço-tempo. Nele, o eixo vertical, como sempre, indica o tempo, mas o eixo horizontal refere-se ao raio.

Há uma grande diferença entre este diagrama de espaço-tempo e o diagrama usual. Este ilustra uma região do espaço-tempo com campos gravitacionais fortes e representa, portanto, um espaço-tempo curvo. Nessa região não temos o sentido claro de tempo e de distância que tínhamos no espaço-tempo de Minkowski. Esse é um conceito difícil, mas importante. O símbolo $c \times \text{tempo}$ é uma coordenada adequada para marcar eventos no espaço-tempo, mas não é o tempo que o relógio marca.⁶ Do mesmo modo, o "raio" não é uma medida de distância, mas sim uma coordenada conveniente. Vale a pena explicar por quê: ela propicia a área correta através da fórmula comum para a determinação da superfície. Isso significa que uma superfície esférica com a coordenada r tem a área $4\pi r^2$, que é a relação usual que conhecemos desde a escola secundária. Essa não é uma afirmação trivial, uma vez que o espaço-tempo é curvo. A mesma coincidência com a simplicidade já não se aplica à distância radial; a coordenada radial r , que nos dá a área correta, *não* nos dá a medida correta das distâncias radiais.



16. Horizonte de evento de Schwarzschild.

A figura 16, portanto, está representando uma região do espaço-tempo com coordenadas adequadas. Perdemos a característica dos diagramas de espaço-tempo anteriores, em que as

linhas de 45 graus representavam o movimento à velocidade c . As linhas de mundo nessa figura são linhas de mundo de foguetes; mostram os caminhos através do espaço-tempo percorridos por objetos que não estão sujeitos apenas à influência gravitacional. Há uma tendência geral para que as linhas se inclinem para a esquerda (com raio menor), devido à atração da gravidade em direção ao centro. Algumas linhas de mundo mostram inclinação para a direita; elas representam objetos, foguetes, cujos motores exercem força maior do que a da gravidade. Tudo isso pode ser esperado. O que não se podia esperar é a linha tracejada vertical. Ela é um horizonte de eventos. Nenhuma linha de mundo pode atravessá-la da esquerda para a direita. Nenhum evento à esquerda pode transmitir informações a qualquer observador à direita. A linha tracejada representa uma superfície esférica que tem propriedades de horizonte iguais às da superfície esférica em expansão da figura 15, exceto quanto a que neste caso a superfície esférica não se está expandindo. O valor de sua coordenada radial não se modifica e, portanto, tampouco se modifica sua superfície. Que outro sentido poderia ter o fato de “não se estar expandindo”?

A região que está dentro do horizonte, região que não pode ser vista por nenhum observador do lado de fora do horizonte, denomina-se, justificadamente, buraco negro. Esse buraco negro esférico, em particular, denomina-se *buraco negro de Schwarzschild* e o seu limite *horizonte de eventos de Schwarzschild*. É a solução matemática mais simples da teoria de Einstein que tem as propriedades de um buraco negro. Outra solução relativamente simples para os buracos negros é o *buraco negro de Kerr*. Ele tem um eixo rotacional e um sentido de rotação que o buraco negro esférico de Schwarzschild não tem. Para o buraco negro de Kerr, assim como para o buraco negro de Schwarzschild, a área do horizonte de eventos não se modifica. Os buracos negros não têm de ser imutáveis no tempo. Os horizontes de eventos que os definem podem mudar de forma e crescer. Mas tem de haver um limite para o crescimento. Se o horizonte pudesse crescer até que já não houvesse mais um “lado de fora”, como no caso da figura 15, o interior já não seria um buraco negro. Um buraco negro precisa

sempre ter um exterior, um exterior que não pode saber nunca o que existe dentro do buraco.

BON VOYAGE

Agora você vai navegar em um interessante mar de ideias e já leva uma pequena bagagem para a viagem. Esta introdução foi como um pequeno guia de excursão, útil para o que está por vir; ela lhe forneceu um mapa inicial dos novos domínios, juntamente com um glossário referente ao vocabulário básico dos que trabalham nesses campos. Como acontece com todos os pequenos guias, não é nele que está contida a emoção. Para isso, é preciso viajar pelas páginas que vêm a seguir.

Pode-se mudar o passado?

Igor Novikov

Neste ensaio exploraremos vários aspectos das máquinas do tempo, embora o ensaio de Stephen Hawking, que se segue a este, argumente que as máquinas do tempo são, com toda a probabilidade, fisicamente impossíveis. Tenho duas razões para ignorar a previsão de Hawking. Em primeiro lugar, em 1895, outro físico destacado, Lord Kelvin, então presidente da Royal Society, afirmou que "máquinas voadoras mais pesadas do que o ar são impossíveis". Essa previsão estava baseada no mais completo entendimento da física daquela época. No entanto, como sabemos, o primeiro voo dos irmãos Wright realizou-se em 1903, poucos anos depois. Do mesmo modo, nossa compreensão atual das máquinas do tempo pode ser incompleta. A segunda razão já foi assinalada muitas vezes por Kip Thorne: mesmo que as leis da física proibam as máquinas do tempo, o esforço de compreendê-las pode trazer-nos muitos ensinamentos e ajudar-nos, em particular, a desenvolver nossa compreensão da causalidade.¹

Vamos, portanto, supor que as máquinas do tempo são, em princípio, possíveis e explorar as consequências disso. Em primeiro lugar, as máquinas do tempo podem ser perigosas. Com efeito, se alguém pudesse viajar do nosso tempo para o passado, tal pessoa provavelmente poderia mudar o passado. Se assim fosse, ele mudaria, em consequência, toda a história subsequente. Por exemplo, uma pessoa que viajasse no tempo até o começo do universo poderia modificar as condições físicas naquele período e, em consequência, mudar toda a história do universo. A explosão de uma bomba de hidrogênio não é nada em comparação com essa possibilidade.



Afinal, será possível usar uma máquina do tempo para mudar o passado? Podemos imaginar o tempo como um rio que corre do passado para o futuro, sem nunca mudar de direção, e que carrega em seu fluxo todos os eventos. Durante muito tempo as pessoas acreditaram que o tempo não podia ser retardado ou acelerado. No entanto, no início do século XX, Albert Einstein descobriu que o tempo não é imutável. Campos gravitacionais fortes — por exemplo, o campo gravitacional de uma estrela de nêutrons — retardam a passagem do tempo. Um relógio que esteja no campo gravitacional forte próximo à superfície de uma estrela de nêutrons anda mais devagar do que um outro que esteja bem distante. Alguém que observasse a estrela de nêutrons à distância poderia, em princípio, ver o retardamento do relógio.

De acordo com a relatividade geral, a teoria moderna da gravidade, o espaço-tempo deve encurvar-se nos campos gravitacionais fortes. A figura 1a ilustra o que isso significa ao mostrar o contínuo do espaço-tempo com o espaço na horizontal e o tempo na vertical. Os campos gravitacionais fortes dão lugar a reentrâncias, ou poços na superfície, como mostra a figura 1b.

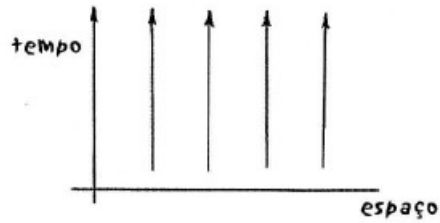


Figura 1a.

A ideia essencial de toda máquina do tempo pode ser explicada agora. Imagine que os topos de duas reentrâncias diferentes toquem-se (figura 1c) e unam-se para formar um arco, ou um túnel, como ideia essencial de toda máquina do tempo pode ser explicada agora.

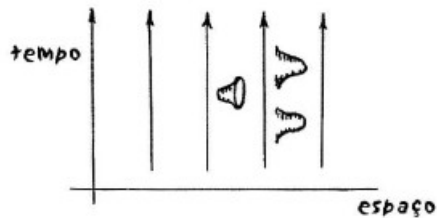


Figura 1b.

Imagine que os topos de duas reentrâncias diferentes toquem-se (figura 1c)

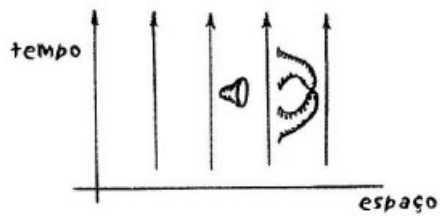


Figura 1c.

e unam-se para formar um arco, ou um túnel, como na figura 1d.

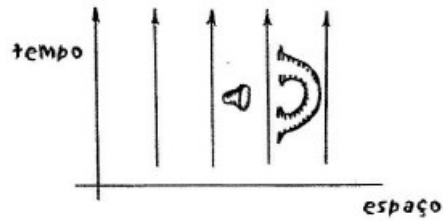


Figura 1d.

O efeito de tal arco é o de que uma parte do rio do tempo separa-se do curso principal, passa pelo arco e volta ao curso principal em um tempo que é anterior àquele em que ela entrou no arco (figura 1e).

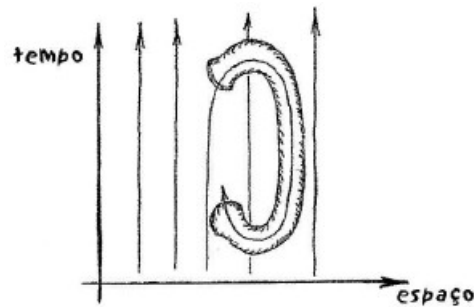


Figura 1e.

Um ser humano que percorresse esse caminho seria levado pelo rio do tempo através do túnel, ficando mais velho, como sempre, até reaparecer no curso principal, no passado (ou seja, num tempo anterior àquele) do ponto em que ele entrou no arco, como na figura 1f. Ele poderia, portanto, encontrar-se com uma versão mais nova de si próprio.

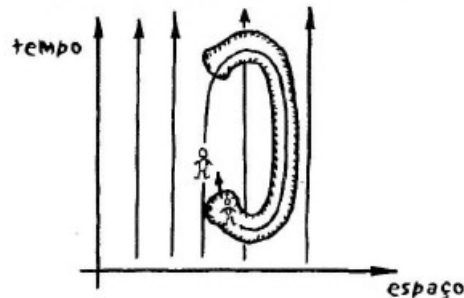


Figura 1f.

Stephen Hawking explica, neste volume, que tais estruturas do espaço-tempo podem surgir como soluções matemáticas para as equações de campo de Einstein. Conquanto a maioria dos cientistas rejeite essas soluções como sendo curiosidades matemáticas, Kip Thorne, junto com seus colegas mais jovens, passou a pesquisar essas soluções seriamente.

Este ensaio discutirá as três seguintes questões relativas às máquinas do tempo. Em primeiro lugar, como se podem criar máquinas do tempo? Em segundo lugar, será realmente possível mudar o passado usando-se uma máquina do tempo? Em terceiro lugar, que aconteceria com as nossas noções de causalidade e livre-arbítrio?

A primeira questão é como se podem criar máquinas do tempo. Isso requer uma discussão sobre espaços curvos. Como é muito difícil imaginar ou visualizar espaços tridimensionais curvos, usemos então como analogia espaços bidimensionais curvos, habitados por pessoas bidimensionais, como na figura 2a. Considere uma estrela bidimensional nesse espaço, com um campo gravitacional bastante fraco. O campo gravitacional aparecerá como um poço raso, como mostra a figura 2b.

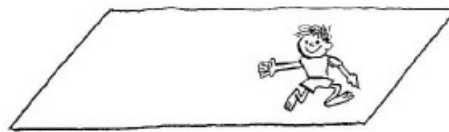


Figura 2a.

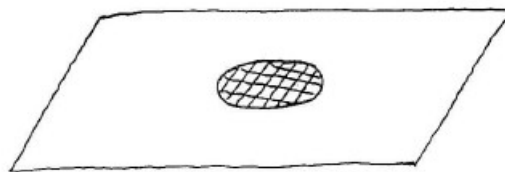


Figura 2b.

Suponha agora que a estrela se contraia. Durante esse processo, o campo gravitacional da estrela ganha força e, em consequência, a profundidade do poço aumenta, como mostram as figuras 2c e 2d.

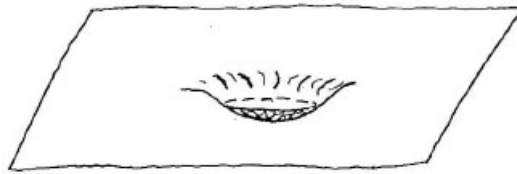


Figura 2c.

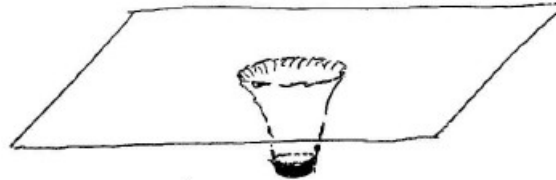
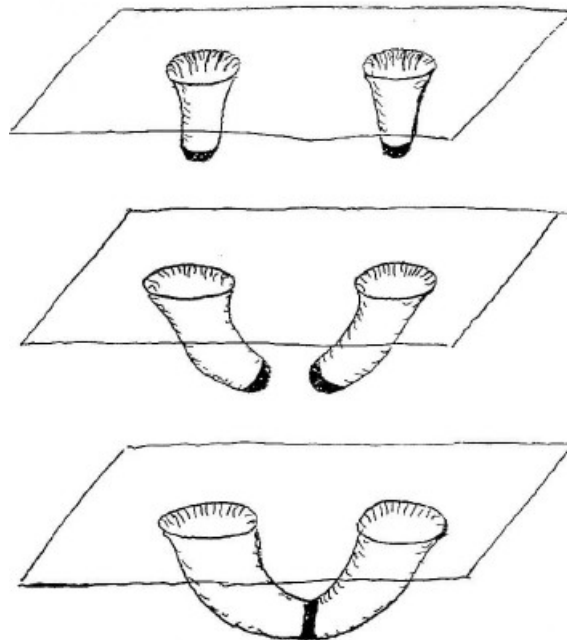


Figura 2d.

Suponhamos agora que existam dois desses poços e que os fundos dos dois poços se toquem. Isso cria uma estrutura denominada *buraco áe minhoca*, ilustrada na figura 3



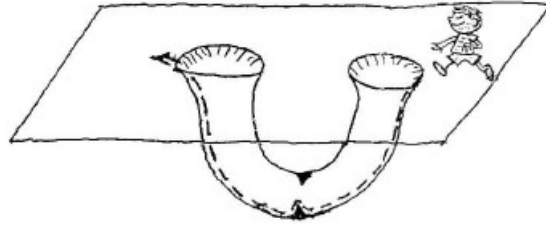


Figura 3.

Ela consiste em duas aberturas, ou bocas, e um túnel ou arco entre elas. Suponhamos ainda que sejamos capazes de estabilizar a estrutura, tornando-a estática (ou seja, imutável) ou quase estática. Nesse caso, um ser bidimensional pode ir de uma boca à outra de duas maneiras: através do espaço "exterior" ou através do túnel do buraco de minhoca. Como se vê na figura 3, o caminho através do buraco de minhoca é mais longo do que aquele através do espaço exterior. Contudo, é possível imaginar situações em que ocorre o oposto. Por exemplo, se houvesse um túnel através do centro da Terra, o caminho que passa pela superfície da Terra entre uma boca e a outra seria mais longo do que o que passa pelo centro, através do túnel. Uma situação similar aplica-se aos nossos modelos bidimensionais de espaço curvo. Como mostra a figura 4, o espaço bidimensional pode ser encurvado de modo a que a distância entre as duas bocas através do corredor seja mais curta do que a que passa pelo espaço exterior.

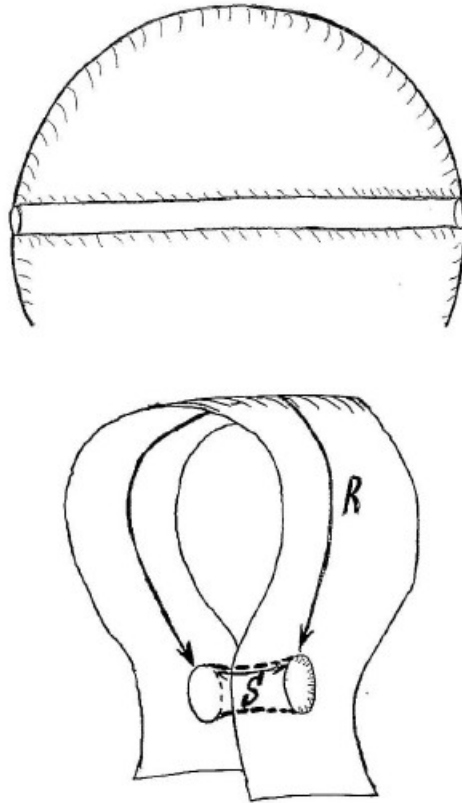
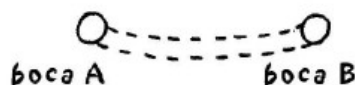


Figura 4.

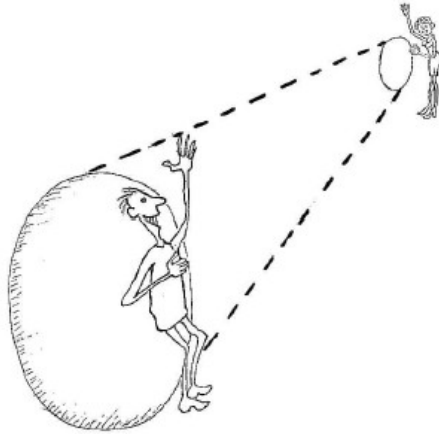
No espaço tridimensional real, podem-se imaginar buracos de minhoca similares. Logo explicarei como esses buracos de minhoca podem transformar-se em máquinas do tempo, como propôs Kip Thorne. Não discutirei, contudo, os possíveis obstáculos que tornam problemática a sua construção, uma vez que essa questão será tratada neste mesmo volume por Stephen Hawking.

Imaginemos agora que no espaço tridimensional haja um buraco de minhoca com duas bocas, *A* e *B*, e um corredor entre elas. Evidentemente, o corredor não fica no espaço tridimensional normal; ao contrário, pode-se pensar que ele existe em um hiperespaço com mais dimensões.

buraco de minhoca



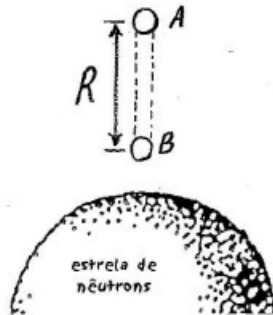
Suponhamos que a distância entre as bocas através do corredor seja muito menor do que a distância entre as bocas através do espaço exterior. Digamos que na boca *A* esteja um homem e que na boca *B* esteja uma mulher.



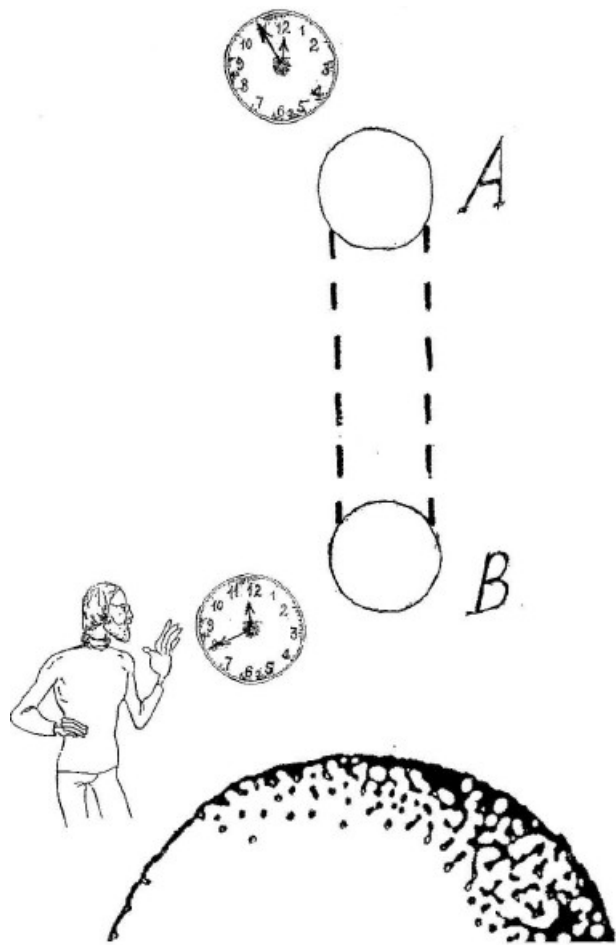
Se o homem olhar para a mulher através do espaço normal, ele verá que ela está muito longe, a muitos quilômetros, talvez até anos-luz de distância. Se ele a olhar através do buraco de minhoca, no entanto, é possível, em princípio, que apenas alguns metros os separem. Note que o buraco de minhoca pode atuar como uma "máquina espacial", porque o homem pode passar por ele e ficar próximo à mulher, mas ainda não é uma máquina do tempo.

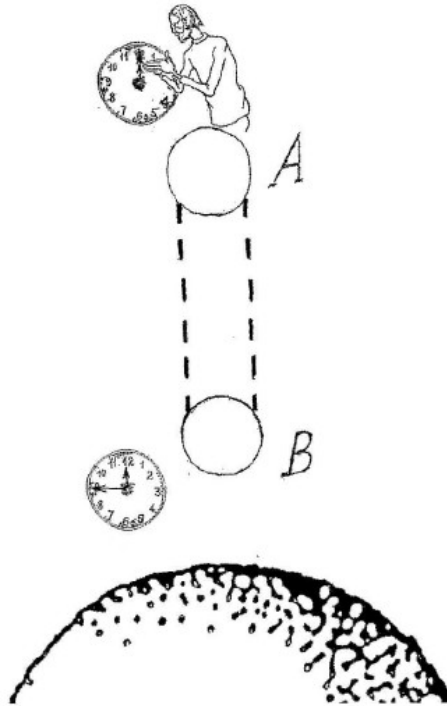


Veja como um buraco de minhoca *pode* ser convertido em máquina do tempo. Suponha que coloquemos um relógio próximo a cada boca, o relógio *A* na boca *A* e o relógio *B* na boca *B*, ambos sincronizados um com o outro.



Coloquemos a boca *B* no campo gravitacional forte de uma estrela de nêutrons. Lembre-se de que o ritmo do tempo depende da força do campo gravitacional e de que o tempo corre mais devagar próximo à superfície de uma estrela de nêutrons, de modo que o tempo passa devagar próximo à boca *B*. Se a boca *A* estiver mais longe da estrela de nêutrons do que a boca *B* por uma distância igual a *R*, a diferença no ritmo do tempo entre as duas bocas será proporcional a *R*. À medida que o tempo passa, a diferença entre os relógios aumenta. O relógio *A* marcará, por exemplo, cinco para o meio-dia e o *B* marcará, digamos, vinte para o meio-dia.

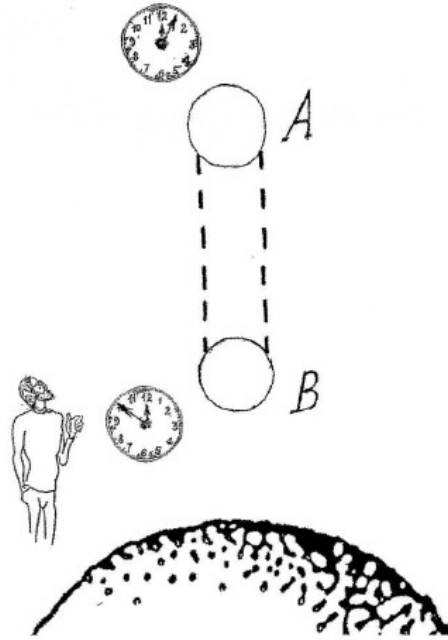




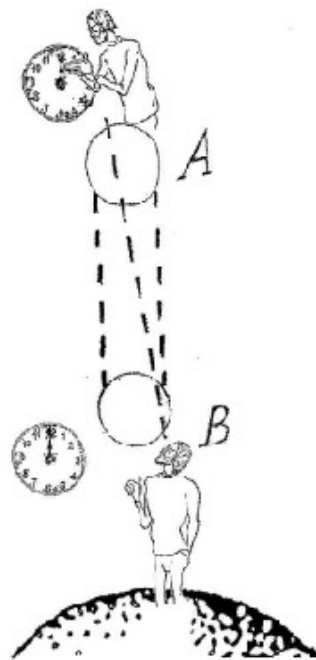
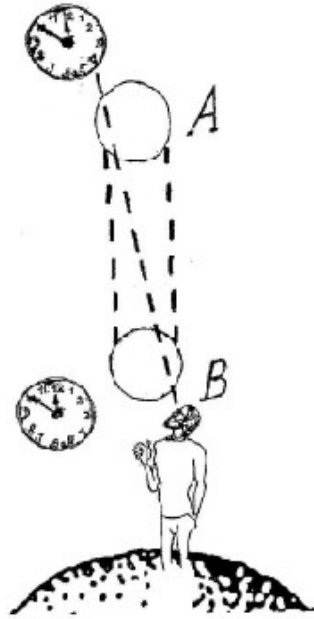
Essa diferença pode ser facilmente percebida por um observador que esteja fora do buraco de minhoca. Ele pode viajar de um relógio ao outro, comparar o que eles marcam e certificar-se de que a diferença entre eles é realmente de quinze minutos.

Suponha agora que o observador volte para a boca *B* e chegue quando o relógio *B* esteja marcando dez para o meio-dia, enquanto que o relógio *A* marca cinco minutos depois do meio-dia. Se nosso observador olhar para o relógio da boca *A*, através do buraco de minhoca, o que ele verá?

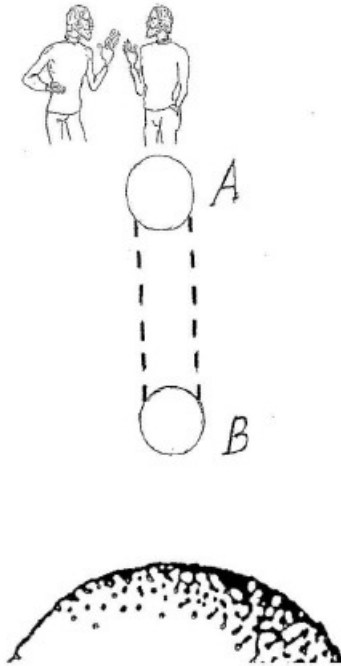
Lembre-se de que a distância através do corredor é muito menor do que a distância entre os mesmos pontos através do espaço exterior. Para o observador, portanto, o segundo relógio parecerá bem próximo, de modo que os dois relógios estarão praticamente lado a lado, a apenas alguns metros um do outro.



Lembre-se também de que a diferença de ritmo entre os dois relógios é proporcional à distância entre eles. Através do buraco de minhoca, essa distância é praticamente nula, de maneira que não há diferença de ritmo entre os dois relógios. Eles marcarão o tempo em uníssono e darão sempre leituras idênticas, quando consultados por observadores que os olhem através do buraco de minhoca. Desse modo, se o observador olhar pelo buraco de minhoca, verá que o relógio *A* marca o mesmo tempo que o relógio *B*, uma vez que durante todo o experimento os dois relógios trabalharam em uníssono. Ele verá que ambos os relógios marcam dez para o meio-dia. Contudo, isso significa que, ao olhar através do corredor, o observador está olhando para o passado, uma vez que se ele olhar para o relógio *A* por fora do buraco de minhoca, verá que ele marca cinco minutos depois do meio-dia.

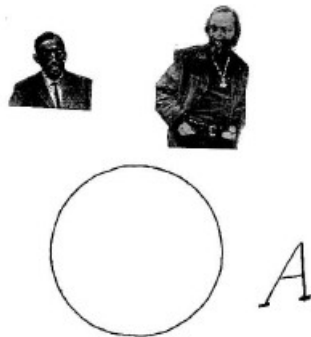


Através do buraco de minhoca ele lê dez para o meio-dia, portanto ele vê o passado. Com efeito, se ele esperar dez minutos, ele se verá a si próprio junto ao relógio A, uma vez que ele foi ao relógio A e o tocou quando marcava o meio-dia.

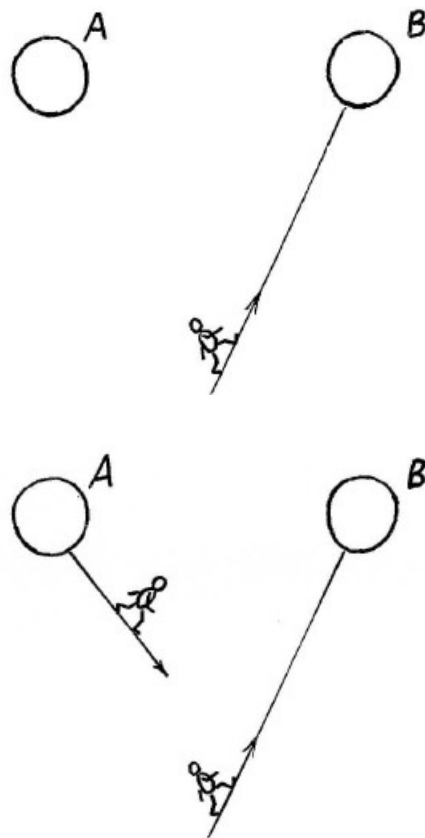


Agora o observador pode começar dez minutos antes do meio-dia no relógio *B* e viajar através do buraco de minhoca. Ele chegará à boca *A* quando o relógio estiver marcando dez para o meio-dia. Terá, assim, viajado ao passado, e o buraco de minhoca terá atuado como uma máquina do tempo. O observador pode até mesmo encontrar-se com ele próprio ao meio-dia, na boca *A*.

Duas observações devem ser feitas aqui. Primeiro, essa máquina do tempo pode, em princípio, ser muito poderosa. Quanto mais tempo esperarmos com a boca *B* no campo gravitacional forte, maior será a diferença de tempo entre os relógios.

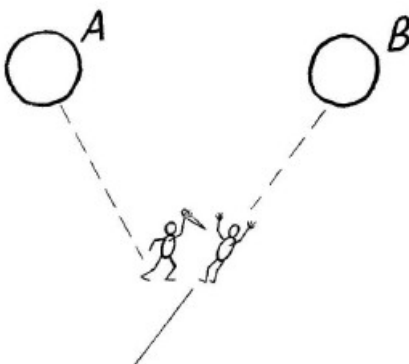


Podemos conseguir que a máquina nos transporte muitas horas e mesmo anos no passado. Segundo, se tirarmos a boca do buraco de minhoca da vizinhança da estrela de nêutrons e do seu campo gravitacional forte, o buraco de minhoca continuará trabalhando como uma máquina do tempo. Podemos, portanto, construir, em princípio, uma máquina do tempo que consiste em duas bocas, *A* e *B*, e um corredor bem curto que as une, em alguma dimensão adicional, de tal modo que um observador que entre pela boca *B* aparecerá na boca *A* no passado. Como explica Stephen Hawking no seu ensaio, isso significa que ele pode encontrar uma versão mais nova dele próprio no passado.



É claro que máquinas do tempo como essa podem dar lugar a paradoxos. Suponha que eu entre pela boca *B* e reapareça na boca *A* no passado, antes que eu entrasse pela boca *B*. Haverá então duas versões de mim, uma mais nova, que está por entrar pela boca *B*, e outra mais velha, que acaba de sair da boca *A*. Suponha que eu leve uma faca e mate a minha versão mais nova. Naturalmente, será

impossível que essa minha versão prossiga em direção à boca B para reaparecer na boca A e cometer o homicídio. Isto é um paradoxo. Alternativamente, posso usar uma máquina do tempo mais poderosa, viajar para o passado distante e matar minha avó antes que minha mãe nascesse, o que levaria a outro paradoxo.



Esses paradoxos demonstram que a viagem no tempo é impossível? De modo algum. A razão está em que, na nossa discussão sobre o paradoxo 1, cometemos um erro sério de lógica. Discutimos a situação duas vezes, de duas maneiras diferentes. Na primeira focalizamos a minha viagem para a boca B , supondo que não tenha havido um encontro com a minha versão mais velha, proveniente do futuro. Na segunda, focalizamos a mesma viagem, mas supusemos que a primeira discussão estava correta e que, por conseguinte, eu podia viajar ao passado e que, portanto, ocorrera um encontro. O erro está na premissa adotada na primeira discussão de que não ocorrera nenhum encontro. Ora, se o encontro ocorreu, na verdade ele ocorreu. Portanto, deveríamos levar em conta as consequências do encontro desde o começo. Por essa razão, mesmo que eu não seja assassinado, quando viajo para a boca B , me lembrarei do encontro com o meu eu mais novo quando apareço na boca A .

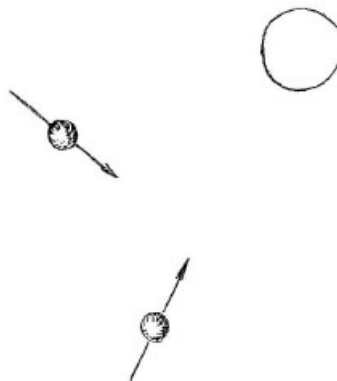
Então, o que é que efetivamente acontece nesse cenário quando o analisamos sem premissas incorretas? Aqui enfrentamos uma complicação: os físicos não podem calcular explicitamente as ações dos seres humanos, porque os seres humanos são demasiado complexos. Essa é uma questão para os psicólogos, provavelmente,

ou para os zoólogos, mas não para os físicos. Contudo, os físicos podem fazer modelos de situações similares e aparentemente paradoxais, que envolvam corpos físicos simples. Por meio de tais modelos, pode-se calcular o que acontece com os corpos e determinar como se resolve o paradoxo.

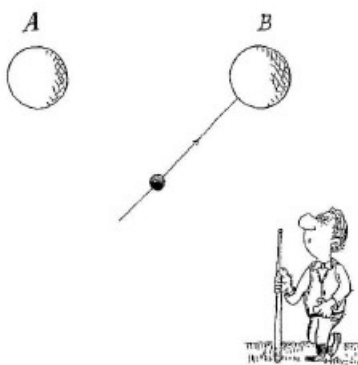
Tratemos, então, de compor um modelo desse paradoxo usando objetos físicos simples. Imagine uma bola de bilhar que rola em uma mesa que tem uma caçapa. Uma pessoa pode facilmente empurrar a bola em direção à caçapa, para que ela role e caia no buraco. Suponha que haja uma segunda bola de bilhar que viaje por um caminho que faça interseção com o caminho da primeira bola antes que esta chegue à caçapa.



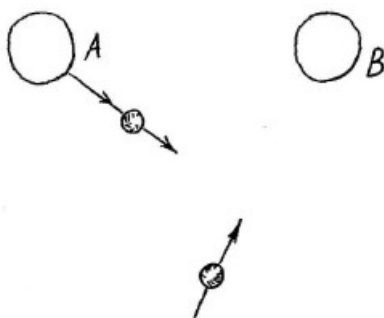
Haverá uma colisão. Se a colisão tiver força suficiente, a mudança de direção da primeira bola será suficiente para que sua trajetória mude e a bola não entre na caçapa.

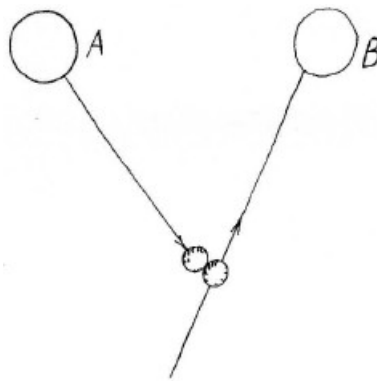


Suponha que tenhamos uma máquina do tempo com as bocas A e B , tal como descrevemos anteriormente, de modo que, se alguém entrar pela boca B , reaparecerá na boca A no passado. Tomamos apenas uma bola de bilhar e a enviamos em uma trajetória em direção à boca B . A bola estará viajando através do espaço vazio, em vez da superfície de uma mesa de bilhar, mas essa diferença não é relevante aqui. A bola se moverá através do espaço em direção à boca B . No entanto, antes que chegue à boca B , ela aparecerá saindo da boca A , devido ao efeito da máquina do tempo. Haverá, então, duas versões, ou encarnações da mesma bola de bilhar: uma mais nova e outra mais velha. Podemos calcular o impulso inicial da bola de tal modo que os caminhos das duas versões se cruzem e as duas versões cheguem ao ponto de encontro quase ao mesmo tempo. Qual será o resultado?



Tal como no caso das bolas que estavam na mesa de bilhar, podemos calcular o impulso inicial de forma que a bola mais velha colida com a mais nova e desvie a sua trajetória de tal forma que ela nunca chegue à boca B .

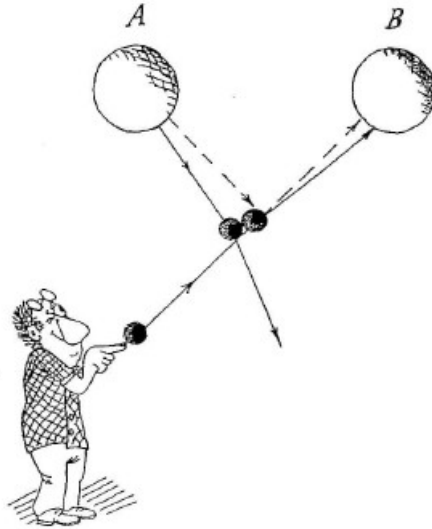




Temos novamente um paradoxo: se a bola mais nova nunca chega a entrar na boca *B*, não há razão para que a bola mais velha apareça na boca *A*. Esse paradoxo é análogo ao anterior, em que me encontrei com uma versão mais nova de mim próprio. Também aqui a origem do paradoxo é o erro lógico cometido nas nossas duas discussões da situação. Na primeira discussão sobre o movimento da bola, supusemos que nenhuma bola apareceria na boca *A* e não levamos em conta a colisão. Essas suposições eram incorretas: se a colisão ocorreu, ela ocorreu, e teria de ser levada em conta na primeira discussão. Assim, o movimento da versão mais nova da bola de bilhar será influenciado por dois efeitos: o impulso inicial e o efeito da colisão com a bola mais velha.

Qual é, então, a solução do paradoxo? O que acontece se mandarmos a bola em direção à boca *B* com um impulso inicial adequado? Nessa situação, podemos calcular o que acontece porque as bolas de bilhar são sistemas mecânicos muito simples. Se levarmos em conta a colisão desde o começo, então ela será bem fraca, apenas um leve toque entre as duas bolas, que afeta a trajetória da mais nova muito ligeiramente. A bola mais nova move-se, então, em uma trajetória um pouco diferente da nossa expectativa, mas mesmo assim entra na boca *B*. Ela reaparece na boca *A* no passado e continua o seu movimento, sempre em uma trajetória que difere apenas ligeiramente daquela que teria percorrido se não tivesse havido a colisão. O resultado da pequena diferença na trajetória é que a colisão com a versão mais nova não será forte, e sim fraca, um leve toque. Temos, portanto, uma solução consistente. Embora tenhamos tratado de produzir uma

colisão forte, vemos que na verdade ela é fraca, se analisarmos a situação corretamente, levando em conta a colisão desde o começo. Essa solução consistente pode ser obtida a partir de um rigoroso cálculo matemático e foi descoberta pela primeira vez por Kip Thorne.



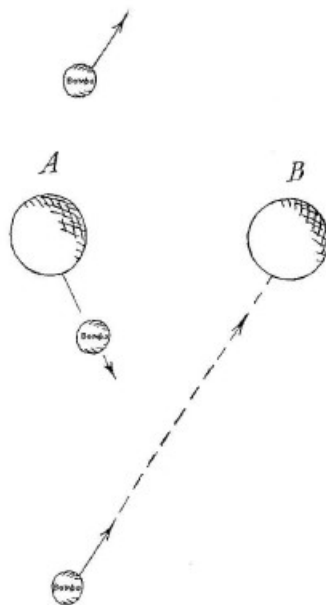
Vemos, assim, que não há contradição ou paradoxo e que, além disso, não há duas versões diferentes do evento da colisão. Houve apenas uma colisão, apenas uma história de eventos. Se algo aconteceu, aconteceu. Os eventos podem ser influenciados por outros eventos no futuro, assim como por outros eventos no passado, de modo que o fluxo dos eventos pode ser complexo. Contudo, só existe um fluxo de eventos, de modo que o passado não pode ser alterado depois de haver ocorrido.

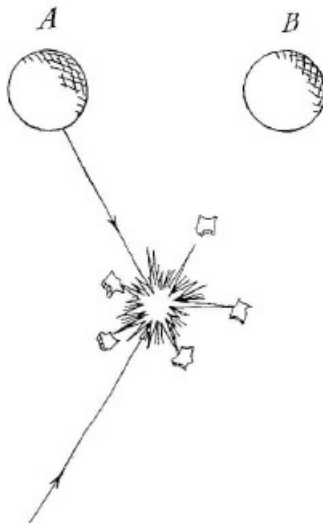
Seria possível objetar que o que analisamos aqui foi um sistema mecânico trivial e que outros sistemas mais complexos levariam a paradoxos drásticos que não se resolveriam tão facilmente. Suponhamos, por exemplo, que, em vez de uma bola de bilhar tivéssemos uma bomba cuja superfície estivesse coberta de detonadores, de modo que ao mais leve toque ela explodiria.



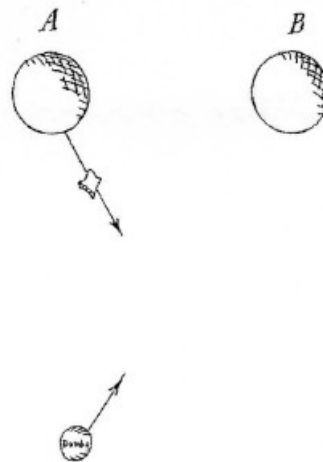
bola-bomba com
detonadores

À primeira vista, pareceria que nessa situação não há um fluxo autoconsistente de eventos. Com efeito, suponhamos que a bomba seja corretamente impulsionada na direção da boca *B* do buraco de minhoca. Ela deve aparecer na boca *A* no passado e mover-se em uma trajetória que a leva ao ponto de encontro. Se ela se encontrar com uma versão mais antiga dela própria, mesmo uma colisão muito leve causará uma explosão. A versão mais nova da bomba será destruída, o que tornará impossível que a versão mais nova continue a mover-se em direção à boca *B* e que a versão mais velha reapareça na boca *A*. Há, portanto, um paradoxo.

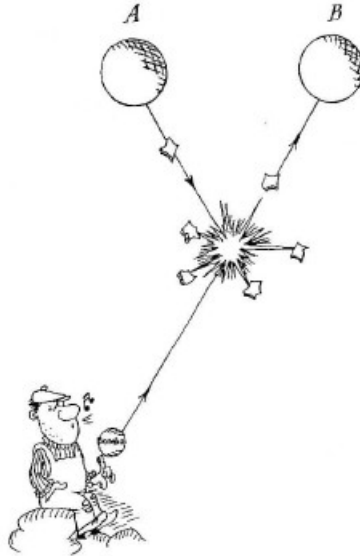




A solução desse paradoxo é a seguinte: enquanto a bomba percorre a trajetória em direção à boca B, algo surge na boca A — não uma versão mais velha da bomba, mas sim um fragmento da bomba (logo ficará claro por que aparece um fragmento na boca A).



O fragmento se desloca ao longo da trajetória até o ponto de encontro, colide com a bomba e causa uma explosão. Os fragmentos da bomba se espalham em múltiplas direções e pelo menos um deles entra na boca B. Esse fragmento reaparece então na boca A no passado e causa a explosão original.



Temos novamente uma situação autoconsistente, sem contradições ou paradoxos. No entanto, podemos também ver explicitamente a influência do futuro sobre o passado. O fragmento que provém do futuro é a causa da explosão, mas é também a consequência da própria explosão. Isso é muito estranho, porém não é uma contradição.

Podemos tirar duas conclusões a partir desses exemplos. A primeira é que, na presença de máquinas do tempo, podem ocorrer processos físicos muito estranhos e incomuns, mas não contradições. A segunda é que os eventos (como a explosão) não podem ser modificados. Eles acontecem uma só vez e é impossível que haja duas histórias em uma das quais o evento ocorre enquanto na outra ele não ocorre.

Reconsideremos agora as situações aparentemente paradoxais que envolvem seres humanos. Seria possível que você pudesse usar uma máquina do tempo, viajar ao passado e matar uma versão mais nova de si próprio? A resposta é: não. É impossível. Isso levaria a um paradoxo, e já vimos que os paradoxos não ocorrem. As leis físicas devem, portanto, impedir que você mate uma versão mais nova de si próprio.

Como disse Kip Thorne, se você tentar matar uma versão mais nova de si próprio, ou a sua avó, alguma coisa tem de segurar a sua mão. Embora possamos calcular o que acontece com relação a

objetos físicos simples, como fizemos aqui, uma vez que os seres humanos são muito complexos, não temos os meios para calcular exatamente o que segura a sua mão.

Isso significa que nosso livre-arbítrio tem de ser restringido. Se eu me encontrar com uma versão mais nova de mim próprio e quiser matá-la, as leis da física me impedirão de fazê-lo.

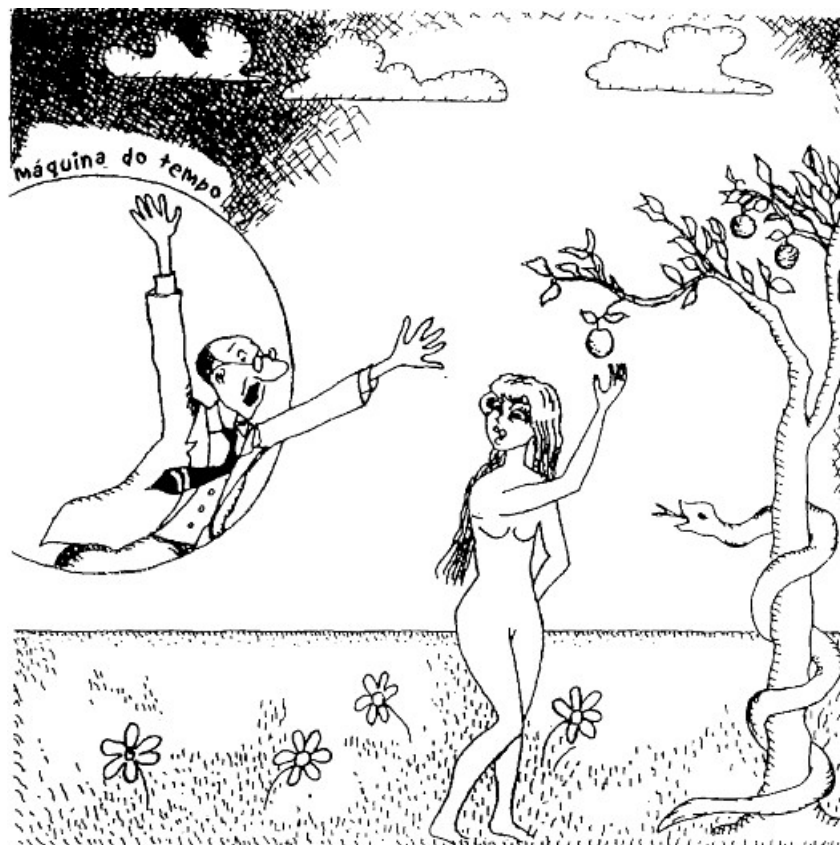
Tal restrição a nosso livre-arbítrio é estranha e misteriosa, mas não completamente isenta de paralelos. Pode ser, por exemplo, que eu queira caminhar pelo teto sem a ajuda de nenhum equipamento especial.



A lei da gravidade me impede de fazê-lo. Se eu tentar, cairei, de modo que meu livre-arbítrio está efetivamente restringido. Evidentemente, no caso da máquina do tempo a natureza da restrição ao livre-arbítrio é outra; mas não chega a ser essencialmente diferente.

Para concluir, a questão de se as máquinas do tempo podem existir ainda está por resolver-se. Contudo, mesmo que elas estejam proibidas pelas leis da física, continua sendo válido pensar a respeito das questões que suscitam, porque isso pode nos abrir novas perspectivas a respeito da natureza do tempo, da causalidade e de

outros aspectos da física. Enfim, não se pode mudar o passado. Não se pode mandar alguém viajar de volta ao paraíso e pedir a Eva que não colha a maçã.



**“Senhorita! Senhorita!
Pelo amor de Deus, pare!”**

Proteção cronológica

Um mundo mais seguro para os historiadores

Stephen W. Hawking

Este ensaio será sobre as viagens no tempo, que se tornaram um tema de interesse para Kip Thorne à medida que ele foi ficando mais velho. (Será coincidência?) Mas especular abertamente sobre viagens no tempo pode ser perigoso. Se a imprensa soubesse que o governo financia pesquisas sobre viagens no tempo, haveria um escândalo pelo mau uso do dinheiro público ou uma intimação para que a pesquisa fosse considerada confidencial, no interesse da segurança nacional. Afinal, como poderíamos nos proteger se os russos ou os chineses possuísem a viagem no tempo e nós não? Eles poderiam trazer de volta os camaradas Stalin e Mao! Portanto, somos muito poucos os loucos, mesmo nos círculos da física, que nos atrevemos a trabalhar em um tema tão politicamente incorreto. Disfarçamos nosso interesse usando termos técnicos, como *curva fechada de tipo temporal*, que é apenas um código para falar em viagens no tempo.

A primeira descrição científica do tempo foi feita em 1689, por Sir Isaac Newton. Newton foi catedrático da Lucasian Chair, de Cambridge, que agora eu ocupo (naquela época ela não era operada por motor elétrico). Na teoria de Newton, o tempo era absoluto e passava incessantemente. Não havia como dar a volta e retornar para um tempo anterior. Mas a situação mudou quando Einstein formulou a teoria da relatividade geral, em 1915. O tempo agora estava ligado ao espaço em uma nova entidade denominada espaço-tempo. O espaço-tempo não era um ambiente fixo e absoluto em que os eventos tinham lugar. Ao contrário, espaço e tempo tornavam-se dinâmicos nas equações de Einstein, que descreviam como a matéria e a energia do universo os curvavam e distorciam. O tempo sempre se somava, em cada lugar, mas havia agora a possibilidade de que o espaço-tempo se curvasse de tal modo que

uma pessoa pudesse seguir um caminho que a trouxesse de volta antes que ela tivesse partido. Anos atrás a **BBC** fez um filme em que Kip e eu mostrávamos o que podia ser esse tipo de viagem. Eles usaram truques fotográficos para ilustrar os *buracos de minhoca*, tubos hipotéticos de espaço-tempo que podem conectar diferentes regiões do espaço e do tempo. A ideia é que você entra por uma boca do buraco de minhoca e sai pela outra em um lugar diferente e em um tempo diferente.

Os buracos de minhoca, se é que existem, seriam ideais para que se pudessem fazer viagens rápidas no tempo. Você poderia viajar pelo buraco de minhoca, ir até o outro lado da galáxia e estar de volta para o jantar. Contudo, pode-se demonstrar que se os buracos de minhoca realmente existem, também poderiam ser usados para que você viajasse e regressasse antes de sua partida. Portanto, pode-se pensar também que, nesse caso, você poderia explodir o foguete ainda na plataforma, para impedir sua própria viagem.

Essa é uma variação do paradoxo do avô: que aconteceria se você viajasse ao passado e matasse seu avô antes que seu pai fosse concebido?



Evidentemente, isso só é um paradoxo se você acreditar que tem livre-arbítrio para fazer o que quiser em suas viagens ao passado. Não entrarei em uma discussão filosófica a respeito do livre-arbítrio neste ensaio. Em vez disso, discutirei se as leis da física permitem que o espaço-tempo se curve de tal maneira que um corpo macroscópico, como uma nave espacial, possa voltar a seu próprio passado. De acordo com a teoria de Einstein, uma nave espacial viaja necessariamente a uma velocidade inferior à da luz e segue o que se denomina uma *curva de tipo temporal* através do espaço-tempo.

A questão pode então ser formulada em termos técnicos: o espaço-tempo admite curvas que sejam “fechadas”, ou seja, que regressem ao ponto de origem sucessivamente?

O espaço-tempo admite curvas fechadas de tipo temporal?

1. Teoria clássica
2. Teoria semiclássica
3. Gravitação quântica completa

Podemos tentar responder a essa pergunta em três níveis. O primeiro é o da teoria da relatividade de Einstein. Essa é uma teoria chamada “clássica”. Assim é porque ela supõe que o universo tenha uma história bem definida, sem nenhuma incerteza. No nível da relatividade geral clássica temos um quadro bastante completo, que descreverei.

Sabemos, no entanto, que a teoria clássica não pode estar inteiramente certa, porque observamos que a matéria do universo está sujeita a flutuações, e seu comportamento não pode ser previsto com precisão. Na década de 1920, desenvolveu-se um novo paradigma, denominado *teoria quântica*, para descrever essas flutuações e quantificar a incerteza. Podemos, então, formular a questão das viagens no tempo em um segundo nível, o da “teoria semiclássica”. Nesse nível, consideram-se campos quânticos de matéria no ambiente clássico do espaço-tempo. Nesse caso, o quadro não é tão completo, mas pelo menos temos alguma ideia sobre como proceder.

Finalmente, há a teoria completa da gravitação quântica, o que quer que isso seja. Aqui não temos clareza nem sobre como fazer a pergunta — é possível viajar no tempo? Talvez o melhor que se possa fazer seja perguntar como um observador no infinito interpretaria suas medições. Será que ele pensaria que ocorrera uma viagem no tempo no interior do espaço-tempo?

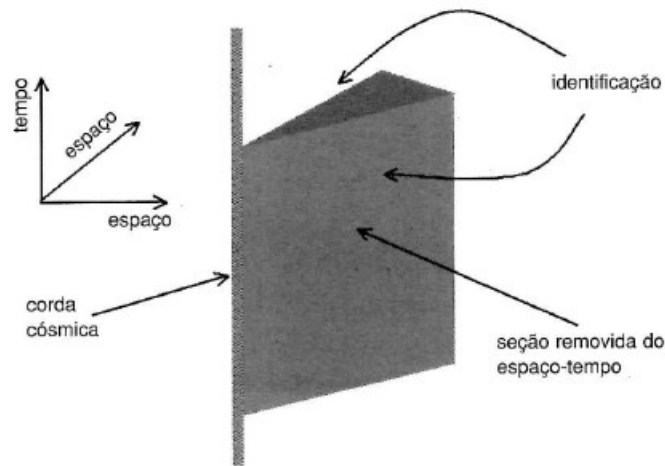
Comecemos com a teoria clássica. Nem o espaço-tempo plano nem as outras soluções dadas nos primeiros anos às equações de Einstein contêm curvas fechadas de tipo temporal. Foi, portanto, um grande choque para Einstein quando, em 1949, Kurt Gödel, mais conhecido na matemática pelo teorema de Gödel, descobriu uma solução que representava um universo repleto de matéria em rotação, com curvas fechadas de tipo temporal em cada ponto. A solução de Gödel requeria uma constante cosmológica, que pode existir ou não na natureza, mas posteriormente foram encontradas outras soluções que não requeriam a constante.

Universo de Gödel

Um espaço-tempo que contém matéria em rotação
com curvas fechadas de tipo temporal em cada ponto.

Caso particularmente interessante é o de duas cordas cósmicas que se movem a alta velocidade, uma de encontro à outra. Como o nome indica, as cordas cósmicas são objetos que têm comprimento, mas uma seção transversal mínima. Algumas teorias das partículas elementares preveem sua ocorrência. O campo gravitacional de uma corda cósmica é um espaço plano do qual é retirada uma seção em forma de cabeça de machado, a corda estando no lado afiado. Assim, se uma pessoa percorre um círculo à volta de uma corda cósmica, a distância espacial será menor do que se poderia esperar, mas o tempo não seria afetado. Isso significa que o espaço-tempo à volta de uma corda cósmica não contém nenhuma curva fechada de tipo temporal.

O espaço-tempo à volta de uma corda cósmica



Contudo, se houver uma segunda corda cósmica que se move em relação à primeira, as respectivas cabeças de machado encurtarão tanto as distâncias espaciais quanto os intervalos de tempo. Se as cordas cósmicas estiverem se movendo uma em relação à outra a uma velocidade próxima à da luz, a economia de tempo ao se contornar ambas as cordas poderá ser tão grande que o viajante chegaria ao lugar de partida antes de ter iniciado a viagem. Em outras palavras, há curvas fechadas de tipo temporal que podem ser seguidas para uma viagem ao passado.

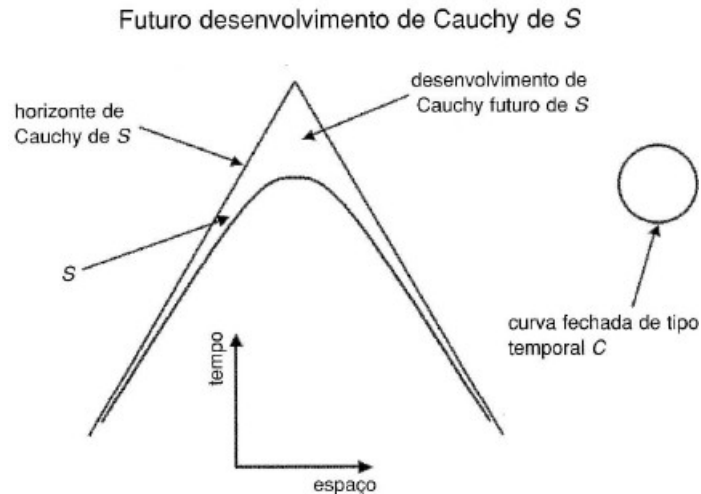
O espaço-tempo das cordas cósmicas contém matéria com densidade energética positiva e é fisicamente razoável. No entanto, o encurvamento que produz as curvas fechadas de tipo temporal estende-se até o infinito, e até o passado infinito. Assim, esses espaços-tempos foram criados com viagens no tempo já incluídas. Não há razão para que acreditemos que nosso universo tenha sido criado dessa maneira encurvada e tampouco temos provas da presença de visitantes provenientes do futuro. (Não estou levando em conta a teoria da conspiração, segundo a qual os discos voadores vêm do futuro e o governo sabe disso mas esconde o fato. Historicamente, o governo não é tão bom assim em encobrir as coisas!) Suporei, por conseguinte, que não há curvas fechadas de tipo temporal no passado de uma superfície S de tempo constante.

A pergunta, então, é a seguinte: uma civilização adiantada poderia construir uma máquina do tempo? Ou seja, essa civilização poderia modificar o espaço-tempo no futuro de S , de modo que curvas fechadas de tipo temporal aparecessem em uma região finita?

Refiro-me a “uma região finita” porque, por mais adiantada que seja a civilização, presumivelmente ela só controlaria uma área finita do universo.

Em ciência, encontrar a formulação correta para um problema muitas vezes é a chave para sua solução, e este é um bom exemplo. Para definir o que significa uma máquina do tempo finita, recorri a um antigo trabalho meu. Nele, eu definira o futuro desenvolvimento de Cauchy de S como o conjunto dos pontos do espaço-tempo em que os eventos são completamente determinados pelo que acontece em S . Em outras palavras, é a região do espaço-tempo em que todos os caminhos possíveis com velocidade inferior à da luz provêm de S .

Contudo, se uma civilização adiantada conseguir construir uma máquina do tempo, haverá uma curva fechada de tipo temporal C no futuro de S . C ficará dando voltas no futuro de S , mas não retornará para fazer interseção com S . Isso significa que os pontos de C não estarão no desenvolvimento de Cauchy de S . Assim, S terá um horizonte de Cauchy H , ou seja, uma superfície que é a fronteira futura do desenvolvimento de Cauchy de S . Eu apresentei o conceito de horizonte de Cauchy na época em que conheci Kip, ainda na pré-história, logo depois da arca!



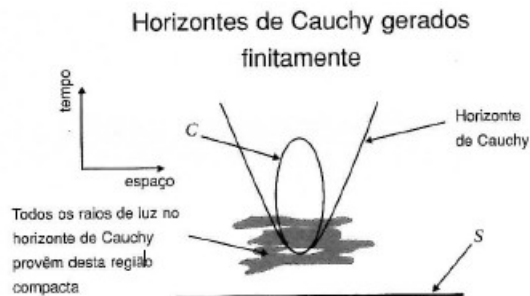
Os horizontes de Cauchy decorrem de algumas soluções teóricas para os buracos negros e ocorrem também em uma solução que os físicos denominam *espaço anti-de Sitter*. Nesses casos, porém, os raios de luz que formam o horizonte de Cauchy têm início ou no infinito ou em singularidades.



A criação desses horizontes de Cauchy requereria ou a capacidade de encurvar infinitamente o espaço-tempo ou a existência de uma singularidade no espaço-tempo. Encurvar infinitamente o espaço-tempo estaria além dos poderes de qualquer civilização, até mesmo da mais adiantada, que só poderia encurvá-lo em uma região finita. Uma civilização adiantada poderia reunir matéria suficiente para causar um colapso gravitacional, o qual produziria uma singularidade

no espaço-tempo, pelo menos de acordo com a relatividade geral clássica. Mas as equações de Einstein não poderiam ser definidas na singularidade, o que impediria que previssemos o que aconteceria do outro lado do horizonte de Cauchy, inclusive quanto à possível existência de curvas fechadas de tipo temporal.

Por essas razões, tomarei como critério para as máquinas do tempo o que denomino *horizonte de Cauchy gerado finitamente*.

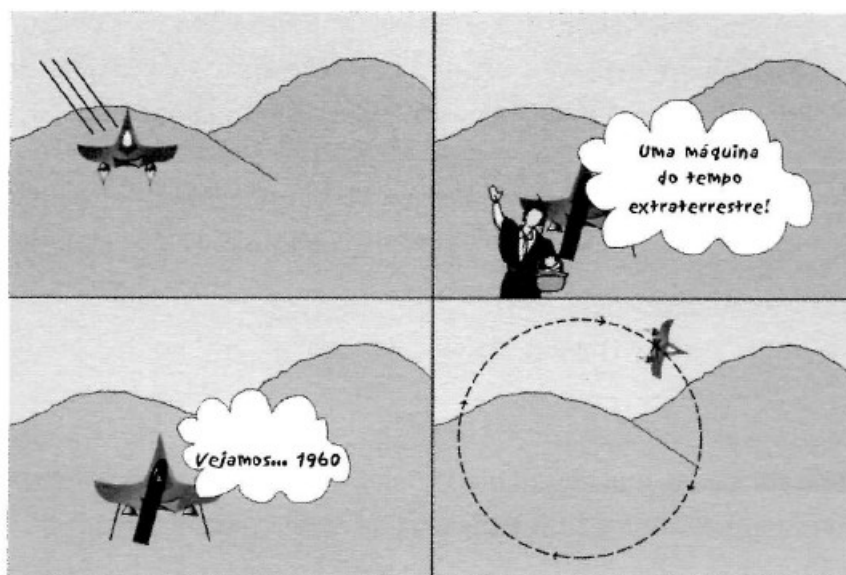


Trata-se de um horizonte de Cauchy gerado por raios de luz que emergem de uma região compacta. Em outras palavras, eles não provêm do infinito nem de uma singularidade, mas sim de uma região finita que contém curvas fechadas de tipo temporal, ou seja, o tipo de região que nossa civilização adiantada supostamente criaria.

Adotar essa definição como o domínio das máquinas do tempo tem a vantagem de permitir o uso do mecanismo de estrutura causal que Roger Penrose e eu desenvolvemos para estudar as singularidades e os buracos negros. Mesmo sem empregar as equações de Einstein, posso demonstrar que, em geral, um horizonte de Cauchy gerado finitamente contém um raio de luz fechado — um raio de luz que volta continuamente ao mesmo ponto.



Vale a pena ver de novo! Além disso, cada vez que o raio de luz volta, ele fica mais desviado para o azul, de modo que as imagens ficam cada vez mais azuladas. Cada vez que passam, os raios de luz podem ficar mais desfocados, de modo que a energia da luz não se acumula infinitamente. No entanto, o desvio para o azul significa que uma partícula de luz terá uma história finita, definida por sua própria medida do tempo, ainda que ela fique dando voltas e mais voltas em uma região finita e não se envolva com nenhuma curvatura típica de uma singularidade. Pode parecer sem importância que uma partícula de luz complete sua história em um tempo finito. Mas também posso provar que haveria rotas com velocidade inferior à da luz e com duração também finita. Essa poderia ser a história dos observadores que ficassem aprisionados em uma região finita diante do horizonte de Cauchy e que ficassem dando voltas e mais voltas, cada vez mais depressa, até alcançar a velocidade da luz em um tempo finito. Assim, se uma bela extraterrestre, saindo de seu disco voador, o convidar para andar em sua máquina do tempo, vá com cuidado! Você pode acabar caindo em uma dessas armadilhas de histórias que se repetem continuamente e que têm duração apenas finita.



Como eu disse, esses resultados não dependem das equações de Einstein, e sim apenas da maneira como o espaço-tempo teria

que se encurvar para produzir curvas fechadas de tipo temporal em uma região finita. Mas agora podemos fazer a pergunta: que tipo de matéria nossa civilização adiantada teria que usar para conseguir encurvar o espaço-tempo de modo a construir uma máquina do tempo de tamanho finito? Será possível que tal matéria tenha densidade energética positiva em toda parte, tal como no espaço-tempo da corda cósmica que descrevi antes? O espaço-tempo da corda cósmica não satisfazia o meu requisito de que as curvas fechadas de tipo temporal aparecessem apenas em uma região finita. Contudo, é possível supor que isso aconteceu só porque as cordas cósmicas que usei eram infinitamente longas. Pode-se imaginar que seja possível construir uma máquina do tempo finita, usando-se arcos finitos de cordas cósmicas e ter densidade energética positiva em toda parte.

Lamento desapontar pessoas como Kip, que querem voltar ao passado, mas isso não pode ser feito com energia positiva em toda parte! Posso provar que, para construir uma máquina do tempo finita, é preciso ter energia negativa.

Os tensores clássicos de energia-momento de todos os campos fisicamente razoáveis obedecem à “condição de energia fraca”, segundo a qual a densidade energética em qualquer aspecto é igual ou maior que zero.

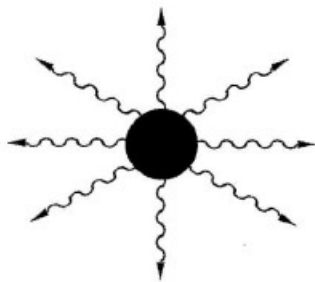
<p>Condição de energia fraca</p> <p>A densidade energética é igual ou maior que zero para todos os observadores.</p>
--

Dessa maneira, as máquinas do tempo de tamanho finito ficam excluídas da teoria puramente clássica. A situação é diferente, contudo, na teoria semiclássica, na qual são considerados campos quânticos em um ambiente de espaço-tempo clássico. O princípio da incerteza da teoria quântica significa que os campos estão sempre

flutuando para cima e para baixo, mesmo no espaço aparentemente vazio. Essas flutuações quânticas tornariam a densidade de energia infinita. Assim, seria necessário subtrair uma quantidade infinita de energia para que a teoria pudesse ter a densidade finita que se observa. Caso contrário, a densidade de energia encurvaria o espaço-tempo até reduzi-lo a um único ponto. Essa subtração pode deixar o "valor esperado" da energia negativo, pelo menos em áreas específicas. Mesmo no espaço plano podem-se encontrar estados quânticos em que o valor esperado da densidade de energia é localmente negativo, embora a energia total integrada seja positiva.

Podemos perguntar se esses valores esperados negativos levam o espaço-tempo efetivamente a encurvar-se da maneira apropriada, ou seja, a maneira que poderia levar às máquinas do tempo. Aparentemente, assim teria de ser. Logo antes da minha primeira visita ao Caltech, em 1974, descobri que os buracos negros não são tão negros como se diz!

O princípio da incerteza da teoria quântica permite que algumas partículas e alguma radiação escapem de um buraco negro. Isso leva a que o buraco negro perca massa e se evapore pouco a pouco.



Para que o horizonte do buraco negro se contraia e diminua de tamanho, a densidade de energia no horizonte tem de ser negativa, o que encurva o espaço-tempo e faz com que os raios de luz divirjam uns dos outros. Se a densidade de energia fosse sempre positiva, e o espaço-tempo encurvado sempre encurvasse os raios de luz uns em direção aos outros, a área do horizonte do buraco negro só poderia crescer com o tempo. Eu me dei conta disso uma noite, quando estava indo para a cama, logo depois do nascimento

da minha filha. Não vou dizer quanto tempo faz isso, mas já tenho um neto.



A evaporação dos buracos negros revela que o tensor quântico de energia-momento da matéria pode, por vezes, encurvar o espaço-tempo na direção necessária para construir uma máquina do tempo. Pode-se imaginar, portanto, que uma civilização muito adiantada pudesse conseguir que o valor esperado da densidade de energia fosse suficientemente negativo para formar uma máquina do tempo que pudesse ser usada por objetos macroscópicos.

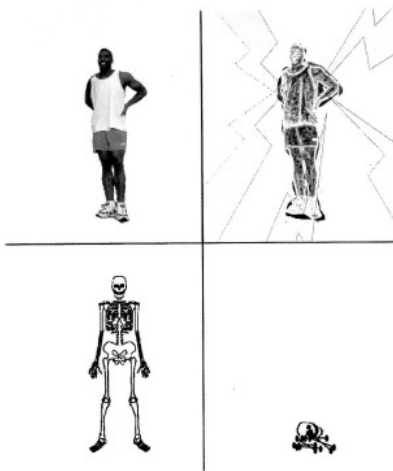
Função de dois pontos
 $\langle \varphi(x)\varphi(y) \rangle$ é infinito quando
 $x = y$ ou
 x e y estão no mesmo raio de luz

Há, porém, uma diferença importante entre o horizonte de um buraco negro e o horizonte em uma máquina do tempo, que contém raios de luz fechados que ficam dando voltas e mais voltas. O tensor de energia-momento de um campo quântico em um fundo ("Background" foi traduzido pelo termo técnico "fundo", no sentido de haver um espaço-tempo de fundo [como uma paisagem no fundo de um quadro], sobre o qual cálculos podem ser realizados - N.R.T.) de espaço curvo pode ser determinado a partir do que se denomina *função de dois pontos*.

Essa função descreve as correlações nas flutuações quânticas do campo em dois pontos, x e y . Toma-se a variação da função de

dois pontos com as posições de x e y e faz-se x tender a y . A função de dois pontos diverge à medida que x se aproxima de y , mas subtraem-se as divergências que ocorreriam no espaço plano e as caracterizadas pela curvatura local em y . Nos espaços-tempos curvos sem raios de luz fechados esta subtração torna o tensor de energia-momento finito, embora possivelmente negativo, como eu disse antes.

Contudo, a função de dois pontos também é infinita se x e y puderem unir-se por meio de um raio de luz. Assim, se houver um raio de luz fechado ou quase fechado, existirá uma infinidade adicional que não é subtraída pelos termos locais. Desse modo, poderíamos esperar que o tensor de energia-momento fosse infinito no horizonte de Cauchy, a fronteira da máquina do tempo, a região em que se pode viajar ao passado. Isso fica claro com cálculos explícitos feitos para alguns fundos suficientemente simples para que a função de dois pontos possa ser determinada com exatidão. Em geral, o tensor de energia-momento diverge no horizonte de Cauchy. Na prática, isso significaria que a pessoa ou o engenho espacial que tentasse cruzar o horizonte de Cauchy para entrar na máquina do tempo seria aniquilada por um surto de radiação!



Será que esse é um aviso da natureza para que não nos metamos com o passado? Em 1990, Kip e Sung-Won Kim sugeriram que a divergência no tensor de energia-momento no horizonte poderia ser eliminada por meio de efeitos quânticos gravitacionais.

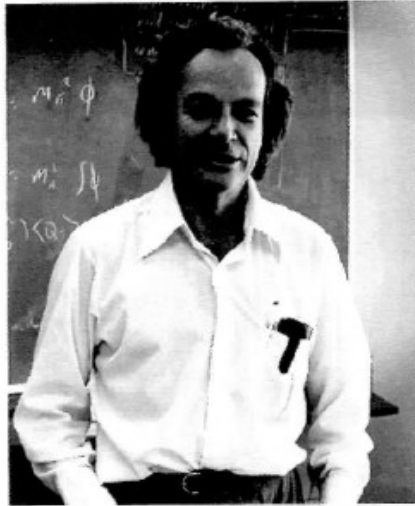
Eles assinalaram que isso poderia ocorrer antes que o tensor de energia-momento se tornasse suficientemente grande para ser percebido. Ainda não sabemos se a gravitação quântica produz um corte efetivo, mas, mesmo que o fizesse, acho que Kip agora estaria de acordo em que o corte não ocorreria em tempo para evitar o aniquilamento da pessoa ou do engenho espacial. O futuro das viagens no tempo parece ser negro — ou talvez ofuscantemente claro.

Mesmo que fique provado que as viagens no tempo são impossíveis, é importante que saibamos por que elas são impossíveis.

Contudo, o valor esperado do tensor de energia-momento depende do estado quântico dos campos de fundo. É possível especular que pode haver estados quânticos em que a densidade de energia seja finita no horizonte, e há exemplos em que isso acontece. Não sabemos como alcançar tais estados quânticos, nem se eles seriam estáveis com relação a objetos que cruzem o horizonte. Mas isso poderia estar dentro da capacidade tecnológica de uma civilização adiantada. Essa é uma possibilidade que deveria ser livremente estudada pelos físicos sem que eles fiquem, por isso, expostos ao deboche.

Para dar respostas definitivas a respeito de estados quânticos no horizonte, temos de considerar flutuações quânticas na métrica do espaço-tempo assim como nos campos de matéria. Pode-se esperar que essas flutuações causem uma perda de nitidez do cone de luz e do próprio conceito da ordem do tempo. Com efeito, a radiação que emana dos buracos negros pode ser vista como consequência do fato de que as flutuações quânticas da métrica significam que o horizonte não está definido com exatidão. Como ainda não temos uma teoria completa da gravitação quântica, é difícil dizer quais seriam os efeitos das flutuações da métrica. Mas é

possível ter esperança de obter algumas indicações a partir do trabalho de um outro físico do Caltech, Richard Feynman.



Richard Feynman. [Cortesia do California Institute of Technology, Agência Melanie Jackson]

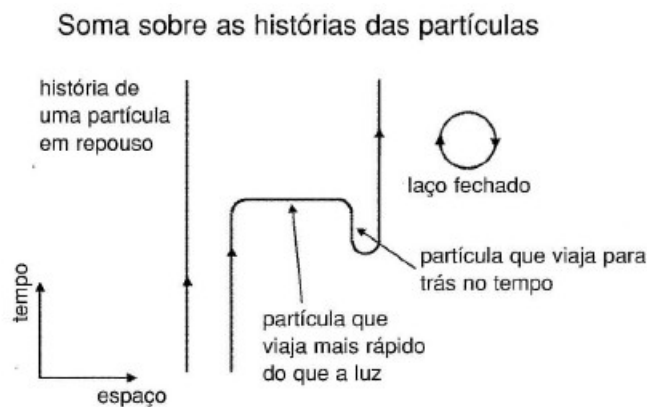
Além de tocar bongô, Feynman prestou uma grande contribuição à humanidade dando-nos a noção de que um sistema não tem uma única história, como o senso comum nos ensina. Em vez disso, cada sistema tem todas as histórias possíveis, cada qual com sua própria amplitude de probabilidades. Tem de haver uma história em que o time de futebol dos Estados Unidos seja campeão mundial, embora a probabilidade talvez seja baixa.



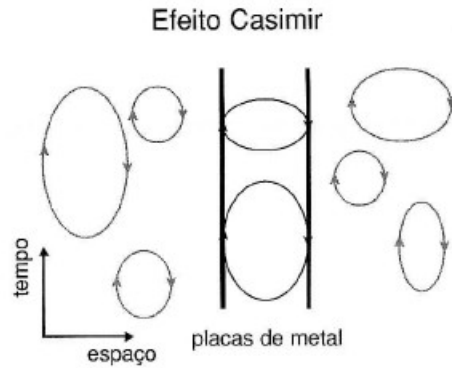
No caso em que o sistema é o universo inteiro, cada história será um espaço-tempo curvo que contém campos de matéria. Como devemos fazer a soma de todas as histórias possíveis, e não apenas das que satisfazem certas equações do movimento, a soma tem de

incluir espaços-tempos suficientemente encurvados para que se possa viajar ao passado. A pergunta, então, é a seguinte: por que as viagens no tempo não estão acontecendo em todo lugar? A resposta é que as viagens no tempo estão de fato ocorrendo em uma escala microscópica, sem que possamos percebê-las.

Se aplicarmos a ideia de Feynman e fizermos a soma das histórias de uma partícula que se move em um espaço-tempo de fundo, teremos que incluir histórias em que a partícula viaja mais rápido do que a luz e até mesmo para trás no tempo. Em particular, haverá histórias em que a partícula fica dando voltas e mais voltas em um laço fechado no tempo e no espaço. Seria como no filme *Feitiço do tempo*, em que um repórter tem que viver repetidamente sempre o mesmo dia.



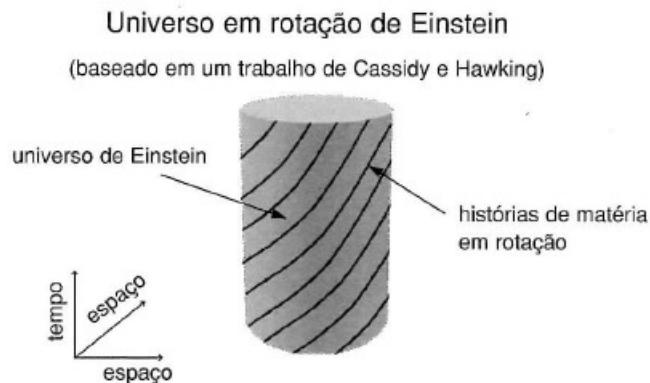
Não é possível observar partículas com essas histórias em laços fechados por meio de um detector de partículas. No entanto, seus efeitos indiretos foram medidos em numerosos experimentos. Um desses efeitos é um pequeno desvio na luz emitida por átomos de hidrogênio, causado por elétrons que se movem em laços fechados. Outro é o efeito Casimir, uma pequena força entre placas paralelas de metal, causada pelo fato de que há um número ligeiramente menor de histórias de laços fechados que podem caber no espaço entre as placas, em comparação com a região externa.



Assim, a existência de histórias de laços fechados está confirmada experimentalmente!

Pode-se argumentar que essas histórias de partículas em laços fechados não têm nada a ver com o encurvamento do espaço-tempo, uma vez que elas ocorrem até mesmo em ambientes fixos, como o espaço plano. Mas nos últimos anos verificamos que os fenômenos físicos muitas vezes têm descrições duais, sendo ambas igualmente válidas. Acho que se pode dizer tanto que uma partícula se move em um laço fechado em determinado ambiente fixo quanto dizer que ela permanece fixa e o espaço e o tempo flutuam à sua volta. É apenas questão de fazer primeiro a soma das trajetórias das partículas e depois a soma dos espaços-tempos curvos ou vice-versa.

Parece, assim, que a teoria quântica permite a viagem no tempo na escala microscópica. Mas isso não ajuda muito os cenários de ficção científica em que você pode voltar ao passado e matar seu avô. A pergunta, então, é: será possível que as probabilidades na soma das histórias tenham um ápice próximo aos espaços-tempos com curvas fechadas de tipo temporal de natureza macroscópica?



Essa questão pode ser analisada mediante o estudo da soma das histórias de campos de matéria em uma série de espaços-tempos de fundo que se aproximam cada vez mais de admitir curvas fechadas de tipo temporal. Pode-se esperar a ocorrência de algo realmente fantástico quando as curvas fechadas de tipo temporal aparecem pela primeira vez. Isso foi o que se passou em um exemplo simples que estudei com meu aluno Mike Cassidy.¹ Os espaços-tempos de fundo da série eram intimamente associados ao que se denomina universo de Einstein. Trata-se de um espaço-tempo estático, em que o tempo transcorre do passado infinito para o futuro infinito. As direções espaciais, contudo, são finitas e se fecham sobre si mesmas, como a superfície da Terra, mas em todas as três dimensões. Desse modo, o espaço-tempo é como um cilindro cujo eixo longo corresponde ao tempo e cuja seção transversal corresponde às três direções espaciais. Como não está em expansão, o universo de Einstein não representa o universo em que vivemos.



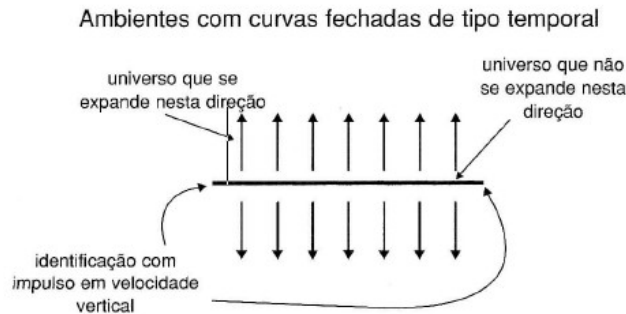
De todo modo, é um fundo conveniente para a discussão sobre as viagens no tempo porque sua simplicidade permite que se execute a soma das histórias.

Deixemos por um momento as viagens no tempo e consideremos campos quânticos a temperaturas finitas em um universo de Einstein que gire à volta de um eixo. Se estivermos exatamente no eixo, podemos permanecer no mesmo ponto do espaço. Mas, se não estivermos no eixo, estaremos movendo-nos através do espaço, de acordo com a rotação do universo à volta do eixo. Se o universo for espacialmente infinito, os pontos que estejam suficientemente afastados do eixo terão de estar rodando a uma velocidade maior que a da luz. No entanto, como o universo de Einstein tem direções espaciais finitas, existe uma velocidade de rotação crítica abaixo da qual nenhuma parte do universo estará rodando mais rápido do que a luz.

Podemos agora considerar a soma das histórias das partículas em um universo de Einstein em rotação. Quando a rotação é baixa, a partícula pode ter muitas trajetórias, cada uma das quais com determinado valor de energia nas partículas. Dessa maneira, muitas trajetórias contribuem para a soma das histórias de todas as partículas. Mas à medida que aumenta o ritmo de rotação do universo de Einstein, a soma das histórias das partículas terá um ápice pronunciado em torno da única trajetória classicamente permitida, ou seja, a que se move à velocidade da luz. Isto significa que a soma líquida das histórias das partículas é pequena. Portanto, a probabilidade desses fundos será relativamente baixa na soma de todas as histórias dos espaços-tempos curvos.

O que é que os universos em rotação de Einstein têm a ver com as viagens no tempo e com as curvas fechadas de tipo temporal? A resposta é que eles são matematicamente equivalentes a outros fundos que admitem curvas fechadas de tipo temporal. Esses outros fundos são universos que se expandem em duas direções espaciais, mas não na terceira direção, que é periódica. Isto é, se se avançar certa distância nessa direção, volta-se ao ponto inicial. Mas cada vez que se completa o circuito nessa terceira direção espacial, a

velocidade do movimento na primeira e na segunda direções sofre um impulso.



Se o impulso for pequeno, não haverá curvas fechadas de tipo temporal. Mas podemos considerar uma sequência de fundos com impulsos crescentes. Em determinado ponto crítico, as curvas fechadas de tipo temporal aparecerão. Não chega a ser surpreendente que esse ponto crítico equivalha ao ritmo crítico de rotação do universo de Einstein correspondente.

Conjectura da proteção cronológica

As leis da física conspiram para impedir que os objetos macroscópicos viajem no tempo.

Como os cálculos da soma sobre as histórias nesses fundos são matematicamente equivalentes, pode-se concluir que a probabilidade desses fundos cai a zero à medida que se aproximam do encurvamento necessário para as curvas fechadas de tipo temporal. Isso apóia a *conjectura da proteção cronológica*., segundo a qual as leis da física conspiram para impedir que objetos macroscópicos viajem no tempo.

Probabilidade de que Kip pudesse voltar ao passado
e matar o avô

Menos que
1 sobre 10
com
trilhões e trilhões e trilhões e trilhões e trilhões
de zeros
em seguida

Embora a soma das histórias permita as curvas fechadas de tipo temporal, as probabilidades são extremamente pequenas. Com efeito, baseado no argumento da dualidade antes mencionado, estimo que a probabilidade de que Kip pudesse voltar ao passado e matar seu avô seja menor do que 1 sobre 10 com 1 trilhão de trilhões de trilhões de trilhões de zeros em seguida. Essa é uma probabilidade bem pequena, mas, se olharmos bem para o Kip, podemos perceber certa falta de nitidez em seus contornos! Isso corresponde à possibilidade ínfima de que algum idiota vindo do futuro possa voltar ao passado e matar seu avô, de maneira que ele, na verdade, não está aí!



Como jogadores inveterados que somos, Kip e eu poderíamos fazer uma aposta sobre isso. O problema é que não podemos apostar porque agora estamos do mesmo lado. Por outro lado, eu não faria essa aposta com mais ninguém. Poderia ser alguém do futuro que soubesse que as viagens no tempo são possíveis!

As dobras do espaço-tempo e o mundo quântico

Especulações sobre o futuro

Kip S. Thorne

Acabo de participar de um aniversário que me deixou emocionado. Meu companheiro Jim Hartle me diz que essas cerimônias têm dois perigos: o primeiro é que os amigos causem o maior constrangimento exagerando as realizações do homenageado. O segundo é que eles não exagerem nada. Felizmente os meus amigos exageraram.

Na medida em que haja alguma verdade no fundo dos seus exageros, isso se deve a John Wheeler. John foi meu mentor como escritor, orientador e pesquisador. Orientou minha tese de doutorado na Universidade de Princeton, quase quarenta anos atrás, e a partir daí tornou-se meu amigo próximo, colaborador em dois livros e fonte de inspiração pelo resto da vida. Essa comemoração dos meus sessenta anos me faz lembrar intensamente as celebrações que fizemos dos sessenta anos de Johnny, trinta anos atrás.

Olhando para as quatro décadas da minha vida de físico, o que me impressiona é a mudança enorme que ocorreu na nossa compreensão do universo. Que outras descobertas as próximas quatro décadas trarão? Hoje especularei a respeito de algumas das grandes descobertas nos campos da física em que atuei. Minhas previsões poderão parecer tolas quando vistas em retrospecto, dentro de quarenta anos. Mas nunca me importei em parecer tolo, e as previsões podem funcionar como estímulo à pesquisa. Imagine hordas de jovens dedicados a provar que estou errado!

Começarei recordando as bases dos campos em que atuei. Trabalho, em parte, com a teoria da relatividade geral. A relatividade foi a primeira revolução do século XX na nossa compreensão das leis que governam o universo, as leis da física. Essa primeira revolução nos foi proporcionada por Albert Einstein em duas etapas: a relatividade especial, em 1905, e a relatividade geral, em 1915,

entremeadas por uma luta de dez anos, muito semelhante à luta que Alan Lightman descreve neste volume.



1. *Albert Einstein aos 26 anos, quando estava formulando a relatividade especial — o primeiro passo da primeira revolução do século XX na compreensão das leis da natureza. [Cortesia de Albert Einstein Archives, the Hebrew University of Jerusalem, Israel.]*

No final da luta, Einstein concluiu que o espaço e o tempo são encurvados pela matéria e pela energia e que esse encurvamento é responsável pela gravidade que nos prende à superfície da Terra. Ele nos deu um conjunto de equações a partir das quais é possível deduzir o encurvamento do espaço e do tempo à volta dos objetos cósmicos que compõem nosso universo. Nos 85 anos transcorridos desde então, milhares de físicos têm labutado com as equações de Einstein, tratando de extrair novas previsões a respeito do encurvamento do espaço-tempo.

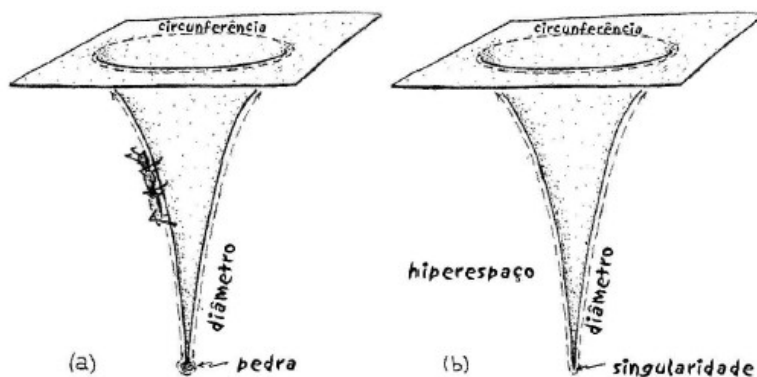
No meu livro *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, conto a história dessa luta, inclusive a descoberta mais interessante que ela produziu: a previsão da existência dos buracos negros. Robert Oppenheimer, que se movia constantemente entre a Universidade da Califórnia em Berkeley e o Caltech no final da década de 1930, fez a primeira previsão, uma tentativa, mas foi necessário o esforço concertado de centenas de outros cientistas nas

décadas de 50, 60 e 70 para elaborar todos os detalhes do que é um buraco negro e de como deve ser seu comportamento. Meu mentor, John Wheeler, foi o pioneiro moderno dos buracos negros, e meu amigo Stephen Hawking foi o profeta dos últimos dias.

O buraco negro é o fim da linha em matéria de encurvamento do espaço-tempo, de acordo com as equações de Einstein: ele é produzido inteira e exclusivamente por esse encurvamento. Seu enorme encurvamento é produzido por uma enorme quantidade de energia altamente compactada — energia que não reside na matéria, mas no próprio encurvamento. O encurvamento gera o encurvamento sem ajuda de matéria. Essa é a essência dos buracos negros.

Se tivéssemos um buraco negro do tamanho da maior abóbora do mundo, com uma circunferência de uns 10 metros, as leis da geometria de Euclides nos dizem que o diâmetro será de 10 metros divididos por π (3,14159...), ou cerca de 3 metros. Mas o diâmetro do buraco seria, na verdade, muito maior do que 3 metros, talvez mais de 300 metros. Como pode ser? Muito simples: as leis de Euclides não prevalecem no espaço altamente encurvado do buraco.

Considere uma analogia simples. Tome uma cama elástica, estique-a com o apoio de quatro mastros altos e coloque uma pedra pesada no centro dela. A pedra forçará a superfície de borracha para baixo, como se vê na figura 2a. Suponha que você é uma formiga que vive na cama elástica. Ela é a totalidade do seu universo. Você não é uma formiga qualquer: é uma formiga cega e não pode ver, portanto, nem os mastros, nem a pedra que encurva a borracha. Mas você é também uma formiga esperta e inquisitiva e põe-se a explorar seu universo. Você caminha pela borda circular da superfície, onde ela começa a encurvar-se e mede a sua circunferência: 30 metros.



2. (a) Uma cama elástica encurvada por uma pedra pesada está sendo explorada por uma formiga inteligente. (b) O espaço encurvado de um buraco negro tal como visto por um hiperser que vive no hiperespaço.

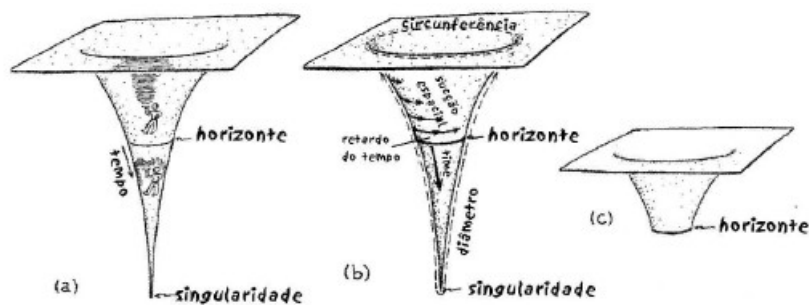
Conhecedor da matemática de Euclides, você prevê que o diâmetro terá cerca de 10 metros, mas como você é também cética em matéria de prognósticos, põe-se a medir o diâmetro e começa a caminhar em direção ao centro; caminha, caminha, caminha e, por fim, chega ao outro lado depois de andar 300 metros, e não os 10 metros previstos por Euclides. “O espaço do meu universo é curvo”, você conclui — fortemente encurvado.

Esta história dá uma descrição bastante precisa de um buraco negro. Podemos descrever o espaço tridimensional do interior e do entorno de um buraco negro como um espaço encurvado dentro de um espaço plano com mais dimensões (frequentemente denominado *hiperespaço*), da mesma maneira como a cama elástica, que é bidimensional e encurvada, como mostra a figura 2a. Se eu fosse um *hiperser* vivendo no hiperespaço, eu veria a forma do espaço do buraco negro como algo muito semelhante à forma da cama elástica (veja a figura 2b).

A coisa mais intrigante a respeito dos buracos negros é que se eu cair em um não haverá nenhuma maneira de escapar, nem de lhe enviar sinais, se você estiver esperando por mim do lado de fora. Isso é o que mostra a figura 3a, onde se vê um Kip bidimensional caindo em um buraco negro, tal como o veria um hiperser no hiperespaço. (Suprimi uma das três dimensões do nosso universo para que a imagem seja compreensível.) Ao cair, levo comigo uma

antena de micro-ondas que transmite sinais para você, do lado de fora, e lhe diz o que estou vendo.

Não é só o espaço através do qual me movo que está encurvado. Também o tempo, de acordo com as equações de Einstein: o fluxo do tempo se retarda perto do buraco negro, e a partir de um ponto de inflexão (denominado *horizonte*, ou borda do buraco negro) o tempo fica tão encurvado que passa a fluir em uma direção que normalmente seria espacial; o fluxo futuro do tempo se dá em direção ao centro do buraco.



3. (a) Kip cai em um buraco negro e tenta transmitir sinais de micro-ondas para você, do lado de fora. (b) O encurvamento do espaço e do tempo e a sucção espacial, em um movimento semelhante a um ciclone, em torno de um buraco negro em rotação. (c) O encurvamento do espaço externo ao horizonte — o diagrama servirá como base para muitas das figuras que se seguem.

Nada pode se mover para trás no tempo,¹ segundo as equações de Einstein. Portanto, uma vez dentro do buraco negro, eu e meus sinais de micro-ondas somos sugados, juntamente com o fluxo do tempo, em direção a uma "singularidade" que jaz no centro do buraco negro. Você, esperando do lado de fora, nunca receberá os meus sinais, emitidos do outro lado do horizonte. Os sinais são tomados pelo fluxo do tempo e sugados na direção oposta à sua. Paguei o preço máximo para explorar o interior do buraco negro: não poderei publicar minhas descobertas.

Além do encurvamento do espaço e do retardamento e do afunilamento do tempo, há um terceiro aspecto do encurvamento do espaço-tempo de um buraco negro: um rodadoiro do espaço e do tempo que gira à volta do horizonte do buraco, como um ciclone

(figura 3b). Assim como acontece com os rodamos de ar, cada vez mais lentos à medida que se afastam do centro do ciclone, também o rodamos do espaço-tempo é bem lento em áreas que estão longe do horizonte do buraco negro. Quanto mais próximo ao centro, ou ao horizonte, mais veloz ele é. E quando está bem perto do horizonte, o rodamos do espaço-tempo é tão rápido e forte que suga todos os objetos que se aventuram a chegar perto, em um rodopio orbital. Por mais poderosos que sejam os motores de uma nave espacial, uma vez que ela chegue no horizonte, não poderá escapar do rodamos. Ela será sugada inexoravelmente pelo fluxo do tempo, em voltas e mais voltas — e, uma vez no interior do horizonte, será tragada para dentro pelo fluxo do tempo, em direção à boca aberta da singularidade que está no centro do buraco negro.

O rodamos do espaço-tempo em torno dos buracos negros foi descoberto em 1963, por Roy Kerr, físico matemático de Christchurch, Nova Zelândia, que o desenterrou da matemática das equações de Einstein. Assim como o encurvamento do espaço e do tempo são produzidos pela enorme energia do buraco negro (que é a energia do próprio encurvamento), também o rodamos do espaço-tempo é produzido pelo enorme momento angular rotacional do buraco negro (momento angular que reside no próprio rodamos do espaço-tempo). A energia e o momento angular do encurvamento criam o encurvamento, de acordo com as equações de Einstein. O encurvamento gera o encurvamento.

Como não podemos ver o interior de um buraco negro a partir do lado de fora, ignoraremos seu lado interno por enquanto. Guardarei os meus desenhos dos horizontes dos buracos negros e representarei apenas o seu exterior, como na figura 3c.

Nós, físicos relativistas, temos andado terrivelmente frustrados nos últimos 25 anos. Em 1975, já havíamos percebido todas essas previsões sobre os buracos negros a partir das equações de Einstein e estávamos pedindo aos astrônomos que produzissem confirmações ou refutações derivadas da observação. Mas, apesar dos enormes esforços, os astrônomos não conseguiram produzir medições quantitativas de nenhum encurvamento do espaço-tempo produzido por buracos negros. O grande triunfo deles é um conjunto de

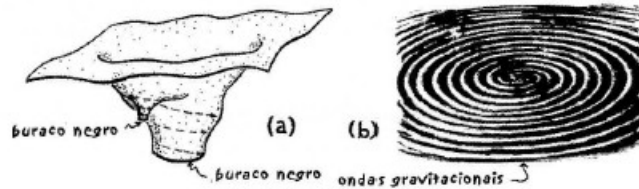
descobertas praticamente irrefutáveis de buracos negros no universo, mas não lhes foi possível até aqui mapear, ainda que em forma de esboço, o encurvamento do espaço-tempo à volta de qualquer dos buracos negros descobertos.

Tendo isso como pano de fundo, vou começar a fazer meus prognósticos. Inicialmente farei uma previsão na qual deposito grande confiança.

PREVISÃO 1: No período de 2010 a 2015, um detector de ondas gravitacionais baseado no espaço e chamado LISA (Laser Interferometer Space Antenna) revelará o encurvamento do espaço-tempo à volta de muitos buracos negros de grande massa no universo longínquo, e mapeará tal encurvamento com finos detalhes em todos os três aspectos do encurvamento: o encurvamento do espaço, o encurvamento do tempo e o rodado do espaço-tempo à volta do horizonte.

Esses mapas dos buracos negros, cada um dos quais será um quadro de como o buraco negro apareceria para um hiperser no hiperespaço, completará a transformação dos buracos negros de entidades puramente teóricas em objetos aptos para exploração pela observação.

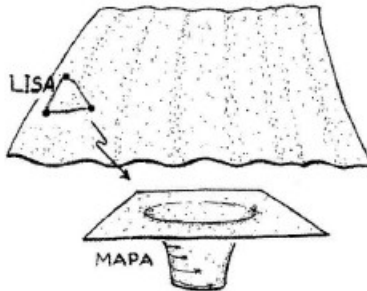
As figuras 4 e 5 mostram a base dos mapas do LISA. Suponha que um buraco negro pequeno esteja em órbita à volta de outro buraco negro bem maior no universo distante (figura 4a). O buraco negro pequeno pode ter uma massa dez vezes maior do que a do Sol e uma circunferência de uns 180 quilômetros (o tamanho de San Francisco). O buraco negro grande pode pesar o equivalente a 1 milhão de vezes o peso do Sol, com uma circunferência de cerca de 18 milhões de quilômetros (quatro vezes maior do que a do Sol). O buraco negro pequeno circularia à volta do grande a uma velocidade aproximadamente igual à metade da velocidade da luz, em uma órbita apenas alguns quilômetros maior do que o horizonte do buraco negro grande.



4. (a) Buraco negro pequeno em órbita em torno de um buraco negro grande. (b) As ondas gravitacionais produzidas pelo movimento orbital do buraco negro pequeno.

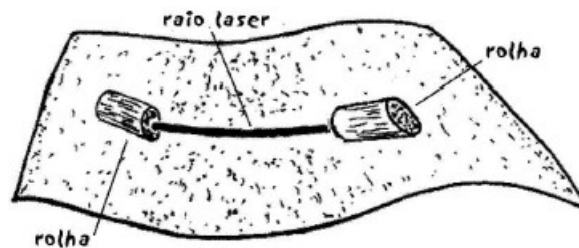
As órbitas do buraco negro pequeno à volta do grande assemelham-se ao movimento que você faz ao mover o seu dedo em círculos na superfície da água de um lago. Assim como o seu dedo cria pequenas ondas na superfície da água, que se irradiam por ela levando para o resto do lago as informações relativas ao movimento do seu dedo, também o encurvamento do espaço do buraco negro pequeno em seu deslocamento rápido cria ondas de encurvamento no tecido do espaço-tempo à volta do buraco negro grande. A cada circuito completo à volta do buraco negro grande, o buraco negro pequeno produz duas oscilações completas das ondas que irradia: duas cristas e dois vales. As ondas, chamadas *ondas gravitacionais* (figura 4b), propagam-se pelo universo com a velocidade da luz. Alguns anos atrás, Fintan Ryan, um estudante de pós-graduação de quem fui mentor, demonstrou que essas ondas transportam, codificado na “forma das ondas”, um mapa pormenorizado do encurvamento do espaço-tempo do buraco negro grande, por onde o buraco negro pequeno trafega, em suas órbitas.

As ondas gravitacionais viajam até os confins do espaço intergaláctico, por bilhões de anos-luz. Em algum momento, elas chegam à nossa galáxia, a Via Láctea, e ao nosso sistema solar, onde encontrarão o LISA (figura 5). O LISA foi construído para monitorar as oscilações das ondas e registrar todos os seus detalhes. A partir desses detalhes, esperamos decodificar o mapa trazido pelas ondas — o mapa dos três aspectos do encurvamento do buraco negro grande.



5. Depois de viajar pelas grandes distâncias do espaço intergalático, as ondas gravitacionais alcançam o LISA, que monitora e registra as formas das ondas. A partir desses dados, podemos extrair um mapa do encurvamento do espaço-tempo do buraco negro grande.

O princípio no qual o LISA baseia-se está descrito na figura 6. Duas naves espaciais que flutuam no espaço interplanetário são análogas a duas rolhas que flutuam na superfície de um lago.

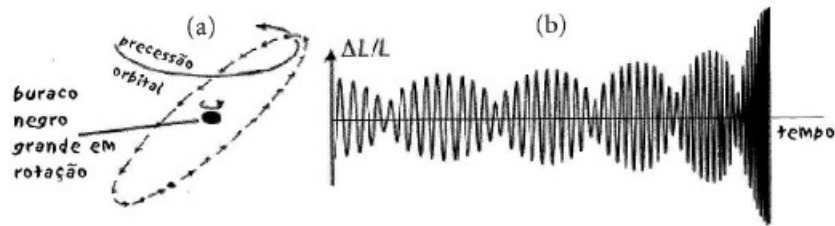


6. Assim como é possível monitorar as ondas de água em um lago por meio do uso de um raio laser que meça a distância entre duas rolhas que flutuam, também o LISA monitorará as ondas gravitacionais usando um raio laser para medir a distância entre naves espaciais.

Com o deslocamento das ondas de água, as cristas e vales aumentam e diminuem a distância entre as rolhas. O movimento relativo das rolhas pode ser monitorado com grande precisão usando-se a mesma técnica empregada pelos agrimensores: a viagem de ida e volta de um raio laser.

Do mesmo modo, as ondas gravitacionais aumentam e diminuem o espaço por onde passam, fazendo com que as naves espaciais, onde está o LISA, movam-se para a frente e para trás, uma em relação à outra. E esse movimento relativo é monitorado pelos raios laser. Quanto maior for a separação L entre as naves espaciais, maiores serão as pequenas oscilações AL em sua

separação. A razão da separação AL/L é igual à oscilação do campo das ondas gravitacionais. O padrão das oscilações em função do tempo t — $AL(t)/L$ — dá a forma das ondas gravitacionais do campo. Essa forma das ondas é análoga aos padrões produzidos pelas ondas sonoras que aparecem em um osciloscópio. Elas transportam o mapa do buraco negro grande.



7. (a) A rotação do buraco negro grande suga o espaço em um movimento à volta de si mesmo, o que causa uma precessão na órbita do buraco negro pequeno. (b) As ondas gravitacionais do buraco negro pequeno, cuja órbita está em precessão, produzem mínimas oscilações na diferença ΔL entre os comprimentos de dois dos braços de LISA. Este gráfico mostra $\Delta L/L$ como função do tempo. Cada viagem do buraco negro pequeno à volta do grande produz duas oscilações em ΔL ; a precessão da órbita causa uma modulação na amplitude e na fase das oscilações.

A figura 7 mostra como um aspecto desse mapa — o rodado do espaço, semelhante a um ciclone, à volta do buraco negro grande — está codificado na forma da onda. O rodado espacial suga a órbita do buraco negro pequeno, provocando a sua precessão. Vista da Terra (se fosse possível enxergar tão longe), a órbita passa alternadamente à frente e atrás do buraco negro grande. Correspondentemente, a amplitude das oscilações (duas oscilações por circuito orbital) torna-se alternadamente menor e maior, de modo que as ondas são moduladas como mostra a figura 7b. Com dois eventos frontais em cada precessão completa, a forma das ondas é modulada duas vezes mais rápido do que os rodado espaciais.

Suponha, por razões de simplicidade, que a órbita seja circular e tenha uma inclinação muito pequena com relação ao equador do buraco negro grande, que o buraco negro pequeno tenha uma massa de 10 vezes a do Sol, que o buraco negro grande tenha uma

rotação muito rápida² e que a sua massa seja 1 milhão de vezes a do Sol. Então, um ano antes de o buraco negro pequeno mergulhar no horizonte do buraco negro grande, sua circunferência orbital será apenas 3,4 vezes maior do que o horizonte, e haverá 92 mil órbitas (184 mil ciclos ondulatórios) antes do mergulho final. O período de oscilação das ondas será de 4,8 minutos, e podemos inferir a partir disso um período orbital (medido por relógios terrestres) de $2 \times 4,8$ minutos. E a modulação da forma das ondas tem um período de 42 minutos, *a partir do que podemos inferir que, para uma circunferência de 3,4 horizontes, o período do rodão espacial será $2 \times 42 = 84$ minutos.*

Um mês antes do mergulho, a circunferência orbital será apenas 1,65 vez maior do que o horizonte, o período de oscilação das ondas será de 1,6 minuto e haverá ainda 40 mil ciclos até o mergulho. O período de modulação da forma das ondas será de 8,6 minutos, *a partir do que podemos inferir que o período do rodão espacial será de 17,2 minutos para uma circunferência de 1,65 horizontes.*

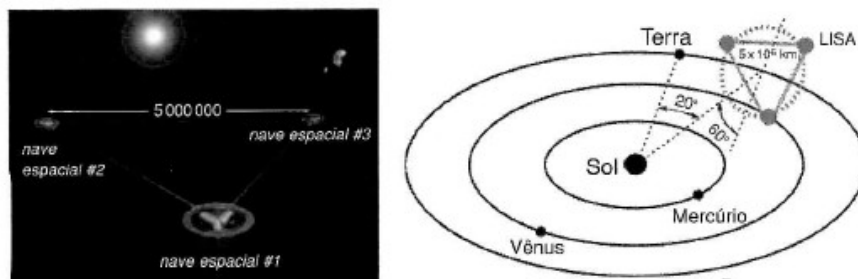
Um dia antes do mergulho, a circunferência orbital será 1,028 vez maior do que o horizonte, o período das ondas será de 38 segundos e haverá 2 mil ciclos ainda por vir. O período de modulação observado será de 43 segundos, *portanto, o período do rodão espacial para uma circunferência de 1,028 horizontes será de 2 minutos.*

Dessa maneira, a partir das alterações no padrão de modulação da forma das ondas, podemos mapear o ritmo do rodão espacial como função da localização do lado de fora do horizonte. Tendo 184 mil ciclos de ondas para trabalhar no último ano de vida do buraco negro pequeno, provenientes de uma área 5,8 vezes maior do que o horizonte do buraco negro grande, podemos esperar obter um mapa extremamente preciso.

O LISA consistirá em três naves espaciais ligadas por laser, localizadas nos ângulos de um triângulo equilátero (figura 8). Por meio de uma variante da interferometria a laser (método que explico posteriormente neste ensaio), qualquer diferença no comprimento dos braços do triângulo será monitorada, e a partir dessas diferenças

de comprimento, independentes uma da outra, deduziremos as duas formas de ondas, também independentes uma da outra. Para extrair o mapa como um todo e ao mesmo tempo conhecer a massa e a rotação do buraco negro pequeno, os detalhes da órbita, a orientação do buraco negro grande no espaço e a distância dos dois buracos negros com relação à Terra, precisamos monitorar as duas formas de onda, e não apenas uma.

As distâncias L entre as três naves espaciais do LISA serão de 5 milhões de quilômetros (13 vezes maior que a distância entre a Terra e a Lua). Elas viajarão à volta do Sol na mesma órbita da Terra, a 50 milhões de quilômetros, formando com ela um ângulo de 20 graus, tendo no vértice o Sol. Depois de viajar pelas enormes distâncias do espaço intergaláctico, as ondas gravitacionais tornam-se muito fracas: AL/L será algo menor do que 10^{21} — um por 1 bilhão de trilhões. Correspondentemente, as pequenas oscilações AL na distância entre as naves espaciais serão de cerca de 10^{10} centímetros — um milionésimo do comprimento de onda da luz de laser usada para monitorar as oscilações e um centésimo do diâmetro de um átomo. Que sejamos capazes de medir essas variações tão pequenas é um verdadeiro prodígio da tecnologia moderna!



8. À esquerda: LISA consistirá em três naves espaciais nos vértices de um triângulo equilátero de 5 milhões de quilômetros de lado. As naves são ligadas entre si por laser. À direita: O tamanho de LISA aparece aqui multiplicado por 10 em relação às órbitas planetárias.

O LISA será construído e operado em conjunto pela NASA e pela ESA (European Space Agency) e o lançamento está provisoriamente

mercado para 2010. Ele foi concebido (ainda com outro nome) em meados da década de 1970 por vários dos meus amigos físicos: Peter Bender, da Universidade de Colorado, Ronald Drever, da Universidade de Glasgow, e Rainer Weiss, do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Muitos cientistas trabalharam duramente nos últimos 25 anos para aperfeiçoar o projeto, para certificar-se dos tipos de objetos emissores de ondas pelos quais ele deve interessar-se, para determinar as modalidades de conhecimento que a nossa ciência pode extrair a partir das ondas gravitacionais e para convencer a NASA e a ESA de que o LISA deve voar. Por fim, em 2001, o LISA foi endossado por comitês de cientistas com poder político e parece estar agora no rumo certo para cumprir minha primeira previsão: produzir mapas de grande precisão de buracos negros enormes, no período entre 2010 e 2015.

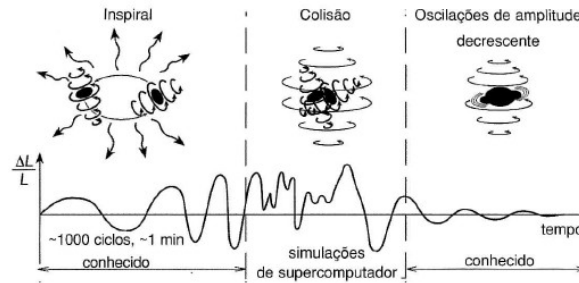
Vamos agora à minha segunda previsão.

PREVISÃO 2: Entre 2002 e 2008 {ou seja, antes do lançamento do LISA, programado para 2010}, detectores de ondas gravitacionais baseados na Terra testemunharão colisões entre buracos negros e observarão as fortes vibrações que elas causarão no encurvamento do espaço-tempo. Comparando as ondas observadas com simulações feitas em supercomputadores, descobriremos como o encurvamento se comporta quando interage com si próprio, de maneira dinâmica e não linear.

Quando as ondas de água alcançam uma altura a partir da qual passam a interagir com si próprias de maneira dinâmica e não linear, o resultado pode ser a espuma que se quebra e cai pesadamente sobre os surfistas — ou uma onda enorme que viaja através do oceano em alta velocidade e produz o caos quando chega à costa. O comportamento dinâmico e não linear do encurvamento do espaço-tempo ainda é, hoje, em grande medida, um mistério. Esperamos desvendá-lo com a combinação entre as observações das ondas gravitacionais e as simulações dos supercomputadores.

O meio pelo qual podemos chegar à nossa descoberta é uma colisão entre dois buracos negros no universo distante. Os dois

buracos negros inicialmente orbitam um em torno do outro em uma “inspiral” (diminuição gradual do raio da órbita), devido à perda de energia, que se esvai nas ondas gravitacionais. Os dois buracos negros se fundem, então, em uma “colisão”, dando origem a um buraco negro derradeiro e único. Por fim, o buraco negro final sofre oscilações de amplitude decrescente.

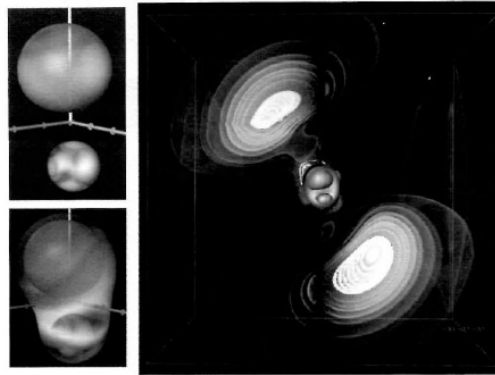


9. Parte superior: A inspiral e a colisão de dois buracos negros que orbitam um à volta do outro. Parte inferior: Gráfico esquemático da forma das ondas gravitacionais emitidas pelos buracos negros.

Como mostra a figura 9, cada buraco negro se assemelha a um ciclone. O espaço-tempo rodopia à volta do seu horizonte como o ar à volta do olho de um furacão. Ao girar em torno um do outro, seu enorme momento orbital angular suga o próprio espaço-tempo em um movimento de rodado, de modo que temos dois ciclones dentro de um terceiro, ainda maior, com o qual se chocam juntos. Queremos saber o que acontece quando os ciclones não são formados de ar, mas sim por um encurvamento do espaço-tempo, que se encontra em rodado. Para saber a resposta será necessário um ataque em três frentes: simulações de supercomputadores, observações de ondas gravitacionais e a comparação entre as simulações e as observações.

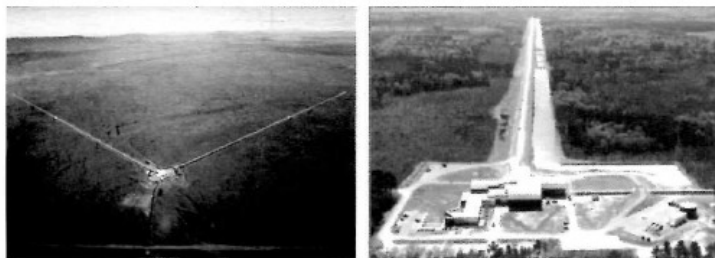
As simulações estão sendo praticadas por cerca de cinquenta cientistas na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Esses cientistas são denominados relativistas numéricos porque tentam resolver numericamente, em computadores, as equações de Einstein para a relatividade geral. Apostei com esses *relativistas numéricos* que as ondas gravitacionais serão detectadas a partir de colisões de buracos negros antes que as computações deles alcancem o grau de

sofisticação necessário para simulá-las. Espero ganhar, mas também espero perder, porque os resultados das simulações são cruciais para interpretar as ondas que observamos.



10. Simulação de uma colisão quase frontal entre dois buracos negros de diferentes tamanhos, computadas numericamente em supercomputador por um grupo de cientistas que trabalham no Albert Einstein Institute, em Golm, Alemanha, liderados por Edward Seidel e Bernd Brügmann. Em cima à esquerda: Horizontes aparentes (boas aproximações de horizontes verdadeiros) dos dois buracos negros pouco antes da colisão. Embaixo à esquerda: Horizonte aparente do buraco negro fundido logo depois da colisão, com os horizontes aparentes individuais no interior. Direita: padrão de ondas gravitacionais com dois lóbulos, produzido pela colisão, com os três horizontes aparentes no centro. [Cortesia do Albert Einstein Institute, Max Planck Society.]

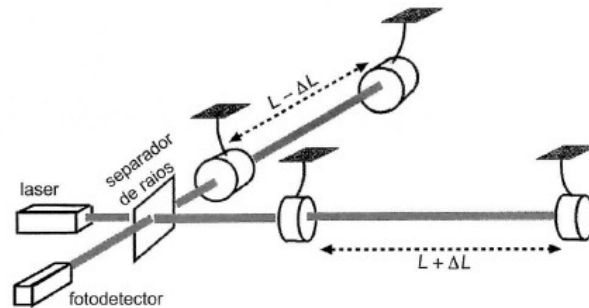
A figura 10 é um exemplo do estado atual do esforço de simulação. Ela mostra algumas características de uma colisão quase frontal entre dois buracos negros que não giram e que têm tamanhos diferentes. Nada espetacular acontece nessa colisão em consequência das não-linearidades dinâmicas do encurvamento. Em contraste, quando os buracos negros têm rotação rápida, com sentido rotacional aleatório, e colidem a partir de órbitas circulares cada vez menores (figura 9), podem se esperar vibrações intensas e complicadas no encurvamento.



11. Vista aérea dos detectores de ondas gravitacionais do LIGO em Hanford, Washington (à esquerda), e Livingston, Louisiana (à direita). [Cortesia do Projeto LIGO, California Institute of Technology.]

A figura 11 mostra três detectores de ondas gravitacionais baseados na Terra e destinados a descobrir as ondas produzidas por colisões de buracos negros, a partir do período entre 2002 e 2008, se eu estiver certo em minha previsão. Esses três detectores, dois em uma mesma instalação em Hanford, estado de Washington, e um em Livingstone, Louisiana, todos nos Estados Unidos, compõem o LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory). O LIGO faz parte de uma rede internacional que inclui um detector franco-italiano denominado VIRGO, em Pisa, Itália; um detector anglo-alemão denominado GEO600, em Hannover, Alemanha; e um detector japonês denominado TAMA, em um subúrbio de Tóquio.

O LIGO e seus parceiros são a culminação de quatro décadas de pesquisas feitas por centenas de cientistas e engenheiros dedicados. O LIGO teve início em 1983, como um sonho de Rai Weiss, no MIT, e de Ron Drever e eu próprio, no Caltech. Tornou-se realidade graças à liderança de Weiss, do MIT, e de Robbie Vogt, do Caltech, Stan Whitcomb e Barry Barish, que é o diretor do LIGO desde o início da construção, em 1994. Barish transformou o LIGO em um esforço de colaboração de 350 cientistas e engenheiros de 25 instituições nos Estados Unidos, Grã-Bretanha, Alemanha, Rússia, Austrália, Índia e Japão. O entusiasmo, dedicação e eficácia dessa talentosa equipe são verdadeiramente maravilhosos. Conto com eles para que a minha segunda previsão se torne realidade.



12. Diagrama esquemático do detector de ondas gravitacionais com interferômetro a laser, baseado na Terra.

Como fazer isso? Que tipo de detectores eles construíram para ver colisões de buracos negros? Cada detector do LIGO é similar ao LISA. As três naves espaciais do LISA, que navegam pelas ondas como rolhas na água, são substituídas por quatro espelhos cilíndricos pendurados por fios, presos a apoios superiores (figura 12), dois no edifício do canto e um em cada um dos edifícios que ficam nas extremidades das estruturas em forma de I, que aparecem na figura 11.0 comprimento dos dois braços de L é de 4 quilômetros. Quando as ondas gravitacionais passam, oscilando com uma rapidez muito maior do que a da frequência da oscilação pendular dos espelhos, que é de um ciclo por segundo, os espelhos navegam pela onda como fazem as rolhas nas direções horizontais, embora os fios impeçam que eles naveguem pelas ondas verticalmente. As ondas fazem com que o espaço se estique e se contraia, e isso faz com que os espelhos se agitem horizontalmente, uns em relação aos outros. As oscilações se contrapõem em cada um dos dois braços do detector (figura 12), de modo que um braço aumenta o seu comprimento em ΔL enquanto o outro o diminui também em ΔL . Tal como no caso do LISA, a taxa de variação no tempo $\Delta L/L$ é a forma da onda gravitacional e a luz de laser é empregada para monitorar a forma da onda da maneira descrita a seguir.

A luz do laser é enviada através de um separador de raios (veja a figura 12) de modo que metade da luz vai para cada braço. A luz é refletida em cada braço cerca de 100 vezes, após o que ela ressurge e os dois braços interferem um com o outro no separador de raios.

Quando um braço ganha em tamanho e o outro diminui, a intensidade da luz que se dirige ao fotodetector aumenta; quando o primeiro se reduz em tamanho e o segundo aumenta, o fotodetector recebe uma intensidade menor de luz. Este *interferômetro a laser* produz no fotodetector um sinal proporcional à forma de onda AL/L .

Os três interferômetros do LIGO estavam previstos para entrar em plena operação no verão de 2002. Ele e os seus parceiros internacionais começariam então suas primeiras pesquisas de ondas gravitacionais. Dependendo da generosidade da natureza, a sensibilidade inicial do LIGO — AL/L aproximadamente igual a 10^{21} — poderia ser ou não ser suficiente para observar colisões de buracos negros. Depois de três anos de pesquisas (e de observações, como esperamos), os detectores iniciais do LIGO serão substituídos por *detectores avançados* cuja sensibilidade será 15 vezes maior, o que lhes possibilitará um raio de observação do universo 15 vezes maior, abrangendo um volume mil vezes superior. Esses detectores avançados deverão permitir observações de colisões de buracos negros em *distâncias cosmológicas* (uma fração grande do universo). Dentro dessas distâncias, os astrofísicos esperam encontrar muitas colisões a cada ano, talvez mesmo a cada dia. Essa estimativa me dá confiança nas minhas previsões: o LIGO e os seus parceiros começarão a observar colisões de buracos negros dentro do período de 2002 a 2008.

Passo agora de previsões confiáveis para a década atual para uma especulação bem informada relativa à década de 2020 a 2030.

ESPECULAÇÃO BEM INFORMADA 3: Na década de 2020 a 2030, o LIGO, seus parceiros e o sucessor do LISA no espaço observarão todas as colisões de buracos negros no espaço com massa inferior a 3 milhões de vezes a do Sol. Sob todas as colisões entre estrelas de nêutrons e buracos negros e todas as colisões entre estrelas de nêutrons. Muitas colisões serão vistas todos os dias. O resultado final, após a comparação das ondas observadas com as simulações dos relativistas numéricos, será um enorme catálogo das colisões e das suas propriedades pormenorizadas, semelhante aos catálogos

de estrelas e galáxias produzidos pelas observações astronômicas ópticas, de ondas de rádio e de raios X, feitas no século XX.

As *estrelas de nêutrons* aqui mencionadas são objetos regidos por uma combinação entre as leis da relatividade geral para o encurvamento do espaço-tempo e as leis da mecânica quântica.

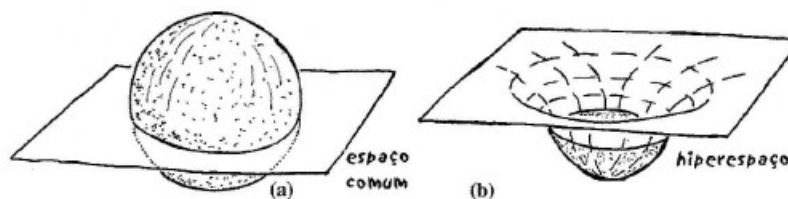
A mecânica quântica foi a segunda grande revolução do século XX no nosso entendimento das leis físicas. Enquanto as leis do encurvamento do espaço-tempo (a primeira revolução) agem normalmente na escala macroscópica, sobre objetos do tamanho de um ser humano, ou muito maiores, as leis da mecânica quântica agem, na escala microscópica, sobre objetos do tamanho de um átomo, ou menores. As leis quânticas são tão diferentes da nossa experiência diária quanto o são as leis do encurvamento do espaço-tempo, mas de maneira ainda mais estranha: elas insistem em que mesmo as propriedades mais simples, como a localização e a velocidade de uma partícula, são intrinsecamente imprecisas e só podem ser definidas de modo probabilístico — uma certa probabilidade de encontrar a partícula aqui, outra de encontrar a partícula ali, e assim por diante. Daqui a pouco discutiremos essa estranheza.

Entre outras coisas, a mecânica quântica rege a *força nuclear* — a força que mantém unidos os prótons e nêutrons nos núcleos atômicos. Normalmente fazemos experimentos com a força nuclear em aceleradores de partículas, arremessando os prótons e nêutrons dos núcleos atômicos uns contra os outros. Esses experimentos de colisões ensinaram-nos muitos detalhes a respeito da força nuclear, mas não todos: surpreendentemente, proporcionaram pouco conhecimento sobre a maneira como a força nuclear se comporta quando um número muito grande de nêutrons se encontra compactado em um volume pequeno, formando assim a matéria nuclear básica. A razão está em que os núcleos atômicos são muito pequenos. Um único núcleo pode comportar até algumas centenas de nêutrons e prótons, mas não mais do que isso.

Que acontece quando se tem milhões e zilhões de nêutrons e prótons atulhados em um volume mínimo? O único lugar em que

essa *matéria nuclear básica* aparece no universo hoje, tanto quanto se saiba, é o interior das estrelas de nêutrons, cuja densidade pode ser 30 vezes maior do que a de um núcleo atômico. As estrelas de nêutrons são, portanto, a chave para que possamos compreender os mistérios da matéria nuclear básica.

A força nuclear da mecânica quântica determina a enorme pressão que atua sobre o centro de uma estrela de nêutrons — uma pressão que tenta fazer com que a estrela exploda. O encurvamento do espaço-tempo produz a enorme atração gravitacional que tenta esmagar a estrela de nêutrons e convertê-la em um buraco negro (a enormidade do encurvamento é caracterizada pela deformação do espaço dentro da estrela e à volta dela, como mostra a figura 13).



13. O encurvamento do espaço dentro de uma estrela de nêutrons e à sua volta: (a) O corte equatorial de uma estrela, quando observado a partir de um hiperespaço plano com dimensões adicionais, no qual o nosso universo está contido, tem a forma assinalada em (b). A circunferência da estrela pode ser duas vezes maior do que o seu diâmetro, e não π vezes maior.

Dentro da estrela, a força esmagadora da gravidade é precisamente contrabalançada pela força explosiva da pressão nuclear. A circunferência da estrela é determinada por esse equilíbrio: quanto maior a pressão nuclear, maior a circunferência. Medindo a circunferência e também a massa, podemos determinar a força da gravidade da estrela, a partir do que podemos inferir a força da pressão nuclear — ou, mais precisamente, podemos conhecer melhor a *equação de estado* nuclear: a pressão nuclear como função da densidade.

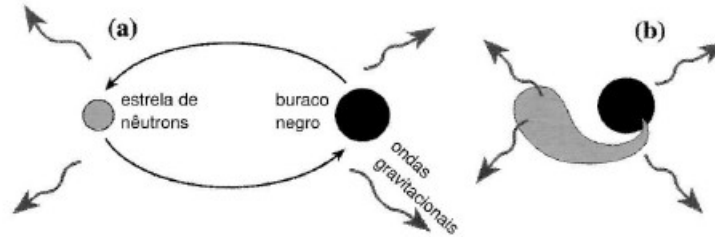
Embora já se tenham descoberto centenas de estrelas de nêutrons por meio de telescópios ópticos, de rádio e de raios X, e ainda que muitas das suas características já tenham sido

examinadas dessa maneira, tais observações eletromagnéticas só nos proporcionaram um conhecimento rudimentar das circunferências das estrelas e das suas equações de estado. Já pudemos medir a massa de cerca de 12 estrelas de nêutrons, e todas estão no entorno de 1,4 vez a do Sol, o que significa que elas contêm cerca de 10^{57} nêutrons; mas a medida de suas circunferências é ainda tão imperfeita que só sabemos que elas estão entre cerca de 25 e 50 quilômetros.

Isso leva à minha próxima previsão.

PREVISÃO 4: Entre os anos 2008 e 2010, os detectores avançados do LIGO e dos seus parceiros começarão a examinar as propriedades da matéria nuclear básica monitorando as ondas gravitacionais produzidas quando um buraco negro destrói uma estrela de nêutrons. As ondas observadas, combinadas com simulações da relatividade numérica a respeito da destruição da estrela, nos informarão a sua circunferência com uma margem de erro de 10%. Essa e outras propriedades das ondas nos proporcionarão muitas informações a respeito da equação de estado nuclear.

A figura 14 mostra um exemplo da destruição de uma estrela de nêutrons por um buraco negro, com a emissão de ondas gravitacionais. A estrela e o buraco inicialmente giram um em torno do outro em uma órbita cujo raio diminui gradualmente à medida que perde energia para as ondas gravitacionais. A partir das ondas inspirais, podemos inferir as massas e as rotações do buraco negro e da estrela. Ao aproximar-se do horizonte do buraco negro, a estrela encontra um encurvamento cada vez maior do espaço-tempo, o que, afinal, a destrói. Quanto maior a circunferência da estrela, mais fácil será sua destruição e mais rapidamente o processo tem início.



14. (a) Uma estrela de nêutrons e um buraco negro orbitam um em torno do outro em uma espiral que se introverte gradualmente à medida que ambos perdem energia para ondas gravitacionais. (b) Com a aproximação da estrela com relação ao buraco negro, o encurvamento do espaço-tempo do buraco negro pode destruir a estrela de nêutrons.

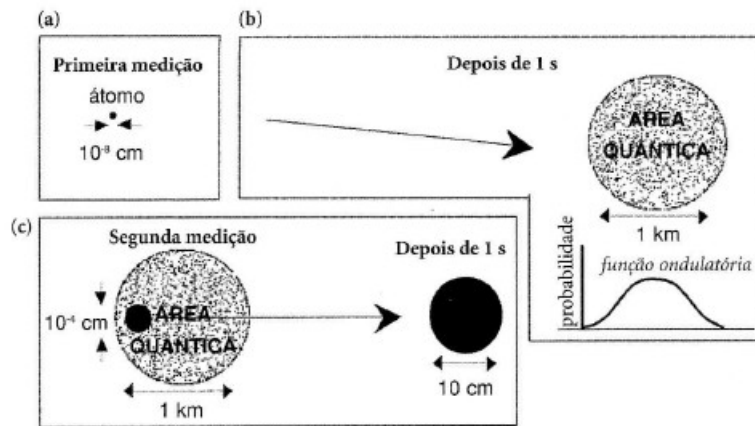
Assim (como demonstrou a minha aluna de pós-graduação Michele Vallisneri), pelo avanço da destruição podemos inferir a circunferência da estrela e, portanto, certos detalhes da sua equação de estado; comparando as ondas produzidas durante o processo de destruição com simulações da relatividade numérica, provavelmente poderemos inferir outros detalhes da equação de estado.

As colisões de buracos negros e a destruição de estrelas de nêutrons são apenas duas das múltiplas fontes de ondas gravitacionais que o LISA, LIGO e seus parceiros verão e utilizarão para examinar as leis fundamentais da natureza e seu papel no universo. Mas, em vez de discutir essas outras fontes, focalizarei a atenção em uma notável previsão a respeito da tecnologia humana e da mecânica quântica.

PREVISÃO 5: *Com o LTGO, em 2008 começaremos a observar cilindros de safira de 40 quilos que se comportarão segundo as leis da mecânica quântica. Criaremos uma tecnologia quântica de não-demolição para lidar com esse comportamento quântico e já em 2008 ela será incorporada aos detectores avançados de ondas gravitacionais do LIGO. Essa nova tecnologia será um ramo de um novo campo da atividade humana denominado informação quântica, que incluirá a criptografia quântica e a computação quântica.*

Essa previsão é realmente notável. Os livros dizem que o domínio da mecânica quântica é o mundo microscópico, o mundo dos átomos e das moléculas e partículas fundamentais. Há tempos

sabemos que, *em princípio*, o comportamento quântico poderia revelar-se também no mundo macroscópico, o mundo dos seres humanos, mas as possibilidades eram tão remotas que nem sequer aparecem nos livros-texto; elas ficaram escondidas dos estudantes. Já não devemos escondê-las. Precisamos ficar prontos para, em 2008, ver o *princípio da incerteza* da mecânica quântica levantar a cabeça e mostrar-se ao mundo macro — nos espelhos de 40 kg do LIGO — e precisamos aprender a contornar o princípio da incerteza.



15. O princípio da incerteza ilustrado por medições sucessivas da localização de um átomo.

A figura 15 ilustra o princípio da incerteza no domínio dos átomos, onde ele dá as cartas. Suponha que façamos duas medições sucessivas da localização de um átomo e que na primeira medição alcancemos uma precisão igual ao tamanho do próprio átomo, 10^{-8} centímetros (figura 15a). O princípio da incerteza nos diz que o próprio fato de determinarmos a localização do átomo cria uma incerteza quanto à velocidade dele. Tal incerteza leva o átomo a mover-se em uma direção desconhecida e *impossível* de conhecer-se, a uma velocidade desconhecida e *impossível* de conhecer-se. Em consequência, é impossível prever onde o átomo estará na hora da segunda medição. Podemos dizer apenas que há uma alta probabilidade de que esteja localizado em alguma região específica, que por vezes é denominada *área quântica* do átomo (figura 15b). Quanto mais esperarmos entre as duas medições, maior será a área

quântica. Se esperarmos apenas um segundo, o princípio da incerteza prevê uma área quântica de um quilômetro! A probabilidade de encontrar o átomo nos diversos pontos que compõem essa esfera de *1 quilômetro* é dada pela *função de onda* do átomo (figura 15b). As leis da mecânica quântica nos propiciam maneiras precisas de prever essa função de onda — ou seja, as probabilidades da localização do átomo —, mas a localização exata é imprevisível.

Suponha que, quando a área quântica tenha se expandido a 1 quilômetro, façamos uma segunda medição da localização do átomo, dessa vez com uma precisão 10000 vezes pior do que da primeira vez — uma precisão de 10^4 centímetros. Esse segundo ato de medir diminui subitamente a área quântica de um quilômetro para 10^4 centímetros (figura 15c) e produz uma nova incerteza quanto à velocidade. De acordo com o princípio da incerteza, a incerteza da velocidade é inversamente proporcional à precisão da medição da localização, de modo que, durante o tempo de um segundo depois da nossa segunda medição, a área quântica alcança um tamanho de 1 quilômetro dividido por 10000, ou seja, apenas 10 centímetros (figura 15c).

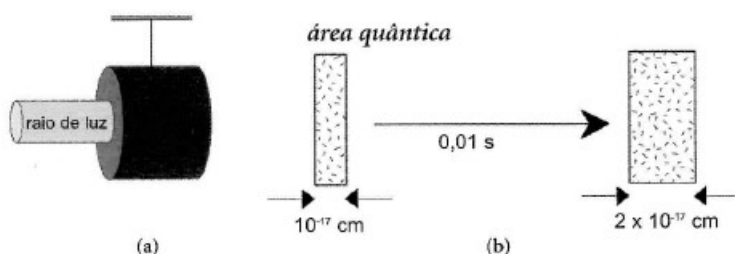
Por mais estranho que pareça, o princípio da incerteza faz parte da realidade e foi verificado em muitos experimentos em laboratórios. Uma característica importante desse princípio é que a incerteza que a medição da localização de uma partícula acarreta quanto à velocidade dela não só é inversamente proporcional à precisão da localização, mas também é inversamente proporcional à massa do objeto localizado. É por isso que nunca se viu um objeto do tamanho de um ser humano comportar-se segundo as leis da mecânica quântica: nossa enorme massa — 10^{28} vezes maior do que a de um átomo — faz com que as incertezas nas nossas velocidades e o tamanho das nossas áreas quânticas sejam fantásticamente pequenas.



16. À esquerda: Um dos espelhos dos interferômetros iniciais do LIGO, repousando sobre uma almofada de veludo. À direita: O mesmo espelho suspenso por fios no local reservado para ele no LIGO. [Cortesia do Projeto LIGO, California Institute of Technology.]

É um feito apreciável dos cientistas do LIGO que sua tecnologia venha a ser capaz de revelar-nos as mínimas variações quânticas no comportamento dos espelhos de 40 kg em 2008 (se minha previsão estiver correta). A figura 16 mostra o tipo de espelho de que estou falando. Os que aparecem nas fotos são os dos primeiros detectores do LIGO, que começarão as pesquisas das ondas gravitacionais em 2002. Esses espelhos pesam 11 kg, e não 40, e são feitos de quartzo, e não de safira, mas os espelhos de safira que pesam 40 kg, previstos para 2008, serão muito parecidos com esses.

A influência do princípio da incerteza sobre um dos futuros espelhos de safira está descrita na figura 17. O raio de luz mede a localização do espelho utilizando um feixe de luz com 10 centímetros de diâmetro na face do espelho durante cerca de 1 milésimo de segundo de tempo — muito mais do que os períodos de vibração térmica dos átomos do espelho.



17. As conseqüências do princípio da incerteza para medições sucessivas do centro de massa de um espelho avançado do LIGO.

Esses procedimentos garantem que o raio meça efetivamente a localização média de todos os átomos — ou seja, meça a localização do *centro de massa* do espelho. Com efeito, nessa medição, o espelho se comporta como se fosse uma única partícula que pesasse 40 kg, em vez de um aglomerado de 10^{28} átomos chocando-se permanentemente uns contra os outros.

O raio de luz não mede a localização do centro de massa em todas as três dimensões, e sim apenas em uma: ao longo da direção do raio. A partir do período de 2008 a 2010, ele medirá essa localização com extraordinária precisão: cerca de 10^{-17} centímetros — um 1/10000 do diâmetro de um núcleo atômico, um bilionésimo do diâmetro de um átomo, um décimo de trilionésimo (10^{-13}) do comprimento de onda da luz. Essa fantástica precisão permitirá localizar o centro de massa do espelho na área quântica de 10^{17} centímetros mostrada na figura 17b. Se a área quântica não aumentasse entre as medições, com sucessivas medições de 10^{-13} centímetros poderíamos detectar ondas gravitacionais que abalam os espelhos do LIGO em distâncias AL de até 2×10^{17} centímetros. Contudo, o princípio da incerteza força o crescimento da área quântica: a primeira medição, com sua extraordinária precisão, induz uma incerteza de velocidade suficientemente grande para dobrar a espessura da área quântica no tempo equivalente a meio período de onda gravitacional (cerca de um centésimo de segundo). Tal crescimento esconderá os efeitos de qualquer onda gravitacional de $AL = 2 \times 10^{17}$ centímetros — a menos que encontremos uma maneira de contornar os efeitos do princípio da incerteza.

Em 1968, meu bom amigo russo Vladimir Braginsky identificou o princípio da incerteza como um obstáculo potencial para os detectores de ondas gravitacionais e outros instrumentos de medida de alta precisão que pensamos utilizar no futuro longínquo. Em 1970, Braginsky teve a intuição de começar a inventar maneiras de lograr esse objetivo — às quais ele próprio deu o nome de *não-demolição quântica*, o que quer dizer “não deixe que o princípio da incerteza destrua as informações que você está tentando extrair dos seus instrumentos de medida”. Eu e meus alunos nos somamos a

Braginsky nessa iniciativa durante alguns anos no fim da década de 1970. Recentemente retomamos com vigor a nossa colaboração quando vimos que o LIGO tem de confrontar o princípio da incerteza em 2008. Graças às ideias de Braginsky e seus colegas russos e ao trabalho recente de Alessandra Buonanno e Yanbei Chen, no meu próprio grupo, estaremos prontos em 2008: já conhecemos maneiras viáveis de proteger as informações das ondas gravitacionais do princípio da incerteza quando elas passam pelos espelhos de 40 kg do LIGO, regidos pela mecânica quântica.

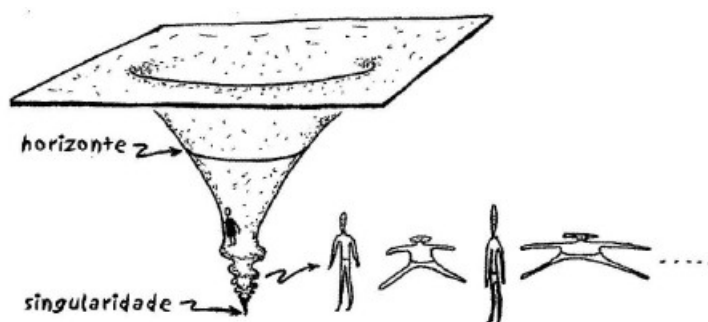
Há diversas chaves para essa não-demolição quântica, e elas são demasiado complexas para discuti-las aqui, mas uma ideia-chave pode ser expressa de modo bem simples: nos detectores avançados não deveremos medir *nunca* as localizações dos espelhos, nem as separações entre eles (que conteriam informações locais). Em vez disso, devemos medir apenas as *mudanças* nas separações, sem nunca medir as próprias separações. Desse modo podemos contornar os efeitos do princípio da incerteza.

Aqui neste mesmo ensaio me fiz representar tentando em vão enviar sinais para fora de um buraco negro enquanto eu era sugado para o coração da singularidade (figura 3a). A natureza dessa singularidade é um grande mistério, mas o encurvamento do espaço-tempo à sua volta não é. No início da década de 1970, três amigos meus russos, Vladimir Belinsky, Isaac Khalatnikov e

Yevgeny Lifshitz, examinaram o encurvamento da singularidade por meio da resolução de equações de Einstein e descobriram o comportamento violento e caótico que mostra a figura 18.³ Quando me aproximo da singularidade, o encurvamento estica o meu corpo dos pés à cabeça, ao mesmo tempo que me comprime lateralmente. Em seguida ele estica o meu corpo lateralmente e o comprime dos pés para a cabeça. Isso se repete sucessivamente, cada vez mais depressa, em um modelo caótico, que se modifica sempre. Logo o meu corpo cede e fica "macarronizado" (para aproveitar um termo técnico cunhado por John Wheeler). A seguir, os átomos do meu corpo ficam irreconhecivelmente macarronizados e depois chega a vez de o próprio espaço ficar macarronizado.

Os argumentos de Wheeler, em 1957, me convenceram de que o ponto final da macarronização — a própria singularidade — é regido por uma união, um casamento entre as leis da mecânica quântica e as do encurvamento do espaço-tempo. Tem de ser assim, uma vez que o encurvamento macarroniza o espaço em escalas tão microscópicas que elas sofrem influências profundas do princípio da incerteza.

As leis unificadas da mecânica quântica e do encurvamento do espaço-tempo denominam-se *leis da gravitação quântica*.



18. Kip cai em um buraco negro. Ao aproximar-se do coração da singularidade, o seu corpo é esticado e comprimido de maneira caótica pelo extremo encurvamento do espaço-tempo.

Elas têm representado o Santo Graal dos físicos desde a década de 50. No começo da década de 60, quando eu era aluno de Wheeler, pensava que as leis da gravitação quântica eram tão difíceis de compreender que não seriam descobertas no meu período de vida, mas agora estou convencido do contrário. O enfoque dado ao problema pela *teoria das cordas* parece extremamente promissor.

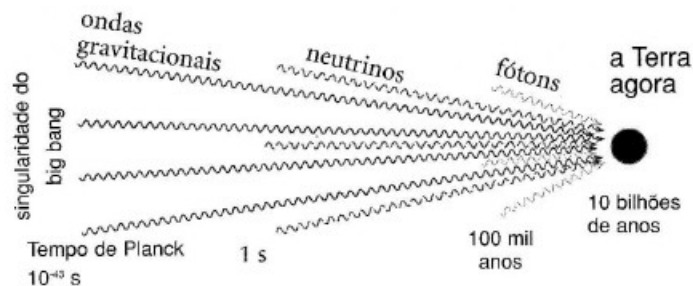
A teoria das cordas tem má reputação em certos círculos porque não fez ainda previsões testáveis em laboratórios ou por meio de observações astronômicas ou cosmológicas. Como as singularidades são objetos que se relacionam com a gravitação quântica, se logarmos observá-las, poderemos retificar essa percepção.

As singularidades que ficam no interior dos buracos negros não são de muita utilidade, uma vez que não podem ser vistas da Terra. Se pudéssemos vê-las, morreríamos sem poder descrever as conclusões. Haverá outras singularidades que *possamos* observar

sem morrer? Sim, há pelo menos uma: a singularidade do big bang, da qual nasceu nosso universo. E as ondas gravitacionais são o instrumento ideal para examiná-la.

O big bang produziu três tipos de radiação: radiação eletromagnética (fótons), radiação de neutrinos (neutrinos) e ondas gravitacionais (figura 19). Durante seus primeiros 100 mil anos de vida, o universo era tão quente e denso que os fótons não podiam propagar-se; eles eram criados e em seguida absorvidos, antes que pudessem viajar praticamente qualquer distância. Por fim, aos 100 mil anos de idade, o universo expandiu-se e resfriou-se o suficiente para que os fótons sobrevivessem, e eles então começaram as suas viagens, até chegar à Terra. Hoje, nós percebemos como *radiação cósmica de fundo em micro-ondas*, que nos chega de todas as direções e nos traz o retrato do universo quando tinha 100 mil anos de idade.

Os neutrinos são muito mais penetrantes do que os fótons.



19. Fótons, neutrinos e ondas gravitacionais provenientes do big bang que criou o universo.

Algum dia, a tecnologia dos detectores de neutrinos permitirá a mensuração dos neutrinos do big bang. Quando conseguirmos fazê-lo, teremos uma fotografia do universo com um segundo de idade! Antes disso, o universo era quente e denso demais para que os neutrinos pudessem sobreviver.

As ondas gravitacionais são muito mais penetrantes do que os neutrinos. Segundo os cálculos dos meus amigos russos Yakov Borisovich Zel'dovich e Igor Novikov, elas são tão penetrantes que nunca devem ter sido absorvidas ou dispersadas pela matéria do universo. Devem ter viajado sem ter sido afetadas pela matéria,

desde os primeiríssimos momentos do universo — a própria singularidade do big bang. Portanto, elas podem propiciar-nos uma fotografia das dores de parto do universo — dores de parto que, em um período de 10^{-23} segundos (conhecido como *tempo de Planck*), destruíram a singularidade e criaram o espaço, o tempo, a matéria e a radiação.

As ondas gravitacionais do big bang, não importa quão poucas e quão débeis sejam, devem ter se amplificado fortemente no primeiro segundo de vida do universo. Essa amplificação (prevista pelo meu amigo russo Leonid Grishchuk em meados da década de 70) é causada por interações não lineares das ondas com o encurvamento do espaço-tempo do universo, e isso nos dá esperança de que *elas* sejam suficientemente fortes para que possamos detectá-las. Isso leva à minha próxima previsão — na verdade, uma especulação bem informada, uma vez que tenho menos confiança nela do que nas outras coisas que chamei de previsões.

ESPECULAÇÃO BEM INFORMADA 6⁴ Entre 2008 e 2030 as ondas gravitacionais provenientes da singularidade do big bang serão descobertas. Isso dará lugar a uma era, que se estenderá pelo menos até 2050, em que grandes esforços serão feitos para medir o espectro das ondas gravitacionais primordiais (sua intensidade como função do comprimento de onda), desde os comprimentos de ondas de 10 bilhões de anos-luz até 100 metros, e para identificar o padrão de intensidade das ondas no espaço. Tais esforços revelarão detalhes íntimos da singularidade do big bang e demonstrarão, por conseguinte, qual das versões da teoria das cordas corresponde à verdadeira teoria quântica da gravidade. Eles revelarão também uma grande riqueza de fenômenos do primeiro segundo de vida do universo.

Por que estou tão inseguro quanto à data da descoberta das ondas gravitacionais da singularidade do big bang (entre 2008 e 2030)? Porque somos muito ignorantes a respeito das propriedades da própria singularidade e do primeiro segundo de vida do universo. A corrente principal dos físicos gosta de um modelo para o primeiro

segundo que se chama *inflação*, de acordo com o qual as ondas gravitacionais do big bang são tão débeis que, para detectá-las, será necessária uma tecnologia à qual só poderemos chegar por volta de 2030. Eu, contudo, não faço fé nessa previsão porque o modelo inflacionário não leva em conta as leis (ainda não conhecidas) da gravitação quântica com a profundidade necessária. As tentativas iniciais de incorporar a teoria das cordas (nossa melhor opção para chegar à gravitação quântica) à física do big bang foram feitas por Gabriel Veneziano, na Suíça, e outros. Seu modelo da teoria das cordas para o big bang prevê ondas que podem ser suficientemente fortes para ser detectadas pelo LIGO em 2008, ou por LISA em 2010. Mas a teoria das cordas ainda está na sua infância e seu modelo ainda é inevitavelmente rudimentar e provisório, de modo que tenho pouca confiança nas suas previsões. No entanto, elas constituem uma advertência no sentido de que o big bang e suas ondas gravitacionais podem ser bem diferentes daquelas previstas pelas opiniões pessimistas do modelo inflacionário favorecido pela corrente principal da física; as ondas do big bang podem muito bem ser detectadas antes de 2030.

A corrente principal também nos diz com grande confiança que, no primeiro segundo de vida do universo, deve ter havido um panorama rico de ação. Por exemplo, com a expansão do universo, a sua temperatura inicial inacreditavelmente alta começou a baixar. No início, todas as forças fundamentais — força gravitacional, força eletromagnética, força nuclear fraca e forte — estavam reunidas em uma única força. A partir de então, em diferentes momentos do processo de expansão e resfriamento, cada força adquiriu sua identidade, de maneira repentina e violenta, talvez produzindo com isso fortes ondas gravitacionais. Por exemplo, estima-se que a força eletromagnética tenha adquirido sua identidade própria, separando-se da força nuclear fraca, quando a temperatura do universo era de cerca de 10^{16} graus e a sua idade era de 10^{15} segundos (um milésimo de trilionésimo de segundo, também chamado de femtossegundo). As ondas gravitacionais produzidas nesse *nascimento da força eletromagnética* devem estar hoje dentro do

alcance de comprimentos de ondas de LISA e talvez sejam suficientemente fortes para serem detectadas e utilizadas para que vejamos o nascimento do eletromagnetismo.

Ainda que as ondas gravitacionais provenientes da singularidade do big bang sejam uma maneira promissora de examinar as leis da gravitação quântica, estão longe de ser uma aposta segura. Seria muito melhor se tivéssemos outras singularidades para examinar.

Existirá alguma esperança de que encontremos e possamos estudar singularidades do universo de hoje? A resposta da corrente principal da física é “provavelmente não” e está contida na *conjectura de censura cósmica* de Roger Penrose, que diz que todas as singularidades, exceto o big bang, estão escondidas dentro de buracos negros; ou seja, elas estão revestidas por horizontes. *Não há singularidades nuas.*

Em 1991, Stephen Hawking, John Preskill e eu fizemos uma aposta sobre a censura cósmica, mostrada na figura 20. Hawking, como defensor da elite (ele foi designado até mesmo “acompanhante de honra de sua majestade a rainha da Inglaterra”), insiste em que “as singularidades nuas são [...] proibidas pelas leis da física”, enquanto Preskill e eu, alfinetando os conservadores, afirmamos que as singularidades nuas são “objetos quânticos que podem existir despidos de horizontes, para que todo o universo veja”.

Preskill e eu estávamos longe de ter muita confiança de que ganharíamos, mas Hawking admitiu a derrota em 1997 (figura 21 à esquerda), embora com sacrifício da elegância. Nossa aposta especificava que “o perdedor recompensará o vencedor com roupas destinadas a cobrir sua nudez. A roupa deve estar adornada com uma mensagem adequada de reconhecimento”. A roupa que Hawking nos deu foi uma camiseta politicamente incorreta que a mulher de Preskill e a minha nos proibiram de usar em público, mas que eu mostro aqui (figura 21, à direita) para que todo o mundo veja. Embora Hawking tenha admitido que as leis da física permitem singularidades nuas, a mensagem estampada na camiseta insiste — como Hawking continua a insistir — em que “A natureza odeia


singularidades nuas". Ora, esta não chega a ser uma "mensagem adequada de reconhecimento".

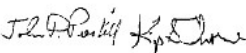
Considerando que Stephen Hawking acredita firmemente que as singularidades nuas são anátema e devem ser proibidas pelas leis da física clássica,

E considerando que John Preskill e Kip Thorne vêem as singularidades nuas como objetos da gravidade quântica que podem existir despidos de horizontes, para que todo o universo veja,

Por essas razões, Hawking oferece e Preskill/Thorne aceitam uma aposta, na proporção de 100 libras esterlinas para 50 libras esterlinas, no sentido de que quando quaisquer formas clássicas de matéria ou campo que sejam incapazes de tornar-se singulares no espaço-tempo plano associem-se à relatividade geral por meio das equações clássicas de Einstein, o resultado nunca pode ser uma singularidade nua.

O perdedor recompensará o vencedor com roupas destinadas a cobrir a sua nudez. A roupa deve estar adornada com uma mensagem adequada de reconhecimento.

 Stephen Hawking

 John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, Califórnia, 24 de setembro de 1991

20. A aposta de 1991, em que Hawking sustenta a conjectura de censura cósmica e Preskill e Thorne a ela se opõem. [Em *Black holes and time warps: Einstein's Outrageous Legacy*, de Kip S. Thorne. Copyright © 1994 de Kip S. Thorne. Usado com permissão de W. W. Norton & Company, Inc.]

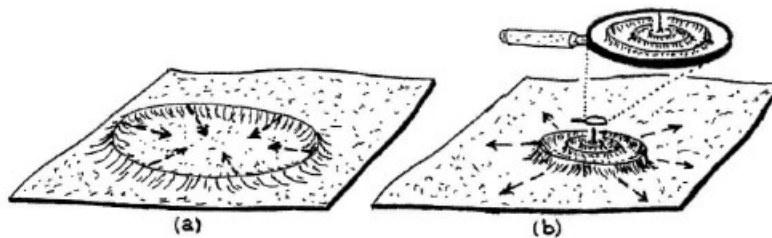


21. À esquerda: Hawking admite haver perdido a nossa aposta sobre a censura cósmica, Thorne faz uma reverência bem-humorada e Preskill sorri com alegria. À direita: A camiseta politicamente incorreta que Hawking nos deu. ["A natureza abomina a singularidade nua."] [Foto da esquerda tirada no Caltech, cortesia de Irene Fertik, University of Southern California.]

Para explicar a insistência de Hawking, esbocei, na figura 22, a comprovação que levou ao seu reconhecimento. A comprovação derivou de simulações da implosão de uma pulsação esférica de ondas em supercomputador (figura 22a). As simulações originais, feitas por Matthew Choptuik na Universidade do Texas, foram um

grande empreendimento em relatividade numérica — muito mais precisas do que qualquer computação antes feita sobre relatividade numérica —, mas envolviam um tipo simples de onda, que pode não existir no universo: uma *onda escalar clássica*. Simulações posteriores, feitas por Andrew Abrahams e Chuck Evans na Universidade da Carolina do Norte, envolveram a implosão de ondas gravitacionais e produziram os mesmos resultados.

Quando se deram amplitudes maiores à implosão, para que ela contivesse bastante energia, as não-linearidades dinâmicas da implosão produziram uma singularidade revestida por um horizonte de buraco negro, como todos os físicos de gravitação esperavam. Quando se aplicaram amplitudes pequenas às ondas, para que contivessem pouca energia, elas se dirigiram para dentro, passaram umas pelas outras sem consequências e ressurgiram como ondas que se dirigem para fora. Isso também era esperado.



22. Esboço das simulações da implosão de ondas em supercomputador que levaram Hawking a reconhecer que as leis da física permitem singularidades nuas, pelo menos em princípio.

A grande surpresa ocorreu quando a amplitude das ondas foi cuidadosamente dosada para um ponto infinitesimalmente menor do que o que seria necessário para formar um buraco negro. Nesse caso, as ondas em implosão interagiram umas com as outras de maneira dinâmica e não-linear e produziram uma espuma fervente de encurvamento do espaço-tempo a partir da qual as ondas escapavam continuamente. O exame detido do fervilhamento central revelou que o comprimento das ondas diminuía — contínua e rapidamente e com surpreendente regularidade — até criar uma singularidade infinitesimalmente pequena e nua, que vive (segundo suspeitamos) um tempo curto antes de autodestruir-se.

Tendo essas simulações por guia, pudemos rever alguns estudos de lápis e papel sobre as equações de Einstein feitos por Demetrios Christodolou (meu ex-pós-doutorando, atualmente professor de matemática na Universidade de Princeton) e verificamos que eles confirmavam que a implosão podia produzir uma singularidade nua. Temos de parabenizar a relatividade numérica pelo fato de que só depois que as simulações numéricas revelaram os detalhes da espuma da implosão das ondas pudemos compreender com clareza o que a matemática de Christodolou tratava de dizer-nos. Que maravilha de instrumento os computadores se tornaram para pessoas como Choptuik, Abrahams e Evans.

Por que então Hawking insiste em que a natureza odeia singularidades nuas? Porque, para desnudar as suas singularidades, Choptuik, Abrahams, Evans e Christodolou tiveram que ajustar com grande precisão a amplitude das ondas que implodiam (figura 22b). Se a amplitude fosse um pouquinho maior, a singularidade se formaria, mas ficaria escondida atrás do horizonte de um buraco negro; se a amplitude fosse um pouquinho menor, as ondas interagiriam e fervilhariam e em seguida reexplodiriam sem formar singularidade nenhuma. Apenas uma amplitude cuidadosamente escolhida produziria uma singularidade nua, e essa singularidade seria infinitesimalmente pequena em tamanho, em energia e (presumivelmente) em duração. Seria muito difícil que essa exata afinação da amplitude ocorresse na natureza — embora uma civilização muito avançada pudesse produzi-la em laboratório. Lamentavelmente, a civilização humana é totalmente incapaz de produzir e afinar as ondas requeridas — hoje, no ano que vem, no próximo século e provavelmente no próximo milênio.

Considerando que Stephen W. Hawking (tendo perdido uma aposta anterior sobre este tema por não haver requerido genericidade) continua a acreditar firmemente que as singularidades nuas são anátema e devem ser proibidas pelas leis da física clássica,


E considerando que John Preskill e Kip Thorne (tendo ganho a aposta anterior) continuam a ver as singularidades nuas como objetos da gravidade quântica que podem existir despidos de horizontes, para que todo o universo veja,

Por essas razões, Hawking oferece e Preskill/Thorne aceitam uma aposta no sentido de que

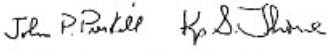
quando quaisquer formas clássicas de matéria ou campo que sejam incapazes de tornar-se singulares no espaço-tempo plano se associam à relatividade geral por meio das equações clássicas de Einstein,

uma evolução dinâmica a partir de condições iniciais genéricas (i. e., a partir de um conjunto aberto de dados iniciais) nunca pode produzir uma singularidade nua (uma geodésica nula, incompleta no passado, a partir de T^+).

O perdedor recompensará o vencedor com roupas destinadas a cobrir a sua nudez. A roupa deve estar adornada com uma mensagem adequada de verdadeiro reconhecimento.



Stephen Hawking
Pasadena, Califórnia, 5 de fevereiro de 1997



John P. Preskill & Kip S. Thorne

23. A nova versão da aposta, de 1997, em que Hawking sustenta a conjectura de censura cósmica e Preskill e Thorne a ela se opõem. Os trechos em itálico tornam a aposta mais precisa por meio do uso de termos técnicos da física teórica.

Hawking, Preskill e eu somos persistentes em nossa busca da verdade e do divertimento, e por isso mesmo renovamos a nossa aposta (figura 23). Hawking agora insiste em que, se excluirmos a afinação (nas palavras da aposta, “condições iniciais genéricas”), não será possível produzir singularidades nuas, o que significa que elas não podem surgir naturalmente. Preskill e eu discordamos novamente e requeremos que, desta vez, a roupa contenha uma verdadeira mensagem de reconhecimento.

Arriscarei uma previsão a respeito do resultado da nossa aposta.

PREVISÃO 7: Antes que Hawking, Preskill e eu morramos, a nossa nova aposta sobre a censura cósmica estará resolvida. Quem ganhará? Temo que seja Hawking, mas o resultado não é nada óbvio e não vou estragar a aposta com uma previsão. Contudo, prevejo, sim, que os esforços para resolver nossa aposta — saber se as singularidades nuas podem ser formadas sem afinação — envolverá

três linhas: cálculos de lápis e papel, cálculos de relatividade numérica e busca de ondas gravitacionais.

As pesquisas para a detecção de ondas gravitacionais farão parte do projeto LISA, que elaborará mapas detalhados do encurvamento do espaço-tempo à volta de buracos negros de grande massa (veja as figuras 5 e 7). Se um ou mais mapas diferirem das previsões da relatividade geral para os buracos negros, é possível que o objeto central, em torno do qual gira o buraco negro de massa menor, seja uma singularidade nua, e não um buraco negro de grande massa. A possibilidade de que isso ocorra é pequena, mas os instrumentos de pesquisa estarão à nossa disposição e, portanto, as pesquisas serão feitas.

Apresento agora meu conjunto final de previsões, todas relativas às leis da gravitação quântica, e os ensinamentos que delas colheremos.

PREVISÃO 8: *Até 2020, os cientistas compreenderão as leis da gravitação quântica, que se revelarão uma variante da teoria das cordas. Até 2040 aprenderemos a usar essas leis para gerar respostas de alta confiabilidade para muitas perguntas profundas e intrigantes, inclusive:*

- *Qual a natureza da singularidade do big bang, da qual nasceram o espaço, o tempo e o universo?*
- *O que havia antes da singularidade do big bang, se é que havia algo que se possa chamar de "antes"?*
- *Existem outros universos? Em caso positivo, como eles se relacionam com o nosso próprio universo ou se ligam a ele?*
- *Qual a natureza das singularidades que estão no interior dos buracos negros?*
- *Outros universos podem ser criados em singularidades de buracos negros?*
- *As leis da física permitem que civilizações muito avançadas criem e mantenham buracos de minhoca para viagens*

interestelares e criem máquinas do tempo para viajar ao passado?

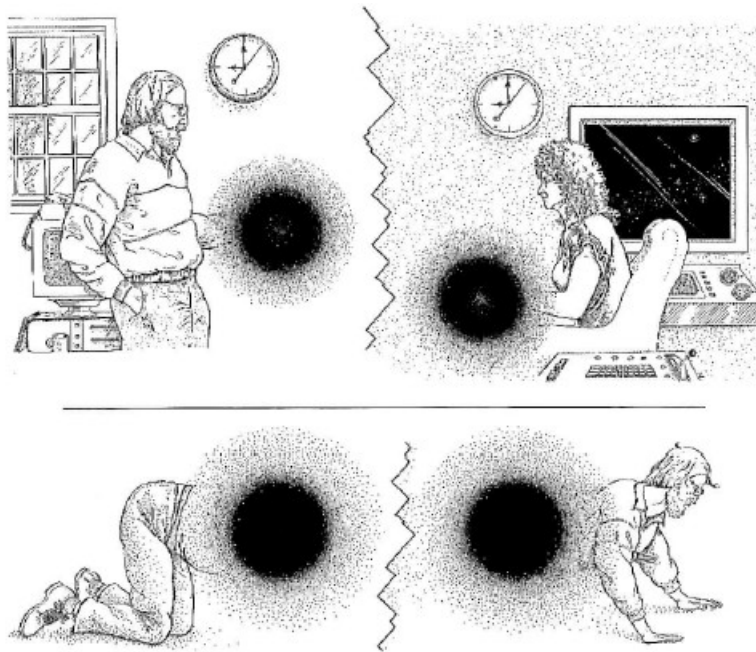
Os buracos de minhoca e as máquinas do tempo foram discutidos em detalhe nos ensaios de Novikov e de Hawking, neste mesmo volume, assim como no último capítulo do meu livro *Black holes and time warps* — e são também conhecidos por qualquer pessoa que assista a filmes de Hollywood ou veja televisão. A figura 24 mostra um exemplo de buraco de minhoca, com desenhos adaptados a partir do meu livro.

Minha mulher, Carolee Winstein, e uma das bocas de um buraco de minhoca estão em uma nave espacial, longe da Terra, e eu estou na nossa casa, em Pasadena, Califórnia, próximo à outra boca. A distância através do buraco de minhoca é muito curta, de modo que Carolee e eu podemos, por meio dele, apertar nossas mãos romanticamente enquanto ela viaja celeremente pelo espaço (figura 24 no alto). Se quisermos fazer algo mais do que simplesmente apertar as mãos, poderei engatinhar pelo buraco de minhoca (figura 24 embaixo) até a nave espacial dela.

No meu livro, explico uma consequência crucial das leis de Einstein para o encurvamento do espaço-tempo: para que um buraco de minhoca fique aberto, de modo que eu ou qualquer outra coisa possamos viajar por ele, o buraco de minhoca tem de estar revestido com “material exótico” — um material que, visto por uma pessoa em repouso dentro do buraco de minhoca, tem uma enorme tensão, como a de um elástico; uma tensão maior do que sua enorme densidade energética. (Nunca pesquisei se posso engatinhar impunemente por um material exótico, uma vez que sabemos muito pouco sobre materiais exóticos.)

Sabemos que esse material exótico, como Hawking descreve no seu ensaio e eu discuto no meu livro, pode existir de fato em quantidades mínimas e em circunstâncias muito especiais. Contudo, cientistas ortodoxos suspeitam fortemente de que as leis da física proíbem quem quer que seja de concentrar quantidades suficientes de tal material por um tempo suficiente para manter aberto um buraco de minhoca de tamanho compatível com o de um homem.

Uma razão para esse preconceito é que uma pessoa que se movesse através desse material exótico a alta velocidade, em vez de estar em repouso em seu interior, veria uma densidade energética negativa. Isso significa uma violação da "condição de energia fraca"⁵⁵, discutida no ensaio de Hawking, e os cientistas ortodoxos têm uma relação de amor com a condição de energia fraca.



24. Em cima: Carolee viaja pelo universo em uma nave espacial, eu fico em casa, na Terra, e nós dois apertamos as mãos através de um buraco de minhoca. Embaixo: Engatinho da Terra para a nave espacial através do buraco de minhoca. [Adaptado dos desenhos de Matthew Zimet em *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, de Kip S. Thorne. Copyright © 1994 de Kip S. Thorne. Usado com permissão de W. W. Norton & Company, Inc.]

Nos anos que se passaram desde que escrevi meu livro, vários dos meus amigos físicos estiveram trabalhando com afinco para determinar se as leis da física permitiriam a uma civilização adiantada reunir suficiente material exótico em um buraco de minhoca de tamanho comparável ao de um homem para mantê-lo aberto. Não se conhece a resposta e talvez ela não possa ser conhecida por completo até que as leis da gravitação quântica tenham sido plenamente deduzidas. Os resultados preliminares,

contudo, realizados sobretudo por minha ex-aluna Eanna Flanagan e por meus amigos Bob Wald, Larry Ford e Thomas Roman, não parecem promissores para os buracos de minhoca.

Apesar disso, permaneço otimista. Pressionado para especular (como agora eu próprio me pressiono), avento o seguinte.

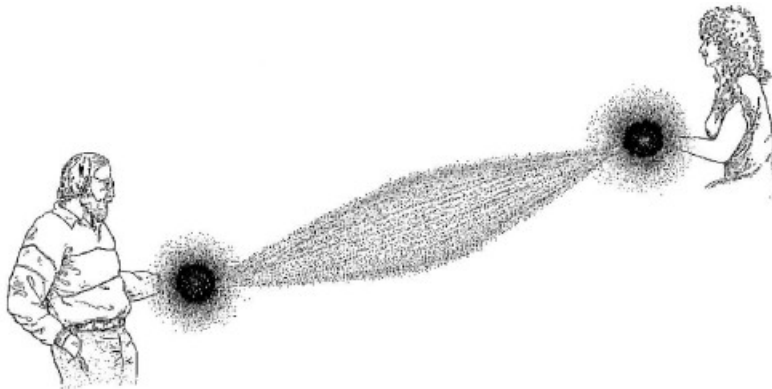
ESPECULAÇÃO NÃO TÃO BEM INFORMADA 9: *Descobriremos que as leis da física permitem sim o acúmulo de matéria exótica suficiente em buracos de minhoca de tamanho comparável ao de um homem para mantê-los abertos. Mas descobriremos também que a tecnologia para produzir os buracos de minhoca e para mantê-los abertos está inimaginavelmente fora do alcance da civilização humana.*

De onde vem meu otimismo a respeito de grandes quantidades de matéria exótica? Talvez do meu ceticismo a respeito do estado atual do nosso conhecimento sobre os tipos de matéria que podem existir no universo. Esse ceticismo é alimentado por uma descoberta cosmológica recente.

Só 5% da massa do universo é composta pelo tipo de material de que os seres humanos são formados — *matéria bariônica* (moléculas, átomos, prótons, nêutrons, elétrons e assim por diante). Cerca de 35% têm a forma ainda desconhecida de *matéria escura fria*, que (assim como a matéria bariônica) pode ser atraída pela gravidade e formar halos em volta das galáxias, assim como poderia também formar “galáxias”, “estrelas” e “planetas” de matéria escura, que não emitem luz. Os restantes 60% da massa do universo têm a forma também desconhecida de *energia escura* (segundo a denominação dada pelos cosmólogos), que está presente em todo o universo e possui enorme tensão.⁵ Essa tensão será maior do que a sua densidade energética? Poderia ela, então, ser o tipo de material exótico necessário para manter abertos os buracos de minhoca? Não sabemos ainda, mas os físicos da corrente principal têm um preconceito muito forte em favor de que a tensão seja igual ou menor do que a densidade energética, mas não maior. Tendo a concordar: seria uma grande sorte se a natureza nos propiciasse material exótico em profusão, espalhado por todo o universo!

No entanto, a energia escura me dá esperança de que o material *exótico* possa efetivamente existir em grandes quantidades. Por quê? Pela simples razão de que a energia escura nos alerta quanto ao tamanho da nossa ignorância.

E as máquinas do tempo? Descrevi em *Black holes and time warps* um mecanismo universal, identificado pelo meu pós-doutorando Sung-Won Kim e por mim em 1990, que poderia provocar a autodestruição de uma máquina do tempo no mesmo momento em que alguém tentasse ativá-la. Hawking discute esse mecanismo em seu ensaio usando palavras bonitas: "Em geral, o tensor de energia-momento diverge no horizonte de Cauchy". A figura 25 mostra uma descrição mais visual e fantasiosa.



25. A autodestruição de uma máquina do tempo no momento em que ela é ativada. [Desenho de Matthew Zimet, em *Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy*, de Kip S. Thorne. Copyright © 1994 de Kip S. Thorne. Usado com permissão de W. W. Norton & Company, Inc.]

Na minha casa, em Pasadena, o tempo passa um pouco mais devagar, por ser retardado pela massa da Terra, enquanto na nave espacial de Carolee, no espaço interestelar, sem nenhum corpo de grande massa por perto, ele flui no seu ritmo normal, um pouco mais rápido. Como foi descrito por Novikov no seu ensaio, depois de certo intervalo de tempo, essa diferença no ritmo do tempo transforma o buraco de minhoca em uma máquina do tempo: Carolee pode viajar ao passado engatinhando pelo buraco de minhoca e pode, então, entrar em outra nave espacial e encontrar-se com seu outro eu mais novo.

Em um primeiro momento, na nave espacial de Carolee, a viagem no tempo é impossível — o momento da *ativação da máquina do tempo*. Esse é o momento em que a entidade que viaja mais rápido do que todas, uma radiação que se move à velocidade da luz, pode passar através do buraco de minhoca, da nave espacial para a Terra, e em seguida viajar de volta à nave espacial, à velocidade da luz, através do espaço interestelar, chegando no mesmo momento em que partiu.⁶ O resultado são duas cópias da radiação, a mais nova e a mais velha, que habitam o mesmo espaço e o mesmo tempo. Ambas as cópias viajam, então, pelo buraco de minhoca, de ida e de volta, produzindo quatro cópias, e depois oito, e depois dezesseis, e assim por diante. Em consequência, forma-se um número enorme de radiações individuais, com uma enorme energia explosiva, que destrói o buraco de minhoca, de acordo com os cálculos feitos por mim e por Kim.

Nossos cálculos, contudo, foram feitos com base na relatividade geral e na teoria quântica, em suas formas descasadas e desunificadas. Em 1990, Kim e eu fizemos um exame detalhado das nossas contas e passamos a admitir que as mal conhecidas leis unificadas da gravitação quântica poderiam intervir e deter a explosão antes que ela destruísse a máquina do tempo. Stephen Hawking discordou e mostrou-nos um ponto de vista mais persuasivo — que nos convenceu de que a gravitação quântica só interviria no último momento, quando a máquina do tempo estivesse em vias de destruir-se. Aparentemente, a gravitação quântica conserva a posse da resposta em suas próprias mãos. Não poderemos conhecer o destino das máquinas do tempo até compreendermos por inteiro as leis da gravitação quântica.

Assim estavam as coisas em 1994, quando meu livro foi publicado. Nos últimos seis anos, fizeram-se novos cálculos, que geraram indícios conflitantes: por um lado, como diz Stephen no seu ensaio, “pode-se especular que seria possível a existência de estados quânticos [situações quânticas] em que a densidade energética seja finita no horizonte [de Cauchy] [ou seja, onde a máquina do tempo não esteja sujeita à autodestruição imediata], e há exemplos [de

cálculos] em que esse é o caso". Com a criação desses estados quânticos (situações quânticas), uma civilização adiantada poderia produzir e ativar com êxito uma máquina do tempo. No entanto, tais estados quânticos parecem irrealistas; duvido que possam ser produzidos no universo real.

Por outro lado, Stephen e seu aluno Mike Cassidy usaram uma versão extremamente frágil e provisória das leis da gravitação quântica para fazer a estimativa a que chegaram a respeito da autodestruição. Essa versão da gravitação quântica prevê uma probabilidade absolutamente mínima de que a máquina do tempo escape da autodestruição: $1/10^{60}$ — um trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo. É possível acreditar nesse cálculo? Não sei, mas ele ainda é, provavelmente, nosso melhor guia para as previsões a respeito do destino das máquinas do tempo.

Todas as versões atuais das leis da gravitação quântica são extremamente frágeis. Mas com o passar do tempo elas vão se tornando cada vez mais firmes e, até 2020 (se a minha previsão 8 for comprovada), serão totalmente corretas. Que nos dirão elas, então, sobre as máquinas do tempo? Sugiro o seguinte:

ESPECULAÇÃO 10: Descobriremos que as leis da física proíbem as viagens ao passado, pelo menos no mundo macroscópico dos seres humanos. Por mais adiantada que seja uma civilização e por mais empenho que ela faça, não poderá impedir que qualquer máquina do tempo se autodestrua no momento da ativação.

Infelizmente, Stephen não aceita apostar comigo sobre isso. Estamos do mesmo lado. Ele me convenceu, mas só no nível da especulação bem informada.

Aí está tudo; dez especulações e previsões sobre o futuro. Todas terão sido provadas ou refutadas muito tempo antes do constrangimento da minha próxima grande festa de aniversário, daqui a sessenta anos. As pesquisas vindouras, que as confirmarão ou refutarão, imporão mudanças radicais na nossa maneira de ver o encurvamento do espaço-tempo e o mundo quântico.

Da popularização da ciência

Timothy Ferris

A ciência é jovem. O empreendimento científico só se tornou importante na metade dos mil anos que Alfred North Whitehead estimou necessários para que um novo modo de pensar penetre no coração de uma cultura. E, no entanto, a ciência já transformou grande parte do mundo de pelo menos três maneiras diferentes: a tecnológica, a intelectual e a política.

As conquistas tecnológicas da ciência tornaram o mundo desenvolvido mais rico e sadio, embora não necessariamente mais sábio, ao mesmo tempo em que aumentaram o seu nível de ansiedade. Boa parte dessa ansiedade deriva de uma compreensível apreensão de que o poder da tecnologia, como acontece com todos os poderes, tem os seus perigos. E deriva também do fato de que muitas pessoas se sintam cercadas — e às vezes ameaçadas — por máquinas cujo funcionamento não compreendem e que são o produto final de realizações científicas que elas também não compreendem.

Do ponto de vista intelectual, a ciência criou uma nova maneira de pensar na qual o medo, a superstição e a obediência cega à autoridade foram substituídos por um tipo de questionamento racional e de mente aberta, baseado na observação e na experiência. Em consequência disso, as pessoas que detêm certo conhecimento científico vêem-se agora como parte de um biosistema, do qual elas próprias surgiram, a bordo de um dentre bilhões de planetas que existem em um universo em expansão, cujas dimensões são desconhecidas e talvez infinitas. Para alguns, esta nova visão é excitante e estimulante, mas para outros ela aparece como uma ameaça. Eles olham pelo telescópio e perguntam: “Isso tudo não faz você se sentir insignificante?”. Talvez a palavra correta seja *inseguro*. A ciência ameaça não só a estabilidade das nossas concepções a respeito de nós mesmos (tais como a noção de que ocupamos o centro do universo), como

também outras velhas maneiras de pensar (por exemplo, que a nossa profunda convicção de que algo é verdadeiro esteja de alguma maneira relacionada com a possibilidade de demonstrá-lo). A ameaça é real em ambos os casos, e isso deve ser reconhecido pelos que, como nós, divulgam a ciência — embora tenhamos a liberdade de explicar por quê, desde que estejamos dispostos a enfrentar esses perigos.

Em terceiro lugar está algo que tem sido pouco ventilado até aqui e que poderia ser chamado de contribuição política da ciência. Não é por coincidência que desde a sua publicação, em 1687, os *Principia* de Newton são considerados um dos mananciais do Iluminismo. O mesmo se aplica ao fato de que entre os fundadores dos movimentos democráticos do século XVIII, na América e em outras partes, havia um número desproporcionalmente grande de pensadores científicos. E ainda ao fato de que os cientistas figuram com destaque nos movimentos dissidentes que se opõem aos estados totalitários dos nossos dias. A ciência é intrinsecamente antiautoritária: ela substitui os sistemas verticais de pensamento político, que Thomas Paine agrupou sob o nome de “despotismo”, pelo enfoque horizontal em que qualquer pessoa capaz de fazer observações competentes e realizar experimentos em condições de controle pode perfeitamente ser vista como fonte potencial de autoridade — autoridade esta que não reside no indivíduo, mas sim nas conclusões a que ele chega.

A ciência nos encoraja — na verdade nos obriga — a conviver com as dúvidas e ambigüidades e a ter consciência da enormidade da nossa ignorância. Em certa medida, esses hábitos do pensamento já impregnaram tanto o domínio científico quanto o político. Como diz Richard Feynman, “o governo dos Estados Unidos foi desenvolvido sob a égide do conceito de que ninguém sabia nem como fazer um governo, nem como governar. O resultado foi a invenção de um sistema que sirva para governar quando você não sabe como fazê-lo. E a maneira de consegui-lo é permitir um sistema como o que nós temos, em que novas ideias podem ser desenvolvidas, experimentadas e descartadas”.¹

Além disso, a condução de pesquisas científicas requer liberdade de expressão e associação. É demasiado difícil fazer física sem poder ir a metade das conferências importantes e quando as suas ideias sobre a ciência têm de se conformar com a filosofia oficial do governo. Essa exigência de liberdade constrói uma aliança entre cientistas, escritores e artistas aliados. E impõe também uma considerável desvantagem para os países que tentem competir em um mundo cada vez mais científico e tecnológico e, ao mesmo tempo, negar a liberdade aos seus cidadãos. Assim, na minha opinião, se a ciência é responsável por haver inventado terríveis armas de destruição, é responsável também, ao menos em parte, pelo fato de que quase metade da humanidade vive hoje em sociedades democráticas, em uma definição flexível, e também pelo fato de que, quando o ano 2000 chegou, não havia no mundo nenhuma guerra entre países diferentes. A ciência é acusada de fabricar bombas, mas também luta pela liberdade.

Em resumo: dos pontos de vista tecnológico, intelectual e mesmo político, a ciência reside em um lugar próximo ao centro da nossa cultura, ou seja, o lugar onde estão as pessoas que valorizam a liberdade, honram a responsabilidade, têm consciência da própria ignorância e sentem vontade de continuar a aprender. Ao mesmo tempo, porém, os cidadãos que compõem essa mesma sociedade permanecem, na sua maior parte, alienados com relação à ciência.

Todos os anos lemos notícias nos jornais sobre o que se denomina "analfabetismo científico". Elas nos dizem, por exemplo, que quase a metade de todos os norte-americanos não acredita que os seres humanos tenham evoluído a partir de outras espécies animais, que a maioria desconhece que o sistema solar está localizado na galáxia que se chama Via Láctea e que apenas a quarta parte ouviu falar que o universo está em expansão. Essas notícias são lamentáveis, e mais lamentável ainda é o fato de serem muito poucos os que entendem a ciência como um processo.

Não faz muita diferença para mim que um estudante saiba ou não quantos são os planetas do nosso sistema solar. Em primeiro lugar, porque os próprios astrônomos continuam a discutir se Plutão merece ou não o nome de planeta. Em segundo lugar, porque os

estudantes podem receber a resposta “certa” da maneira errada. Podem aprender em um livro que o Sol tem nove planetas, ou ouvir que um cientista, na televisão, divulga essa informação com voz autoritária. Aprender fatos científicos dessa maneira tem a mesma profundidade com que um cortesão fica repetindo, como um papagaio, as palavras do rei, ou com que um professor prega que o progresso não existe porque outros, como Nietzsche e Schopenhauer, assim o disseram. O analfabetismo científico denunciado pelos jornais — como no caso em que a televisão entrevistou universitários no dia da sua formatura e descobriu que muitos deles não sabiam o que causa as estações do ano — é preocupante principalmente como sintoma de um problema maior, que é eles não terem aprendido como é que se investigam as coisas. Em última análise, *o que* você pensa é menos importante do que *como* você pensa.

Dizem que nossos estudantes não aprendem lógica e não sabem como raciocinar, mas isso não é nem a metade do problema. Conhecemos a lógica há milhares de anos, bem antes de termos uma ciência de verdade, e o que aprendemos é que a lógica pode produzir fantásticas coleções de conclusões que quase nada têm a ver com o mundo real. Em outras palavras, existe um número infinito de universos logicamente consistentes; o que a ciência pergunta é em qual desses universos nós vivemos. O estudante que não aprender isso não poderá captar o sentido da ciência, por mais que saiba construir um silogismo ou informar que o néon é um gás nobre. Para eles a ciência é uma máquina perigosa, que funciona de maneira tão misteriosa quanto a magia. Não se pode estranhar, portanto, que tantas pessoas temam a ciência e desconfiem dela, pois isso é coerente com o fato de que, nos filmes e nas séries de televisão — que buscam sempre refletir a atitude mental da população —, os cientistas têm maior probabilidade de sofrer mortes violentas do que os membros de qualquer outra profissão, inclusive os pistoleiros.

Uma das motivações da popularização da ciência é ajudar a pôr as pessoas em contato com a evolução da sua cultura. Tal cultura tem, evidentemente, muitas outras raízes profundas, como a arte, a

religião, a filosofia e a história. Estas raízes nos parecem mais familiares porque já cumpriram o mandato de mil anos prescrito por Whitehead, o que as torna mais naturais aos nossos olhos. Mas nada é mais natural do que a ciência, porque nada contribuiu mais para mostrar-nos como a natureza trabalha. A função do divulgador da ciência é, em parte, a de ajudar as pessoas a perceber isso, de modo que elas possam viver melhor em um mundo integrado, em vez de fazê-lo em um mundo dividido e em guerra consigo mesmo.

No entanto, nós, os divulgadores, não conseguimos, até aqui, fazer um bom trabalho. Há décadas estamos produzindo programas científicos para a televisão e escrevendo livros e artigos para a seção de ciências dos nossos jornais. Mas o fato é que vivemos em uma nação, os Estados Unidos, em que, de acordo com um estudo, menos de 7% dos adultos podem ser considerados cientificamente alfabetizados, ainda que usemos a mais generosa das definições, e apenas 13% têm ao menos uma compreensão mínima do que seja o processo científico, enquanto 40% acreditam em astrologia.

Onde foi que erramos?

Bem, em primeiro lugar somos poucos. Há apenas cerca de 3000 escritores de ciência nos Estados Unidos, e talvez uns 10 mil no mundo inteiro, muitos dos quais são trabalhadores autônomos, que fazem jornalismo de noite e trabalham em outra atividade de dia. O lado bom é que hoje há mais escritores de ciência do que antes e que o nosso grupo vem crescendo com a entrada de cientistas que gostam de escrever e que atingem um público relativamente amplo. Mas poderíamos ser mais numerosos.

A urgente necessidade cívica de que mais pessoas se ocupem de fazer divulgação científica não é, contudo, a minha principal motivação para atrair os jovens escritores para a ciência. Na verdade, não acredito muito que as pessoas pratiquem este ofício movidas pelo bem comum; escrever já é difícil mesmo com finalidades egoístas, de modo que não podemos sobrecarregá-las com esperanças de que trarão melhoras para o destino do público em geral. Lao-Tseu disse que governar um grande país é como cozinhar um pequeno peixe. Escrever também é assim. Não é preciso refletir profundamente sobre o bem que faz comer peixe,

nem estimular as pessoas a fazê-lo. Basta cozinhar — bem — um peixe de cada vez. Digo aos meus alunos que a ciência é uma grande história — a maior de todas, em certo sentido — e que escrever sobre ciência pode abrir as suas perspectivas sobre todas as demais coisas. Pelo menos foi isso que aconteceu comigo.

Quando comecei como jornalista, ainda havia entre meus colegas repórteres da velha guarda, enrijecidos no orgulho de não ter tido educação formal, muitos que olhavam com desprezo para tudo o que tivesse cheiro de erudição. Alguns sequer escreviam: eles passavam a história para um redator, que então a transformava em palavras. Muitos desses homens — quase todos eram homens naquele tempo — eram excelentes repórteres, hábeis e experientes na cobertura dos assuntos da cidade, das atividades dos tribunais e dos eventos policiais. Mas a ciência não fazia parte do seu mundo.

Para dar uma ideia dessa época, permitam-me citar algumas linhas de uma entrevista feita por um repórter do *Wisconsin State Journal*, em abril de 1929, quando da visita do físico Paul Dirac, famoso por ser taciturno e mais taciturno ainda ao responder a perguntas como esta.

O repórter perguntou: “Escute, doutor, o senhor pode me dar, em poucas palavras, o que há de verdade em todas essas pesquisas?”

Dirac: “Não”.

Repórter: “Diga-me se assim fica melhor: ‘O professor Dirac resolve todos os problemas da física matemática mas não é capaz de inventar uma maneira melhor de apresentar as estatísticas de baseball?’”

Dirac: “Sim”.

Repórter: “O que o senhor mais aprecia nos Estados Unidos?”.

Dirac: “Batatas”.²

Desde então nos tornamos um pouco mais cerebrais. Hoje a maioria dos repórteres tem curso universitário, e fico feliz de dizer que a maioria dos que se formam em jornalismo hoje nos Estados Unidos é composta por mulheres, o que nos permite ao menos dizer que os jornalistas estão à frente de algumas das ciências no ato de

trazer à luz o poder mental da outra metade da espécie humana. Na mídia eletrônica, onde o viés anticientífico tem sido particularmente forte, as atitudes estão começando a mudar. Isso se deve em parte à internet. Em 20 de julho de 1976, a sonda *Viking* desceu na superfície de Marte justamente na hora em que os noticiários da manhã iam ao ar nas emissoras de televisão na costa leste dos Estados Unidos. Mas os produtores se recusaram a pôr no ar as imagens ao vivo de Marte. Argumentaram que as pessoas não estavam interessadas. Vinte anos depois, quando o *Pathfinder* desceu em Marte, o número de pessoas que visitou a página do veículo na internet para ver as fotos foi maior do que a soma do público que assistia aos noticiários matinais das três cadeias principais de televisão.

Os produtores estavam errados. As pessoas têm interesse em ciência e existe um público para a cobertura jornalística da ciência. Um estudo conduzido pela National Science Foundation em 1995 revelou que 86% dos americanos concordam em que “a ciência e a tecnologia tornam a nossa vida mais sadia, fácil e confortável” e que 72% concordam em que os benefícios da ciência são maiores do que os efeitos maléficos que ela pode provocar. Em termos de confiabilidade, o público coloca os cientistas em segundo lugar, atrás apenas dos médicos e à frente dos juizes da Corte Suprema dos EUA. (A propósito, no fim da lista estavam o Congresso, a imprensa e a televisão.)³

Existe um público, e ele é hoje mais bem atendido do que no passado, mas persiste o problema de como transmitir-lhe o que é a ciência em sua essência — de que forma ela funciona como processo, como um meio de compreender o mundo. Essa é a questão à qual dedicarei o restante deste ensaio.

São muitos os que querem saber mais a respeito da ciência, mas não têm com ela familiaridade suficiente para compreender o que representa a pesquisa científica. Para eles, ler um relato sobre estudos com células-tronco ou a pesquisa da radiação cósmica de fundo em microondas feita em um balão estratosférico é como ler a descrição de um jogo de críquete sem ter visto o jogo e sem

conhecer as regras. É fácil pôr a culpa no sistema educacional, e talvez nem seja injusto. Apenas a quinta parte de todos os americanos que completam o segundo grau teve aulas de física. Dentre os que as tiveram, só a quarta parte teve professores formados em física. E nada mais do que uma pequena fração desses professores chegou a fazer pesquisas no campo da física. Como seriam os times de basquete das universidades americanas se 75% dos técnicos nunca tivessem estudado basquete e se praticamente nenhum deles jamais tivesse praticado esse esporte?

Mas as escolas são apenas o reflexo de uma realidade muito ampla: a ciência ainda não está integrada na corrente principal da cultura. Isso torna difícil trazer a ciência para a televisão, para o cinema e para outras formas da mídia da cultura popular, precisamente porque a ciência ainda é uma novidade, o que significa que os desafios que os cientistas enfrentam não são familiares para o grande público. Uma platéia que vai ao cinema para ver um filme sobre amor, esporte ou guerra leva consigo algum entendimento prévio a respeito do que seja ganhar ou perder no amor, no esporte ou na guerra. Tal não é o caso com relação à ciência.

Como enfrentar esse desafio?

Em vez de fazer pregações sobre questões de princípio, apresentarei algumas cenas de filme, escritas com o objetivo de encarar esse problema. Trata-se de um filme de longa-metragem, contemplado pelos estúdios de Walt Disney, sobre a vida de Albert Einstein. O filme nunca foi feito; nem eu escrevi o roteiro, mas sim algumas cenas, destinadas a transmitir determinadas ideias científicas de Einstein. A maioria delas implicava efeitos especiais. Eu imaginava o filme como um musical sem cantos, em que os efeitos especiais tomariam o lugar das canções. Em outras palavras, as cenas correspondem a intervalos em que a platéia é retirada do fluxo da narração da vida de Einstein e transportada ao reino dos seus pensamentos.

Tinha poucas ilusões à época, e as tenho poucas hoje, quanto às dificuldades do empreendimento. Nem penso que esse trabalho resolva as questões ligadas à preparação do público, que aflorei aqui. Mas é um esforço que fiz para combinar a narrativa com a

biografia do pensamento científico. Permitam-me, então, algumas pequenas citações.

Esta é a abertura do filme:

Título em negro. Título se esvai. Tela negra. Luz branca ofuscante. Estamos vendo o big bang. Sons de trovão à medida que o universo se esfria e se expande. Chegamos a uma época de escuridão, iluminada por faíscas douradas, prateadas e azuis, de partículas com alta energia.

Música-tema.

As galáxias começam a formar-se na escuridão — rodamos de baixa luminosidade com quasares brilhantes fulgurando nos seus corações. Ondas de choque varrem as nuvens de poeira e gás que se formam nas imediações, levando ao nascimento de bilhões de estrelas em cada galáxia. Explosões fazem tremer as galáxias, que se separam umas das outras à medida que o universo se expande. Ao fundo, o brilho do big bang se esvai pouco a pouco, estendendo-se do azul ao vermelho escuro, graças à expansão do universo. O brilho se reduz ao invisível, deixando a escuridão do espaço como pano de fundo para as galáxias.

Aproximamo-nos de uma galáxia — a Via Láctea — que viaja pelo espaço. Seus braços espirais varrem toda a sua extensão como fogo *no* campo. A galáxia evolui a partir de uma predominância de estrelas azuis brilhantes para uma rica mescla de estrelas azuis, vermelhas e amarelas. Sobrevoamos o disco da Via Láctea e seu centro dourado e, mais alto, aproximamo-nos de dois braços espirais e mergulhamos em direção ao disco, voando por entre gigantescas nuvens cor de rubi, onde nascem novas estrelas em meio a outras nuvens que emergem subindo do disco, como em explosões.

À nossa frente aparecem as estrelas da vizinhança do Sol. Passamos pelo aglomerado das Plêiades, no Touro — o

aglomerado que veremos no céu quando focalizarmos a infância de Einstein e depois como fundo de um eclipse solar.

Aproximamo-nos do Sol, mergulhamos rumo à Terra, à América do Norte e entramos, em progressiva dESAceleração, pelo teto da casa de Einstein, na rua Mercer, em Princeton.

Close próximo: uma velha bússola amarelada.

Corte para o interior do estúdio de Einstein, à noite. A bússola está na mão de Einstein, que a faz girar lentamente, fascinado como nos seus tempos de criança, enquanto a agulha mantém-se apontando sempre para a mesma direção.

Segue-se uma série de cenas em que Einstein aparece como conhecemos — o velho Einstein, legendário, vivendo um dia da sua vida em Princeton. Nessa noite, depois do jantar, Einstein dirige-se ao estúdio. Está proibido de fumar, mas tem o cachimbo e o fumo escondidos; foi enquanto os buscava que ele encontrou a bússola na noite anterior. Encontra-os, prepara o cachimbo e o acende e, em seguida, toma novamente a bússola na mão. Dessa vez, começamos com um close bem próximo sobre a bússola e continuamos:

A agulha cobre toda a tela. Ela vibra com a tensão, respondendo ao campo magnético da Terra. Mais próximo: a lâmina que envolve a agulha da bússola toma toda a tela. Mais próximo: o metal da superfície da lâmina aparece deformado e corrugado como a superfície da Lua. Aparecem cristais de metal à medida que continuamos a aproximação; eles apresentam disposição regular, como os telhados das casas de uma vila. Agora um único cristal toma toda a tela; é como estar dentro de uma catedral. Prosseguimos mergulhando até o nível dos átomos e chegamos ao interior de um núcleo atômico. O núcleo sofre uma fissão, e a tela é repentinamente inundada de luz

branca, idêntica à que vimos com o big bang, no começo do filme.

Percorremos o caminho contrário e voltamos a ver a bússola ocupando a tela.

Corte para o interior da casa da infância de Einstein, em um subúrbio de Munique, à noite, em 1885. Einstein, com cinco anos de idade, está na cama, resfriado. A bússola está na mão do seu pai, Hermann. É um presente para o filho. Einstein gira-a devagar em sua mão, surpreso porque a agulha aponta sempre para o norte. Anos depois ele recordaria que sua reação foi pensar que "alguma força, bem escondida, deve estar por trás das coisas".

EINSTEIN: Como é que ela funciona?

HERMANN EINSTEIN: Ela reage ao campo magnético da Terra.

EINSTEIN: O que é um campo magnético?

HERMANN EINSTEIN: É uma espécie de energia que fica em volta do mundo.

EINSTEIN: Em volta do mundo inteiro?

Corte para o exterior, do lado de fora da casa de Einstein, no subúrbio de Munique, no começo da noite, um ou dois dias depois. *Einstein*, com cinco anos de idade, está no jardim, olhando as estrelas do aglomerado das Plêiades, que aparecem no céu que vai escurecendo.

Close sobre Einstein. Uma malha de trêmulas linhas douradas aparece nos seus olhos. A voz da mãe o chama para dentro de casa.

Einstein, visto de costas, caminha para casa, sempre olhando para as estrelas. Acima, projetado pela sua imaginação, o campo magnético da Terra se estende de norte a sul através do céu. Ele é formado de listras douradas e luminosas, entrelaçadas como o vime de uma cesta. O menino entra pela

porta, mas a malha de listras douradas não se dissolve totalmente.

A cena seguinte tem lugar alguns dias depois, na pequena construção que o pai e o tio de Einstein fizeram no jardim, para abrigar um gerador de energia:

Interior, dia, na casinha do gerador construída pelo pai de Einstein, Hermann, e pelo seu tio Jakob. O lugar é barulhento e ativo, cheio de correias de transmissão, uma incursão aventureira pela tecnologia da época, que, neste caso, estava destinada ao fracasso.

Hermann e Jakob estão consertando o gerador. O jovem Einstein está olhando.

EINSTEIN: Para que é que isso serve?

JAKOB: Para produzir eletricidade, Albert. Olhe aqui. Está vendo estes ímãs? Quando eles giram assim, produzem eletricidade nestes fios enrolados de metal.

EINSTEIN: **E** como é que a eletricidade passa dos ímãs para os fios, tio?

JAKOB: O giro dos ímãs cria um campo magnético.

EINSTEIN: Como na bússola?

JAKOB (*com entusiasmo*): É isso mesmo, Albert! O ímã produz a eletricidade.

EINSTEIN: A eletricidade está aí agora?

JAKOB: Não, agora não. Os ímãs precisam estar girando para produzir a eletricidade. É por isso que nós estamos aqui, consertando a máquina, para que os ímãs possam girar.

EINSTEIN: Então é o movimento que produz a eletricidade.

Saltarei algumas cenas, inclusive uma, na Itália, quando Einstein, com dezesseis anos de idade, imagina estar voando em um raio de luz e concebe a ideia que se tornaria o centro da

teoria da relatividade especial. Vamos para a época em que era estudante universitário:

Interior, dia, laboratório de física de Herr Heinrich Weber, no Instituto Politécnico de Zurique. Entra alguma luz pelas janelas, mas o laboratório é escuro e sombrio. Weber está fazendo uma demonstração com um dínamo para uma turma de alunos. É um assunto importante para ele, inclusive porque o seu departamento no instituto foi estabelecido com recursos proporcionados pelos fabricantes dos grandes dínamos hidroelétricos que estavam sendo instalados nos principais rios da Alemanha. Mas Weber, como todos os físicos do seu tempo, não sabe bem como um dínamo funciona. Isso era particularmente inconveniente porque impedia que se pudesse determinar com precisão a potência efetiva dos dínamos, que estavam sendo construídos com investimentos de grande volume.

Einstein começa a perceber que a resposta está na extrapolação das equações de campo de Maxwell. Mas Weber se recusa até mesmo a ensinar as equações de Maxwell à turma. Einstein *pergunta* a Weber sobre a natureza do campo magnético no dínamo, referindo-se às equações de Maxwell. Weber, furioso, acaba por expulsar Einstein do laboratório.

Einstein arruma seus livros e se prepara para sair quando...

WEBER: Seu problema, Einstein, é que ninguém pode ensinar nada a você.

Interior, no corredor, fora da sala de aula. Einstein corre pelo corredor.

Exterior, Instituto Politécnico, dia. Einstein empurra a porta, passa da escuridão para a luz brilhante do Sol e dá um salto no ar. Por um momento, ele se sente livre.

Corte para o interior, na sala das baterias do Instituto Politécnico, tarde da noite. Herr Weber realiza experimentos de quase- eletrocução, usando a si próprio como cobaia. Ele está sentado em uma espécie de cadeira elétrica.

Weber põe eletrodos nos seus braços e pernas, embebe os contatos com salmoura para assegurar boa condutividade e dá o sinal para que um assistente acione a corrente. Ele é galvanizado por mil volts de corrente alternada. Einstein e alguns amigos, escondidos em um recanto na parte superior da grande sala, ficam olhando. Os amigos estão espantados. Einstein não. Ele já aprendeu que o mundo dos seres humanos é pelo menos 50% louco.

Finalmente, duas cenas que têm a ver com a relatividade geral:

Exterior, Ilha do Príncipe, na costa da África, dia. Arthur Stanley Eddington e outros astrônomos colegas seus prepararam barracas e um telescópio com uma câmara para registrar o eclipse do Sol. O vento e uma chuva intermitente dificultam os seus esforços e agitam as barracas. As nuvens ocultam o Sol, reduzido agora à forma de um crescente, devido ao eclipse, que já começou. No último momento abre-se um espaço entre as nuvens, que permite que os astrônomos fotografem o eclipse.

Exterior, visão espacial do eclipse solar. A Lua desliza entre a Terra e o Sol, lançando uma sombra gigantesca que corre através do oceano, em direção à ilha. As estrelas do aglomerado das Plêiades envolvem o eclipse do Sol, cuja coroa brilha com seus tons rosados e brancos. O Sol se desloca à frente das Plêiades, e as estrelas avançam lentamente pelo céu (como vimos em um experimento anterior).

Exterior, no local da observação do eclipse. O eclipse é total; uma cena estupefaciente. Os observadores estão boquiabertos. Um deles pronuncia repetidamente o nome de Eddington, para

que ele observe. Eddington, curvado sobre a câmara, ocupado com as fotografias, não olha nunca para o céu.

Corte para o interior, uma barraca na ilha, noite. Quarto escuro improvisado. Chove lá fora. O vento sacode as paredes da barraca. Eddington debruça-se sobre as bandejas, revelando as primeiras fotografias do eclipse. Toma um negativo, ainda molhado, coloca-o na mesa e desliza sobre ele um mapa transparente das estrelas do céu. As estrelas no negativo aparecem em posição diferente da normal. Toma um segundo mapa, feito de acordo com a previsão de Einstein, e o coloca sobre o negativo. As imagens das estrelas sobrepõem-se perfeitamente.

Corte para o interior, escritório de Einstein em Zurique, 27 de setembro de 1919. Einstein lê passagens de um livro sobre a relatividade para uma aluna, Use Rosenthal Schneider.

EINSTEIN (*lendo alto*): "Einstein é completamente ininteligível".
Que belo reconhecimento do autor!

Chega um mensageiro com um telegrama. Einstein abre-o e lê, absorto em pensamentos.

Close sobre o telegrama. Lê-se: "Eddington encontrou deslocamento das estrelas na periferia do Sol. Medição preliminar entre nove décimos de segundo e duas vezes esse valor".

EINSTEIN (*entregando o telegrama*): Acho que você vai querer ler.

Ela lê.

ILSE: Que maravilha! É o resultado exato que a teoria previa!

EINSTEIN (*provocante*): E você tinha dúvidas? ILSE: Não, claro que não. Mas o que é que você teria dito se a observação do eclipse não tivesse confirmado a teoria?

EINSTEIN: Ficaria com pena do querido Senhor. A teoria está certa.

Meu desejo aqui, como é lógico, é ligar a ciência a um público amplo por meio de uma personalidade famosa — o “homem do século” da revista *Time*— e transmitir algo do seu pensamento através de metáforas, narrativas e efeitos especiais. Um dos objetivos é mostrar que seus pensamentos não são apenas abstrações — porque estão ligados à observação e aos experimentos.

Einstein mantém a confiança não por ser arrogante, mas por ser bravo. É como um herói tradicional que embarca em um caso de amor ou que vai para o combate. Ele sabe que o resultado do experimento é perigoso, como o são o amor e a guerra, mas enfrentar o perigo com o espírito confiante e alegre é parte do seu trabalho.

Para concluir, permitam-me dizer que é um prazer poder escrever sobre alguém como Einstein e que tive a sorte de conhecer diversos grandes cientistas exemplares, não só pelas suas conquistas intelectuais, mas também pelo caráter. O jornalismo tem muito a ver com o desenterrar de segredos, com levar as pessoas a dizer coisas que não querem divulgar, vasculhando dissimulações e dESAssimilações para chegar à verdade. Mas ainda que os cientistas sejam seres humanos vulneráveis às nossas fraquezas, a ciência como um todo é muito mais aberta do que os mundos da política e das finanças. A ciência é uma espécie de buraco branco que jorra informações, e a posição básica da maioria dos cientistas que conheci é explicar o máximo possível e da maneira mais clara possível o que eles acreditam que são os fatos da natureza.

Isso me foi demonstrado com particular clareza anos atrás, quando estávamos fazendo um filme chamado *A criação do universo*. Estávamos no CERN, a organização europeia para a pesquisa nuclear, próximo a Genebra, Suíça. A equipe de trabalho estava envolvida com a montagem dos equipamentos, de modo que eu tinha pouco o que fazer, além de recordar as minhas falas. Por isso, comecei a andar pelos corredores, e cada vez que via uma porta aberta e alguém trabalhando na sala, eu entrava e perguntava

o que ela estava fazendo. Nenhum dos cientistas que eu, um ilustre desconhecido, interrompi no meio do seu trabalho, me expulsou, ou tratou de livrar-se de mim com respostas bruscas. Ao contrário, todos dedicaram-se a explicar-me do modo mais eficiente possível tudo o que se referia às suas pesquisas. Perguntome como seria o mundo se mais pessoas fossem assim.

Além disso, muitos cientistas se dão o trabalho de escrever sobre ciência para o público em geral. Naturalmente, há razões de interesse próprio para isso, como ganhar dinheiro e fama e manter informadas as pessoas cujo imposto de renda ajuda a financiar as pesquisas, mas também há a clareza interna. Niels Bohr insistia em que a ciência, por mais fantasiosa que seja, deve, em última análise, ser explicada em linguagem corrente. Ernest Rutherford costumava dizer que, se você não conseguir explicar sua teoria para um garçom, é porque ela provavelmente não é uma boa teoria. Um dos maiores divulgadores da ciência é o homem que homenageamos no Kipfest — não só pelas suas conquistas intelectuais, mas também pelo seu caráter. Conheço Kip Thorne há muitos anos, não só como cientista — um dos supremos pesquisadores em todo o mundo sobre o universo em expansão revelado pela relatividade de Einstein —, mas também como um homem íntegro. Durante todo esse tempo, nunca vi Kip dizer algo destinado a desanimar alguém, ou criticar algum colega por motivos egoístas, ou promover indevidamente o seu próprio trabalho, ou contornar algum aspecto de um problema por comodidade, ou ofuscar, distorcer, desunir.

Quanto a mim, não creio que após a morte venhamos a enfrentar são Pedro ou algum outro juiz que possa responsabilizar-nos pela nossa vida, mas a ideia de tal julgamento é um excelente incentivo para uma meditação diária. Porque, afinal de contas, não se trata apenas do que você pensa e como age e o que você consegue realizar, mas sim da pessoa que teve esses pensamentos e empreendeu essas ações e conseguiu realizar essas coisas. Diógenes, andando pela ágora com uma lanterna acESA na mão em pleno dia, respondeu a quem lhe perguntou o que estava fazendo que estava “procurando um homem”. A sua intenção ainda não ficou totalmente clara, já que até hoje se diz que ele estava “procurando

um homem *honesto*”, mas a honestidade é apenas uma parte do assunto. Diógenes queria dizer que estava procurando um *homem* — alguém que pudesse dizer “eu sei quem é que faz o meu trabalho e tem as minhas ideias, e luta pelas minhas coisas e assume a responsabilidade por elas”. Se Diógenes tivesse encontrado Kip na ágora naquele dia, poderia ter apagado a lanterna.

O físico como romancista

Alan Lightman

Kip Thorne escreveu cerca de quarenta artigos para o público geral. Em 1971, quando tive a sorte de tornar-me um dos seus alunos de pós-graduação, vi, um dia, na secretaria, uma pilha de reimpressões do seu artigo "A morte de uma estrela", que havia recebido um prêmio na categoria divulgação científica. Hoje um bom número de cientistas escreve para o grande público, mas no começo da década de 1970 o número era mínimo. "Muito interessante", pensei comigo mesmo. "Então Kip está dedicando uma parte do seu precioso tempo de pesquisa para escrever para o público geral." Anotei. Revi a imagem que eu formara do físico jovem e brilhante de barba vermelha, que usava túnicas africanas e parecia trabalhar dia e noite escrevendo equações no bloco de papel branco sem pautas, que nos deixou impressionadíssimos no primeiro dia de aula, quando nos disse que o chamássemos de "Kip" e entrou em conspirações científicas com pessoas chamadas Yakov Borisovich Zeldovich, Vladimir Braginsky e Igor Novikov. Então Kip também era escritor. Anotei. Minha impressão quanto ao lado literário de Kip fortaleceu-se quando o meu colega de estudo David Lee e eu recebemos de volta, mandado por ele, o rascunho do nosso primeiro trabalho científico, banhado em tinta vermelha. Uma nota dizia: "A aceitação dos seus trabalhos e o impacto que eles poderão causar dependem crucialmente da maneira como são escritos". Atrevo-me a pensar que poucos cientistas, tanto naquela época quanto agora, revelam tanto cuidado e desejo de ajudar nos seus comentários sobre a qualidade da redação dos seus alunos.

No período em que fui aluno de pós-graduação no grupo de relatividade de Kip, eu já tinha desenvolvido um forte gosto por escrever. Na verdade, desde criança eu sofria uma dupla paixão pela ciência e pela arte. No segundo grau, eu construía foguetes e escrevia poesia. Esse duplo interesse me levava a ter dois grupos separados de amigos, e eu próprio me sentia às vezes separado de

mim mesmo. Sete ou oito anos depois do meu doutorado em física teórica, perdi a vergonha com relação aos meus interesses literários e comecei a escrever ensaios populares sobre ciência. O ensaio é uma forma de escrever extremamente flexível. Em um ensaio, você pode ser informativo, filosófico, pessoal ou poético. Logo passei a fazer experiências com os meus ensaios, ampliando seus limites, e escrevi alguns textos esquisitos que poderiam chamar-se fábulas — metade fato, metade ficção, sempre tratando de ciência, mas de maneira oblíqua. Ciência como metáfora. Ciência como maneira de ver o mundo. Há mais ou menos dez anos abandonei para sempre a terra firme e me entreguei por completo à ficção.

Um dia, levantei-me da cama e descobri que eu era membro de uma segunda comunidade. Uso a palavra *comunidade* aqui de maneira não específica, porque a comunidade dos escritores é muito diferente da dos cientistas. Um cientista ativo permanece em contato com dezenas de outros cientistas, frequentemente faz pesquisas em universidades e laboratórios em conjunto com outros colegas, faz seminários a respeito das suas novas investigações, telefona ou manda e-mails diariamente para seus companheiros, troca artigos com eles antes da publicação e comparece a diversas conferências a cada ano. Os escritores, ao contrário, trabalham isoladamente. As duas maiores organizações de escritores nos Estados Unidos, PEN e Author s Guild, existem sobretudo para promover os direitos legais e políticos dos escritores e para distribuir prêmios. A maioria dos escritores não vai a encontros. A maior parte deles escreve sozinha em casa.

Um romancista pode ficar cinco anos trabalhando em um livro. Durante esse tempo, talvez converse com um ou dois colegas a cada seis meses, com o seu agente umas duas vezes e com um editor no quarto ano. Muito de vez em quando pode ser que vá a uma feira de livros ou participe de uma leitura conjunta com dois ou três outros escritores. O romancista vive no deserto. Ele vê as provas da existência de outros romancistas principalmente nas pegadas ocasionais que observa em seu caminho, sob a forma de livros ou de críticas. Lê os trabalhos dos colegas com admiração e ciúmes e volta para sua toca individual. Assim é a comunidade dos escritores.

Como membro dessas duas comunidades, assim como elas são, sempre fui fascinado pelas suas diferentes maneiras de pensar e de trabalhar e pelos caminhos diferentes pelos quais buscam a verdade. E, ao mesmo tempo, pelas semelhanças. Boston, onde moro, é uma cidade em que há muitos exemplares das duas espécies — escritores e cientistas —, e às vezes, quando estou no metrô, faço um jogo solitário e tento identificar os escritores e os cientistas só pela aparência. Aquele cara ali, olhando fixo para a escuridão pela janela com cara de perplexidade, com calça xadrez e camisa de nylon, quatro canetas aparecendo no bolso e uma pasta velha que já devia ter sido aposentada há mais de dez anos — aposto que é um físico teórico. E aquele outro com calça de veludo cotelê, cabelo bem cortado e uma barba de dois dias cuidadosamente aparada, com o corpo espichado e um bloquinho na mão, escrevinhando ao mesmo tempo que examina cada passageiro e que agora olha para mim, como eu olho para ele — aposto que é um escritor... Mas sei que esses estereótipos de aparência não funcionam sempre. Largo o meu bloquinho e me ponho a pensar em quantos minutos o trem demorará para chegarmos à parada de Kendall Square.

Uma diferença importante que encontro entre físicos e romancistas, e mesmo entre cientistas e artistas em geral, está na questão de dar nome às coisas. Como regra geral, o cientista trata de dar nome às coisas e o artista trata de evitá-lo. Essa diferença tem muitos aspectos. Descreverei alguns.

Dar nome a uma coisa é colhê-la, destilá-la e purificá-la. É identificá-la com clareza e precisão, fechá-la em uma caixa e dizer: "O que está dentro da caixa é a coisa e o que não está não é". Considere, por exemplo, a palavra *elétron*, a partícula subatômica. Tanto quanto se saiba, todos os zilhões e mais zilhões de elétrons do universo são idênticos. Existe apenas um tipo de elétron. E para um físico moderno a palavra *elétron* significa uma equação particular, a equação de Dirac com operadores de campo. Essa equação resume, em precisa forma matemática e quantitativa, tudo o que se sabe a respeito dos elétrons, todas as interações, todas as variações de energia medidas pelos nossos despedaçadores de átomos e magnetômetros. As energias dos elétrons nos átomos de diversos

tipos, a medida precisa das deflexões e mudanças de rumo dos elétrons afetados por determinados campos magnéticos e elétricos, os efeitos minúsculos causados pelas materializações de elétrons e suas antipartículas, que ocorre a partir do nada e é seguida pelo seu imediato desaparecimento — tudo isso pode ser previsto com precisão de muitas casas decimais pela equação de Dirac com operadores de campo. Pode-se discutir este ou aquele aspecto do elétron, se ele gira como pião ou se dá uma volta para dentro de si próprio, se fica em órbita ou se paira, se se irradia, como uma onda, ou se concentra, como uma semente, mas a equação de Dirac nos dá uma representação muito precisa e objetiva do elétron. No sentido estrito, o nome *elétron* refere-se a essa equação. Os físicos modernos conhecem e veneram a equação de Dirac. Os cientistas gostariam de poder expressar todos os objetos físicos do universo com essa mesma precisão. É uma fonte de tranquilidade, um sentimento de poder, uma sensação de controle poder dar nome às coisas dessa maneira.

Os conceitos e os objetos com que o romancista trabalha não podem receber nome. O escritor pode usar as palavras *amor* ou *medo*, mas esses nomes não indicam muitas coisas ao leitor. Para começar, existem mil tipos diferentes de amor: o amor pela mãe que lhe escreve todos os dias quando você sai de férias sozinho pela primeira vez; o amor pela mãe que lhe dá um tapa quando você chega bêbado em casa depois de uma festa e que em seguida o abraça; o amor pela pessoa com quem você acaba de fazer amor; o amor pelo amigo que lhe telefona para dar apoio depois que você brigou com o seu cônjuge; e assim por diante. E não é só a existência de diferentes tipos de amor que impede o romancista de verdadeiramente dar nome às coisas. É que a sensação do amor, a sensação particular, dentre os mil tipos diferentes de amor, a dor particular, tem de ser mostrada ao leitor, e não nomeada, e mostrada através das ações praticadas pelos personagens.

Se o amor é mostrado, em vez de nomeado, cada leitor o experimentará da sua maneira, própria e individual. Cada leitor o associará às suas próprias aventuras e decepções amorosas. O amor

significa uma coisa para uma pessoa e outra para uma segunda. Todos os elétrons são iguais, mas todos os amores são diferentes.

O romancista não deseja eliminar essas diferenças, não deseja esclarecer nem destilar o significado do amor até que haja um significado único, como a equação de Dirac, porque nenhuma destilação pode representar adequadamente o amor. Qualquer tentativa de destilar o conceito do amor acaba por destruir a autenticidade das reações dos leitores, destruir a experiência criativa de participação que ocorre quando um bom leitor lê um bom livro. Em certo sentido, um romance só se completa ao ser lido. E cada leitor completa o romance de maneira diferente.

É verdade que essa questão de dar ou não dar nome às coisas é bem mais complicada do que a mesmice dos elétrons contra as variedades do amor. O próprio leitor, o indivíduo que lê, muda, de um momento para outro da sua vida. As experiências e as relações com o mundo modificam-se, de modo que o significado de uma história, ou de um personagem, ou mesmo de uma palavra, transformam-se, para ele, com o tempo. Uma vez fui a um seminário na Modern Language Association, a principal organização profissional dos críticos literários e professores de inglês, e uma das conferências foi sobre a ciência como literatura. Um dos professores levantou-se e disse que o texto científico ideal seria de tal forma conciso, claro e exato — uma vez que se ocupa do mundo das exatidões — que o leitor só teria de lê-lo uma vez. Mas o ideal de um texto literário, como o de um romance, seria que o leitor precisasse lê-lo repetidamente, porque ele conteria as complexidades e ambiguidades do comportamento humano, e a cada leitura o leitor estaria em um ponto diferente da sua vida e poderia apreciar coisas diferentes e sempre extrair algo novo do livro.

Darei outro exemplo da diferença entre dar ou não nomes. Permitam-me representar a ciência com o texto expositivo. Tal como a ciência, o texto expositivo vê o mundo através de um prisma reducionista e racional. Você tem uma posição, um argumento; *você* o estrutura em passos lógicos, reúne fatos e provas para convencer seus leitores de cada uma das suas assertivas e os conduz por um

caminho mais ou menos direto do ponto inicial a um ponto final, onde a compreensão será maior. Todos aprendemos que em um texto expositivo é excelente estilo começar cada parágrafo com uma sentença tópica. Ela, na verdade, dá nome à ideia do parágrafo. Comece informando o leitor sobre o que ele vai aprender no parágrafo e sobre como deve organizar os seus pensamentos.

Mas na literatura de ficção, uma sentença tópica é quase sempre fatal. Porque o poder da literatura de ficção é emocional e sensual. Você quer que seu leitor sinta o que você diz, sinta o cheiro, escute o som e faça parte da cena. Você quer o seu leitor inteiramente concentrado e pronto para deixar-se levar para o lugar mágico a ele destinado. Cada leitor fará um percurso diferente, que depende da sua própria experiência de vida. Dizer ao seu leitor logo no início como ele deve pensar a respeito do tema simplesmente cancela a viagem. E caso o enredo seja sobre o desenvolvimento de uma ideia — e muitos romances são mais sobre ideias do que sobre personagens e relatos —, você não chega afirmando a sua ideia nua e crua, mas prefere que ela se infiltre, vagarosa e gradualmente, pelas beiradas, de modo que o seu leitor tenha de andar pelo terreno repetidas vezes, buscando o sentido, assombrado. Uma sentença tópica não dá lugar para a criatividade e a imaginação do leitor. A diferença entre esses dois tipos de texto pode ser assimilada à parte do corpo que se quer atingir. Em um texto expositivo, você quer chegar ao cérebro do leitor. Em um texto criativo, você quer passar pelo cérebro para chegar ao estômago ou ao coração.

Um padrão de pensamento intimamente associado ao de dar nomes às coisas é a tradição de formular os problemas em termos de perguntas e respostas. Normalmente, os cientistas trabalham encontrando problemas interessantes e decompondo-os em partes que podem ser apresentadas em termos de uma pergunta definida à qual corresponda uma resposta definida. Com efeito, fazer ciência é, em grande parte, colocar um problema com precisão e clareza suficientes para assegurar uma solução. Assim é construído o mundo da ciência, peça a peça, a partir desses problemas solúveis. Um problema científico típico poderia ser, por exemplo: como uma estrela muda com o tempo? Uma das partes do problema seria: qual

é a estrutura de uma estrela que tenha determinada composição química, pressão e densidade central? Este é um problema bem construído, com uma solução definida. Outra parte do problema seria: qual a taxa de reações nucleares de determinada mistura de hidrogênio e hélio em determinadas condições temperatura e densidade? E assim por diante. Os cientistas aprendem desde o início de sua carreira a não perder tempo com perguntas que não têm respostas claras e definidas.

Já os artistas muitas vezes não se preocupam com a resposta porque sabem que não existem respostas definidas. Em um romance, como em uma pintura, as ideias se complicam com a ambiguidade intrínseca da natureza humana. Na verdade, são as finas contradições e incertezas do coração humano que dão interesse à vida. É por causa delas que as ações dos personagens de um bom romance podem ser discutidas incessantemente, que temos reações emocionais a respeito dos políticos do nosso país e que Deus mostrou bem a maçã para Eva antes de proibir que ela a comesse. Para o artista, há múltiplas perguntas interessantes sem resposta: O que é o amor? Seríamos mais felizes se vivêssemos mil anos? Por que o pôr do sol nos parece bonito? Com efeito, para muitos artistas, a pergunta é muito mais importante do que a resposta. Tal como Rainer Maria Rilke, o poeta, escreveu, há um século: "Temos de aprender a amar as perguntas, elas próprias, como um quarto fechado, ou como um livro escrito em uma língua muito estranha".¹

Uma das consequências de termos ou não termos respostas definidas revela-se no dia-a-dia do cientista em comparação com o do artista. Quando eu trabalhava como físico, às vezes ficava obcecado por um problema científico de tal modo que não podia pensar em nada mais, consumindo nele os meus dias e as minhas noites, debruçado sobre a mesa da cozinha com lápis e papel na mão enquanto o mundo escuro dormia. Eu não sentia cansaço, energizado que estava, trabalhando até o dia raiar e ainda mais.

Mas como escritor, mesmo quando estou escrevendo bem, não consigo trabalhar mais de seis horas seguidas. Depois desse tempo,

fico exausto e a minha vista se turva com as sutilezas e incertezas inerentes ao trabalho. Então é preciso esperar que as palavras se assentem na página e que as minhas forças retornem.

Como cientista, por outro lado, posso ficar ligado durante dias seguidos, dias inteiros, sem parar, porque quero saber a resposta. Quero conhecer o que significa o comportamento da matéria que entra, em espirais, em um buraco negro; a temperatura máxima de um gás de elétrons e pósitrons; ou o que é que sobra depois que um aglomerado de estrelas pouco a pouco vai se concentrando em si mesmo até entrar em colapso. A braços com um problema novo, me sentia compelido a dedicar-me a ele porque sabia que existe uma resposta definida. Sabia que as equações levariam inexoravelmente a uma resposta que nunca fora conhecida e que estava esperando por mim. Essa certeza e esse poder, e a intensidade da energia que eles despertam, não se encontram facilmente na maioria das outras profissões.

Como fui treinado nas ciências e nas várias maneiras de dar nome às coisas, enfrentei, na qualidade de escritor ficcionista, uma luta constante. O grande duelo da minha vida literária, e da minha vida como um todo, deu-se na tensão entre o racional e o intuitivo, o lógico e o ilógico, o certo e o incerto, o linear e o não linear, o deliberado e o espontâneo, o previsível e o imprevisível.

Vivo essa tensão sob a forma de uma constante torção do estômago, quando estou consciente do meu corpo, e sempre como uma comoção mental. Aprendi a viver com esse desconforto. Ele pode até mesmo ser uma fonte de força. Com o tempo, passei a crer que tanto a certeza quanto a incerteza são necessárias no mundo. Talvez esta seja uma ideia óbvia para a maioria das pessoas, mas ela não é facilmente reconhecível para alguém que foi treinado nas ciências.

Mesmo na literatura há uma grande diferença entre ficção e não-ficção. Quando escrevo um ensaio, ou uma crítica, ou um artigo sobre ciência, sei que posso fazer uma pesquisa, coletar o material e preparar um primeiro rascunho. Em síntese, sinto que controlo o processo. Tenho uma boa percepção do rumo pelo qual vou indo. Quando escrevo ficção, não sinto que controlo nada. Não posso

prever o que vai acontecer. Sei que tenho de dar aos meus personagens fictícios liberdade e vida suficientes para que possam fazer-me uma surpresa. Um personagem pode decidir que não gosta do meu enredo, ou pode fazer algo que desarticula totalmente a cena — e talvez o próprio livro. Eu digo obrigado e estremeço em silêncio. Escrever ficção me deixa nervoso. Fico feliz, mas nervoso.

Vejam como uma pessoa dividida entre as virtudes da certeza e da incerteza cria um personagem. No primeiro rascunho delinheio os contornos do personagem. Só os contornos. Porque o personagem na verdade define a si próprio, segundo a maneira como age em situações diversas, e se eu não souber exatamente como o personagem vai agir é porque não o conheço. Depois de todas as surpresas desagradáveis desse primeiro rascunho, já fico com uma ideia melhor do personagem. No segundo rascunho, já na posse desse conhecimento mais profundo, revejo o personagem, trabalho nos diálogos que não ficaram bem e altero as cenas que se tornaram inconsistentes. Depois do segundo rascunho, tenho uma compreensão ainda mais profunda do personagem e repito o processo. Dessa maneira, o personagem vai sendo construído por meio de uma série de aproximações.

Agora que estou pensando nesse método de desenvolver personagens, me vem uma suspeita. Ele é lógico demais. Criar personagens bons não é o meu forte. Tenho mais facilidade para criar cenas e climas. Valorizo a originalidade acima de tudo. Como se pode esperar de uma pessoa treinada nas ciências, as ideias desempenham um papel importante nos meus escritos. Mas na ficção, as ideias têm de ser manuseadas como se fossem explosivos de alto teor. Elas podem destruir um conto ou um romance quando os personagens se transformam em meros apresentadores das preferências intelectuais do escritor. É melhor que as intenções intelectuais do autor não entrem sobranceiras pela porta da frente, mas sim que se esgueirem pela porta dos fundos.

Agora quero dizer algo a respeito do que há de comum entre o físico e o romancista.

O folclore diz que os romancistas inventam tudo e os físicos não inventam nada. Ambos os conceitos estão errados. A imaginação

criativa e a inventividade sempre foram a marca dos melhores físicos, tanto quanto dos melhores romancistas. Por outro lado, os romancistas têm de se conformar com os parâmetros das verdades reconhecidas a respeito da natureza humana, assim como os físicos têm de se acomodar às verdades a respeito da natureza não-humana.

Os físicos teóricos, mais do que todos os outros, trabalham em um mundo mental. Um mundo abstrato e matemático. A realidade física é representada por modelos simples que possam ser visualizados, ou equações matemáticas que possam ser escritas em um pedaço de papel. Por exemplo, um físico pode imaginar um peso pendurado embaixo de uma mola, que fica subindo e descendo ritmadamente, e pode capturar essa imagem mental com uma equação. Se a fricção do ar for um inconveniente indesejado, basta imaginar que o peso está no vácuo. Não existe nenhum peso pendurado em nenhuma mola em nenhum vácuo em nenhum lugar do mundo, mas existem milhares deles na mente dos físicos.

Einstein sempre enfatizava a importância do que ele chamava a "invenção livre" da mente. O grande físico acreditava que não podemos chegar às verdades da natureza apenas por meio da observação e do experimento. Ao contrário, temos de criar conceitos, teorias e postulados a partir da nossa própria imaginação e só depois confrontar essas construções mentais com a experiência.

Uma das melhores ilustrações da invenção livre de Einstein na ciência foi o seu trabalho sobre a teoria da relatividade especial — teoria que levou a conceitos radicalmente novos do espaço e do tempo. Esse trabalho começou com o desconcertante postulado de que a medida da velocidade de um raio de luz é sempre a mesma, independentemente da movimentação do emissor e do observador. Einstein considerou essa afirmação um "postulado" porque não havia a comprovação experimental requerida. Em vez disso, os fatos experimentais disponíveis indicavam o contrário. Se uma coisa se move, ou ela é arremessada, caso em que sua velocidade com relação a um observador depende da velocidade do arremessador com relação ao mesmo observador, ou ela se move como uma onda,

caso em que sua velocidade com relação a um observador depende da velocidade do próprio observador.

O postulado de Einstein sobre a constância da velocidade da luz violava por completo o bom senso. Mas ele se deu conta de que o bom senso poderia perder o sentido quando se trata de velocidades extremamente altas, como a da luz. E com o seu postulado deu um salto de imaginação. Ao derivar as consequências desse estranho postulado, ele verificou que as ideias do bom senso a respeito do tempo — de que o tempo é absoluto, de que um segundo é um segundo, é um segundo — tinham de ser revistas. Tampouco nesse caso seria possível buscar indícios por meio de experimentos, uma vez que a discrepância no ritmo dos relógios era pequena demais para ser medida. É certo que Einstein foi influenciado por alguns experimentos com a eletricidade e o magnetismo e com o conhecimento de que a luz é uma onda viajante de energia eletromagnética, mas nenhum desses experimentos requereu a ousadia e a criatividade do seu postulado.

Um exemplo mais recente do uso da invenção na física é a teoria das cordas. Nela, os físicos propõem que as unidades fundamentais da natureza não são as partículas subatômicas, como os elétrons, mas sim cordas de uma só dimensão e de tamanho mínimo. O comprimento mediano de uma dessas cordas fundamentais é de 10^{33} centímetros, um centésimo de bilionésimo de bilionésimo do tamanho do núcleo de um átomo. Não é preciso dizer que nenhuma dessas cordas incrivelmente diminutas jamais foi vista e nada indica que venha a sê-lo. Há um outro detalhe a respeito das cordas. Elas vivem em um universo que tem pelo menos nove dimensões, seis a mais do que as três normais. Não percebemos as outras dimensões porque elas estão enroladas em si mesmas, em laços ultramínimos.

Quando Yoichiro Nambu, Holger Nielsen, Leonard Susskind, John Schwarz e Joel Scherk expuseram as primeiras ideias sobre as cordas no começo da década de 70, usaram uma boa dose de imaginação. Eles estavam tratando de entender as forças básicas da natureza. Mas nenhum fato experimental requeria o postulado da

corda em vez da partícula e, por certo, nenhuma observação jamais sugerira que vivemos em um mundo com nove dimensões. A maior parte das pessoas já tem trabalho bastante para lidar com o comprimento, a largura e a profundidade das coisas. Esses físicos estavam seguindo o método de Einstein, de deixar girar a mente com liberdade, formular postulados e em seguida desenvolver as consequências desses postulados. Até hoje não se conhecem experimentos que possam testar com exatidão a teoria das cordas. Na verdade, a teoria ainda não chegou a fazer nenhuma previsão definida. Mesmo assim, alguns dos melhores físicos teóricos — todos artistas — trabalham com a teoria das cordas, pondo a cabeça para criar e inventar.

É claro que os físicos não podem inventar tudo, mesmo quando estão inventando uma teoria nova. Já temos à nossa disposição um enorme conjunto de fatos conhecidos a respeito do universo físico, e esses fatos não podem ser contrariados. Richard Feynman colocou-o bem no seu livrinho *The character of physical law* [O caráter da lei física]: “O que nós precisamos é de imaginação, mas de imaginação em uma terrível camisa-de-força. Temos de encontrar uma maneira nova de ver o mundo, que tem de concordar com tudo o que é conhecido, mas discordar em algum ponto quanto às suas previsões...”²

Se o físico tem de pôr-se de acordo com fatos conhecidos ao inventar coisas novas, também o romancista tem de fazê-lo. Mas qual é a camisa-de-força do romancista? É o amplo catálogo de conhecimentos sobre o comportamento e a psicologia do *Homo sapiens*, catálogo ao qual por vezes damos o nome de cultura humana. Esses são os fatos da verdade emocional, à qual o romancista se cinge.

Vamos a um exemplo. Suponhamos que um romancista tenha criado um personagem de uns quarenta anos de idade, casado e com dois filhos, que acaba de chegar a uma festa de Natal com sua mulher. Esse senhor — vamos chamá-lo de Gabriel — não é muito seguro de si. Já na entrada, ele acha que ofendeu, sem querer, a

filha do dono da casa. Em seguida começa a preocupar-se sobre como será recebido o discurso que tem de fazer após a ceia.

Depois da festa, ele e a mulher vão caminhando para o hotel onde vão passar a noite. As crianças ficaram na casa de uns primos, na cidade ao lado. Está nevando. A mulher de Gabriel, Greta, esteve calada a maior parte da noite. Mas Gabriel, no trajeto de volta ao hotel, sente-se tomado de admiração, amor e desejo por ela. Olha-a com ternura e lembra-se dos momentos felizes da sua vida de casal. Procura animá-la, fazê-la esquecer-se das chatices dos muitos anos de convivência, da rotina da vida, das crianças, dos deveres de casa. É tarde da noite, eles entram no hotel, sobem as escadas e chegam ao quarto, iluminado à luz de vela.

Gabriel morre de desejos por ela. Imagina que ela também sente o mesmo e que se oferecerá a ele com amor, mas, em vez disso, ela se vira para o outro lado e começa a chorar. Ele pergunta o que está acontecendo, e ela acaba por dizer que uma música triste na festa de Natal a fez recordar-se de um rapaz que ela conheceu há muito tempo, na juventude. Gabriel começa a sentir um vago mal-estar no estômago, mas continua a fazer perguntas à mulher sobre essa figura do seu passado. Ele tinha dezessete anos, diz Greta, trabalhava na usina de gás, era suave e delicado e tinha grandes olhos castanhos. Os dois costumavam andar juntos pelo campo. Gabriel pergunta se Greta estava apaixonada pelo rapaz, e ela responde que "naquele tempo sentia-se muito bem com ele". Em seguida diz que ele morreu aos dezessete anos. De que morreu, tão cedo?, pergunta Gabriel. "Acho que ele morreu por minha causa", responde Greta. Ela para de falar, sente-se invadida pela dor e se joga na cama, aos soluços.

A cena que acabo de descrever é o final de uma história famosa de James Joyce, "O morto". Como Joyce termina a cena? Qual será a reação de Gabriel à confissão da sua mulher? Suponhamos que ele não apresente nenhuma reação. Nós, como leitores e com base na nossa própria experiência de vida, acreditaríamos? Esse seria um final falso. Suponhamos que Gabriel sintasse superior ao namorado de Greta, morto há tantos anos, e não se sintasse afetado pela sua dor. Essa também seria uma reação falsa. Suponhamos, então, que

Gabriel ficasse furioso com a mulher, tomasse a sua confissão como se fosse um adultério e resolvesse deixá-la. Esse é um final possível, mas não se harmoniza com o que já conhecemos a respeito de Gabriel. O final que Joyce escreveu na verdade é o seguinte: Gabriel percebe que a sua mulher sempre amou o rapaz morto mais do que a ele, constata a pobreza do papel que desempenhou como marido, em contraste com essa memória, e se dá conta de que ele próprio jamais amou alguém com a mesma força com que sua mulher foi capaz de amar. A única coisa que ele pode fazer é encostar a testa no vidro da janela e ficar ouvindo a respiração de Greta, que agora está dormindo, observando-a como se eles nunca tivessem se casado. Podemos acreditar nesse final, sabemos que ele é verdadeiro, ainda que fictício, porque é compatível com a nossa compreensão da natureza humana e com a nossa experiência de vida. E ele nos causa angústia.

Tanto o romancista quanto o físico estão buscando a verdade — para o romancista, a verdade do mundo da mente e do coração; para o físico, a verdade do mundo das forças e das massas. Na busca da verdade, tanto o romancista quanto o físico inventam, e ambos os tipos de invenção são importantes. Em última análise, ambos têm de ser confrontados com a experiência. Na física, os testes são mais definidos e objetivos. Por mais bela que seja a invenção de um físico, ela padece de uma terrível vulnerabilidade: pode ser refutada. Essa terrível vulnerabilidade é a razão pela qual não posso concordar com a escola da filosofia da ciência que diz que todo conhecimento científico é uma construção humana. Muitas vezes os cientistas desejam intensamente que uma teoria seja confirmada e sofrem com a sua refutação. A ideia aristotélica de que os planetas se movem em órbitas circulares perfeitas era simples e elegante, mas foi refutada por Brahe, Kepler e Newton.

As histórias e os personagens de um romancista não podem ser refutados, mas podem ter um ar de falsidade e por isso perder o poder. Nesse sentido, o romancista está constantemente testando o seu trabalho de ficção com a experiência de vida dos seus leitores.

Uma experiência que os físicos e os romancistas compartilham, uma experiência verdadeiramente extraordinária, é o momento da

criação.

Todos sabemos que uma grande parte das atividades dos cientistas e dos artistas não é especialmente criativa: desenvolver os detalhes de um cálculo, verificar a lubrificação do selo de uma bomba de vácuo, pesquisar o ambiente para um romance, aplicar o tom de fundo de uma pintura. Mas há outros períodos, que podem durar apenas alguns segundos, ou algumas horas, em que ocorre algo diferente, quando o cientista ou o artista ficam possuídos pela inspiração — e acho que a experiência, neste caso, é bem similar.

Escrevo em dois lugares. Um é uma ilha no estado de Maine, nos Estados Unidos. Da minha mesa de trabalho vejo o mar, a quinze metros de distância, as aves marinhas, os arbustos e o caminho que desce da casa para a beira do mar. O outro lugar onde escrevo é um depósito ao lado da garagem da minha casa em Massachusetts, do tamanho de um pequeno quarto de vestir, úmido, fechado e sem janelas. Aí não vejo nada além do cimento branco da parede, a trinta centímetros de distância. Os dois lugares me servem bem porque, depois de vinte minutos escrevendo, eu desapareço e ressurjo bem longe, no mundo imaginário da minha criação, desconectado do ambiente físico. Com essa mágica, me desconecto não só do ambiente, mas também da minha própria individualidade, do meu ego, do meu corpo.

Que belo e estranho paradoxo da criatividade, esse que nos faz mergulhar profundamente dentro de nós mesmos para criar algo, recorrendo às coisas mais pessoais e íntimas, e ao mesmo tempo separar-nos completamente de nós próprios no processo. Quando estou escrevendo, esqueço onde estou e quem sou. Torno-me puramente espiritual; misturo-me com os outros espíritos que crio. Na minha percepção, esses são os momentos em que um ser humano mais se aproxima da imortalidade. São os meus momentos de maior felicidade.

A minha primeira experiência com o momento da criação científica ocorreu durante os anos que passei como estudante de pós-graduação, aqui no Califórnia Institute of Technology. Eu tinha 22 anos de idade. Quando você está fazendo o seu doutorado em ciência, e outros cursos além disso, tem de realizar uma pesquisa e

resolver um problema que seja novo e suficientemente importante para ser publicado. O tema de uma das minhas primeiras pesquisas como estudante de pós-graduação relacionava-se com o comportamento da gravidade: se a gravidade tem de ser equivalente a um encurvamento da geometria do espaço e do tempo.

Depois de um período inicial de estudo, eu já tinha conseguido escrever todas as equações a serem resolvidas. Em seguida, defrontei-me com uma muralha. Eu sabia que tinha cometido um erro porque um dos resultados obtidos, já no meio do caminho, não era compatível com o esperado, mas não conseguia encontrar o erro. E também não podia prosseguir. Dia após dia dediquei-me a verificar cada uma das equações, andando de um lado para outro, no meu escritorzinho sem janelas, sem saber onde havia errado. Essa confusão e essa angústia duraram meses. Ao contrário do que acontecia com todos os outros problemas que eu enfrentara na escola, a resposta não estava em nenhum livro. Ela não era conhecida. Eu estava obcecado pelo problema da minha pesquisa; ruminei-o dia e noite. Alguns dias eu nem chegava a sair do cubículo. Almoçava e jantava nele. Tinha uma coleção de latas de sardinha na prateleira. Parei de visitar os amigos. Estava começando a duvidar da minha capacidade. Começando a crer que não tinha o talento necessário para ser um cientista.

Um dia — uma manhã de domingo, lembro bem — acordei às cinco da manhã e não voltei a dormir. Estava no meu apartamento e não no meu escritório. Sentia-me extremamente animado. Algo estava acontecendo na minha mente. Eu estava pensando no meu problema científico e conseguia vê-lo em profundidade. A sensação física era que minha cabeça estava saindo do pescoço. Senti-me sem peso. Eu estava flutuando. Não tinha nenhuma sensação do meu próprio corpo. Sentia-me totalmente despido de ego, ou de qualquer preocupação quanto às consequências e expectativas de aprovação ou glória. Não experimentava nenhum desses sentimentos. Tinha, sim, uma sensação de certeza. Uma forte sensação de penetrar profundamente no problema, de compreendê-lo e de saber que eu estava certo. Esse é um aspecto fascinante do momento da criação

— essa certeza íntima de ter acertado, essa confiança avassaladora de estar certo.

E com essas sensações percorrendo o meu corpo, saí da cama, pé ante pé, com todo o cuidado, para não afetar a mágica que estava acontecendo dentro do meu cérebro, e fui para a cozinha. Peguei meu bloco, sentei-me ao lado da mesa que havia lá e abri as páginas dos meus cálculos. Os primeiros sinais do dia começavam a aparecer na janela. Independentemente do fato de eu estar indiferente a tudo o que ocorria à minha volta, o fato é que eu estava completamente sozinho. Acho que ninguém poderia ajudar naquele momento. Nem eu queria ajuda alguma. Eu tinha todas essas sensações e revelações acontecendo na minha cabeça, e estar sozinho era essencial para o processo. Eu sabia coisas que ninguém mais sabia. E esse conhecimento fez com que me sentisse poderoso, como se eu fosse capaz de fazer qualquer coisa. Eu estava na fantástica condição de enxergar. Como não tinha nenhuma noção de mim mesmo, não havia nenhum eu executando o ato de enxergar, não havia nenhum “enxergador”. Era apenas o próprio ato sendo praticado.

Sentei-me e comecei a trabalhar, fazendo aqui e ali umas aproximações que eu sabia serem boas porque via a coisa como um todo. Por semanas, talvez, a minha mente inconsciente vinha trilhando caminhos secretos, buscando outras possibilidades e conexões, e agora, por fim, derramava-se. Pouco tempo depois, na mesa da cozinha, o problema da minha pesquisa estava resolvido. Saí da cozinha assombrado e sentindo-me poderoso. De repente escutei um barulho, virei a cabeça e vi no relógio da parede que eram duas da tarde.

Mencionei a sensação íntima da certeza no momento da criação. Tive essa experiência tanto como físico quanto como romancista, e creio que esse sentido de certeza está ligado ao poder da beleza na psicologia humana. Os físicos são movidos pela estética, assim como os romancistas. Quando Einstein estava buscando uma teoria unificada que combinasse a gravidade e o eletro- magnetismo, ele escreveu para o seu amigo Paul Ehrenfest: “Os últimos resultados são tão bonitos que eu tenho plena confiança de ter encontrado as

equações de campo naturais para essa variedade".³ E Feynman, que não era chegado ao sentimentalismo, disse em *The character of physical law* que uma coisa importante quando se está tratando de descobrir novas as leis da física é "saber quando se está certo. É possível saber que se está certo muitíssimo antes de verificar todas as consequências. Pode-se reconhecer a verdade pela beleza e pela simplicidade".

Os físicos e os romancistas que conheço têm pelo menos mais uma coisa em comum: são o que são porque gostam de sê-lo; e porque não conseguem imaginar-se fazendo outra coisa. Essa compulsão é ao mesmo tempo uma bênção e um fardo. Uma bênção porque uma vida criativa e cheia de beleza não está ao alcance de qualquer um; e um fardo porque o chamado é incessante e pode consumir por completo a vida do indivíduo. Essa mistura de bênção e fardo deve ser o "doce inferno" a que Walt Whitman se referia quando constatou, cedo na vida, que estava destinado a ser um poeta. "Nunca mais escaparei."⁴ Essa mistura de bênção e fardo deve ser a razão por que Chandrasekhar continuou a trabalhar em física até depois dos oitenta anos, por que Hans Bethe continua fazendo cálculos sobre as supernovas aos noventa anos e por que um amigo de Einstein que o visitou no seu apartamento em Berna encontrou-o cuidando do bebê com uma mão e fazendo cálculos de matemática com a outra.

Quando um jovem que queria ser poeta perguntou a Rilke se ele deveria continuar a escrever, Rilke respondeu que só se ele não pudesse ficar sem escrever: "Busque a razão que o leva a escrever; verifique se as raízes dessa razão se infiltram pelas partes mais profundas do seu coração, veja bem se teria que morrer se lhe fosse negada a possibilidade de escrever. E isto acima de tudo — pergunte a si mesmo, na calada da noite: eu tenho que escrever?"⁵

Lembro-me de uma vez em que visitei Kip em Monte Palomar, quase trinta anos atrás. Era um dia quente de verão. Tínhamos muito o que fazer depois da chegada — escalar a montanha levando as caixas de comida e de cerveja para o fim de semana, com os alunos de Kip, de pós-graduação e pós-doutorado, armando as

barracas e abrindo as camas e preparando-nos para proteger-nos contra os insetos. Lembro-me de que as pessoas esperavam a sua vez para balançar-se em uma corda ou um balanço preso em uma árvore alta. Fizemos uma fogueira para cozinhar. Alguém trouxera uma assadeira, carvão, fósforos, galinha e bifés. Procurei Kip e o vi sozinho, sentado em uma cadeira de campanha, ao lado de uma pedra grande. Estava debruçado sobre um pedaço de papel, escrevendo equações, alheio ao mundo, feliz, fazendo o que ele gostava de fazer acima de tudo, fazendo o que ele tinha de fazer, vivendo a bênção e o fardo ao mesmo tempo. Foi mais uma lição para um jovem estudante.

Notas

INTRODUÇÃO: BEM-VINDO AO ESPAÇO-TEMPO [pp. 13-59]

1. Kip S. Thorne, *Black holes and time warps: Einsteins outrageous legacy* (W. W. Norton, Nova York, 1994).
2. Edwin F. Taylor e John Archibald Wheeler, *Spacetime physics* (W. H. Freeman, San Francisco, 1992).
3. Nick Huggett, *Space from Zeno to Einstein: Classic readings with a contemporary commentary* (MIT Press, Cambridge, Mass., 1999).
4. A velocidade c é usualmente denominada *velocidade da luz*, mas isso pode levar a equívocos e, portanto, evito a expressão. Dar a denominação de velocidade da luz muitas vezes é interpretado no sentido de que a propagação da luz seria responsável pelos efeitos relativísticos, quando, na verdade, os sinais da propagação da luz nada têm a ver com isso. Com efeito, a luz se move (no vácuo) à velocidade c , mas essa é uma consequência do papel de c na estrutura do espaço-tempo. Se não existisse o eletromagnetismo, c continuaria a existir.
5. O espaço-tempo de Schwarzschild é assim chamado em homenagem a Karl Schwarzschild, que revelou, em 1916, essa solução para as equações de Einstein. As coordenadas de raio e de tempo aqui descritas são frequentemente denominadas *coordenadas de Schwarzschild*.
6. A coordenada de tempo de uso tradicional é adequada porque, com esse significado de tempo, o campo gravitacional não sofre modificações temporais. Isso perturba a nossa intuição porque ela nos exige que o campo gravitacional ou se modifique ou não se modifique no tempo. Essa intuição falaciosa baseia-se na ideia — difícil de extirpar — de que o tempo é absoluto e pode ser medido por um relógio universal que marca o mesmo ritmo para tudo e para todos.

PODE-SE MUDAR O PASSADO? [pp. 60-87]

1. Kip S. Thorne, "Closed timelike curves", em *General relativity and gravitation 1992: Proceedings of the 13^h International Conference on General Relativity and Gravitation*, ed. R. J. Gleiser, C. N. Kozameh e O. M. Moreschi (Institute of Physics Publishing, Bristol, Inglaterra, 1993), pp. 295-315.

PROTEÇÃO CRONOLÓGICA: UM MUNDO MAIS SEGURO PARA OS HISTORIADORES [pp. 88-HI]

1. M. J. Cassidy e S. W. Hawking, "Models for chronology selection", *Physical Review* D57 (1998): 2372-80.

AS DOBRAS DO ESPAÇO-TEMPO E O MUNDO QUÂNTICO: ESPECULAÇÕES SOBRE O FUTURO [pp. 112-6o]

1. Formulado de uma maneira mais precisa, nada pode mover-se em direção ao passado através do fluxo *local* do tempo. Se a viagem ao passado fosse possível (como explicado por Novikov neste mesmo volume), só poderia ocorrer em viagens de ida e volta (como através de um buraco de minhoca), nas quais você está sempre se movendo para a frente, junto com o fluxo local do "rio do tempo", mas regressa ao ponto inicial antes da própria partida. No final do meu ensaio farei um prognóstico a esse respeito.

2. Para os peritos na matemática dos buracos negros: estou supondo que $a/M = 0,999$.

3. Uma pesquisa mais recente, iniciada pelo meu amigo canadense-sul-africano Werner Israel, demonstrou que, à medida que o buraco negro envelhece, o encurvamento à volta da sua singularidade torna-se mais débil e possivelmente ainda menos letal. Sou cético quanto a que possa ser menos letal, mas devo admitir que esse ceticismo não tem raízes sólidas. Somente as leis da gravitação quântica (que discuto posteriormente neste ensaio) poderão comprová-lo.

4. Essa especulação foi modificada com relação à versão apresentada na minha palestra no Kipfest, devido aos avanços

ocorridos nos meses seguintes e antes que este livro entrasse em trabalhos de impressão.

5. Na versão oral e original deste ensaio fiz a previsão de que até 2002 já teria ficado claro que a energia escura existe. Eliminei a previsão desta versão escrita porque, ao início dos trabalhos de impressão do original, em janeiro de 2002, novas observações cosmológicas confirmaram sua existência com alta confiabilidade. Seria muito menos arriscado dizer agora que a energia escura existe do que fazer essa previsão em junho de 2000!

6. Na verdade, como descrito no meu livro, são as "flutuações no vácuo" do campo de radiação que fazem essa primeira viagem e se acumulam progressivamente depois.

DA POPULARIZAÇÃO DA CIÊNCIA [pp. 161-80]

1. Richard R Feynman, *The meaning of it all: Thoughts of a citizen scientist* (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1998), p. 49.

2. *Wisconsin State Journal* 30/4/1929; citado em Helge S. Dragh, *Dirac: A scientific biography* (Cambridge University Press, Cambridge, 1990), p. 73.

3. National Science Foundation, *Science & engineering indicators 1996*; citado em *Skeptical Inquirer*, novembro/dezembro de 1996, pp. 6-7.

O FÍSICO COMO ROMANCISTA [pp. 181-202]

1. Rainer Maria Rilke, *Letters to a young poet* (W W Norton, Nova York, 1962), p. 35.

2. Richard Feynman, *The character of physical law* (MIT Press, Cambridge, Mass., 1965), p. 171.

3. Albert Einstein, carta para Paul Ehrenfest, 24 de setembro de 1929; citada em Albrecht Fölsing, *Albert Einstein: A biography*, trad. Ewald Osers (Viking Books, Nova York, 1997), p. 606.

4. Walt Whitman, "Out of the cradle endlessly rocking" na seção *Sea Drift* de *Leaves of Grass* (publicada pelo autor, 1855; muitas reedições e reimpressões subsequentes).

5. Rilke, pp. 18-9.

Glossário

Este glossário dá informações a respeito de alguns termos técnicos que aparecem neste livro, ao lado de orientações para localizá-los nos ensaios. Como o âmbito dos ensaios é relativamente estreito, o número de termos de que nos ocupamos aqui é também relativamente pequeno, mas as explicações vão além das definições e podem sustentar-se por si mesmas. Nesse sentido, este glossário é complementar ao que aparece no final de *Black holes and time warps: Einsteins outrageous legacy* (W. W. Norton, Nova York, 1994), de Kip Thorne, que contém um grande número de termos, com pequenas explicações.

As palavras em VERSALETE fazem referência aos termos definidos neste glossário.

BURACOS DE MINHOCA

No espaço euclidiano simples e plano — o espaço que intuitivamente acreditamos ser aquele em que vivemos — há apenas um caminho que corresponde à definição de caminho mais curto entre dois lugares. Qualquer alteração introduzida nesse caminho torna-o mais longo. Como a teoria de Einstein nos informa que o espaço não é plano, existem possibilidades mais interessantes para as maneiras pelas quais as localizações espaciais podem conectar-se. É possível que existam dois (ou mais) caminhos diferentes entre duas localizações. Ambos os caminhos podem ser “o mais curto”, no sentido de que qualquer alteração torna o caminho mais longo. Os dois caminhos não precisam ter o mesmo comprimento e, com efeito, um deles pode ser consideravelmente mais curto do que o outro. Em situações como essa, os estudiosos do espaço-tempo dão ao caminho mais curto o nome de *buraco de minhoca*. Os lugares onde o caminho se torna identificável denominam-se as bocas do buraco de minhoca.

O buraco de minhoca é uma estrutura não trivial no espaço tridimensional curvo e não pode ser visualizado com facilidade. O

que podemos fazer é usar um exemplo bidimensional desse tipo de conexão. Foi isso o que se fez na Introdução (veja especialmente a figura 9). No seu ensaio a respeito das viagens ao passado, Igor Novikov descreve um buraco de minhoca usando o desenho de poços bidimensionais cujas profundidades gravitacionais encontram-se uma com a outra. Em três dimensões, um buraco de minhoca bidimensional aparece tipicamente como se fosse a boca de um túnel estreito, um buraco feito por uma minhoca na terra.

A existência de um atalho do tipo de um buraco de minhoca pode permitir que a viagem entre dois pontos se realize em um tempo muito curto, inferior ao que a luz demoraria para viajar entre esses dois lugares pelas trajetórias convencionais. Aparentemente, teríamos aqui uma viagem mais rápida do que a luz (na verdade, não é assim: um fóton atravessará o buraco de minhoca mais depressa do que qualquer partícula). Embora isso não seja de modo algum óbvio, esse tipo de viagem “mais rápida do que a luz” tornaria possível voltar a um tempo anterior e seguir uma CURVA FECHADA DE TIPO TEMPORAL. Na Introdução, isso é representado pelo uso de dois buracos de minhoca que se movem, um em relação ao outro. No ensaio de Igor Novikov, isso é feito por meio de uma interação entre um buraco de minhoca único e a gravidade.

Durante a última década, têm-se pesquisado ativamente a possibilidade de que as leis da física permitam a existência de buracos de minhoca. A resposta mais aceita hoje em dia — “provavelmente não” — é um dos temas do ensaio de Stephen Hawking.

Mais detalhes a respeito dos buracos de minhoca e de suas conexões com as viagens no tempo encontram-se no capítulo 14 de *Black holes and time warps: Einsteirís outrageous legacy*, de Kip S. Thorne.

CAMPOS QUÂNTICOS
Veja TEORIA QUÂNTICA

CENSURA CÓSMICA

O desenvolvimento de uma SINGULARIDADE no espaço-tempo causa um terrível problema para a teoria da gravitação. Os princípios científicos só podem determinar como as coisas se modificam no tempo se se conhecer o conjunto de todos os princípios relevantes e as leis capazes de especificar o comportamento do espaço-tempo e de tudo o que nele existe. Mas justamente em função da sua própria natureza, que contém quantidades infinitas, como a curvatura ou a DENSIDADE ENERGÉTICA, uma singularidade não pode ser descrita por esses princípios. A formação de uma singularidade no espaço-tempo implica que as leis físicas perdem o poder de prever o que acontecerá em seguida. (Essa ausência de previsibilidade pode levar a um HORIZONTE DE CAUCHY.)

Os buracos negros oferecem uma maneira de tornar tolerável esse colapso. Nada no interior do horizonte de eventos de um buraco negro pode influenciar o que quer que seja no exterior do horizonte. Por conseguinte, uma singularidade no interior do horizonte não causa problemas de previsibilidade no lado externo do horizonte. Em (quase) todos os exemplos conhecidos, as singularidades se formam no interior dos horizontes, os quais “protegem” as regiões externas contra a imprevisibilidade. As singularidades que não tenham essa proteção chamam-se *singularidades nuas*. A censura cósmica é a ideia (ou a esperança) de que nenhuma singularidade nua pode formar-se em situações realistas, uma vez que as leis da física “censuram” a singularidade, escondendo-a atrás de um horizonte.

CONSTANTE COSMOLÓGICA

Einstein inventou uma modificação na maneira pela qual a RELATIVIDADE GERAL associa a curvatura do espaço-tempo às quantidades de matéria e energia que estejam presentes nele. Um número denominado *constante cosmológica* regula o valor dessa relação. Se a constante for fixada em zero, o resultado é a teoria original da relatividade (que se chamou *teoria da relatividade especial*). A forma da relação é a que ocorreria se o universo contivesse uma densidade material muito baixa e uniforme, com propriedades incomuns. Por essa razão, considera-se, em algumas ocasiões, que a constante

cosmológica está relacionada às propriedades físicas do que se chama espaço vazio. É como se o espaço vazio (o vácuo) tivesse uma energia intrínseca.

Atualmente é difícil fazer observações astronômicas compatíveis com a teoria-padrão de Einstein, e a constante cosmológica tem recebido grande atenção por parte dos cientistas. As observações também têm levado os físicos a considerar novos tipos de "energia escura", que poderiam estar presentes em todo o universo.

No seu ensaio, Stephen Hawking refere-se às estranhas propriedades do espaço-tempo de Gödel, que é uma solução da teoria de Einstein com uma constante cosmológica.

CORDA CÓSMICA

Corde cósmica é uma proposição teórica: um filamento de matéria e energia, com seção transversal igual a zero. Como a matéria e a energia encurvam o espaço-tempo, as cordas cósmicas influenciam o espaço-tempo à sua volta. As cordas cósmicas podem ser consideradas simplesmente filamentos de MATERIAL extremamente EXÓTICO, confinados de maneira tão compacta que não chegam a ocupar volume algum.

O interesse das cordas cósmicas deriva, no entanto, de outras razões. As distorções a que fica submetido o espaço-tempo à volta de uma corda cósmica prestam-se a que consideremos a corda como um pequeno "defeito" no espaço-tempo. Podemos fazer uma analogia para esse tipo de defeito com papel e tesoura. Recorte uma cunha em um disco de papel, como você faz quando corta uma fatia de pizza. Em seguida, cole as bordas do que restou do disco, formando assim um cone. O defeito aqui é a ponta do cone; é um defeito de dimensão zero em um papel de duas dimensões. Devido a esse defeito, o cone é diferente, em alguns sentidos, de um pedaço plano de papel. De maneira comparável, as cordas cósmicas são defeitos unidimensionais no espaço-tempo quadridimensional. No seu ensaio, Stephen Hawking mostra que as cordas cósmicas podem ser usadas, em vez dos BURACOS DE MINHOCA, para criar.

CURVAS FECHADAS DE TIPO TEMPORAL.

As cordas cósmicas não têm ligação direta com a *teoria das cordas*, proposição teórica que visa a explicar detalhadamente as características das forças e das partículas fundamentais. As cordas cósmicas podem ter o mesmo comprimento do universo. As cordas da teoria das cordas são menores do que a menor das partículas elementares.

CORTE

Veja FUNÇÃO DE DOIS PONTOS

CURVAS FECHADAS DE TIPO TEMPORAL

Todos os eventos em uma LINHA DE MUNDO têm entre si uma conexão de tipo temporal (veja TIPO TEMPORAL E TIPO ESPACIAL), de modo que a linha de mundo de um objeto pode ser considerada uma curva de tipo temporal através do espaço-tempo. Por meio de certos métodos, tais como passar por um BURACO DE MINHOCA, o objeto pode voltar a um evento uma segunda vez. Isso significa que a linha de mundo do objeto é fechada; ou seja, ela forma um laço, uma volta fechada.

O paradoxo das curvas fechadas de tipo temporal é que cada evento que ocorra nela está tanto no passado quanto no futuro de todos os outros eventos da mesma curva. A resolução desse paradoxo está em que os buracos de minhoca permitem conexões não triviais entre os eventos no espaço-tempo. Essas conexões não nos causam dificuldades se a curva for de tipo espacial, como o equador terrestre. Nesse tipo de caminho, pode-se andar constantemente em uma mesma direção, digamos no rumo leste, e voltar ao ponto de partida. Isso é possível porque as conexões entre os pontos da superfície da Terra são relativas a um tipo não trivial de geometria, a geometria de uma superfície esférica. Isso também pode acontecer com uma curva de tipo temporal se as conexões geométricas forem do tipo adequado.

CURVO E PLANO

Em um plano bidimensional, como um quadro-negro, pode-se, em princípio, desenhar um conjunto de linhas paralelas retas, com

distâncias fixas entre cada uma delas. Pode-se também obter um segundo conjunto com as mesmas propriedades e cujas linhas sejam todas perpendiculares às do primeiro conjunto. É porque isso é possível que essa geometria toma o nome de *geometria plana*. Contudo, essa hipótese não pode ocorrer sempre, nem mesmo em princípio. Na superfície da Terra, por exemplo, ela não pode ser executada. As geometrias nas quais isso não pode ser feito (por não serem planas) chamam-se *geometrias curvas*. Em uma geometria tridimensional, a pergunta que se deve fazer é se é possível obter três conjuntos de linhas, sendo cada um perpendicular aos outros dois. Em cada conjunto, as linhas devem permanecer paralelas, por mais longas que sejam. Esses conceitos de plano e curvo podem ser aplicados a qualquer número de dimensões, tanto no que se refere ao espaço-tempo quanto ao espaço.

DENSIDADE DE ENERGIA, TENSOR DE ENERGIA-MOMENTO

Segundo a RELATIVIDADE GERAL, a teoria einsteiniana da gravitação, a curvatura do espaço-tempo, e por conseguinte, a força da gravitação, é gerada pela matéria e pelos campos (como por exemplo os campos elétricos) que nele estejam presentes. A intensidade do encurvamento do espaço-tempo é determinada pela densidade da matéria e dos campos em uma região do espaço. A densidade da energia no espaço-tempo, ou seja, quantidade de energia por unidade de volume, tem, neste contexto, importância crucial

Para a matéria e os campos comuns, a densidade de energia ou é zero ou é positiva, e o bom senso indica que densidades negativas de energia são impossíveis na prática. Isso não é um bom augúrio para as viagens no tempo, uma vez que os BURACOS DE MINHOCA requerem densidade de energia negativa, mas ainda resta alguma esperança para os buracos de minhoca. De acordo com a TEORIA QUÂNTICA, as flutuações quânticas dos campos tornam possível, em certas circunstâncias, a existência de densidades de energia negativas. A maior parte dos debates recentes sobre viagens no tempo concentrou-se em determinar se, em princípio, tais flutuações quânticas podem ser exploradas para a construção de buracos de minhoca.

Embora a densidade de energia seja a característica mais importante da matéria e dos campos do universo, outras facetas do conteúdo do espaço-tempo (tais como as pressões e os fluxos de energia) também são importantes e devem ser especificados na matemática da teoria de Einstein. O objeto da matemática que inclui todas as informações denomina-se *tensor de energia-momento* ou, alternativamente, *tensor de tensão-energia*

DESVIO PARA O AZUL

Os termos *desvio para o vermelho* e *desvio para o azul* descrevem a diferença entre a frequência da luz emitida por uma fonte, como uma estrela, e a frequência recebida por um observador, como um astrônomo. Portanto, os termos referem-se à diferença entre a energia com que os fótons são emitidos e a energia com que são recebidos.

Se uma estrela está se afastando da Terra, os astrônomos do nosso planeta receberão a luz desviada para o vermelho, porque a luz terá uma frequência menor, mais vermelha, do que a luz produzida pelos processos estelares. A energia dos fótons, ao serem recebidos, é menor do que aquela que tinham ao serem emitidos. O oposto ocorre com relação a uma estrela que se move em direção à Terra: a luz recebida aqui estará desviada para frequências maiores, mais azuis, e os fótons terão mais energia ao serem recebidos do que ao serem emitidos.

Os desvios para o vermelho e para o azul também são causados por campos gravitacionais. Se estivermos na base da torre de um farol, os fótons que nos alcançam ganharão energia à medida que “caem” na nossa direção. Com esse acréscimo de energia, eles serão mais azuis do que quando foram emitidos no alto da torre.

No seu ensaio, Stephen Hawking assinala que a luz sofre um desvio para o azul a cada ciclo de uma volta fechada em que ela retorna para um evento anterior.

ENCURVAMENTO

Quando o espaço-tempo não é plano (veja CURVO E PLANO), há uma maneira de quantificar seu encurvamento. No caso de uma

superfície bidimensional, a curvatura é quantificada por meio de dois números, os raios máximo e mínimo da curvatura da superfície. Quanto menores esses raios, mais curva é a superfície. Os detalhes são mais complicados quando há um número maior de dimensões, mas o quadro geral de quantificação permanece válido. Ao discutir o futuro da astronomia das ondas gravitacionais, Kip Thorne usa o termo *encurvamento* para referir-se à ordem geral de grandeza da curvatura de um espaço-tempo altamente curvo na área imediatamente próxima a um buraco negro, que constitui uma região que pode ser examinada por meio de ONDAS GRAVITACIONAIS.

EQUAÇÃO DE ESTADO

A estrutura de uma estrela deve-se à ação combinada da gravidade, que busca puxar a matéria da estrela para o seu centro, e as forças centrífugas presentes no material estelar. A relação entre essa pressão para fora e as condições do material estelar, especialmente a densidade, denomina-se *equação de estado do material*. Para uma estrela comum, a equação de estado envolve a física dos gases a altas temperaturas, a qual já é bem conhecida. Para uma ESTRELA DE NÊUTRONS, por outro lado, a equação de estado depende dos detalhes da natureza das forças nucleares, os quais são pouco conhecidos. No seu ensaio, Kip Thorne revela como as observações de ONDAS GRAVITACIONAIS por meio do emprego da INTERFEROMETRIA A LASER pode auxiliar os físicos a alcançar um melhor entendimento da equação de estado nuclear.

ESTRELA DE NÊUTRONS

A maior parte da massa de um átomo está no seu núcleo, mas o tamanho de um átomo normal é determinado pelos elétrons desse átomo, que ocupam um espaço muito maior do que o que é ocupado pelo núcleo. Em algumas estrelas, a força gravitacional pode ser suficientemente forte para que os elétrons (de carga negativa) dos átomos do material estelar fiquem comprimidos juntamente com os núcleos atômicos, compartilhando o espaço com os prótons (de carga positiva) e formando, assim, nêutrons. Dessa

maneira, a estrela praticamente inteira consiste apenas em nêutrons fortemente comprimidos uns contra os outros. Ao contrário da matéria normal, essa “matéria nuclear”, extremamente densa, tem uma EQUAÇÃO DE ESTADO regulada sobretudo pelas forças nucleares.

As leis físicas da gravidade e das forças nucleares impedem que as estrelas de nêutrons tenham massa muitas vezes maior do que a do Sol, embora o seu tamanho seja muitíssimo menor. Com efeito, uma estrela de nêutrons não é muito maior do que o HORIZONTE de um BURACO NEGRO que tenha a mesma massa. As estrelas de nêutrons e os buracos negros são tão compactos que podem formar pares binários de objetos compactos em órbita recíproca, capazes de gerar ONDAS GRAVITACIONAIS relativamente fortes. No seu ensaio, Kip Thorne discute como a detecção de ondas gravitacionais a partir desses sistemas, por meio da INTERFEROMETRIA A LASER, pode propiciar importantes informações a respeito das forças nucleares e das equações de estado nuclear.

FLUTUAÇÃO NO VÁCUO
Veja TEORIA QUÂNTICA

FLUTUAÇÕES QUÂNTICAS
Veja TEORIA QUÂNTICA

FORMA DA ONDA

As ondas provenientes de fontes naturais (sonoras, eletromagnéticas, gravitacionais e assim por diante) raramente são simples oscilações de amplitude e período fixos. Em vez disso, a complexidade dos detalhes da fonte produz uma complexidade de detalhes na “forma da onda”, a variação do sinal da onda no tempo. Um exemplo é a complexidade da forma da onda sonora de uma orquestra, que contém informações a respeito de múltiplos instrumentos. No seu ensaio, Kip Thorne prevê que, no futuro não muito distante, as formas das ondas denominadas ONDAS GRAVITACIONAIS serão detectadas por INTERFEROMETRIA A LASER com uma RAZÃO SINAL/RUÍDO tão boa que os cientistas poderão aprender muitíssimo a respeito do

ENCURVAMENTO do espaço-tempo em áreas próximas a buracos negros e a respeito de muitas outras coisas.

FUNÇÃO DE DOIS PONTOS

Assim como a relatividade geral encontra problemas com relação às SINGULARIDADES, isso também acontece com relação à TEORIA QUÂNTICA, embora de maneira diferente. Na teoria dos campos quânticos, a localização de um evento no espaço-tempo e a energia associada a esse evento constituem um par de valores quantitativos regidos pelo princípio da incerteza. Como as flutuações quânticas são maiores nos valores quantitativos definidos em escalas muito pequenas, elas se tornam infinitamente grandes quando tentamos medir as propriedades do espaço-tempo, ou de campos físicos, em distâncias infinitesimalmente curtas. Flutuações muito grandes de energia levariam a conflitos, tais como atribuir peso infinitamente grande a partículas pequenas. Os cientistas encontraram diversas maneiras igualmente eficazes de descontar os efeitos dessas flutuações, o que leva a teorias que são consistentes com os experimentos. Descontá-los é mais difícil no espaço-tempo curvo da RELATIVIDADE GERAL, mas os perigos de não fazê-lo são ainda maiores, porque as flutuações destruiriam a própria continuidade do espaço-tempo. Um dos métodos, descrito por Stephen Hawking, examina a maneira pela qual tais flutuações ocorrem em dois pontos próximos um do outro e usa o nome prosaico de "função de dois pontos" para remover as infinitudes, como se estivéssemos no espaço-tempo plano. Hawking examina o que acontece quando o espaço-tempo curvo contém CURVAS FECHADAS DE TIPO TEMPORAL, teste pelo qual esse método não precisa passar se for usado para remover singularidades no espaço-tempo plano!

Como as flutuações quânticas contêm mais energia quando ocorrem em distâncias curtas, é possível encontrar uma distância que seja suficientemente pequena para que a energia da flutuação seja suficientemente grande para formar um buraco negro mínimo cujo HORIZONTE tem o mesmo tamanho dessa pequena distância. Os físicos não acreditam na possibilidade de que o espaço-tempo seja contínuo nessas distâncias mínimas. Hawking especula que isso

proporciona um “corte” natural nas flutuações, de modo que a natureza não pode, na verdade, produzir flutuações singulares, e sim limitá-las a esse tamanho mínimo e essa energia máxima.

HIPERESPAÇO

Os mundos bidimensionais (um plano, uma batata frita, a superfície da Terra) podem ser matematicamente descritos apenas em termos da sua geometria interna, ou seja, em termos das relações entre as distâncias medidas exclusivamente nesses próprios mundos. Mas a apresentação dessas geometrias como superfícies que existem em um mundo tridimensional constitui grande ajuda à nossa percepção intuitiva. A teoria da relatividade ocupa-se das geometrias curvas de dimensões múltiplas e em particular com o espaço-tempo quadridimensional curvo. Por vezes é útil imaginar essas geometrias curvas da teoria da relatividade como superfícies que existem em um espaço plano (veja CURVO E PLANO) de dimensões múltiplas chamado hiperespaço. Igor Novikov e Kip Thorne usam esse tipo de imagem nos seus ensaios. Embora o hiperespaço seja útil para representações intuitivas, raras vezes ele entra na matemática da relatividade. Tipicamente, as pesquisas sobre a relatividade são feitas em termos da geometria interna do espaço-tempo quadridimensional, e os teóricos da relatividade não costumam referir-se a um hiperespaço de dimensões múltiplas.

HORIZONTE DE BURACO NEGRO

Um *horizonte*, ou *horizonte de eventos*, é uma superfície fechada que divide o espaço-tempo em uma região exterior e uma região interior, denominada buraco negro. A propriedade que define o horizonte é que nenhum sinal ou influência proveniente do interior pode alcançar o exterior. Para uma discussão mais completa, veja “Horizontes e buracos negros” na introdução de Richard Price.

HORIZONTE DE CAUCHY

Fundamental para as ideias da relatividade é o conceito de causalidade, a maneira como os eventos influenciam-se mutuamente. Um *evento* é um *ponto* no espaço-tempo, ou seja, um

local do espaço em um tempo particular. Um evento pode influenciar um segundo evento, em princípio, se for possível enviar um sinal do primeiro para o segundo a uma velocidade igual ou inferior à da luz.

Tomemos todos os pontos do espaço-tempo que existam em algum momento do tempo, ou seja, tomemos uma SUPERFÍCIE DE TEMPO CONSTANTE. Na relatividade matemática, os pontos do espaço-tempo que são influenciados pela nossa superfície de tempo constante recebem o nome de *desenvolvimento de Cauchy* (denominação dada em homenagem ao matemático francês Augustin-Louis Cauchy, 1789-1857) de tal superfície. Em certo sentido, esses pontos dão a resposta à seguinte pergunta: qual será o desenvolvimento da informação contida nessa superfície de tempo constante?

A expectativa normal é que *todos* os pontos que estão no futuro dessa superfície estarão contidos no seu desenvolvimento de Cauchy. Mas, como Stephen Hawking assinala no seu ensaio, há espaços-tempos para os quais esse não é o caso; nesses espaços-tempos há superfícies de tempo constante que não determinam todas as regiões do futuro. Para esses espaços-tempos, Hawking cunhou o termo *horizonte de Cauchy*, para designar o limite das regiões que podem ser determinadas. Como ele observa, os horizontes de Cauchy ocorrem em algumas soluções das equações de Einstein que implicam buracos negros. Ele também revela que, em determinadas circunstâncias, o horizonte de Cauchy é inevitável, se o espaço-tempo contiver uma região com CURVAS FECHADAS DE TIPO TEMPORAL.

O horizonte de Cauchy é diferente do horizonte (cujo nome completo é *horizonte de eventos*) de um buraco negro. (Veja "Horizontes e buracos negros" na introdução de Richard Price.) Os dois tipos de horizonte compartilham, no entanto, a propriedade de dividir o espaço-tempo em duas regiões distintas.

INTERFEROMETRIA A LASER

Quando um sinal ondulatório proveniente de uma única fonte nos chega através de duas trajetórias diferentes, as diferentes contribuições da onda combinam-se segundo um complexo padrão em que ou elas se cancelam ou se reforçam mutuamente, processo

ao qual se dá o nome de *interferência*. As faixas multicoloridas que se formam em uma camada fina de óleo devem-se à interferência entre as ondas de luz refletidas nas faces superior e inferior da lâmina de óleo; a posição das faixas depende da espessura da lâmina. Na interferometria, a posição das faixas é utilizada para dar, dessa maneira, a medida da espessura. Essa técnica também pode ser empregada para medir grandes espessuras, como a distância entre dois espelhos separados por vários quilômetros, mas só a luz produzida por lasers é suficientemente pura para gerar faixas a essas distâncias. Como o interferômetro a laser permite uma precisão extremamente alta na medida da separação entre dois objetos, ele se presta para avaliar a oscilação da separação que ocorre quando a passagem de uma onda gravitacional atua sobre duas massas distintas.

LINHA DE MUNDO

Em um diagrama de espaço-tempo (veja “Diagramas do espaço-tempo” na introdução de Richard Price), as linhas desenhadas (não necessariamente retas) muitas vezes representam o fluxo contínuo dos eventos que ocorrem na história de um objeto físico. Tal linha recebe o nome de *linha de mundo* desse objeto. Esse conceito é tão valioso que freqüentemente é empregado sem qualquer referência a um diagrama de espaço-tempo específico, com o objetivo de sugerir a ideia geral de como o objeto se move.

MATERIAL EXÓTICO

Todas as formas de matéria e todos os campos, como o campo eletromagnético, têm equações de estado que relacionam sua densidade (de massa ou energia) à pressão por ela exercida. Para os materiais comuns, a magnitude da pressão em seu interior é, em certo sentido, muito menor do que sua densidade. A construção de UM BURACO DE MINHOCA — e de uma máquina do tempo baseada em um buraco de minhoca — requer um tipo de material tão distante do normal que Kip Thorne e outros o classificaram como exótico. Esse é o tema da sua nona previsão e de uma discussão ao final do seu ensaio.

MÉTRICA

O começo da introdução focaliza a ideia da quantificação das distâncias que separam diferentes pontos no espaço ou no espaço-tempo. A palavra *métrica* refere-se à fórmula que dá a distância. Especificar a métrica é especificar a geometria. Assim, quando Stephen Hawking escreve no seu ensaio sobre “flutuações quânticas na métrica”, está se referindo à possibilidade de uma TEORIA QUÂNTICA para a geometria do espaço-tempo. Assim como os efeitos quânticos impõem a incerteza na órbita de um elétron, Stephen Hawking nos diz que eles impõem igualmente a incerteza na própria geometria do espaço-tempo.

NÃO-LINEARIDADE

No contexto de equações, teorias e interações físicas, o termo *linear* não se destina a descrever linhas retas. De modo geral, ele significa que as coisas podem somar-se. A eletrodinâmica clássica é um exemplo de teoria de interações lineares. Se calcularmos o campo elétrico devido a uma primeira carga elétrica e, em seguida, o campo elétrico devido a uma segunda carga elétrica, poderemos somar os dois campos e encontrar a medida do campo formado pelas duas cargas em conjunto.

Na RELATIVIDADE GERAL de Einstein, a gravidade não trabalha dessa maneira. A força gravitacional devida a dois corpos não é simplesmente a soma das forças devidas a cada um deles. As interações em que a simples soma não proporciona a resposta correta, como as interações relativas à gravidade, são chamadas *não lineares*. Grande parte das dificuldades técnicas que afetam o trabalho com a teoria de Einstein tem a ver com o caráter não linear da teoria.

ONDAS GRAVITACIONAIS

Veja ONDAS GRAVITACIONAIS na introdução de Richard Price

PARADOXO DO AVÔ

Paradoxo do avô é o nome dado às contradições que ocorrerão se as pessoas puderem viajar ao passado e modificar eventos que já sucederam. Como diz Stephen Hawking no seu ensaio: “Que aconteceria se você viajasse ao passado e matasse seu avô antes que seu pai fosse concebido?” Se algo assim pudesse acontecer, você não teria nascido e não poderia ter viajado ao passado nem alterado as coisas dessa maneira. Os físicos têm se dado um grande trabalho para demonstrar que as viagens no tempo não levam necessariamente a essas contradições, desde que os objetos obedecem às leis determinísticas da física. (Hawking exclui especificamente o livre-arbítrio, que é, por definição, não-determinístico.) Igor Novikov descreve detalhadamente a maneira segundo a qual tais contradições podem ser evitadas em certos cenários de viagens no tempo.

RAZÃO SINAL/RUÍDO

Em qualquer experimento, medição ou detecção, os cientistas buscam algum *signal* que contenha a informação desejada. Junto com o sinal sempre há também um componente indesejado, causado, por exemplo, pela imperfeição do equipamento de detecção. Tal componente indesejado tem o nome genérico de *ruído*, embora muito poucas vezes ele se relacione com o som. A importância relativa do sinal, que se deseja, comparada com o ruído, que não se deseja, toma o nome de *razão sinal/ruído*, ou simplesmente *signal/ruído*.

Na tecnologia cotidiana de comunicações, como nas transmissões de rádio, o ruído é, muitas vezes, uma parte pequena, quase imperceptível, do que se recebe. O oposto ocorre com muitos experimentos científicos que, pela sua própria natureza, por estarem na vanguarda das possibilidades, trabalham com sinais que não são fortes, quando comparados com o ruído que os acompanha. Os sinais das ondas gravitacionais serão extraordinariamente fracos, de modo que as informações que puderem ser obtidas dependerão sensivelmente da nossa capacidade científica de separar um sinal diminuto de um ruído envolvente.

Em seu ensaio, Kip Thorne discute as informações contidas em ondas gravitacionais provenientes das inspirais produzidas por buracos negros pequenos que orbitam em torno a outros bem maiores. As suas previsões baseiam-se nas expectativas de que possamos operar com êxito a tecnologia sinal/ruído nos anos de 2010 a 2015, com o observatório de ondas gravitacionais baseado no espaço e denominado LISA (Laser Interferometer Space Antenna).

RELATIVIDADE GERAL

Relatividade geral é o nome dado à teoria da gravitação de Einstein, apresentada por ele em 1915. Ela se distingue da *relatividade especial* teoria sobre o espaço-tempo apresentada por Einstein em 1905, que se aplica apenas na circunstância especial de ausência de influências gravitacionais. A relatividade geral descreve as influências gravitacionais em termos da curvatura do espaço-tempo; na relatividade especial, o espaço-tempo é plano (veja CURVO E PLANO). Na Introdução (na seção "Por que a geometria do espaço-tempo é curva?"), mostramos que a ideia de um espaço-tempo curvo tem uma ligação muito natural com a gravitação.

A teoria de Einstein foi a primeira, embora não a única, a usar o espaço-tempo curvo para descrever as influências gravitacionais. Muitas teorias alternativas foram propostas durante o século XX. A maioria delas difere apenas quanto às regras matemáticas segundo as quais o conteúdo do espaço-tempo (matéria e energia) provoca o seu encurvamento. Do ponto de vista matemático, a relatividade geral de Einstein tem a regra mais simples dentre todas as teorias. Até aqui, essa teoria mais simples de todas passou em todos os testes experimentais aplicáveis a uma teoria da gravitação. É interessante observar que Einstein modificou ligeiramente sua regra matemática para introduzir a CONSTANTE COSMOLÓGICA, à qual hoje se atribui um papel na dinâmica do universo.

RELATIVIDADE NUMÉRICA

A matemática da RELATIVIDADE GERAL de Einstein toma a forma de um conjunto de equações muito difíceis, referentes à MÉTRICA que co-

manda a geometria do espaço-tempo. Soluções matemáticas sucintas para essas equações só podem ser encontradas para configurações muito simples, como o espaço-tempo esfericamente simétrico. Desde a década de 1970, têm-se despendido muitos esforços na *relatividade numérica*, solução para as equações de Einstein com o emprego de grandes computadores. Com o tempo, a relatividade numérica produzirá soluções para configurações astrofísicas realistas e completas, mas o progresso nessa área é extremamente difícil, devido, em parte, à NÃO-LINEARIDADE das equações de Einstein. Kip Thorne, em seu ensaio, assinala que os físicos que esperam detectar ondas gravitacionais a partir de inspirais de pares de objetos compactos contam com a relatividade numérica para obter os detalhes teóricos referentes a essas ondas.

SEMICLÁSSICA

Veja TEORIA QUÂNTICA

SINGULARIDADE

As teorias físicas fazem previsões a respeito de valores quantitativos, e essas previsões indicam, em alguns casos, a ocorrência de valores infinitos. Exemplo disso é a contração gravitacional de uma esfera de matéria com pressão insignificante, algo como um aglomerado esférico de poeira. De acordo com a teoria clássica da gravidade de Newton, o impulso gravitacional centrípeto atua sem limites e comprime o corpo até alcançar raio igual a zero, causando, assim, uma densidade infinita. Tal densidade infinita é considerada uma *singularidade*, um desvio com relação ao comportamento contínuo e finito que esperamos das quantidades físicas. O comportamento singular de um corpo esférico na teoria de Newton é facilmente explicável como consequência da premissa irreal de considerá-lo perfeitamente esférico.

Na RELATIVIDADE GERAL, a teoria de Einstein para a geometria do espaço-tempo, as singularidades correspondem geralmente a uma curvatura infinita do espaço-tempo (veja CURVO E PLANO e ENCURVAMENTO).

Ao contrário das singularidades newtonianas, as singularidades da teoria de Einstein não podem ser afastadas facilmente como

consequências de configurações irrealistas. As singularidades da relatividade geral formam-se em uma ampla gama de condições, e há pelo menos dois casos na astrofísica em que podemos estar certos da sua existência. Existem singularidades no interior dos HORIZONTES DE BURACOS NEGROS sempre que se forme um buraco negro e o próprio big bang, o nascimento do universo, é uma singularidade.

Supõe-se geralmente que as singularidades teóricas do espaço-tempo devem-se às incompletudes da teoria de Einstein e que elas não apareceriam em uma teoria mais completa que venha a combinar a teoria einsteiniana com a TEORIA QUÂNTICA.

SINGULARIDADE NUA

Veja CENSURA CÓSMICA

SOMA SOBRE AS HISTÓRIAS

O físico do Caltech e ganhador do prêmio Nobel Richard Feynman (1918-88) deu muitas contribuições importantes para a TEORIA QUÂNTICA e especialmente para a teoria dos campos quânticos. Uma das mais instigantes foi mostrar que as partículas comportam-se na teoria quântica como se experimentassem todas as trajetórias possíveis no espaço-tempo entre um evento inicial e um final. Na física clássica, apenas uma trajetória é levada em conta, mas na física quântica há uma probabilidade para cada trajetória possível no espaço-tempo (sendo que a probabilidade mais alta normalmente corresponde à trajetória esperada pela teoria clássica). Os diferentes resultados possíveis em uma experiência na física quântica são vistos, portanto, como diferentes trajetórias percorridas no espaço-tempo. Feynman deu a esse método de calcular as flutuações quânticas o nome de *soma sobre as histórias*. Essa é uma maneira interessante de formular a gravitação quântica por não envolver premissas de que o espaço-tempo seja contínuo e uniforme nas pequenas escalas.

SUPERFÍCIE DE TEMPO CONSTANTE

No espaço-tempo, a expressão "em determinado momento do tempo" engloba todos os eventos que ocorrem em um mesmo

tempo. Tais eventos podem estar localizados em qualquer lugar do espaço e, portanto, “em determinado momento do tempo” é um conjunto de pontos em três dimensões, ou uma superfície tridimensional denominada *superfície de tempo constante*. (No espaço normal, a tridimensionalidade recebe o nome de *volume*. No espaço-tempo quadridimensional, o termo *superfície* é empregado para estruturas tridimensionais ou bidimensionais.)

Stephen Hawking discute a possibilidade de que uma civilização adiantada modifique o futuro do espaço-tempo em uma superfície de tempo constante *S*. Esta é uma maneira precisa de dizer-se que tal civilização modificaria o espaço-tempo a partir de determinado momento do tempo.

TEMPO DE PLANCK

Atualmente não existe uma teoria que combine a gravidade do espaço-tempo curvo de Einstein com os princípios da TEORIA QUÂNTICA. É possível, contudo, fazer afirmações razoavelmente seguras a respeito de algumas das características que uma teoria integrada teria de ter. Uma dessas afirmações, e uma das mais importantes, relaciona-se às *unidades de Planck* (também denominadas *unidades de Planck-Wheeler*) — a energia, a distância e o tempo característicos das interações que combinam, em pé de igualdade, a gravidade do espaço-tempo curvo e a teoria quântica. O raciocínio dos físicos é que essas unidades podem ser estabelecidas a partir das constantes fundamentais da teoria física: a velocidade da luz, incorporada à relatividade especial, a constante de Planck da teoria quântica e a constante universal da teoria da gravitação. O tempo de Planck é dado pela fórmula $\sqrt{Gh/c^3}$, que fica na casa de 10^{-34} segundos.

TEORIA QUÂNTICA

Ao lado da relatividade, a teoria quântica é um dos dois grandes avanços da física teórica no século XX. *Teoria quântica* é um termo geral usado para as teorias em que as leis da física permitem a apresentação dos resultados de diversos experimentos apenas em termos de probabilidades. Na teoria quântica, mesmo que hoje se

conheça tudo o que se pode saber a respeito de um sistema físico, não há garantia de que amanhã a sua condição possa ser prevista com precisão absoluta. É possível prever o resultado provável de um experimento, o que toma o nome de *valor esperado*, mas qualquer experimento tomado isoladamente pode produzir valores diferentes. O termo *flutuação quântica* é empregado para denotar a maneira pela qual os valores das quantidades físicas variam nas teorias quânticas.

As teorias quânticas contrastam vivamente com as teorias *clássicas*, que são teorias determinísticas em que, em princípio, o estado futuro de um sistema físico pode ser determinado com precisão. As teorias clássicas, como a mecânica de Newton e a eletrodinâmica de Maxwell, revelaram-se inadequadas para descrever a estrutura dos átomos, o comportamento dos átomos nas moléculas e o comportamento da luz em determinadas circunstâncias.

Existem várias teorias quânticas. Inicialmente, os cientistas descreviam os átomos usando a física quântica, mas descreviam os campos eletromagnéticos dos próprios átomos por meio de leis inteiramente determinísticas. Posteriormente, desenvolveram-se com êxito teorias de *campos quânticos*, em que campos como o eletromagnetismo apresentavam flutuações quânticas. É interessante observar que as flutuações de campo ocorrem mesmo quando não há nenhum campo presente, segundo as expectativas clássicas. São as chamadas *flutuações de vácuo*, que hoje estão solidamente incorporadas nas teorias quânticas de campo. Kip Thorne assinala, próximo ao fim do seu ensaio, que as flutuações de vácuo podem ter um papel essencial que impediria a existência de BURACOS DE MINHOCA.

Atualmente, os físicos empregam teorias que tratam o próprio espaço-tempo como se ele fosse clássico. Essas teorias híbridas (espaço-tempo clássico e conteúdo quântico do espaço-tempo) são chamadas teorias *semiclássicas*. O desenvolvimento de uma "teoria inteiramente quântica" que descreva as flutuações do espaço-tempo, ou da MÉTRICA, assim como tudo o que ele contém, é um desafio que a física teórica enfrenta já há muito tempo. Essa teoria, que

substituiria a RELATIVIDADE GERAL, recebe, por vezes, o nome de *gravitação quântica*.

Uma característica comum a todas as teorias quânticas é que as flutuações quânticas obedecem a certas leis. A mais importante delas é o *princípio da incerteza*, mencionado por Stephen Hawking. De acordo com o princípio da incerteza, as quantidades mensuráveis podem ser dispostas em pares que têm flutuações correlatas. Se a natureza do sistema físico faz com que uma das quantidades do par seja bem determinada, então a determinação do outro membro do par será bastante baixa e ele flutuará acentuadamente. A localização e a velocidade de uma partícula constituem um desses pares. Em uma teoria quântica da gravidade, esse par seria constituído pela localização de um evento no espaço-tempo e pela energia associada a esse evento. Alguns físicos acreditam que as flutuações quânticas do espaço-tempo próximas a uma SINGULARIDADE ⁴ espalharão as infinitudes previstas pela física clássica e restaurarão a previsibilidade. (Veja CENSURA CÓSMICA.)

TIPO TEMPORAL E TIPO ESPACIAL

Suponhamos que dois eventos ocorram na mesma localização espacial mas em tempos diferentes, segundo o referencial utilizado. Na introdução de Richard Price (veja "Diagramas do espaço-tempo") ficou demonstrado que não pode haver um referencial em que os eventos ocorram ao mesmo tempo. Os eventos terão uma diferença de tempo entre eles em qualquer referencial. Diz-se então que tais eventos têm uma separação de tipo temporal. Por outro lado, se existem eventos que efetivamente ocorrem ao mesmo tempo em algum referencial, diz-se que eles têm entre si uma conexão de tipo espacial.

Quaisquer dois eventos experimentados por uma mesma partícula física têm de ter uma separação de tipo temporal. Assim, a LINHA DE MUNDO *desse objeto* físico consiste em pontos, os quais têm uma relação de tipo temporal entre si.

VALOR ESPERADO

Veja TEORIA QUÂNTICA

Sobre os autores

STEPHEN W. HAWKING é professor lucasiano de matemática da Universidade de Cambridge, posição que já foi ocupada por Isaac Newton, e autor de *Uma breve história do tempo* e *O universo numa casca de noz*.

KIP S. THORNE é professor da cadeira Feynman de física teórica do California Institute of Technology (Caltech) e co-fundador do projeto LIGO, para construir um detector de ondas gravitacionais. É autor de *Black holes and time warps*.

IGOR NOVIKOV dirige o Centro de Astrofísica Teórica do Instituto Nórdico de Física Teórica (Nordita), de Copenhague, e é professor do observatório da Universidade de Copenhague. Publicou, entre outros, *Black holes and the universe* e *The river of time*.

TIMOTHY FERRIS é autor de *The whole shebang*, *O despertar na Via Láctea*, *O céu da mente*, e venceu duas vezes o prêmio do American Institute of Technology de escritos científicos.

ALAN LIGHTMAN é ficcionista, professor da cadeira John E. Burchard de humanidades e professor sênior de física do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Publicou os romances *Sonhos de Einstein*, *Good Benito* e *The diagnosis*.

RICHARD PRICE é professor de física teórica da Universidade de Utah, com pesquisa direcionada à física do espaço-tempo, e realizou grandes avanços na física dos buracos negros. É co-autor de *Problem book in relativity and gravitation* e *Black holes: the membrane paradigm*.

1ª EDIÇÃO [2005] 1ª reimpressão

ESTA OBRA FOI COMPOSTA PELO GRUPO DE CRIAÇÃO EM MINION
E IMPRESSA PELA RR DONNELLEY MOORE EM OFSETE SOBRE
PAPEL PÓLEN SOFT DA SUZANO BAHIA SUL PARA A EDITORA
SCHWARCZ EM SETEMBRO DE 2005

Table of Contents

[Sumário](#)

[Prefácio](#)

[AGRADECIMENTOS](#)

[Introdução](#)

[Pode-se mudar o passado?](#)

[Proteção cronológica](#)

[As dobras do espaço-tempo e o mundo quântico](#)

[Da popularização da ciência](#)

[O físico como romancista](#)

[Notas](#)

[Glossário](#)

[Sobre os autores](#)