

MURRAY GELL-MANN

O QUARK
E
O JAGUAR

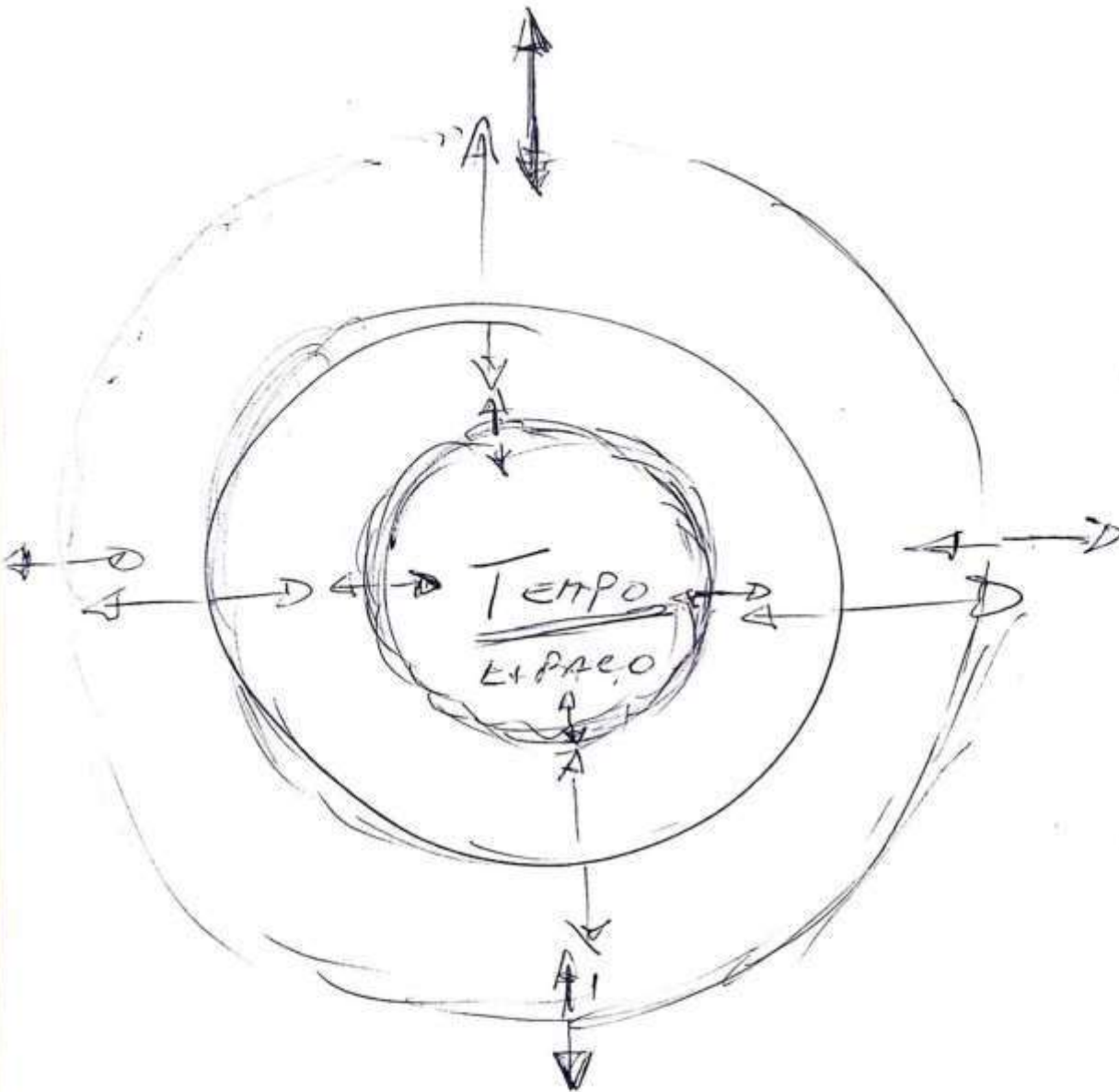
As aventuras no simples
e no complexo

O QUARK E O JAGUAR

Um dos arquitetos da nova ciência da simplicidade e da complexidade, Murray Gell-Mann tem uma visão pessoal e unificadora do mundo natural. Como físico teórico, tem explorado a natureza em seu nível mais fundamental. Entre suas conquistas está o prêmio Nobel de 1969 pelo trabalho que conduziu à descoberta do quark — o bloco constitutivo básico de todos os núcleos atômicos em todo o universo. Mas Gell-Mann é um homem de muitas paixões intelectuais, com interesses em campos que buscam entender a existência em seu nível mais complexo: história natural, evolução biológica, história da linguagem e estudo do pensamento criativo.

Essas atividades aparentemente discrepantes reúnem-se no trabalho corrente de Gell-Mann no Instituto Santa Fé, onde cientistas investigam as similaridades e diferenças entre *sistemas adaptativos complexos* — sistemas que aprendem ou evoluem utilizando informação adquirida. Eles incluem uma criança aprendendo sua língua nativa, uma variedade de bactéria que se torna resistente a um antibiótico, uma comunidade científica testando novas teo-

O QUARK E O JAGUAR



COLEÇÃO CIÊNCIA ATUAL

Coordenação editorial: Leny Cordeiro

Complexidade – Roger Lewin

Buracos negros, universos-bebês e outros ensaios – Stephen Hawking

Dobras no tempo – George Smoot e Keay Davidson

O bico do tentilhão – Jonathan Weiner

Sonhos de uma teoria final – Steven Weinberg

O quark e o jaguar – Murray Gell-Mann

SÉRIE MESTRES DA CIÊNCIA

Os três últimos minutos – Paul Davies

A origem do universo – John D. Barrow

A origem da espécie humana – Richard Leakey

O rio que saía do Éden – Richard Dawkins

O reino periódico – P. W. Atkins

Os números da natureza – Ian Stewart

MURRAY GELL-MANN

O QUARK E O JAGUAR

As aventuras no simples e no complexo

Tradução de
ALEXANDRE TORT
Professor do Instituto de
Física da UFRJ

Waldemar F. Ribeiro
1994
Tererópolis

Rocco

Rio de Janeiro — 1996

Título original
THE QUARK AND THE JAGUAR
Adventures in the simple
and the complex

© 1994 by Murray Gell-Mann

O poema "Cosmic Gall" de John Updike está no livro
Telephone Poles and Other Poems
Copyright 1960 John Updike
Impresso com a autorização de Alfred A. Knopf, Inc.
e Andre Deutsch, Ltd.

Direitos para a língua portuguesa reservados
com exclusividade para o Brasil à
EDITORA ROCCO LTDA.
Rua Rodrigo Silva, 26 – 5º andar
20011-040 – Rio de Janeiro, RJ
Tel.: 507-2000 – Fax: 507-2244

Printed in Brazil / Impresso no Brasil

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

G282q Gell-Mann, Murray
O quark e o jaguar: aventuras no simples e no complexo /
Murray Gell-Mann; tradução de Alexandre Tort. – Rio de Janeiro:
Rocco, 1996.

Coordenação editorial: Leny Cordeiro

Tradução de: The quark and the jaguar: adventures in the simple
and the complex

1. Gell-Mann, Murray – Viagens. 2. Partículas (Física nuclear).
3. Equador – Descrições e viagens. I. Título. II. Série.

95-1076

CDD 530.
CDU 53.

Rui Caetano
Rua da Vila Gualdina,
N.º 35 - Fenafiel
4560 Fenafiel
Tel.: 055/24514

FARMÁCIA LOPES CAVALA
Meinedo
4620 LOUSADA

→ Tel.: 055/811662
FAX:..

PARA MARCIA

É bom para nós –
Quero dizer, o caos e a cor.

Marcia Southwick
Why the River Disappears

SUMÁRIO

Prefácio	9
----------------	---

Parte I O SIMPLES E O COMPLEXO

1. Prólogo: um encontro na selva.....	21
2. Luz inicial	29
3. Informação e complexidade rudimentar	40
4. RANDomicidade.....	58
5. Uma criança aprendendo uma língua.....	67
6. Bactérias que desenvolvem resistência às drogas	79
7. O empreendimento científico.....	91
8. O poder da teoria.....	105
9. O que é fundamental?	123

Parte II O UNIVERSO QUÂNTICO

10. Simplicidade e randomicidade no universo quântico	139
11. Uma visão contemporânea da mecânica quântica: a mecânica quântica e a aproximação clássica	151
12. Mecânica quântica e tolices	182
13. Quarks e todos os outros: o modelo padrão	191
14. A teoria das supercordas: unificação por fim?.....	212
15. As setas do tempo: tempo retrógrado e tempo progressivo	227

Parte III
SELEÇÃO E APTIDÃO

16. A seleção em funcionamento na evolução biológica e em outros lugares	247
17. Do aprendizado ao pensamento criativo	273
18. Superstição e ceticismo	286
19. Esquemas adaptativos e mal-adaptativos	302
20. Máquinas que aprendem ou simulam a aprendizagem	317

Parte IV
DIVERSIDADE E SUSTENTABILIDADE

21. Diversidades sob ameaça	339
22. Transições para um mundo mais sustentável	354
23. Posfácio	376
Índice	385

PREFÁCIO

O quark e o jaguar não é uma autobiografia, embora contenha algumas reminiscências de minha infância e um certo número de casos sobre meus colegas na ciência. Também não é fundamentalmente relacionado com meu trabalho sobre o quark, embora uma porção considerável do livro seja devotada a algumas observações sobre as leis fundamentais da física, incluindo o comportamento dos quarks. Espero algum dia escrever uma autobiografia científica, mas meu objetivo neste volume é apresentar ao leitor meus pontos de vista sobre uma síntese das características do mundo que nos cerca que está surgindo na vanguarda da pesquisa: o estudo do simples e do complexo. Este estudo começou a reunir, de um modo novo, material provindo de grande número de campos diferentes das ciências físicas, biológicas e do comportamento, e mesmo das artes e das humanidades. Ele traz consigo um ponto de vista que facilita o estabelecimento de conexões, algumas vezes entre fatos e idéias que parecem à primeira vista muito distantes uns dos outros. Além disso, ele começa a responder algumas questões torturantes que muitos de nós, trabalhando nas ciências ou não, continuamos a nos fazer sobre o que realmente significam simplicidade e complexidade.

O livro é dividido em quatro partes. No começo da primeira parte, descrevo algumas experiências pessoais que me fizeram escrevê-lo. Ao fazer longas caminhadas em florestas tropicais, estudando pássaros, e planejando atividades de conservação da natureza, fiquei excitado pela idéia de dividir com os leitores minha consciência crescente dos elos de ligação entre as leis fundamentais da física e o mundo que vemos ao nosso redor. Durante toda a minha vida gostei de explorar o reino das coisas vivas, mas minha vida profissional tem sido devotada principalmente à pesquisa sobre as leis fundamentais. Estas leis são subjacentes a todas as ciências (no sentido discutido neste livro), mas muitas vezes

parecem muito distantes da prática, incluindo uma boa parte da prática em outras ciências. Ao refletir sobre questões de simplicidade e complexidade, percebemos conexões que nos ajudam a reunir todos os fenômenos da natureza, do mais simples ao mais complexo.

Quando minha esposa leu para mim o poema de Arthur Sze no qual ele menciona o quark e o jaguar, fiquei imediatamente impressionado pelo fato de as duas imagens servirem tão bem ao meu tema. Os quarks são os blocos básicos de toda a matéria. Todo objeto que vemos é mais ou menos composto por quarks e elétrons. Mesmo o jaguar, este símbolo antigo do poder e da ferocidade, é um conjunto de quarks e elétrons, mas que conjunto! Ele exhibe um grau enorme de complexidade, o resultado de bilhões de anos de evolução biológica. Neste contexto, o que significa exatamente complexidade, e como ela surgiu? Tais questões são tipicamente aquelas que este livro tenta responder.

O resto da primeira parte é dedicado às relações entre os diversos conceitos de simplicidade e complexidade, assim como aos sistemas adaptativos complexos, que são aqueles que aprendem ou evoluem da maneira que os sistemas vivos o fazem. Uma criança que aprende uma língua, bactérias que desenvolvem resistência aos antibióticos e o empreendimento científico humano são todos discutidos como exemplos de sistemas adaptativos complexos. O papel da teoria na ciência também é discutido, assim como a questão de qual ciência é mais fundamental do que as outras, junto com a questão relacionada do que se quer dizer com reducionismo.

A segunda parte trata das leis fundamentais da física, aquelas que governam o cosmos e as partículas elementares a partir das quais é composta toda a matéria do universo. Aqui o quark ganha vida própria, assim como as supercordas, as quais pela primeira vez na história oferecem a séria possibilidade de termos uma teoria unificada de todas as partículas e forças da natureza. A teoria das partículas elementares é tão abstrata que muitas pessoas acham difícil de acompanhar mesmo quando explicada, como aqui, sem matemática. Alguns leitores podem achar melhor passar os olhos sobre trechos da segunda parte, especialmente os capítulos 11 (sobre a interpretação moderna da mecânica quântica) e 13 (sobre o modelo padrão das partículas elementares, que inclui os quarks). Passar os olhos sobre estes capítulos, ou mesmo sobre toda esta parte, não interfere seriamente com as partes restantes. É irônico que uma porção do livro destinada a explicar por que uma teoria física fundamental é simples deve ser, não obstante, difícil para muitos leitores. *Mea culpa!* A segunda parte conclui com um capítulo sobre a seta ou as setas do tempo, culminando com um comentário sobre por que mais e mais estruturas complexas continuam aparecendo, seja nos sistemas adap-

tativos complexos, como a evolução biológica, ou em sistemas não-adaptativos como as galáxias.

A terceira parte considera as pressões seletivas que operam em sistemas adaptativos complexos, especialmente na evolução biológica, no pensamento humano criativo, crítico e supersticioso e em alguns aspectos (incluindo os econômicos) do comportamento das sociedades humanas. As noções aproximadas mas convenientes de aptidão e cenários de aptidão são introduzidas. No capítulo 20, descrevo brevemente o uso de computadores como sistemas adaptativos complexos, por exemplo, para fazer evoluir estratégias que são aplicadas a jogos ou para fornecer simulações simplificadas de sistemas adaptativos complexos existentes na natureza.

A parte final é bastante diferente das outras, já que é dedicada principalmente aos assuntos de política em vez de ciência e com tanto de paixão quanto de erudição. O capítulo 21 segue a discussão das partes iniciais do livro sobre como a diversidade da vida na Terra representa informação destilada em quase 4 bilhões de anos de evolução biológica, e como a diversidade cultural humana tem uma relação similar com as dezenas de milhares de anos de evolução cultural do *Homo sapiens*. No capítulo 21, argumento que vale a pena um grande esforço para preservar ambas as diversidades, a cultural e a biológica, e considero alguns dos problemas, paradoxos e desafios envolvidos nisso. Mas não é realmente possível considerar estas questões isoladamente. Hoje a teia de relações que une a raça humana a si mesma e ao resto da biosfera é tão complexa que todos os efeitos afetam todos os outros em um grau extraordinário. Alguém deveria estar estudando o sistema como um todo porque nenhuma montagem de estudos parciais de um sistema complexo não linear pode dar uma boa idéia do comportamento global. O capítulo 22 descreve alguns esforços que estão apenas começando para levar em frente o estudo ainda incipiente dos problemas mundiais, incluindo todos os aspectos pertinentes, não apenas ambientais, demográficos e econômicos, mas também sociais, políticos, militares, diplomáticos e ideológicos. O objetivo do estudo não é apenas especular sobre o futuro, mas tentar identificar entre os múltiplos e possíveis caminhos futuros para a raça humana e o resto da biosfera, quaisquer caminhos razoáveis e prováveis que poderiam conduzir a uma maior sustentabilidade. Aqui a palavra sustentabilidade é usada em um sentido amplo, para incluir não apenas a prevenção de uma catástrofe ambiental, mas também de uma guerra catastrófica, uma tirania duradoura e disseminada, assim como outros males.

Neste volume o leitor encontrará muitas referências ao Instituto Santa Fé (SFI), que eu ajudei a fundar e onde agora trabalho, tendo

antes me aposentado no Instituto de Tecnologia da Califórnia, em que me tornei professor emérito depois de ter sido professor lá por mais de 38 anos. Uma boa parte da pesquisa sobre simplicidade, complexidade e sistemas adaptativos complexos realizada hoje é feita pelos membros do Instituto, ou mais precisamente pela família que constitui o Instituto.

A palavra família é apropriada porque o SFI é uma organização bastante livre. O presidente, Edward Knapp, é assistido por dois vice-presidentes e um estado-maior de uma dúzia de auxiliares notavelmente dedicados. Há apenas três professores, dos quais um sou eu, todos com contratos de cinco anos. Todos os outros são visitantes que permanecem por períodos que vão de um dia a um ano. Os visitantes vêm de todas as partes do mundo, e um certo número deles realiza visitas frequentes. O Instituto oferece numerosos encontros de trabalho que duram alguns dias ou às vezes uma ou duas semanas. Além disso, diversas redes de pesquisa têm sido organizadas, envolvendo uma variedade de tópicos interdisciplinares. Os membros distantes de cada rede se comunicam uns com os outros pelo telefone, correio eletrônico, fax e carta ocasional, e se encontram de tempos em tempos em Santa Fé ou algumas vezes em outros lugares. Eles são peritos em dúzias de especialidades, e estão todos interessados em colaborar, ultrapassando fronteiras interdisciplinares. Cada um tem uma instituição de origem, mas cada um também preza sua afiliação ao Santa Fé, que permite fazer contatos que de alguma forma não são fáceis de fazer na instituição de origem. Essas instituições de origem podem ser os grandes laboratórios industriais de pesquisa, as universidades, ou os laboratórios nacionais (especialmente o laboratório vizinho em Los Alamos, que tem fornecido muitos membros brilhantes e dedicados ao Instituto).

Aqueles que estudam sistemas adaptativos complexos estão começando a encontrar alguns princípios gerais subjacentes a tais sistemas, e, ao investigar esses princípios, são necessárias discussões e colaborações intensas entre os especialistas de muitos campos. É claro que o estudo cuidadoso e inspirado de cada especialidade permanece vital como sempre. Mas a integração destas especialidades também é urgentemente necessária. Contribuições importantes são feitas por uma mancha de eruditos e cientistas que estão se transformando de especialistas em estudantes da simplicidade e da complexidade, ou dos sistemas adaptativos complexos em geral.

O sucesso ao realizar esta transição é muitas vezes associado a um certo modo de pensar. O filósofo F. W. J. von Schelling introduziu a distinção, tornada famosa por Nietzsche, entre os "apolíneos", que favorecem a lógica, a abordagem analítica e a avaliação desapassionada das evidências, e os "dionisíacos", que são mais inclinados à intuição, à sín-

tese e à paixão. Estes traços são algumas vezes descritos como correspondentes, grosso modo, da ênfase no uso do lado esquerdo e direito do cérebro, respectivamente. Mas alguns de nós parecem pertencer a outra categoria, a dos “odisseianos”, que combinam as duas predileções na sua busca por relações entre idéias. Tais pessoas se sentem muitas vezes solitárias em instituições convencionais, mas encontram no SFI um ambiente particularmente agradável.

As especialidades representadas no Instituto incluem as matemáticas, a ciência da computação, a física, a química, a biologia das populações, a ecologia, a biologia da evolução, a biologia do desenvolvimento, a imunologia, a arqueologia, a lingüística, as ciências políticas, a economia e a história. O SFI mantém seminários e publica relatórios de pesquisa sobre tópicos que incluem a disseminação da epidemia de AIDS, as ondas de deserção em massa dos *pueblos* pré-históricos no sudoeste dos EUA, as estratégias de estocagem de alimentos das colônias de formigas, se é possível fazer dinheiro utilizando os aspectos não aleatórios das flutuações de preços nos mercados financeiros, o que acontece às comunidades ecológicas quando uma espécie importante é removida, como programar computadores para imitar a evolução biológica, e como a mecânica quântica conduz ao mundo familiar que vemos à nossa volta.

O SFI está mesmo cooperando com outras organizações na tentativa, descrita no capítulo 22, de modelar maneiras pelas quais as sociedades humanas em nosso planeta possam evoluir na direção de padrões mais sustentáveis de auto-interação e de interação com o resto da biosfera. Aqui especialmente precisamos superar a idéia tão predominante, tanto no círculo acadêmico quanto no burocrático, de que o único trabalho que vale a pena considerar seriamente é a pesquisa altamente detalhada em uma especialidade. Precisamos celebrar as contribuições igualmente vitais daqueles que ousam dar o que eu chamo de “um olhar estimativo sobre o todo”.

Embora o SFI seja um dos poucos centros de pesquisa no mundo exclusivamente dedicado ao estudo da simplicidade e da complexidade em uma ampla variedade de campos, ele não é de modo algum o único, ou mesmo o lugar principal, onde pesquisas importantes estão sendo realizadas sobre os vários tópicos envolvidos. Muitos dos projetos individuais do Instituto têm paralelos em outras partes do mundo, e em muitos casos a pesquisa em questão foi iniciada mais cedo em outras instituições, muitas vezes antes mesmo de o SFI ter sido fundado em 1984. Em alguns casos estas instituições são a sede de membros-chave da família SFI.

Gostaria de desculpar-me pelo que deve parecer propaganda a favor do SFI, especialmente porque a natureza da relação entre o

Instituto e outras organizações de pesquisa e ensino tem sido de alguma forma distorcida em certos livros publicados por escritores de divulgação científica durante os últimos anos. O que representa uma glorificação do Santa Fé à custa de outros lugares tem deixado furiosos muitos de nossos colegas destes mesmos lugares, especialmente na Europa. Lamento se meu livro der uma impressão igualmente errônea. A razão de minha ênfase no Santa Fé é simplesmente porque estou familiarizado com alguns dos trabalhos realizados aqui, ou por eruditos e cientistas que nos visitam, e muito menos familiarizado com a pesquisa, mesmo a pesquisa anterior, realizada em outras partes.

De qualquer modo, neste ponto devo mencionar (sem nenhuma ordem particular) algumas das principais instituições onde pesquisas significativas sobre temas relacionados à simplicidade, complexidade, e sistemas adaptativos complexos estão se realizando, e na maioria dos casos, há muitos anos. É claro que ao fazer isto me arrisco a exacerbar a ira dos cientistas e eruditos daqueles lugares que esqueci de incluir nesta lista parcial: a Escola Normal Superior em Paris, o Instituto Max Planck de Química e Biofísica, do qual Manfred Eigen é o diretor; o Instituto de Química Teórica em Viena, onde Peter Schuster foi diretor (ele está agora envolvido na criação de um novo instituto em Iena); a Universidade de Michigan, onde Arthur Burks, Robert Axelrod, Michael Cohen e John Holland formam o “grupo BACH”, uma junta interdisciplinar que vem tratando de problemas de sistemas complexos há bastante tempo — todos eles estão relacionados de alguma forma com o SFI, especialmente John Holland, que é co-diretor, junto comigo, da Diretoria de Ciência; a Universidade de Stuttgart, onde Hermann Haken e seus associados vêm estudando há muito tempo os sistemas complexos nas ciências físicas sob a rubrica “sinérgica”; a Universidade Livre de Bruxelas, onde muitos trabalhos interessantes vêm sendo realizados há muitos anos; a Universidade de Utrecht; o Departamento de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade de Tóquio; a ATR, próxima de Quioto, para onde Tomas Ray se mudou proveniente da Universidade de Delaware; os centros para estudos não lineares nos diversos *campi* da Universidade da Califórnia, incluindo aqueles em Santa Cruz, Berkeley e Davis; a Universidade do Arizona; o Centro de Pesquisas de Sistemas Complexos no Instituto Beckman da Universidade de Illinois em Urbana; o programa de Computação e Sistemas Neurais do Instituto Beckman do Instituto de Tecnologia da Califórnia; a Universidade Chalmers em Gotemburgo; a NORDITA em Copenhague; o Instituto Internacional de Análise Aplicada de Sistemas em Viena; e o Instituto de Intercâmbio Científico em Turim.

Diversos amigos e colegas, cujo trabalho respeito muito, foram su-

ficientemente generosos em olhar todo o manuscrito nos vários estágios de conclusão. Sou muito grato por sua ajuda, que foi de imenso valor, mesmo que, em razão da pressão do tempo, eu tenha sido capaz de utilizar apenas uma fração de suas excelentes sugestões. Neles se incluem Charles Bennett, John Casti, George Johnson, Rick Lipkin, Seth Lloyd, Cormac McCarthy, Harold Morowitz e Carl Sagan. Além destes, muitos especialistas notáveis em vários campos foram pródigos com seu tempo e verificaram passagens particulares do manuscrito, incluindo Brian Arthur, James Brown, James Crutchfield, Marcus Feldman, John Fitzpatrick, Walter Gilbert, James Hartle, Joseph Kirschvink, Christopher Langton, Benoît Mandelbrot, Charles A. Munn III, Thomas Ray, J. William Schopf, John Schwarz e Roger Shepard. É claro que os erros que restaram são sem dúvida de minha exclusiva responsabilidade e não destas pessoas amáveis e eruditas.

Qualquer um que me conhece sabe da minha intolerância com os erros, que se manifesta, por exemplo, no meu hábito incessante de corrigir as palavras francesas, italianas e espanholas que aparecem nos menus dos restaurantes americanos. Quando deparo com uma imprecisão escrita em um livro por alguma outra pessoa, fico desencorajado e me pergunto se posso realmente aprender alguma coisa de um autor que já provou estar errado em pelo menos um ponto. Quando os erros dizem respeito a mim e a meu trabalho, fico furioso. Portanto o leitor deste livro pode imaginar prontamente a agonia embaraçosa pela qual já estou passando só de imaginar dúzias de erros sérios sendo encontradas pelos meus amigos e colegas depois da publicação e apontados com um sorriso maroto ou uma cara de pena ao autor perfeccionista. Além disso, fico pensando na figura legendária descrita para mim por Robert Fox (que escreve sobre o problema da população humana) — o faroleiro norueguês que não tem nada para fazer nas longas noites de inverno a não ser ler nossos livros em busca de erros.

Gostaria de expressar meus agradecimentos especiais a minha hábil e devotada assistente, Diane Lams, pela ajuda que dela recebi no processo de finalização e edição do livro, por cuidar de meus assuntos de forma tão competente que pude dedicar tempo e energia suficientes ao projeto, e especialmente por suportar o mau humor que frequentemente exibo em face de prazos de entrega.

Os editores, W. H. Freeman e companhia, foram muito compreensivos com minha dificuldade em lidar com tarefas programadas e me forneceram um editor de texto maravilhoso, Jerry Lyons (agora na Springer-Verlag), com quem foi um prazer trabalhar. Gostaria de agradecer-lhe não apenas por seus esforços mas também por seu humor e afabilidade e pelos bons momentos que Marcia e eu tivemos com ele e

sua maravilhosa esposa Lucky. Minha gratidão se estende também a Sara Yoo, que trabalhou incansavelmente distribuindo cópias e revisões incontáveis aos editores ansiosos pelo mundo. Liesl Gibson merece meus agradecimentos por sua generosa e eficientíssima assistência com as exigências de última hora na preparação do manuscrito.

É um prazer agradecer a hospitalidade recebida de quatro instituições com as quais estive associado durante a feitura deste livro: o Caltech,* o SFI, o Centro Aspen de Física, e o Laboratório Nacional de Los Alamos. Gostaria também de agradecer à Fundação Alfred P. Sloan e às agências governamentais dos EUA que têm apoiado minhas pesquisas nos últimos anos: o Departamento de Energia e o Escritório para a Pesquisa Científica da Força Aérea. (Pode ser uma surpresa para uns poucos leitores saber que ambas as agências financiam pesquisas, como as minhas, que não são secretas nem relacionadas com a produção de armas. A ajuda dada à ciência pura por tais organizações é um tributo à sua visão.) Agradeço também o apoio ao meu trabalho por meio de doações feitas ao SFI por Jeffrey Epstein.

Em Los Alamos, fui especialmente bem tratado pelo diretor do laboratório, Sig Hecker, pelo diretor da divisão teórica, Richard Slansky, e pela secretária da divisão, Stevie Wilds. No Instituto Santa Fé, todos os membros da administração e da equipe foram da maior ajuda. No Caltech, o presidente, o reitor, e os diversos diretores das divisões de física, matemática e astronomia foram todos muito gentis, assim como John Schwarz, e também aquela senhora maravilhosa que tem sido a secretária do grupo teórico de partículas elementares por mais de vinte anos, Helen Tuck. No Centro Aspen de Física, desde sua fundação há mais de trinta anos, tudo tem girado sempre em torno de Sally Mencimer, e gostaria de agradecer a ela por suas muitas gentilezas.

Escrever nunca foi fácil para mim, provavelmente porque meu pai criticava vigorosamente tudo o que eu escrevia quando era criança. Que eu tenha sido capaz de completar este projeto é um tributo a minha amada esposa, Marcia, que de alguma forma inspirou e me convenceu a continuar o trabalho. Sua contribuição também foi indispensável de diversas outras maneiras. Como poeta e professora de inglês, ela foi capaz de sanar alguns de meus piores hábitos como escritor, embora infelizmente muitos erros de estilo permaneçam e, é claro, não devem ser atribuídos a ela. Convenceu-me a trabalhar com um computador, a que me afeiçoei; parece-me agora estranho que eu pudesse ter pensado em trabalhar sem um. Além disso, como alguém com pouco treino em

* Caltech, Instituto de Tecnologia da Califórnia. (N. do T.).

ciência ou matemática, e que não obstante tem um profundo interesse em ambas, ela foi o alvo de treinamento ideal para o livro.

Como professor e conferencista, fui muitas vezes aconselhado a escolher uma pessoa em particular da audiência e dirigir a palestra para aquele indivíduo, tentando mesmo estabelecer um contato visual contínuo com ele ou ela. Em certo sentido, foi o que fiz com este livro. É dedicado a Marcia, que apontou incansavelmente para os pontos onde as explicações eram insuficientes ou as discussões muito abstratas. Mudei muitas e muitas vezes partes do livro até que ela tivesse compreendido e aprovado. Como em muitos outros aspectos, mais tempo teria ajudado. Ainda há, infelizmente, muitas passagens onde ela teria preferido uma clareza maior.

Ao escrever os toques finais que os prazos permitem, percebo que nunca trabalhei tão duramente em qualquer coisa na minha vida. Pesquisa em física teórica é completamente diferente. É claro que um teórico pensa e se preocupa muito em horas estranhas do dia, consciente ou inconscientemente. O tempo gasto numa escrivania ou quadro-negro, umas poucas horas de meditação ou cálculos, todos os dias ou de tanto em tanto, mais um bom período de discussões com colegas e estudantes usualmente são suficientes para o desenvolvimento do trabalho. Escrever, ao contrário, significa gastar um grande número de horas no teclado quase todos os dias. Para uma pessoa fundamentalmente preguiçosa como eu, isto é um choque.

A parte mais excitante na feitura deste livro é ser constantemente lembrado de que o próprio projeto é um sistema adaptativo complexo. Em cada estágio da composição tenho um modelo mental (ou esquema) do livro, um sumário conciso do que este será. O sumário necessita ganhar corpo com um vasto número de detalhes para que possa originar um capítulo ou uma parte. Então, depois que meu editor de texto, meus amigos e colegas, Marcia e eu tivemos a chance de examinar um capítulo, as críticas e comentários resultantes sobre o texto afetam não apenas o texto daquele capítulo, mas o próprio modelo mental, permitindo que muitas vezes um modelo alternativo seja adotado. Quando o novo modelo mental é provido de detalhes para que possa produzir mais texto, o mesmo processo é repetido. Desta maneira a concepção do trabalho todo permanece em evolução.

O resultado deste desenvolvimento evolutivo é o livro que você está prestes a ler. Espero que ele tenha êxito em transmitir um pouco da excitação que todos aqueles que pensam nas cadeias de relações que unem o quark ao jaguar, e também aos seres humanos, experimentam.

PARTE I

O SIMPLES E O COMPLEXO

CAPÍTULO 1

PRÓLOGO: UM ENCONTRO NA SELVA

Na verdade, nunca vi um jaguar na floresta. No decurso de muitas caminhadas longas através das florestas da América tropical e muitas viagens de barco pelos rios das Américas Central e do Sul, nunca experimentei aquele momento que interrompe a batida do coração, quando o poderoso gato sarapintado surge à nossa frente. Todavia, alguns amigos me contaram que encontrar um jaguar pode mudar nossa maneira de olhar o mundo.

O mais perto que cheguei de um foi na baixada da floresta tropical ao leste do Equador, próximo ao rio Napo, um tributário do Amazonas, em 1985. Aqui muitos índios das terras altas se estabeleceram, abrindo pequenas clareiras na floresta para a agricultura. Eles falam quéchua (ou quíchua no Equador), que era a língua oficial do império inca, e deram seus próprios nomes a alguns dos acidentes geográficos do cenário amazônico.

Voando sobre este cenário, que se estende por milhares de quilômetros do norte para o sul e do leste para o oeste, vêem-se os rios embaixo como fitas sinuosas se contorcendo através da floresta. Muitas vezes as curvas dos rios tornam-se cotovelos, como aqueles que se encontram no rio Mississippi, e os cotovelos incham e se tornam lagos, cada um deles ligado ao rio principal por um filete de corrente. Os moradores locais de língua espanhola chamam estes lagos de *cocha*, uma palavra quéchua que é aplicada também aos lagos das montanhas e ao mar. O observador aéreo pode ver estes *cochas* em todos os estágios diferentes pelos quais eles passam, começando como uma curva comum no rio, depois o cotovelo, depois, a partir deste, o lago recém-formado e então “a seqüência ecológica” à medida que o lago seca lentamente e é pouco a pouco tomado de volta pela floresta por meio de várias espécies de plantas. Subseqüentemente, visto do ar, ele parece apenas um ponto

verde-claro contra o verde mais escuro da floresta que o circunda, e ao final, depois de um século ou mais, aquele ponto se torna indistinguível do resto da floresta tropical.

Quando quase vi um jaguar, eu estava em uma trilha florestal próximo a Paña Cocha, que significa "lago das piranhas". Naquele lugar eu e meus companheiros tínhamos pescado e preparado três diferentes espécies de piranhas, todas deliciosas. Aqueles peixes não são tão perigosos como se poderia pensar. É verdade que eles algumas vezes atacam pessoas, e é aconselhável a um banhista que tenha sido mordido por um sair da água para que o sangue não atraia mais deles. Ainda assim, em seus contatos com a humanidade, é mais provável que as piranhas se transformem em comida do que comam alguém.

Cerca de uma hora de caminhada longe do lago, encontramos um grupo de pecaris,* e imediatamente depois sentimos a presença de outro grande mamífero à nossa frente. Sentimos um cheiro forte e pungente muito diferente do cheiro dos porcos selvagens, e ouvimos o som de uma criatura pesada se movendo através da vegetação rasteira. Consegui ver a ponta de sua cauda, depois ela se foi. O mestre dos animais, o símbolo do poder dos sacerdotes e governantes havia passado por perto.

Não era um jaguar, mas um outro gato selvagem menor que influenciaria minha vida ao me fazer perceber que diversos dos meus interesses aparentemente díspares haviam convergido. Quatro anos depois deste incidente no Equador, estava me familiarizando com a flora e a fauna de uma outra área florestal da América tropical muito longe do lugar que os incas tinham governado. Esta era a região onde uma civilização pré-colombiana diferente havia florescido, a dos maias. Eu estava no noroeste de Belize, próximo às fronteiras guatemalteca e mexicana, em um lugar chamado Chan Chich, que significa "pássaro pequeno" na língua maia local.

Muitas das pessoas que falam as línguas maias vivem hoje nesta área, e traços da civilização clássica maia podem ser encontrados em todos os lugares daquela parte da Mesoamérica, mais dramaticamente nos restos físicos das cidades abandonadas. Uma das maiores destas cidades é Tikal, situada no canto nordeste da Guatemala, a menos de 160 quilômetros de Chan Chich, com seus templos e pirâmides gigantescos.

As especulações sobre o colapso do modo de vida da civilização maia clássica há mais de mil anos são muitas, mas até hoje suas causas permanecem um mistério e uma fonte de controvérsias. Teria o povo simples se cansado de trabalhar sob as ordens dos governantes e da nobreza? Teriam eles perdido a fé no elaborado sistema religioso que

* *Tayassu angulatus*, mamífero encontrado nas Américas Central e do Sul; às vezes é chamado, erroneamente, porco-do-mato. (N. do T.)

mantinha o poder da elite e o tecido social coeso? Teriam as guerras entre as numerosas cidades-Estados conduzido a uma exaustão geral? Teriam as notáveis práticas agrícolas que sustentavam vastas populações na floresta tropical finalmente falhado? Os arqueólogos continuam a procurar pistas para responder estas e outras questões. Ao mesmo tempo, têm de considerar a relação entre o colapso definitivo da civilização clássica maia da floresta tropical e o que aconteceu na região mais árida do Yucatán, onde em alguns lugares a civilização clássica foi sucedida pela pós-clássica sob influência tolteca.

Visitar um gigantesco sítio arqueológico escavado como Tikal é, naturalmente, inesquecível, mas, para aqueles que desejam sair de trilhas já percorridas, a floresta também oferece outros prazeres, como deparar subitamente com uma ruína não explorada e que não está indicada nos mapas comuns. A ruína se revela primeiramente uma pequena colina na floresta coberta, como o solo plano, por árvores e arbustos. Ao nos aproximarmos, percebemos o estranho lampejo da alvenaria velha coberta por musgo, samambaias e trepadeiras. Olhando através da folhagem, podemos ter uma idéia geral do tamanho e da forma do lugar, especialmente se subirmos até um ponto mais alto. Ali, num instante a imaginação afasta a selva, escava e restaura um pequeno sítio da civilização maia clássica em todo o seu esplendor.

A floresta em torno de Chan Chich é tão rica em vida selvagem quanto em ruínas. Aqui podemos ver tapires adultos franzindo o longo nariz enquanto observam sua diminuta e variegada prole. Podemos admirar a plumagem brilhante dos perus ocelados, especialmente os machos com suas cabeças azuis brilhantes cobertas com pequenas manchas vermelhas. À noite, um facho de lanterna iluminando o topo de uma árvore pode localizar juparás* de olhos grandes prendendo-se aos galhos com suas caudas preênsais.

Como observador vitalício de pássaros, tenho prazer particular em gravar suas vozes fugidias na floresta, e depois reproduzir seus cantos ou chamados para os atrair, e então observar (e gravar seus sons ainda melhor) quando se aproximam. Em busca de pássaros, encontrei-me, em um dia de dezembro passado, caminhando sozinho por uma trilha perto de Chan Chich.

A primeira parte de minha caminhada tinha sido sem acontecimentos. Não havia tido a sorte de gravar ou observar nenhuma das espécies de pássaros que estava procurando. Agora, depois de mais uma hora de caminhada, já não me concentrava no canto dos pássaros ou na atenção cuidadosa aos movimentos na folhagem. Meus pensamentos haviam

* *Potus flavus*, mamífero carnívoro também conhecido como macaco-da-meia-noite. (N. do T.)

derivado para um assunto que tem ocupado boa parte da minha vida profissional, a mecânica quântica.

Durante a maior parte de minha carreira como físico teórico, minha pesquisa tem sido sobre partículas elementares, os tijolos básicos de toda a matéria do universo. Ao contrário de um físico de partículas experimental, não tenho de ficar perto de um gigantesco acelerador ou em um laboratório no fundo da terra para realizar o meu trabalho. Não utilizo diretamente detectores sofisticados e não preciso de uma grande equipe profissional. Quando muito exijo apenas um lápis, um pouco de papel, e uma cesta de lixo. Muitas vezes mesmo isto não é essencial. Dê-me uma boa noite de sono, isolamento das distrações, tempo livre de preocupações e obrigações, e posso trabalhar. Seja debaixo do chuveiro, ou pairando entre o sono e o despertar em um vôo noturno, ou caminhando ao longo de uma trilha na selva, meu trabalho pode me acompanhar aonde quer que eu vá.

A mecânica quântica não é em si mesma uma teoria; é antes um arcabouço dentro do qual toda teoria física contemporânea deve caber. Como é bem sabido, este arcabouço exige o abandono do determinismo que caracteriza a física "clássica" anterior, já que a mecânica quântica permite apenas, mesmo em princípio, o cálculo de probabilidades. Os físicos sabem como usá-la para predizer as probabilidades dos vários resultados possíveis de uma experiência. Desde sua descoberta em 1924, as previsões da mecânica quântica, dentro dos limites de uma experiência particular ou de uma teoria particular pertinente, se concretizaram sempre de modo perfeito. Mas, a despeito deste sucesso contínuo, não entendemos ainda completamente no nível mais profundo o que a mecânica quântica realmente significa, especialmente para o universo como um todo. Por mais de trinta anos alguns de nós têm efetuado avanços em direção à construção do que eu chamo a "interpretação moderna" da mecânica quântica, que permite sua aplicação ao universo e também no trato de eventos particulares que envolvem objetos individuais em vez de apenas a experiências repetíveis com pequenas porções facilmente reproduzíveis de matéria. Caminhando através da floresta perto de Chan Chich, eu ponderava sobre como a mecânica quântica pode ser, em princípio, utilizada para estudar a individualidade, para descrever quais pedaços de uma fruta podem ser comidos pelos papagaios ou os vários modos pelos quais uma árvore em crescimento pode destruir um pedaço de alvenaria de um templo em ruínas.

Minha cadeia de pensamentos foi interrompida quando uma figura escura apareceu na trilha cerca de 90 metros à minha frente. Parei e peguei meu binóculo para dar uma olhada mais próxima. Era um gato

selvagem de tamanho médio, um jaguarundi.* Ele estava imóvel, interrompendo a trilha, com sua cabeça voltada em minha direção, permitindo-me ver suas características, o crânio chato, o corpo longo e as patas dianteiras curtas (características que fizeram com que alguns o chamassem de gato-lontra). O tamanho da criatura — cerca de 1 metro — e a pelagem uniforme de cor negro-acinzentada indicavam que era um adulto e muito mais do tipo escuro do que do avermelhado. Tanto quanto eu soubesse, o jaguarundi estava parado ali há algum tempo, seus olhos acastanhados fixos em mim, como se enfeitiçado pelos mistérios da mecânica quântica. Cheguei mais perto. Embora obviamente alerta, o animal parecia completamente à vontade. Olhamo-nos, ambos imóveis, pelo que me pareceu ser alguns minutos. Ele permaneceu imóvel, mesmo quando cheguei mais perto, mais ou menos uns 30 metros. Então, tendo visto tudo o que precisava ser visto deste ser humano particular, o jaguarundi olhou para a frente, baixou sua cabeça, e lentamente se dissolveu entre as árvores.

Tais observações não são muito comuns. O jaguarundi é um animal tímido. Em razão da destruição de seu hábitat nativo no México e nas Américas Central e do Sul, seu número decresceu ao longo dos anos e ele está agora incluído na *Lista vermelha dos animais ameaçados*. A esta ameaça se soma a aparente incapacidade da criatura de reproduzir-se em cativeiro. Minha experiência com este jaguarundi particular entrou em ressonância com tudo o que penso sobre a noção de individualidade. Minha memória foi jogada de volta para um encontro anterior com a individualidade na natureza.

Um dia, em 1956, quando eu era um professor muito jovem no Caltech, minha primeira esposa Margaret e eu estávamos retornando a Pasadena vindos da Universidade da Califórnia em Berkeley, onde eu tinha ministrado algumas palestras sobre física teórica. Estávamos no nosso conversível Hillman Minx com a capota abaixada. Naqueles dias, os acadêmicos se vestiam um pouco mais formalmente do que fazemos hoje — eu estava vestindo um terno de flanela cinza e Margaret saia e suéter, com meias e sapatos altos. Viajávamos na Rota 99 (ainda não convertida em pista de alta velocidade) próximo a Tejon Pass, entre Bakersfield e Los Angeles. Ao passar por esta área, muitas vezes varria o céu com os olhos esperando perceber um lampejo de um condor da Califórnia. Desta vez, percebi uma forma grande voando baixo sobre minha cabeça e depois desaparecendo rapidamente atrás da colina a nossa direita. Não tinha certeza do que era aquilo, mas estava determinado a descobrir. Parei o carro no acostamento da estrada, peguei meu

* *Felis eyra*, gato selvagem sul-americano, também conhecido por gato-mourisco. (N. do T.)

binóculo de observação, saltei para fora e subi a colina. Afundei os pés na espessa lama vermelha durante a maior parte da subida. Na metade do caminho, olhei para trás e lá estava Margaret, não muito longe, com suas elegantes roupas cobertas com lama exatamente como as minhas. Alcançamos juntos o topo da colina e olhamos para baixo onde um bezerro morto jazia sobre o campo. Refestelando-se com ele estavam onze condores da Califórnia. Eles constituíam uma grande fração da população total da espécie naquele tempo. Observamos por um longo tempo enquanto eles se alimentavam, voavam pequenas distâncias, pousavam, caminhavam ao redor e se alimentavam novamente. Eu estava preparado para seu tamanho gigantesco (a envergadura de suas asas mede cerca de 3 metros), suas cabeças peladas brilhantemente coloridas e sua plumagem branca e preta. O que me surpreendeu foi a facilidade com que podíamos distinguir um do outro por meio de suas penas perdidas. Um tinha um par de voadouros faltando na asa esquerda. Um outro tinha uma falha em forma de cunha em sua cauda. Nenhum estava completamente intacto. O efeito foi dramático. Cada pássaro era um indivíduo facilmente identificado, e essa individualidade observável era o resultado direto de acidentes históricos. Perguntei-me se essas perdas de plumagem eram conseqüências permanentes da longa e acidentada vida dos condores, ou simplesmente o efeito temporário de uma troca de plumagem anual. (Aprendi mais tarde que os condores trocam todas as suas penas todos os anos.) Estamos todos acostumados a pensar nos seres humanos (e animais de estimação) como indivíduos. Mas a visão daqueles condores distinguíveis reforçou fortemente minha apreciação de quanto percebemos o mundo como composto de objetos individuais, animados ou inanimados, com suas próprias histórias particulares.

Um terço de século mais tarde, parado na floresta centro-americana, olhando para o lugar onde o jaguarundi tinha desaparecido, lembrando-me dos condores maltrapilhos, e lembrando também que eu estava pensando sobre história e individualidade na mecânica quântica, ocorreu-me que meus dois mundos, o da física fundamental e o dos condores, jaguarundis e ruínas maias, tinham finalmente se reunido.

Por décadas vivi com estas duas paixões intelectuais, uma pelo meu trabalho profissional, em que tento entender as leis universais que governam os constituintes finais de toda a matéria, e a outra pela minha vocação de estudante amador da evolução da vida terrestre e da cultura humana. Tive sempre a impressão de que de alguma forma as duas estavam profundamente ligadas, mas por um longo tempo eu realmente não sabia como (exceto pelo tema comum da beleza da natureza).

+ Parecia haver um enorme hiato entre a física fundamental e estes outros interesses. Na teoria das partículas elementares, tratamos com

objetos como o elétron e o fóton, cada um deles se comportando exatamente da mesma maneira onde quer que apareçam no universo. De fato, todos os elétrons são rigorosamente intercambiáveis entre si, e o mesmo vale para todos os fótons. Partículas elementares não têm individualidade.

As leis físicas das partículas elementares são consideradas exatas, universais e imutáveis (exceto por possíveis considerações cosmológicas), embora nós cientistas as abordemos por meio de aproximações sucessivas. Em contrapartida, assuntos como a arqueologia, a lingüística e a história natural se preocupam com impérios, linguagens e espécies particulares, e, em um nível mais detalhado, com artefatos individuais, palavras e organismos, incluindo os seres humanos como nós. Nesses assuntos as leis são aproximadas; além disso, elas lidam com a história e com o tipo de evolução sofrida pelas espécies biológicas, línguas humanas ou culturas.

Mas as leis quânticas fundamentais da física dão realmente origem à individualidade. A evolução física do universo, operando de acordo com estas leis, produziu, espalhados através do cosmos, objetos particulares como o nosso planeta Terra. Então, por meio de processos como, por exemplo, a evolução biológica na Terra, as mesmas leis produziram objetos particulares como os jaguarundis e os condores, capazes de adaptação e aprendizado, e finalmente outros objetos particulares, como os seres humanos, capazes de ter uma linguagem, criar civilizações e descobrir estas leis físicas fundamentais.

Durante alguns anos, meu trabalho tinha sido dirigido tanto para esta cadeia de relações quanto para as próprias leis. Por exemplo, eu tinha pensado sobre o que distingue sistemas adaptativos complexos, os quais sofrem processos como o da aprendizagem e o da evolução biológica, dos sistemas evolutivos (como as galáxias e as estrelas) que não são adaptativos. Sistemas adaptativos complexos incluem um bebê humano aprendendo sua língua nativa, uma cepa de bactérias que se tornam resistentes a um antibiótico, a comunidade científica testando novas teorias, um artista tendo uma idéia criativa, uma sociedade desenvolvendo novos costumes ou adotando um novo conjunto de superstições, um computador programado para desenvolver novas estratégias para vencer no jogo de xadrez, e a raça humana desenvolvendo novos modos de viver em harmonia maior consigo mesma e com outros organismos com os quais divide o planeta Terra.

A pesquisa sobre sistemas adaptativos complexos e suas propriedades comuns assim como o trabalho sobre a interpretação moderna da mecânica quântica e sobre o significado de simplicidade e complexidade têm feito progressos firmes. Para promover o estudo interdisciplinar de tais questões, ajudei a fundar o Instituto Santa Fé em Santa Fé, estado do Novo México.

Encontrar o jaguarundi em Belize de alguma forma reforçou minha consciência do progresso que meus colegas e eu fizemos para obter uma melhor compreensão da relação entre o simples e o complexo, entre o universal e o individual, entre as leis básicas da natureza e os objetos particulares terrenos que sempre amei.

Quanto mais aprendo sobre o caráter desta relação, mais quero transmiti-la aos outros. Pela primeira vez em minha vida sinto a compulsão de escrever um livro.

CAPÍTULO 2

LUZ INICIAL

O título deste livro vem de uma linha de um poema de meu amigo Arthur Sze, um esplêndido poeta sino-americano que vive em Santa Fé e que conheci por meio de sua esposa, a talentosa tecelã hopi* Ramona Sakiestewa. A linha é: “O mundo do quark tem tudo em comum com um jaguar circulando na noite.”

Os quarks são partículas elementares, os tijolos básicos do núcleo atômico. Eu sou um dos dois teóricos que predisseram sua existência, e fui eu quem lhes deu o seu nome. No título, o quark simboliza as leis físicas simples e básicas que governam o universo e toda a matéria contida nele. Para muitas pessoas pode parecer que a palavra “simples” não se aplica à física contemporânea; na verdade, explicar que ela realmente se aplica é um dos objetivos deste livro.

O jaguar representa a complexidade do mundo que nos cerca, especialmente como esta se manifesta nos sistemas adaptativos complexos. As imagens de Arthur do quark e do jaguar juntas me parecem refletir perfeitamente os dois aspectos da natureza que eu chamo o simples e o complexo: de um lado as leis físicas subjacentes à matéria e ao universo e do outro o rico tecido do mundo que percebemos diretamente e do qual fazemos parte. Além disso, assim como o quark é um símbolo das leis físicas que, uma vez descobertas, surgem completas ante a mente analítica, assim é o jaguar, pelo menos para mim, uma possível metáfora para o ardiloso sistema adaptativo complexo, o qual continua a evitar um olhar analítico claro, embora seu odor pungente possa ser sentido nos arbustos.

Mas como fiquei fascinado por assuntos como a história natural quando era criança? E como e por que me tornei então um físico?

* Uma das diversas tribos de índios pueblos shoshone do norte do Arizona. (N. do T.)

UMA CRIANÇA CURIOSA

Devo a maior parte de minha educação inicial ao meu irmão Ben, que é nove anos mais velho do que eu. Foi ele quem me ensinou a ler quando eu tinha três anos (com uma caixa de biscoitos de água e sal Sunshine) e que me apresentou à observação dos pássaros e mamíferos, à botânica e à coleta de insetos. Vivíamos em Nova York, principalmente em Manhattan, mas mesmo ali era possível estudar a natureza. Eu achava que Nova York era uma floresta de coníferas que tinha sido demasiadamente desmatada, e passávamos a maior parte do nosso tempo na pequena porção que ainda restava, ao norte do zoológico do Bronx. Fragmentos de outros habitats sobreviviam em lugares como o parque Van Cortlandt, com seus brejos de água doce; a área de New Dorp na ilha Staten, com suas praias e brejos de água salgada; e mesmo, bem na nossa vizinhança, no Central Park, que possuía alguma vida ornitológica interessante, especialmente durante as migrações da primavera e do outono.

Tornei-me consciente da diversidade da natureza e do modo impressionante pelo qual esta diversidade é organizada. Se você caminhar ao longo da beira de um pântano e observar uma toutinegra do norte ou ouvir alguém cantando "Wichita, Wichita, Wichita",* sabe que provavelmente encontrará uma outra mais adiante. Se você escavar um fóssil, provavelmente encontrará outro do mesmo tipo nas proximidades. Depois de tornar-me um físico, meditei algum tempo sobre como as leis fundamentais da física fornecem a base de tais fenômenos. Acontece que a resposta está relacionada com a maneira como a história é tratada na mecânica quântica, e que a explicação final está nas condições do universo primordial. Mas, independente destas profundas questões físicas, a questão menos obscura da formação das espécies como um fenômeno na biologia vale a pena ser considerada.

Não é em absoluto uma questão trivial o fato de existirem coisas como as espécies; e elas não são apenas artifícios da mente do biólogo, como algumas vezes tem sido dito. Ernst Mayr, o grande ornitólogo e biogeógrafo, gosta de relatar como, quando era um jovem pesquisador na Nova Guiné, contou 127 espécies de pássaros habitando o vale onde ele estava trabalhando. Os membros da tribo local contaram 126; a única diferença entre a sua lista e a dele era que eles tinham contado como uma só duas espécies muito similares de *gerygone* que Ernst, com seu treinamento científico, foi capaz de distinguir uma da outra. Mais importante ainda do que a concordância entre diferentes tipos de pes-

* O autor procura reproduzir aqui o som emitido pela toutinegra. (N. do T.)

soas é o fato de que os próprios pássaros podem dizer se pertencem ou não à mesma espécie. Animais de espécies diferentes não têm geralmente o hábito de acasalar-se entre si, e, nos raros casos em que o fazem, os híbridos que produzem são provavelmente estéreis. De fato, uma das mais bem-sucedidas definições do que constitui uma espécie é a afirmação de que não existe troca efetiva de genes por meios comuns entre membros de espécies diferentes.

Nos meus primeiros passeios ecológicos, fiquei impressionado pelo fato de que as borboletas, pássaros e mamíferos que víamos realmente se dividiam com concisão em espécies. Se você sair para uma caminhada, poderá ver pardais cantadores, do pântano, do campo e pardais-do-papo branco, mas provavelmente não verá um pardal que pertença a uma categoria intermediária. Discussões sobre se duas populações pertencem ou não à mesma espécie nascem principalmente quando as populações são encontradas em lugares diferentes, ou então vivem em épocas diferentes, com pelo menos uma delas na forma fóssil. Ben e eu gostávamos de falar sobre como as espécies são todas relacionadas entre si pela evolução, como as folhas de uma "árvore" evolutiva, com agrupamentos como gêneros, famílias e ordens representando tentativas de especificar mais a estrutura daquela árvore. Quão distante é a relação entre duas espécies diferentes depende do quanto é necessário descer ao longo da árvore para encontrar um ancestral comum.

Ben e eu não passávamos todo o nosso tempo juntos ao ar livre. Visitávamos também museus de arte, inclusive aqueles ricos em material arqueológico (como o Metropolitan Museum of Art) e os que possuíam objetos da Europa medieval (como o Cloisters). Líamos livros de história. Aprendemos a ler hieróglifos egípcios. Estudávamos gramática latina, francesa e espanhola só por diversão, e observávamos como palavras francesas e espanholas (e muitas palavras "emprestadas" no inglês) eram derivadas do latim. Lemos sobre a família das línguas indo-européias e aprendemos como muitas palavras latinas, gregas e do inglês nativo tinham uma origem comum, com leis de transformação bastante regulares. Por exemplo, o inglês "salt" corresponde ao latim "sal" e ao grego antigo "hals", enquanto que o inglês "six" corresponde ao latim "sex" e ao grego antigo "hex"; o "s" inicial em inglês e latim é aspirado no grego antigo, o que indicamos por "h". Aqui estava outra árvore evolutiva, esta era a das línguas.

Processos históricos, árvores evolutivas, diversidade organizada e variação individual estavam em toda a parte. Além de explorar a diversidade, aprendi também que em muitos casos ela estava em perigo. Ben e eu estávamos entre os primeiros conservacionistas. Víamos como as

poucas áreas em torno de Nova York que eram mais ou menos naturais estavam se tornando ainda mais raras à medida que eram drenadas e pavimentadas, como, por exemplo, no caso dos pântanos.

Já nos anos 30 estávamos perfeitamente conscientes da finitude da Terra, do efeito da intromissão das atividades humanas sobre as plantas e comunidades de animais, e da importância da limitação populacional, assim como da conservação do solo, proteção das florestas e coisas semelhantes. Naturalmente, eu não havia relacionado ainda a necessidade de todas essas mudanças de atitude e de prática com a evolução em escala planetária da sociedade humana em direção a uma maior sustentabilidade, embora este seja o modo pelo qual olho hoje estes assuntos. Mas mesmo então tive alguns pensamentos sobre o futuro da raça humana, relacionados principalmente com os textos e os romances científicos de H. G. Wells.

Também gostava de ler seus romances. Devorava também livros de contos; Ben e eu líamos antologias de poesia inglesa. Íamos ocasionalmente aos concertos, e mesmo ao Metropolitan Opera, mas éramos muito pobres e tínhamos de contentar-nos na maior parte das vezes com atividades gratuitas. Fizemos tentativas canhestras de tocar piano e de cantar árias de operetas, assim como canções de Gilbert e Sullivan, ouvíamos rádio e tentávamos sintonizar estações distantes em ondas curtas e longas, e, quando conseguíamos, escrevíamos para elas pedindo “cartões de verificação”. Lembro-me vividamente daqueles que recebemos da Austrália com ilustrações do pássaro *kookaburra*.

Ben e eu queríamos entender o mundo e desfrutá-lo, e não retalhá-lo de um modo arbitrário. Não diferenciávamos marcadamente dentre categorias como as ciências naturais, as ciências sociais e do comportamento, as humanidades e as artes. De fato, nunca acreditei na primazia de tais distinções. O que sempre me impressionou é a unidade da cultura humana, sendo a ciência uma parte importante. Mesmo a distinção entre natureza e cultura humana não é clara; nós, seres humanos, precisamos nos lembrar de que somos uma parte da natureza.

Embora seja uma característica necessária de nossa civilização, a especialização necessita ser complementada pela integração do pensamento por meio da interdisciplinaridade. Um dos obstáculos que continua presente é a linha que separa aqueles que se sentem confortáveis com a utilização da matemática daqueles que não se sentem assim. Tive a fortuna suficiente de ser apresentado ao raciocínio quantitativo desde a mais tenra idade.

Embora Ben estivesse interessado nas ciências físicas e na matemática, foi principalmente meu pai quem me encorajou a estudar estes assuntos. Imigrante oriundo da Áustria-Hungria no início do século, ele

tinha interrompido seus estudos na Universidade de Viena para vir para os Estados Unidos e ajudar seus pais. Estes tinham imigrado poucos anos antes e estavam vivendo em Nova York, mas com dificuldades para manter-se. O primeiro emprego de meu pai foi em um orfanato na Filadélfia, onde aprendeu inglês e beisebol com os órfãos. Embora já um jovem adulto quando começou a aprender inglês, sua pronúncia e gramática eram perfeitas. Quando o conheci, a única maneira pela qual se poderia supor que ele tivesse nascido no exterior era notar que ele nunca cometia erros.

Depois de explorar muitos ramos de atividades, ele finalmente fundou nos anos 20 a Escola de Línguas Arthur Gell-Mann, onde tentava ensinar aos outros imigrantes a falar um inglês impecável. Também ensinava alemão e contratou outros professores para ensinar francês, espanhol, italiano e português. A escola teve um sucesso modesto, mas as coisas mudaram em 1929, o ano em que nasci. Não somente o mercado de ações quebrou, como também entrou em vigor uma lei que limitava severamente a imigração para os Estados Unidos. Daí em diante, os alunos potenciais da escola de meu pai foram reduzidos em número pelas novas quotas e empobrecidos pela Depressão. Na época em que eu tinha três anos de idade, a escola havia falido e meu pai teve de contentar-se com um emprego rotineiro mal remunerado em um banco para manter-nos vivos. Fui ensinado a pensar que os dias anteriores ao meu nascimento eram os dias bons.

Meu pai era fascinado pela matemática, física e astronomia, e todos os dias passava horas fechado em seu escritório estudando cuidadosamente livros sobre a relatividade especial e geral, e sobre a expansão do universo. Ele encorajou meu interesse pela matemática, pela qual me apaixonei, estudando por minha própria conta e admirando sua coerência e rigor.

Durante meu último ano no colégio, ao preencher o formulário de admissão em Yale, tinha de escolher a área mais provável de interesse. Quando discuti a escolha de campo de atividades com meu pai, ele zombou de meus planos de estudar arqueologia ou lingüística, dizendo que eu morreria de fome. Em vez disso, sugeriu engenharia. Respondi que preferia morrer de fome, e também que qualquer coisa que eu projetasse provavelmente ruiria. (Mais tarde me foi dito, depois de um teste de aptidão, "qualquer coisa menos engenharia!") Meu pai então me propôs que fizéssemos um acordo e eu escolhesse física.

Expliquei a ele que eu tinha feito um curso de física no colégio, e que aquele era o curso mais chato do currículo, e que era a única matéria em que tinha ido mal. Tivéramos de memorizar coisas como os sete tipos de máquinas simples: a alavanca, o parafuso, o plano inclina-

do e assim por diante. Tínhamos estudado também mecânica, calor, som, luz, eletricidade e magnetismo, mas sem nenhuma indicação de qualquer relação entre estes tópicos.

Meu pai então abandonou os argumentos econômicos e passou a promover a física com base no seu encanto estético e intelectual. Ele me prometeu que a física avançada seria mais excitante e satisfatória do que a do meu curso colegial, e que eu gostaria da relatividade restrita e geral, e da mecânica quântica. Decidi agradar ao velho, sabendo que eu poderia sempre trocar meu assunto principal se e quando chegasse a New Haven. Todavia, tendo chegado lá, fui muito preguiçoso e não fiz a troca imediatamente. Então, em pouco tempo, fui fisgado. Comecei a me divertir com a física teórica. Meu pai estava certo a respeito da relatividade e da mecânica quântica. À medida que as estudava, comecei a compreender que a beleza da natureza se manifesta tanto na elegância destes princípios fundamentais quanto no pio de um mergulhão-do-norte, ou nos rastros luminescentes deixados à noite pelos porcos-do-mar.

SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS

Um exemplo maravilhoso dos princípios simples subjacentes da natureza é a lei da gravitação, especificamente a lei da gravitação de Einstein (embora muitas pessoas considerem aquela teoria tudo menos simples). No decurso da evolução física do universo, o fenômeno da gravitação provoca a aglomeração da matéria na forma de galáxias, e depois na forma de estrelas e planetas, inclusive a Terra. Desde o instante da sua formação, tais corpos já começam a manifestar complexidade, diversidade e individualidade. Mas estas propriedades ganharam novos significados com a emergência dos sistemas adaptativos complexos. Aqui na Terra este aperfeiçoamento era associado com a origem da vida na Terra e com os processos de evolução biológica, os quais produziram esta impressionante diversidade de espécies. Nossa própria espécie, pelo menos em alguns aspectos a mais desenvolvida das que evoluíram neste planeta, conseguiu descobrir uma grande parte da simplicidade subjacente, inclusive a própria teoria da gravitação.

Pesquisas nas ciências da simplicidade e da complexidade, que se realizam no Instituto Santa Fé e em outros lugares no mundo todo, incluem naturalmente a distinção clara dos conceitos de simplicidade e complexidade, mas incluem também as similaridades e diferenças entre os sistemas adaptativos complexos que operam em diversos processos, como a origem da vida na Terra, a evolução biológica, o comportamento

dos organismos nos sistemas ecológicos, o funcionamento do sistema imunológico dos mamíferos, o aprendizado e o raciocínio nos animais (inclusive nos seres humanos), a evolução das sociedades humanas, o comportamento dos investidores no mercado financeiro e a utilização dos computadores, aplicativos e/ou equipamentos, projetados para desenvolver estratégias ou fazer previsões com base nas observações passadas.

A característica comum de todos estes processos é que em cada um deles um sistema adaptativo complexo adquire informação sobre seu meio ambiente e sobre sua própria interação com este meio ambiente, identificando regularidades naquela informação, condensando estas regularidades em um tipo de “esquema” ou modelo, e atuando no mundo real com base neste esquema. Em cada caso, há vários esquemas competindo, e os resultados da ação sobre o mundo real retroalimentam o esquema e influenciam a competição entre eles.

Cada um de nós, humanos, funciona de muitas maneiras diferentes como um sistema adaptativo complexo. (De fato o termo “esquema” tem sido utilizado há bastante tempo na psicologia para significar uma estrutura conceitual, como a que um ser humano usa sempre para recolher dados e dar-lhes significado.)

Suponha que você está numa cidade estranha ao entardecer durante a hora do pique, tentando pegar um táxi numa avenida movimentada que vai do centro para os bairros residenciais. Os táxis passam mas não param. A maioria deles já tem passageiros, e você observa que aqueles táxis têm as luzes do teto apagadas. Ah ha! você deve procurar táxis com as luzes do teto acesas. Então descobre alguns naquela condição e de fato eles estão sem passageiros, mas também não param. Você precisa de um esquema modificado. Em breve você percebe que as luzes do teto têm uma parte interna e outra externa, com esta última portando o aviso de “fora de serviço”. O que precisa é de um táxi que tenha apenas a parte interna das luzes do teto iluminada. Sua nova idéia é confirmada quando dois táxis descarregam seus passageiros uma quadra adiante e então seus motoristas acendem apenas a parte interna das luzes do teto. Infelizmente, aqueles táxis são imediatamente apanhados por outros pedestres. Uns poucos táxis mais acabam suas corridas perto de você, mas são também ocupados por outras pessoas. Você é obrigado a lançar sua rede com uma abertura maior na busca por um esquema bem-sucedido. Finalmente observa que no outro lado da avenida, indo na direção oposta, muitos táxis passam lentamente com suas luzes internas do teto acesas. Você atravessa a avenida, faz sinal para um deles, e embarca.

Como mais uma ilustração, imagine que você é uma cobaia em

uma experiência de psicologia na qual lhe é mostrada uma longa seqüência de fotografias de objetos familiares. As fotografias representam várias coisas, e cada uma pode ser exibida muitas vezes. De tempos em tempos pedem a você que prediga quais serão as próximas fotografias, e você continua tentando construir esquemas mentais para a seqüência, inventando teorias sobre como a seqüência é estruturada, com base no que você já viu. Qualquer esquema deste tipo, complementado pela memória das últimas fotografias mostradas, lhe permite fazer uma predição sobre as próximas. Tipicamente, aquelas predições estarão erradas nas primeiras vezes, mas, se a seqüência tem uma estrutura facilmente perceptível, a discrepância entre predição e observação fará com que você rejeite os esquemas malsucedidos em favor daqueles capazes de fazer boas predições. Em breve você poderá estar prevendo com precisão o que será mostrado a seguir.

Agora imagine uma experiência similar conduzida por um psicólogo sádico que exhibe uma seqüência sem qualquer estrutura real. Você provavelmente continuará a fazer esquemas, mas desta vez eles não conseguem fazer boas predições, exceto por acaso. Neste caso os resultados do mundo real não oferecem qualquer orientação na escolha de um esquema, somente aquela que diz: "esta seqüência parece não ter pé nem cabeça". Mas cobaias humanas acham duro aceitar tal conclusão.

Seja planejando uma estratégia de negócios para um novo empreendimento, aperfeiçoando uma receita ou aprendendo uma língua, você está se comportando como um sistema adaptativo complexo. Se estiver adestrando um cachorro, você estará vendo um sistema adaptativo complexo em operação, e também estará funcionando como um (se for principalmente este último que está em funcionamento, então é o cachorro que pode estar treinando você, como muitas vezes é o caso). Quando investe no mercado financeiro, você e todos os outros investidores são sistemas adaptativos complexos individuais participando de uma entidade coletiva que está evoluindo graças aos esforços de todas as partes componentes para melhorar suas posições, ou pelo menos sobreviver economicamente. Tais entidades coletivas podem elas mesmas ser sistemas adaptativos complexos. Também podem sê-lo entidades coletivas organizadas, como empresas ou tribos. A humanidade como um todo não está ainda muito bem organizada, mas uma boa parte dela já funciona como um sistema adaptativo complexo.

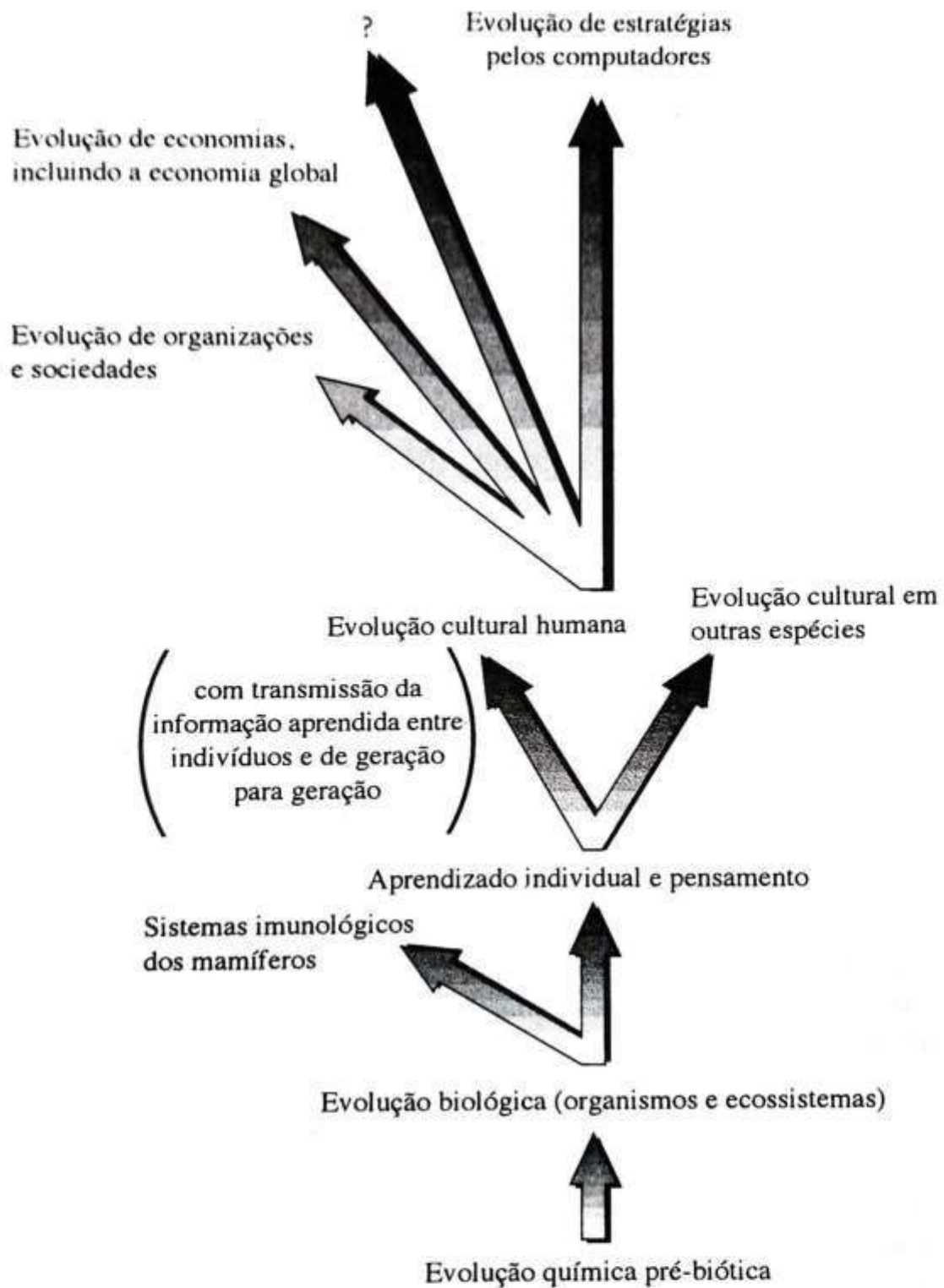
Não é só o aprendizado no sentido usual que fornece exemplos do funcionamento de sistemas adaptativos complexos. A evolução biológica fornece muitos outros. Enquanto os seres humanos adquirem conhecimento principalmente pelo uso individual ou coletivo de seus cére-

bro, os outros animais adquiriram uma fração muito maior de informação do que necessitam para sobreviver pela herança genética direta; esta informação, que evoluiu em milhões de anos, é o que é subjacente àquilo que muitas vezes é chamado vagamente de “instinto”. As borboletas monarca,* incubadas em várias partes dos Estados Unidos, “sabem” como migrar em massa para as encostas cobertas de pinheiros dos vulcões próximos à Cidade do México para passar o inverno. Isaac Asimov, o falecido bioquímico, divulgador e autor de livros de ficção científica, me contou que uma vez teve uma discussão com um físico teórico que se recusava a admitir que um cachorro pudesse saber as leis do movimento de Newton. Isaac perguntou indignado: “Você diz isto mesmo já tendo observado um cachorro apanhar um disco de *frisbee* com a boca?” Obviamente, o físico e ele estavam utilizando a palavra “saber” para denotar coisas diferentes; no caso do físico, para denotar o resultado da aprendizagem no contexto cultural do empreendimento científico humano; no caso de Isaac, a informação armazenada nos genes, complementada por algum aprendizado obtido a partir da experiência do indivíduo.

A capacidade de aprender a partir da experiência, seja nos parâmetros, nos cachorros ou nas pessoas, é em si mesma um produto da evolução biológica. Além disso, a evolução deu origem não apenas ao processo de aprendizado, mas também a outros tipos de sistemas adaptativos complexos, como o sistema imunológico dos mamíferos. O sistema imunológico sofre um processo muito similar ao próprio processo de evolução biológica, mas em uma escala de tempo de horas ou dias, em vez de milhões de anos, permitindo ao corpo identificar a tempo um organismo invasor ou uma proteína estranha, e produzir uma resposta imunológica.

Acontece que sistemas adaptativos complexos têm uma tendência geral de gerar outros sistemas análogos. Por exemplo, a evolução biológica pode conduzir a uma solução “instintiva” para um problema enfrentado por um organismo, mas também pode gerar inteligência suficiente para que um organismo resolva um problema semelhante pelo aprendizado. O diagrama da página seguinte ilustra como vários sistemas adaptativos complexos da Terra estão relacionados uns com os outros. Certas reações químicas que envolvem a reprodução e algumas variações transmitidas conduziram, há mais ou menos 4 bilhões de anos, ao aparecimento das primeiras formas de vida e então a diversos organismos constituindo comunidades ecológicas. A vida então deu origem a mais sistemas adaptativos complexos, como o sistema imunológico e

* Variedade de borboleta americana do gênero *Danaus plexippus*. (N. do T.)



Alguns sistemas adaptativos complexos da Terra.

o processo de aprendizagem. Nos seres humanos, o desenvolvimento da capacidade de utilizar a linguagem simbólica fez o aprendizado evoluir para uma atividade cultural elaborada, e novos sistemas adaptativos complexos surgiram dentro da cultura humana: sociedades, organizações, economias e o empreendimento científico humano, só para citar alguns. Agora que velocíssimos e poderosos computadores emergiram desta cultura, podemos tornar possível a eles agir como sistemas adaptativos complexos também.

No futuro, os seres humanos podem vir a criar novos tipos de sistemas adaptativos complexos. Um exemplo, que apareceu na ficção científica, chamou primeiramente minha atenção como consequência de uma conversa que tive no começo dos anos 50. O grande físico húngaro-americano, Leo Szilard, já falecido, convidou a mim e a um colega para participar de um encontro internacional sobre controle de armas. Meu colega, "Murph" Goldberger (mais tarde presidente do Caltech e depois diretor do Instituto de Estudos Avançados de Princeton), respondeu que participaria apenas da segunda parte do encontro. Leo voltou-se para mim, e eu lhe disse que poderia participar apenas da primeira parte. Leo pensou por alguns momentos e então nos disse: "Não, não serve; os neurônios de vocês não estão interligados."

Algum dia, para melhor ou para pior, tais interligações poderão ser possíveis. Um ser humano poderia ser ligado diretamente a um computador avançado (não por meio da linguagem falada ou de uma interface com um console), e por esse computador a um ou mais seres humanos. Pensamentos e emoções seriam completamente compartilhados, sem qualquer seletividade ou dissimulação que a linguagem permite. (Voltaire supostamente observou: "Os homens... empregam a fala apenas para esconder seus pensamentos.") Minha amiga Shirley Hufstедler diz que estar interligado não é algo que ela recomendaria a um casal prestes a se unir. Não estou certo absolutamente de que recomendaria este procedimento (embora se tudo desse certo ele pudesse mitigar alguns dos mais intratáveis problemas humanos). Mas ele certamente criaria uma nova forma de sistema adaptativo complexo, um verdadeiro composto de muitos seres humanos.

Gradualmente, os estudiosos dos sistemas adaptativos complexos estão se familiarizando com suas propriedades gerais, assim como com as diferenças entre eles. Embora difiram bastante em suas propriedades físicas, eles se parecem uns com os outros na maneira como manipulam a informação. Esta característica comum é talvez o melhor ponto de partida para explorar seu funcionamento.

CAPÍTULO 3

INFORMAÇÃO E COMPLEXIDADE RUDIMENTAR

Ao estudar qualquer sistema adaptativo complexo, acompanhamos o que acontece com a informação. Examinamos como ela chega ao sistema na forma de um fluxo de informações. (Por exemplo, se em uma experiência de psicologia mostramos a uma cobaia uma seqüência de imagens, estas constituem o fluxo de informações.) Observamos como o sistema adaptativo complexo percebe regularidades no fluxo de informações, escolhendo-as a partir de características consideradas incidentais ou arbitrárias, e as condensando em um esquema sujeito a variações. (No exemplo, a cobaia infere e modifica continuamente regras conjecturadas que se supõe descrever as regularidades que governam a seqüência de imagens.) Observamos como cada um dos esquemas resultantes é então combinado com a informação adicional, do mesmo tipo que a informação incidental que tinha sido colocada de lado ao abstrair regularidades do fluxo de informações, para gerar um resultado com aplicações ao mundo real: uma descrição de um sistema observado, uma previsão de eventos, uma prescrição para o comportamento do próprio sistema adaptativo complexo. (Na experiência de psicologia, a cobaia pode combinar um esquema experimental baseado na sucessão passada de imagens com a informação fornecida pelas seguintes e assim fazer uma previsão sobre quais imagens serão mostradas mais tarde. Neste caso, como muitas vezes acontece, a informação especial suplementar vem de uma parte subsequente do mesmo fluxo de dados.) Finalmente, vemos como a descrição, previsão ou comportamento tem conseqüências no mundo real que retroalimentam o sistema para exercer “pressões seletivas” sobre a competição entre vários esquemas; alguns são rebai-xados na hierarquia ou completamente eliminados, enquanto um ou mais tratam de sobreviver e podem ser promovidos. (No exemplo, um esquema que faz previsões que são contrariadas pelas imagens que vêm

a seguir é presumivelmente descartado pela cobaia, enquanto um que dá previsões corretas é mantido com a utilização das partes ulteriores do mesmo fluxo de informações que em primeiro lugar deu origem aos esquemas, e que é suprido com informação adicional suplementar utilizada para fazer previsões.) A operação de um sistema adaptativo complexo pode ser representada por um diagrama como o da página 42, no qual é enfatizado o fluxo de informação.

Como todas as outras coisas, sistemas adaptativos complexos são sujeitos às leis da natureza, as quais, elas mesmas, repousam sobre as leis físicas fundamentais da matéria e do universo. Além disso, de todas as situações físicas permitidas por aquelas leis, apenas condições específicas permitem a existência de um sistema adaptativo complexo.

Ao estudar o universo e a estrutura da matéria, podemos seguir o mesmo procedimento que seguimos quando estudamos sistemas adaptativos complexos: concentrar-nos na informação. Quais são as regularidades e onde entram os acidentes e a arbitrariedade?

A INDETERMINAÇÃO DA MECÂNICA QUÂNTICA E DO CAOS

De acordo com a física clássica de um século atrás, o conhecimento exato das leis do movimento e da configuração do universo em qualquer instante de tempo permite, em princípio, predizer a história completa do universo.* Sabemos agora que isto é completamente falso. O universo é quântico, o que significa que, mesmo se sabendo seu estado inicial e as leis fundamentais da matéria, apenas um conjunto de probabilidades para as possíveis e diferentes histórias do universo podem ser calculadas. Além disso, a amplitude desta indeterminação quântica vai bem mais longe do que é discutido usualmente. Muitas pessoas estão familiarizadas com o princípio da incerteza de Heisenberg, o qual proíbe, por exemplo, a especificação exata da posição e do momento** de uma partícula ao mesmo tempo. Enquanto aquele princípio teve grande publicidade (algumas vezes em termos completamente errôneos) durante muitas décadas, a indeterminação que a mecânica quântica exige é raramente mencionada. Consideraremos isto mais adiante.

* Um exemplo é a lei de movimento de Newton, força = massa x aceleração. Conhecidas a força (isto é, sua interação com o "universo") que atua sobre a partícula de massa inercial m , a posição e a velocidade iniciais (a configuração inicial), podemos calcular a aceleração, e depois a velocidade e a posição em qualquer instante de tempo t posterior (sua história futura). (N. do T.)

** O momento (linear) de uma partícula é definido classicamente pelo produto entre a sua massa inercial e a sua velocidade, e pode assumir qualquer valor; na mecânica quântica, o momento é associado com um objeto matemático chamado operador linear hermitiano. Na teoria quântica, em princípio, somente números reais associados com este operador são medidos na experiência. (N. do T.)



Como um sistema adaptativo complexo funciona.

Mesmo quando a aproximação clássica é justificada e a indeterminação quântica correspondente é ignorada, o onipresente fenômeno do caos, no qual o resultado de um processo dinâmico não-linear é tão sensível às condições iniciais que uma minúscula mudança na situação no começo do processo resulta em uma grande diferença no fim, ainda permanece.

Algumas afirmações contemporâneas sobre o determinismo e o caos clássicos foram antecipadas nesta passagem escrita em 1903 pelo matemático francês Henri Poincaré em seu livro *Science and Method** (como é citado por Ivars Peterson em *Newton's Clock*):

Se soubéssemos exatamente as leis da natureza e a situação do universo no momento inicial, poderíamos prever exatamente a situação deste mesmo universo em um momento posterior. Mas mesmo que fosse o caso de as leis da natureza não terem mais qualquer segredo para nós, ainda

* Este livro é um dos clássicos da literatura destinada a divulgar a ciência e seus métodos ao leigo interessado. O autor cita a versão em inglês deste livro, que no original é intitulado *Science et méthode*. (N. do T.)

assim poderíamos saber as condições iniciais apenas *aproximadamente*. Se isto nos permite prever a situação seguinte com a mesma aproximação, é tudo o que exigimos, e deveríamos dizer que o fenômeno foi predito, que ele é governado por leis. Mas não é sempre assim; pode acontecer que pequenas diferenças nas condições iniciais produzam diferenças muito grandes no fenômeno final. Um pequeno erro no primeiro produzirá um erro enorme neste último. A previsão se torna impossível, e temos o fenômeno fortuito.

Um dos trabalhos que chamou a atenção para o caos nos anos 60 foi escrito por um meteorologista, Edward N. Lorenz. De fato, a meteorologia muitas vezes oferece exemplos de caos que vão bem ao ponto. Embora a fotografia por satélite e cálculos que utilizam poderosos computadores tenham tornado a previsão do tempo razoavelmente confiável para muitos propósitos, os boletins meteorológicos ainda não podem dizer corretamente o que a maioria de nós mais quer saber — vai chover ou não *aqui, amanhã?* Exatamente onde passará um determinado sistema de tempestades e quando choverá podem ser perguntas arbitrariamente sensíveis aos detalhes sobre o regime dos ventos e à posição e estado físico das nuvens uns poucos dias, ou mesmo umas poucas horas, anteriores. A menor imprecisão no conhecimento que o meteorologista tem sobre estas informações pode tornar a previsão do tempo de amanhã inútil para planejar o piquenique da empresa.

Como nada pode jamais ser medido com precisão absoluta, o caos dá origem a uma indeterminação efetiva no nível clássico que está além da indeterminação em princípio da mecânica quântica. A interação entre estes dois tipos de imprevisibilidade é um aspecto fascinante e pouco estudado da física contemporânea. O desafio de entender a relação entre a imprevisibilidade quântica e a imprevisibilidade caótica clássica impressionou tanto os editores do *Los Angeles Times* que em 1987 eles publicaram um editorial sobre o assunto! O editorialista apontou para o paradoxo aparente de que alguns teóricos que estudam a mecânica quântica de sistemas que exibem caos no limite clássico tenham sido incapazes de encontrar o tipo caótico de indeterminação superposto ao do tipo quântico.

Felizmente, a questão está agora sendo esclarecida com o trabalho de vários físicos teóricos, incluindo o de um dos meus alunos, Todd Brun. Seus resultados parecem confirmar que para muitos propósitos é útil considerar o caos como um mecanismo que amplifica em níveis macroscópicos a indeterminação inerente à mecânica quântica.

Recentemente tem havido uma porção de trabalhos descuidados

sobre o caos. De um nome utilizado para designar um fenômeno técnico na mecânica não-linear, a palavra foi transformada em uma espécie de expressão vale-tudo que designa qualquer tipo de complexidade ou incerteza, real ou aparente. Por exemplo, quando dou uma palestra pública sobre sistemas adaptativos complexos e menciono o fenômeno talvez uma, ou mesmo nenhuma vez, é quase certo que ao final serei cumprimentado por ter dado uma palestra interessante sobre caos.

Parece ser uma característica do impacto da descoberta científica sobre o mundo literário e sobre a cultura popular que certos itens do vocabulário, interpretados vaga ou incorretamente, sejam muitas vezes os principais sobreviventes da jornada entre a publicação técnica e as revistas populares ou livros de bolso. As qualificações e distinções importantes, e algumas vezes as próprias idéias, tendem a se perder ao longo do caminho. Notem os usos populares de “ecologia” e “salto quântico”, isto para não dizer nada de “campo de energia”, uma expressão da Nova Era. É claro que se pode argumentar que palavras como “caos” e “energia” são anteriores ao seu uso como termos técnicos, mas são os significados técnicos que estão sendo distorcidos no processo de vulgarização, não o sentido original das palavras.

Em face do que parece ser um eficiente mecanismo literário de transformar certos conceitos úteis em clichês sem significado algum, deve-se fazer um esforço para impedir que as várias noções de complexidade tenham o mesmo destino.

Teremos de considerá-las à parte e tentar localizar onde cada uma se aplica.

Entretanto, que tal a palavra “complexo” no termo “sistemas adaptativos complexos” como é usado aqui? Na verdade, “complexo” não tem razão de ter significado preciso nesta frase, que é meramente uma frase convencional. Ainda assim, a presença da palavra implica a crença de que qualquer sistema deste tipo possui pelo menos um certo nível mínimo de complexidade, convenientemente definida.

Simplicidade se refere à ausência (ou quase ausência) de complexidade. Enquanto a primeira palavra é derivada de uma expressão que significa “que já foi dobrado”, a última vem de uma expressão que significa “trançados juntos”. (Note que “plic-” para dobrar e “plex-” para trançado vêm da mesma raiz indo-européia “plek”.)

TIPOS DIFERENTES DE COMPLEXIDADE

O que realmente se quer dizer com simplicidade e complexidade, dois termos opostos? Em que sentido a gravitação einsteiniana é simples

enquanto um peixinho dourado é complexo? Estas não são questões fáceis — não é simples definir “simples”. Provavelmente não há um único conceito de complexidade que possa exprimir adequadamente nossas noções intuitivas do que a palavra deve significar. Pode haver a necessidade de definir diversos tipos diferentes de complexidade, alguns dos quais podem não ter sido ainda concebidos.

Quais são alguns dos casos onde surge a questão da definição de complexidade? Um deles é a preocupação que os cientistas da computação têm sobre o tempo que um computador exige para resolver certo tipo de problema. Para que este tempo não dependa da habilidade do programador, os cientistas focalizam sua atenção sobre a solução que exige o menor tempo possível, o que muitas vezes é chamado “complexidade computacional” do problema.

Todavia, mesmo o tempo mínimo depende ainda da escolha do computador. Tal “dependência do contexto” continua surgindo nas tentativas de definir tipos diferentes de complexidade. Mas o cientista da computação está particularmente interessado no que acontece com um conjunto de problemas similares, exceto no tamanho; além disso, a preocupação principal dele, ou dela, é com o que acontece com a complexidade computacional à medida que o tamanho do problema aumenta, tendendo ao infinito. De que maneira a solução que exige um tempo mínimo depende do tamanho do problema quando este tende ao infinito? A resposta a tal questão pode ser independente dos detalhes do computador. A noção de complexidade computacional tem se mostrado bastante útil, mas não corresponde com exatidão ao que usualmente queremos dizer quando empregamos a palavra complexo, como em: uma história de enredo altamente complexo; ou em: estrutura organizacional complexa. Naqueles contextos, podemos estar mais preocupados com o tempo que uma mensagem exigiria para descrever certas propriedades do sistema em questão do que com o tempo exigido para resolver algum problema com o computador.

Por exemplo, um debate na ciência da ecologia sobre se ecossistemas “complexos”, como as florestas tropicais, são mais ou menos flexíveis do que aqueles comparativamente “simples”, como as florestas de carvalhos e coníferas encontradas no alto das montanhas de San Gabriel atrás de Pasadena, vem se arrastando há décadas. Aqui, flexibilidade significa probabilidade de sobrevivência (ou mesmo a obtenção de benefícios) frente a distúrbios maiores devidos à mudança de clima, fogo ou alguma outra alteração ambiental, de origem humana ou não. Atualmente, os ecologistas que afirmam que até certo ponto o ecossistema mais complexo é o mais flexível parecem estar vencendo o debate. Mas o que querem dizer com simples e complexo? A resposta

está de alguma maneira relacionada com a extensão de uma descrição de cada floresta.

Para chegar a uma noção muito elementar de complexidade de uma floresta, os ecólogos podem contar o número de espécies de árvores existentes em cada tipo (menos que uma dúzia em uma floresta típica do alto das montanhas, na zona temperada, contra centenas em uma floresta tropical nas baixadas). Podem contar também o número de espécies de pássaros ou mamíferos; de novo, a comparação favoreceria bastante as baixadas tropicais. Com insetos os resultados seriam ainda mais espantosos — imagine quantas espécies de insetos deve haver em uma floresta equatorial. (Sempre se pensou que o número seria muito grande, e recentemente as estimativas aumentaram bastante. Começando com o trabalho de Terry Erwin do Instituto Smithsonian, foram realizadas experiências em que todos os insetos de uma única árvore de uma floresta tropical foram mortos e coletados. Descobriu-se que o número de espécies era da ordem de dez vezes o número previamente estimado, e muitas das espécies eram novas para a ciência.)

Não é necessário apenas contar as espécies. Os ecólogos incluiriam também as interações entre os organismos da floresta, como aquelas entre predador e presa, parasita e hospedeiro, polinizador e polinizado, e assim por diante.

GRANULAÇÃO GROSSEIRA

Mas até que nível de detalhes eles contariam? Olhariam para os microorganismos, e mesmo os vírus? Olhariam para as interações sutis assim como para as óbvias? Evidentemente eles teriam de parar em algum lugar.

Portanto, ao definir complexidade é sempre necessário especificar o nível de detalhe com que o sistema é descrito, sendo os detalhes mais finos ignorados. Os físicos chamam isto de “granulação grosseira”. A imagem que o nome inspira é provavelmente a de uma fotografia de alta granulidade. Quando numa fotografia um detalhe é tão pequeno que necessita ser bastante ampliado para ser identificado, a ampliação pode mostrar os grãos fotográficos individuais. Em vez de uma fotografia clara do detalhe, haverá apenas uns poucos pontos que dão uma imagem grosseira deste. No filme de Antonioni *Blow-Up*, o título se refere exatamente a uma ampliação deste tipo. A granulidade de uma fotografia estabelece um limite sobre a quantidade de informação que ela pode fornecer. Se o filme é muito granulado e o melhor que a

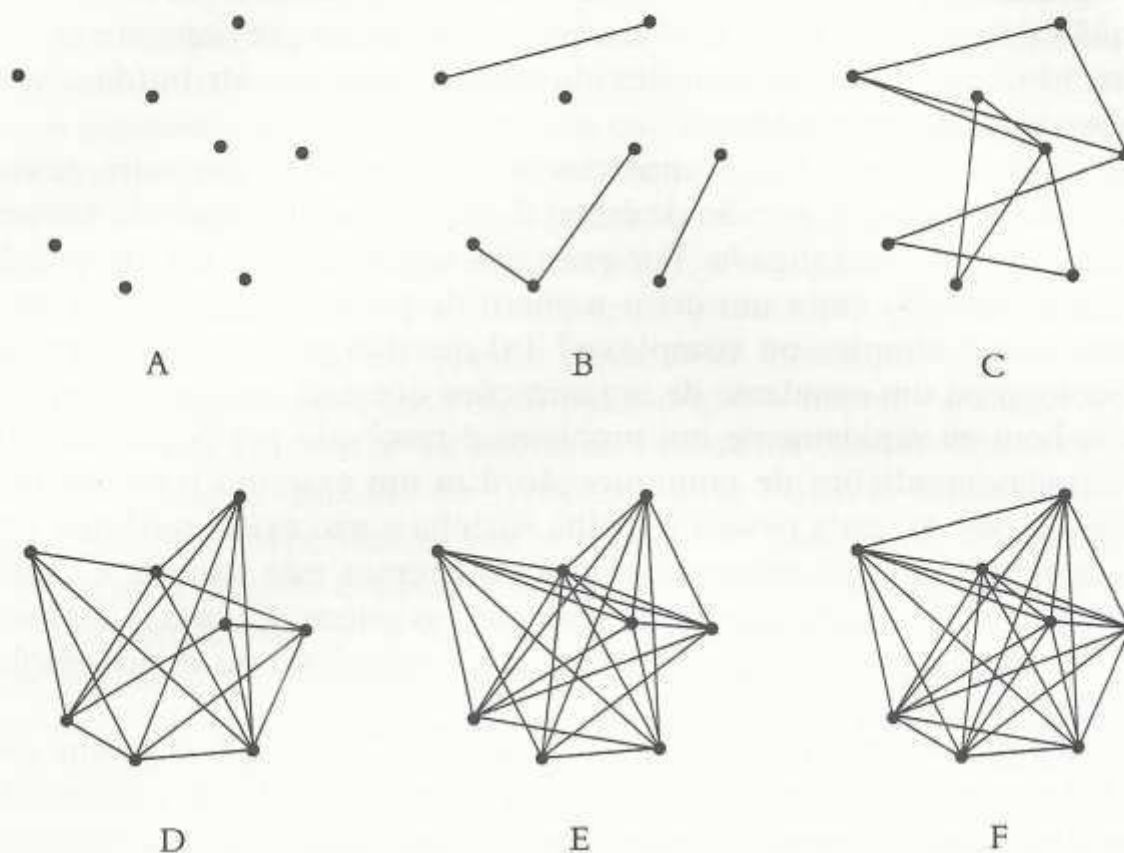
fotografia como um todo pode dar é uma impressão grosseira do que foi fotografado, o filme apresenta uma granulação grosseira. Se um satélite espião tira fotografias de um “complexo” de armas previamente desconhecido, a medida da complexidade que pode ser atribuída a este depende da granulosidade.

Tendo estabelecido a importância da granulação grosseira, temos ainda de enfrentar a questão de como definir a complexidade do sistema que está sendo investigado. Por exemplo, o que caracteriza um padrão de comunicação entre um certo número de pessoas (digamos, N pessoas) como simples ou complexo? Tal questão pode surgir para um psicólogo ou um estudante de organizações que está tentando comparar quanto bem ou rapidamente um problema é resolvido por N pessoas sob diferentes condições de comunicação. Em um extremo (chamaremos este caso de A), cada pessoa trabalha sozinha e não existe qualquer tipo de comunicação. No outro extremo (chamaremos este caso de F), cada pessoa pode se comunicar livremente com as outras. O caso A é obviamente simples. Será o caso F muito mais complexo ou é tão simples quanto o caso A ?

Quanto ao nível de detalhes (granulação grosseira), suponha que todas as pessoas sejam tratadas da mesma forma, não tendo características individuais, e sejam simplesmente representadas em um diagrama como pontos, de tal forma que as posições dos pontos não importam e todos os pontos sejam intercambiáveis. A comunicação entre duas pessoas quaisquer ou é permitida ou não, sem gradações intermediárias, e cada elo de comunicação nos dois sentidos é representado por uma linha (sem direcionalidade) unindo dois pontos. O diagrama resultante é o que os matemáticos chamam “gráfico não dirigido”.

O TAMANHO DA DESCRIÇÃO

Com o nível de detalhe especificado desta forma, é possível explorar o que se quer dizer com complexidade de um padrão de conexões. Primeiro considere o caso de um número pequeno de pontos, digamos oito ($N = 8$). Aqui é fácil desenhar alguns dos padrões, inclusive alguns triviais. Os diagramas da página 48 mostram alguns dos padrões de comunicação possíveis entre oito indivíduos. No caso A , nenhum dos pontos está conectado com qualquer outro. No caso B , alguns dos pontos, mas não todos, têm conexões. No caso C , todos os pontos estão conectados, mas não de todos os modos possíveis. No caso D , as conexões presentes em C estão ausentes, e aquelas ausentes em C estão presentes; D é o que podemos chamar o complemento de C , e vice-versa. Da



Alguns padrões de conexão entre oito pontos.

mesma forma, E e B são complementos um do outro. Assim como F e A: o padrão A não tem conexões, enquanto F tem todas as conexões possíveis. Para quais padrões devemos atribuir uma maior complexidade em relação aos outros?

Todos concordarão que A, que não tem conexões, é simples, e que B, que tem algumas conexões, é mais complexo ou menos simples do que A. Mas o que dizer dos outros? Um caso particularmente interessante é o F. Em uma reação inicial a F poderíamos dizer que é o mais complexo de todos, já que possui a maioria das conexões. Mas será isto razoável? Não é a propriedade de ter todos os pontos conectados tão simples quanto a de não ter nenhum? Talvez F esteja no começo da escala de complexidade junto com A.

Este raciocínio nos traz de volta à sugestão de que pelo menos uma maneira de definir a complexidade de um sistema é fazer uso do tamanho de sua descrição. Então, na verdade, o padrão F seria tão simples quanto o seu complemento, o padrão A, já que a frase “todos os

pontos estão conectados” tem mais ou menos o mesmo tamanho da frase “nenhum dos pontos está conectado”. E, além disso, a complexidade de E não é tão diferente da complexidade de seu complemento, B, já que adicionar a palavra “complemento” não torna a descrição significativamente maior. O mesmo é verdadeiro para D e C. Em geral, padrões complementares terão mais ou menos a mesma complexidade.

Os padrões B e E são evidentemente mais complexos do que A e F, assim como C e D. A comparação de B e E com C e D é mais sutil. Utilizando-se o critério simples do tamanho da descrição, pode parecer que C e D sejam mais complexos, mas se eles realmente o são depende em alguma medida do vocabulário utilizado na descrição.

Antes de ir adiante com a noção de que a complexidade está relacionada com o tamanho da descrição, vale a pena observar que os mesmos diagramas que aplicamos aos padrões de comunicação entre pessoas podem também ser aplicados a uma outra situação, de grande significação hoje em dia na ciência, na tecnologia e nos negócios. Atualmente, os cientistas da computação estão fazendo progressos rápidos na construção e utilização de computadores que empregam o “processamento paralelo”, os quais são muito mais eficientes para resolver certos tipos de problemas do que as máquinas convencionais. Em vez de um único computador gigantesco que resolve um problema passo a passo até o fim, o processamento paralelo utiliza um conjunto de muitas unidades computacionais de pequeno porte, todas operando simultaneamente, com algum padrão de elos de comunicação interligando certos pares de unidades. Aqui podemos novamente fazer a pergunta: o que significa dizer que um padrão de interligações é mais complexo do que outro? Na verdade, foi um físico que projetava um computador de processamento paralelo que me fez esta mesma pergunta anos atrás e renovou meu interesse pelo problema de definição de complexidade.

Consideramos anteriormente a possibilidade de contar o número de espécies, interações, e assim por diante, para definir comunidades ecológicas simples e complexas. Por exemplo, se todos os tipos de árvores que existem na comunidade fossem listadas, o tamanho daquela parte da descrição seria grosseiramente proporcional ao número de espécies. Portanto, também naquele caso a descrição estava sendo efetivamente utilizada como uma medida da complexidade.

A DEPENDÊNCIA DO CONTEXTO

Se a complexidade é definida em termos do tamanho da descrição, então ela não é uma propriedade intrínseca da coisa descrita. Obviamente, o tamanho de uma descrição pode depender de quem ou do que a esteja fazendo. (Isto me lembra o conto de James Thurber, *The Glass in the Field*, em que um pintassilgo dá aos outros pássaros um relato conciso de uma colisão com uma janela de vidro: “Eu estava voando sobre a relva quando de repente o ar se cristalizou na minha frente.”) Qualquer definição de complexidade depende necessariamente do contexto, e é mesmo subjetiva. É claro que o nível de detalhe no qual o sistema está sendo descrito já é de alguma maneira subjetivo — ele depende também do observador ou do equipamento utilizado para fazer a observação. Na verdade, estamos discutindo uma ou mais definições de complexidade que dependem da descrição de um sistema por outro sistema, presumivelmente um sistema adaptativo complexo, que poderia ser um observador humano. Suponha, para os objetivos presentes, que o sistema que faz a descrição é de fato um observador humano.

Para tornar mais refinada a noção de tamanho de uma descrição, deveríamos evitar a descrição de alguma coisa simplesmente apontando para ela; deve ser claro que é tão fácil apontar para um sistema complexo quanto para um simples. Portanto, estamos preocupados com uma descrição que está sendo transmitida para alguém distante. É fácil também dar um nome como “Sam” ou “Judy” para alguma coisa extremamente complicada, tornando sua descrição trivialmente curta. Devemos entrar num acordo prévio sobre a linguagem descritiva e não incluir termos criados com este propósito.

É claro que ainda permanecem muitos tipos de arbitrariedades e subjetividades. O tamanho da descrição variará com a linguagem utilizada, e também com o conhecimento e a compreensão do mundo que aqueles que se comunicam repartem entre si. Por exemplo, se é um rinoceronte que deve ser descrito, a mensagem pode ser encurtada se ambas as partes já sabem qual é o mamífero. Se é a órbita de um asteroide que deve ser descrita, faz muita diferença se ambas as partes sabem ou não a lei da gravitação de Newton e a sua segunda lei do movimento — também pode fazer diferença para a descrição se as órbitas de Marte, de Júpiter e da Terra já são conhecidas por ambas as partes ou não.

CONCISÃO E COMPLEXIDADE RUDIMENTAR

Mas o que acontece se uma descrição é desnecessariamente longa porque se está desperdiçando palavras à toa? Lembro-me da história de

uma professora primária que pediu à sua classe como dever de casa uma composição de trezentas palavras. Um aluno que tinha passado o final de semana brincando conseguiu rabiscar na segunda-feira pela manhã a redação seguinte: "Ontem a cozinha dos vizinhos pegou fogo e coloquei minha cabeça para fora da janela e gritei, 'Fogo! Fogo! Fogo!'" A criança repetiu a palavra "fogo" até que a redação tivesse trezentas palavras. Entretanto, se não fosse por aquela exigência, a criança poderia ter escrito "...gritei 'Fogo!' 280 vezes" e transmitido a mesma mensagem. Portanto, na nossa definição de complexidade estamos preocupados com o tamanho da mensagem mais curta possível que descreve um sistema.

Estes pontos podem ser integrados em uma definição do que pode ser chamado "complexidade rudimentar": o tamanho da mensagem mais curta que descreverá o sistema, para um dado nível de granulosidade grosseira, para alguém distante, empregando uma linguagem, conhecimento e compreensão que ambas as partes repartem (e sabem que repartem) de antemão.

Certas maneiras familiares de descrever um sistema não conduzem a nada parecido com a mensagem mais curta. Por exemplo, se descrevermos as partes de um sistema separadamente (digamos, as peças de um carro ou as células do corpo humano) e também dizemos como o todo é constituído pelas partes, teremos ignorado muitas oportunidades de comprimir a mensagem. Aquelas oportunidades teriam utilizado as similaridades entre as partes. Por exemplo, a maioria das células do corpo humano dividem os mesmos genes e têm muitas outras características comuns, enquanto as células de um dado tecido são ainda mais similares. A descrição mais curta levaria isto em conta.

O CONTEÚDO DE INFORMAÇÃO ALGORÍTMICA

Certos especialistas da teoria da informação utilizam uma quantidade muito parecida com a complexidade rudimentar, embora sua definição seja mais técnica e naturalmente envolva computadores. Eles vislumbram uma descrição em dado nível de granulosidade grosseira que é expressa em uma determinada linguagem e então codificada por algum procedimento padrão de codificação em uma cadeia de dígitos 1 e 0. Cada escolha de 1 ou 0 é conhecida como um "bit". (Originalmente, um acrônimo de "binary digit". Ela é binária porque há apenas duas escolhas possíveis, enquanto com os dígitos usuais do sistema decimal há dez: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.) É com esta cadeia de bits, ou "cadeia de mensagem", que eles se preocupam.

A quantidade que eles definem é chamada “complexidade algorítmica”, “conteúdo de informação algorítmica” ou “randomicidade algorítmica”. Hoje em dia a palavra “algoritmo” se refere a uma regra para calcular alguma coisa, e por extensão a um programa para computar alguma coisa. O conteúdo de informação algorítmica se refere, como veremos, ao tamanho de um programa de computador.

Originalmente, algoritmo significava uma coisa diferente. A palavra soa como se tivesse sido derivada do grego, como “aritmética”, mas, de fato, é apenas o resultado de um disfarce. O “t” foi introduzido em analogia com o “t” de “aritmética”, embora na verdade ele não deva estar ali. A grafia que melhor reflete a etimologia seria “algorismo”. Ela vem do nome do homem cujo livro introduziu o zero na cultura ocidental. O matemático árabe do século IX Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi. O sobrenome indica que sua família era originária da província de Khorezm, ao sul do mar Aral, que é agora parte da nova república do Uzbequistão. Ele escreveu um tratado de matemática cujo título contém a frase árabe “*al jabr*”, que significa “a transposição”, de onde obtemos a palavra “álgebra”. Originalmente, a palavra “algorismo” referia-se ao sistema de notação decimal, que se pensa ter passado da Índia para a Europa principalmente por meio da transposição para o latim da “álgebra” de al-Khwarizmi.

O conteúdo de informação algorítmica (CIA) foi introduzido nos anos 60 por três autores, trabalhando de forma independente. Um era o grande matemático russo Andrei N. Kolmogorov. Um outro era um americano, Gregory Chaitin, que tinha apenas 15 anos nesta época. O terceiro era outro americano, Ray Solomonoff. Cada um deles pressupõe um computador idealizado, capaz de efetuar todas as tarefas, essencialmente infinito em sua capacidade de armazenar informações (ou então finito, mas capaz de adquirir capacidade adicional se necessário). Eles então consideram uma cadeia particular de mensagem e querem saber quais os programas que farão com que o computador imprima a cadeia e pare de computar. O tamanho do programa mais curto é o CIA da cadeia.

Vimos que a arbitrariedade ou a subjetividade é inerente à definição de complexidade rudimentar, surgindo a partir de fontes como a granulação grosseira e a linguagem utilizada para descrever o sistema. No CIA, fontes adicionais de arbitrariedade foram introduzidas, a saber: o procedimento particular de codificação que transforma a descrição do sistema em uma cadeia de bits, e os hardwares e softwares particulares associados com o computador.

Nenhuma destas arbitrariedades perturba muito os teóricos matemáticos da informação porque usualmente eles estão preocupados

com os limites nos quais a arbitrariedade finita se torna insignificante. Eles gostam de considerar seqüências de cadeias de bits similares de tamanho crescente, e estudar como o CIA se comporta à medida que o tamanho se aproxima do infinito. (Isto é remanescente da maneira como os cientistas da computação gostam de tratar a complexidade computacional de uma seqüência de problemas similares à medida que o tamanho do problema se aproxima do infinito.)

Retornemos ao computador idealizado que utiliza o processamento paralelo e é composto por unidades, representadas por pontos, ligadas entre si por elos de comunicação representados por linhas. Aqui, Kolmogorov, Chaitin e Solomonoff não estariam muito interessados no CIA dos vários padrões possíveis de comunicação entre uns meros oito pontos. Em vez disso, fariam perguntas sobre as conexões entre N pontos à medida que N tende para o infinito. Sob estas condições, certas diferenças no comportamento do CIA (por exemplo, entre o padrão mais simples de comunicação e o mais complexo) tornam pequenas quaisquer diferenças que resultem do uso de um computador em vez de um outro, um procedimento de codificação em vez de um outro, ou mesmo de uma linguagem em vez de outra. Um teórico da informação se preocupa se um certo CIA cresce ou não à medida que N se aproxima do infinito, e, se é o caso, com que rapidez. Ele, ou ela, não está muito preocupado com as diferenças comparativamente desprezíveis entre um CIA e um outro que são introduzidas pelos vários tipos de arbitrariedade do equipamento descritivo.

Podemos aprender uma lição interessante destas teorias. Mesmo que não nos limitemos aos sistemas que se tornam infinitamente grandes, é importante compreender que discussões sobre simplicidade e complexidade tendem a se tornar mais e mais relevantes à medida que as cadeias de bits se tornam cada vez mais longas. No extremo oposto, digamos para uma cadeia de um bit, é evidentemente destituído de sentido a diferenciação entre simplicidade e complexidade.

A DEFINIÇÃO DE INFORMAÇÃO

É tempo de deixar clara a distinção entre conteúdo de informação algorítmica e informação, tal como é discutido, por exemplo, por Claude Shannon, fundador da teoria moderna da informação. Basicamente, a informação está interessada na seleção de alternativas, que é expressa de modo mais simples se estas alternativas podem ser reduzidas a uma seqüência de escolhas binárias, cada uma das quais entre duas alternativas igualmente prováveis. Por exemplo, se você sabe que um lançamen-

to de moedas resultou em coroa em vez de cara, você terá aprendido um bit de informação. Se você sabe que três lançamentos sucessivos de moeda resultaram em cara, depois coroa, depois cara novamente, você terá adquirido três bits de informação.

O jogo das Vinte Perguntas proporciona uma bela oportunidade de expressar os mais variados tipos de informação na forma de escolhas binárias sucessivas entre alternativas igualmente prováveis, ou tão próximas disso quanto a pessoa que faz as perguntas pode formular. Ele é jogado por duas pessoas, das quais a primeira imagina alguma coisa que a segunda tem de adivinhar em vinte perguntas ou menos, após ter sido informada se é um animal, vegetal ou mineral. As questões têm de ser respondidas com um “sim” ou com um “não”, cada resposta é uma escolha binária. Para o segundo jogador, é vantajoso fazer perguntas que sejam o mais próximo possível de uma escolha entre duas alternativas igualmente prováveis. Por exemplo, sabendo que a coisa é um mineral, a pessoa que pergunta fará mal em perguntar diretamente se é o diamante Hope ou não. Em vez disso, ele ou ela deveria perguntar: “Ela é natural (em oposição a ser manufaturada ou modificada por humanos)?” Aqui, as probabilidades de resposta positiva ou negativa são quase iguais. Se a resposta é “não”, a próxima questão poderia ser: “Ela é um objeto específico ou uma classe de objetos?” Quando as probabilidades de uma resposta sim ou de uma resposta não são iguais, cada questão fornecerá um bit de informação (o máximo que tal questão pode fornecer). Vinte bits de informação correspondem a uma escolha entre 1.048.576 alternativas igualmente prováveis, que é o produto da multiplicação de 20 fatores 2. Este produto é o número das diferentes cadeias de bits de tamanho 20.

Observe que as cadeias de bits são empregadas de modo diferente dependendo se o CIA ou a informação estejam sendo discutidos ou não. No caso do conteúdo de informação algorítmica, uma cadeia de um único bit (de preferência uma longa) é considerada, e suas regularidades internas são medidas pelo tamanho (em bits) do programa mais curto que fará com que um computador padrão imprima a cadeia de bits e então pare. Em contraste, no caso da informação podemos considerar uma escolha entre todas as cadeias de bits diferentes de um determinado tamanho. Se elas são todas igualmente prováveis, seu tamanho é o número de bits de informação.

Podemos lidar também com um conjunto de cadeias de bits, por exemplo, cadeias igualmente prováveis, cada uma com um valor particular do CIA. Neste caso é muitas vezes útil definir uma quantidade de informação, determinada pelo número de cadeias, assim como o valor médio sobre o conjunto do CIA.

COMPRESSÃO E CADEIAS RANDÔMICAS

O conteúdo de informação algorítmica tem uma propriedade muito curiosa. Para discuti-la, temos de examinar primeiro a “compressibilidade” relativa das diferentes cadeias de mensagens. Para uma cadeia de bits de um determinado tamanho (digamos, uma muito grande) podemos perguntar quando a complexidade algorítmica é baixa e quando ela é alta. Se uma cadeia tem a forma 110110110110110 ...110, ela pode ser produzida por um programa muito curto que manda imprimir 110 um certo número de vezes. Uma cadeia de bits deste tipo tem um CIA muito baixo, embora seja longa. Isto significa que ela é altamente compressível.

Em contraste, pode ser mostrado matematicamente que a maioria das cadeias de bits de um determinado tamanho são incompressíveis. Em outras palavras, o programa mais curto que produzirá uma destas cadeias (e depois faz o computador parar) é aquele que diz PRINT (imprima) seguido pela própria cadeia. Tal cadeia tem o máximo de CIA para o seu tamanho. Não há regra, não há algoritmo, não há teorema que simplifique a descrição desta cadeia de bits e permita que ela seja descrita por uma mensagem mais curta. Ela é chamada uma cadeia “randômica” precisamente porque não contém regularidades que permitam que seja comprimida. O fato de que o conteúdo de informação algorítmica seja máximo para cadeias randômicas explica o nome alternativo de randomicidade algorítmica.

A NÃO-COMPUTABILIDADE DO CIA

A propriedade curiosa é que o CIA não é computável. Embora a maioria das cadeias de bits sejam randômicas, não há maneira de saber exatamente quais as que o são. De fato, de modo geral, não podemos ter certeza de que o CIA de uma determinada cadeia não seja mais baixo do que pensamos. Isto porque sempre pode haver um teorema que nunca acharemos, um algoritmo que nunca descobriremos, que permitiria que a cadeia fosse ainda mais comprimida. Mais precisamente, não há procedimento para encontrar todos os teoremas que permitiriam uma maior compressão. Isto foi provado há alguns anos por Greg Chaitin em um trabalho que é remanescente de uma parte de um resultado famoso obtido por Kurt Gödel.

Gödel era um lógico matemático que surpreendeu o mundo da matemática no começo dos anos 30 com suas descobertas sobre as limitações dos sistemas de axiomas na matemática. Até sua época, os matemáticos acreditavam que era possível formular um sistema de

axiomas para a matemática que poderia se provar sólido e ser utilizado em princípio para demonstrar a verdade ou a falsidade de todas as proposições matemáticas. Gödel mostrou que nenhum destes objetivos pode ser alcançado.

Resultados negativos como este representam muitas vezes avanços monumentais em matemática ou na ciência. Podemos compará-lo com a descoberta devida a Einstein de que não pode haver definição absoluta de espaço e tempo, mas apenas uma combinação de espaço-tempo. Na verdade, Einstein e Gödel eram bons amigos. No começo dos anos 50, costumava vê-los juntos indo para o trabalho no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, Nova Jersey. Formavam uma dupla de aparência estranha, como Mutt e Jeff.* Gödel era tão pequeno que fazia Einstein parecer bastante alto. Discutiriam eles profundas questões físicas ou matemáticas? (Gödel trabalhava de vez em quando com problemas relacionados com a relatividade geral.) Ou seria sua conversa principalmente sobre o tempo e seus problemas de saúde?

A parte das conclusões de Gödel pertinente à nossa discussão é aquela sobre indecidibilidade: dado qualquer sistema de axiomas para a matemática, haverá sempre proposições baseadas nestes axiomas que serão indecidíveis. Em outras palavras, há proposições que não podem, em princípio, ser demonstradas como verdadeiras ou falsas.

O tipo mais célebre de proposição indecidível é uma afirmação independente dos axiomas. Podemos usar esta proposição para aumentar o conjunto de axiomas ou introduzindo este tipo de afirmação como um novo axioma, ou introduzindo o seu oposto.

Mas há outras proposições indecidíveis que têm um caráter diferente. Por exemplo, suponha que uma proposição indecidível relativa aos números inteiros positivos seja da seguinte forma: "Todo número par maior do que 2 tem a seguinte propriedade..." Se houvesse alguma exceção a tal proposição, com tempo suficiente, e testando todos os números pares (4, 6, 8, 10, ...) um por um, até encontrar um número que não possuísse a propriedade em questão, poderíamos em princípio descobri-la. Isto desmentiria imediatamente a proposição, mas também contrariaria sua indecidibilidade, já que indecidibilidade significa precisamente que a proposição não pode ser provada ou desmentida. Assim, *não há exceções* a esta proposição. No sentido ordinário da palavra "verdadeiro", a proposição é verdadeira.

Podemos tornar isto mais concreto considerando uma proposição que nunca foi provada, após séculos de esforços, embora nenhuma exceção tenha sido encontrada. A proposição é a conjectura de Goldbach que afirma que todo número par maior do que 2 é a soma de dois

* Personagens de quadrinhos. (N. do T.)

números primos. Um número primo é um número maior do que 1 que não é divisível por qualquer número exceto por ele próprio e 1. Os primeiros números primos são portanto: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31 e 37. É fácil ver a partir desta lista como todo número par entre 4 e 62 pode ser expresso em pelo menos uma forma como a soma de dois números primos. Cálculos de computador verificaram que todo número par até um número inacreditavelmente grande tem a mesma propriedade. Entretanto, tais cálculos não podem *provar* a conjectura, que poderia sempre falhar para algum número par ainda maior. Apenas uma demonstração matemática rigorosa pode transformar a conjectura em um teorema demonstrado.

Não há razão para acreditar que a conjectura de Goldbach seja indecidível, mas suponhamos que seja. Então a conjectura seria verdadeira, embora não pudesse ser demonstrada, porque não pode haver exceção a ela. A existência de qualquer número par maior do que 2 que não é a soma de dois números primos desmentiria a conjectura e portanto contradiria sua indecidibilidade.

O fato de tais teoremas, verdadeiros mas indemonstráveis, estarem sempre à espreita significa, como Chaitin demonstrou, que pode haver um que permitirá que uma cadeia de mensagem longa seja comprimida quando pensamos que ela é incompressível, ou seja, mais comprimida ainda quando pensamos que encontramos o programa mais curto que fará com que o computador imprima a mensagem e então pare. Assim, em geral, não podemos ter certeza sobre o valor do conteúdo de informação algorítmica; podemos apenas estabelecer um limite superior para ele, um valor que não pode ser ultrapassado. Como o valor pode estar abaixo do limite, o CIA é não computável.

A propriedade da não computabilidade pode ser estranha, mas é uma propriedade diferente que nos impede de usar o conteúdo de informação algorítmica para definir complexidade. Embora o CIA seja útil para introduzir noções também úteis como granulação grosseira, compressibilidade de cadeias de mensagem e o tamanho de uma descrição gerada pelo sistema observador, ele tem realmente uma falha muito grave: o nome alternativo randomicidade algorítmica revela por quê. O conteúdo de informação algorítmica é o maior para cadeias randômicas. Ele é uma medida da randomicidade, e randomicidade não é o que usualmente queremos dizer com complexidade, seja no discurso ordinário seja na maioria dos modos de emprego científicos. Assim, o CIA não é a complexidade verdadeira ou efetiva.

Entretanto, acontece que se exige cuidado quando se discute randomicidade porque a palavra nem sempre significa a mesma coisa. Tornei-me consciente deste perigo oculto há bastante tempo, em meus contatos com a Corporação RAND.

CAPÍTULO 4

RANDomicidade

Nos anos 50, quando fui trabalhar no Caltech pela primeira vez, eu precisava de um trabalho de consultoria para pagar algumas contas. Aos professores do Caltech era permitido dar consultoria uma vez por semana, e sondei então meus colegas para descobrir quais eram as possibilidades. Um ou dois sugeriram a Corporação RAND, localizada em Santa Monica, perto do famoso píer e de Muscle Beach.

A Corporação RAND tinha começado, logo após o término da Segunda Guerra Mundial, com o projeto RAND da Força Aérea (que dizem ser o acrônimo para pesquisa e nenhum desenvolvimento).^{*} Ela tinha sido criada para aconselhar a Força Aérea dos EUA em questões como adaptar a estratégia à missão (isto é, às tarefas designadas ao serviço) e planejar métodos racionais de aquisições de material. Depois de um tempo, seu papel foi ampliado para incluir aconselhamento ao governo sobre uma variedade de assuntos, muitos deles relacionados com a estratégia de defesa. O projeto RAND continuou a ser importante, mas fornecia apenas uma parte do suporte financeiro da organização, que se tornou uma organização não-lucrativa e passou a incluir projetos civis de muitos tipos. A RAND emprega especialistas em muitos campos, incluindo a ciência política, a economia, a física, a matemática e a pesquisa operacional.

O departamento de física, constituído em sua maior parte por teóricos, contratou-me como consultor e comecei a ganhar dinheiro fazendo pesquisa não-classificada.^{**} Três de nós do Caltech formamos um transporte solidário e passávamos toda quarta-feira na RAND.

^{*} Em inglês, RAND é o acrônimo de Research and Development (pesquisa e desenvolvimento). (N. do T.)

^{**} No jargão da burocracia americana, um projeto não-classificado significa um projeto que não é secreto. (N. do T.)

O SIGNIFICADO DE “RANDÔMICO”*

Uma das coisas que lembro bem das minhas visitas iniciais à RAND era a pequena pilha de relatórios recentemente produzidos que me era entregue para que pudesse me familiarizar com alguns dos trabalhos em andamento. Um dos trabalhos da pilha era a “Tabela RAND de números randômicos”, que era sem dúvida muito útil, embora não muito excitante como leitura (entretanto, me disseram que o subtítulo, “e 100 mil desvios normais”, fez com que algumas bibliotecárias a classificassem como psicologia do anormal).

O que achei interessante sobre o relatório era um pequeno pedaço de papel (um “folheto”) que escapuliu dentre as páginas e caiu ao chão. Apanhei-o e descobri que era uma errata. Os matemáticos da RAND estavam fazendo correções nos números randômicos! Estariam eles descobrindo erros randômicos nos números randômicos? Por um longo tempo considerei este incidente como apenas mais uma cena na comédia humana, mas mais tarde, ao especular sobre o assunto, focalizei minha atenção sobre um fato importante: mesmo para os matemáticos e cientistas a palavra “randômico” significa diversas coisas diferentes.

Do jeito que temos utilizado a palavra, aplicada por exemplo a uma única cadeia de mil bits,** randômico significa que a cadeia é incompressível. Em outras palavras, ela é tão irregular que não há maneira de expressá-la de forma mais curta. Entretanto, um segundo significado é que ela tenha sido gerada por um processo randômico, isto é, por um processo ao acaso tal como o lançamento de uma moeda, onde cada cara vale 1 e cada coroa 0. Agora, estes dois significados não são os mesmos. Uma seqüência de mil lançamentos de moedas *poderia* produzir uma seqüência de mil caras, representada por uma cadeia de bits correspondendo a mil dígitos 1, o que está tão longe de ser uma cadeia randômica de bits quanto possível. É claro que uma seqüência toda de caras não é em absoluto provável. De fato, sua chance de acontecer é 1 sobre um número muito grande com três centenas de dígitos. Como a maioria das cadeias de bits são incompressíveis (randômicas) ou quase assim, conjuntos formados por mil lançamentos muitas vezes conduzirão a cadeias randômicas de bits, *mas não sempre*. Uma maneira de evitar a confusão seria referir-nos aos processos ao acaso como “estocásticos” e

* Em estatística, um processo de seleção é dito randômico se cada um dos elementos de um conjunto tem probabilidade igual de ser escolhido. A palavra randômico deriva do germânico, foi incorporada ao francês antigo e depois ao inglês medieval, não tendo portanto relação alguma com a Corporação RAND. (N. do T.)

** Em computação, um bit é a unidade básica de informação que resulta da escolha entre duas alternativas. Do inglês, (bi)nary digi(t), dígito binário, já que as duas alternativas são representadas pelos dígitos 0 e 1. (N. do T.)

não como randômicos, reservando o último termo principalmente para seqüências incompressíveis.

Mas o que realmente significa randômico na tabela RAND de números randômicos? Por que deveria a tabela vir acompanhada de uma errata? E, em primeiro lugar, para que serve uma tabela de números randômicos?

Em 1956 e 1957, uma das atividades do departamento de física da RAND era um projeto não classificado com aplicações à astrofísica, que exigia um cálculo que utilizava física bastante elementar. Decidi realizá-lo recebendo alguma ajuda de outro consultor, um velho amigo chamado Keith Brueckner. Parte do cálculo envolvia a efetuação de um par de somas bastante difíceis, e um dos mais interessantes físicos da RAND, Jess Marcum, ofereceu-se para realizá-las com o que é conhecido como método de Monte Carlo, utilizando a tabela de números randômicos.

NÚMEROS RANDÔMICOS E O MÉTODO DE MONTE CARLO

O método era muito adequado a Jess porque, além de físico, ele era um jogador. Em sua juventude, Jess havia ganho bastante dinheiro nos cassinos jogando vinte-e-um. Jess utilizava o “método do estudante”, apostando pouco na maioria das jogadas, quando as probabilidades eram levemente contrárias a ele, e então pesadamente quando as probabilidades eram a seu favor, por exemplo, quando todas as cartas que valem dez (o dez e as figuras) estavam em uma metade do baralho. Este método de jogo era possível somente enquanto um único baralho estava sendo usado. Depois de um tempo, todos os cassinos reajustaram seus procedimentos (adaptando-os aos “estudantes”) e começaram a utilizar muitos baralhos ao mesmo tempo. Jess passou para outros interesses.

Em um dado momento, ele pediu uma licença de várias semanas à RAND para apostar nos cavalos. Seu método consistia em atribuir um peso à opinião dos cotadores não-oficiais de apostas. Jess não se pretendia um especialista em cavalos, ele simplesmente estudava os boletins de corridas para comparar as previsões de cada cotador com os resultados reais. Ele seguia então o conselho dos cotadores bem-sucedidos. Entretanto Jess acrescentava um outro truque engenhoso. Imediatamente antes de cada páreo, ele conferia a “pedra” para ver se as cotações oficiais das apostas (que refletiam as apostas recebidas até o momento) correspondiam àquelas dos bons cotadores. Se elas não correspondessem, isto significava que a multidão estava seguindo o conselho dos maus cotadores. Jess se lançava ao intervalo entre os prognósti-

cos oficialmente cotados e os dos melhores cotadores, apostando pesadamente. Desta maneira ele ganhara um dinheiro seguro na pista de corridas. Mas, depois de um tempo, concluiu que seu salário na RAND pagava pelo menos a mesma coisa com menor risco, e assim ele voltou ao trabalho. E desta maneira aconteceu o fato de Jess estar disponível para ajudar-me.

O método de Monte Carlo de efetuar somas é aplicado quando há um conjunto de quantidades realmente grande a ser adicionadas; é dada uma regra (um algoritmo!) para calcular a primeira quantidade a partir do número 1, a segunda a partir do número 2, a terceira a partir do número 3, e assim por diante; a regra é tal que a quantidade varia suavemente de um número para o próximo; o cálculo de cada quantidade a partir do número correspondente é longo e tedioso, de modo que não é desejável fazer mais cálculos do que o necessário. (Nos dias de hoje, com os poderosos e velocíssimos computadores facilmente disponíveis, muitas destas somas são calculadas diretamente, embora os computadores de 35 anos atrás exigissem truques como o do método de Monte Carlo.)

Suponha que temos de adicionar 100 milhões de quantidades a partir do número correspondente que varia, é claro, de 1 a 100 milhões. Para utilizar a aproximação de Monte Carlo, usamos uma tabela de números randômicos para obter, digamos, 5.000 números entre 1 e 100 milhões, escolhidos ao acaso. Em cada um dos 5.000 casos, todos os números entre 1 e 100 milhões têm igual probabilidade de serem sorteados. Calculamos então as quantidades correspondentes aos 5.000 números e as somamos, considerando-as como uma amostra representativa das 100 milhões de quantidades a serem adicionadas. Finalmente, multiplicamos o resultado por 100 milhões divididos por 5.000 (isto é, 20 mil). Deste modo, aproximamos nosso longo cálculo por um muito mais curto.

RANDÔMICO OU PSEUDO-RANDÔMICO?

Supõe-se que a tabela de números randômicos seja um conjunto de números inteiros entre um e algum valor fixo muito grande, com cada número do conjunto escolhido por meio de um processo ao acaso em que todo número que dele participa tem a mesma probabilidade de ser escolhido. De fato, tal tabela não é usualmente gerada desta maneira, ela é na verdade uma tabela de números pseudo-randômicos! Estes são gerados por um computador que utiliza alguma regra matemática, mas tão confusa que se supõe simular um processo ao acaso (por exemplo, pode

ser utilizada uma regra que seja caótica no sentido técnico). A listagem de números resultante pode então ser testada para verificar se satisfaz alguns dos critérios estatísticos que uma listagem obtida por um processo aleatório real deve satisfazer na maioria dos casos.* No caso da tabela RAND, seriam os números realmente pseudo-randômicos? Teria uma verificação de última hora revelado que um dos tais critérios não era suficientemente preenchido? Por que uma errata teve de ser publicada? Acontece que as respostas a estas questões são negativas. Afinal de contas, uma tabela de números randômicos *pode* ser gerada por um processo verdadeiramente estocástico, por exemplo, pode-se utilizar um fenômeno quântico. De fato, a tabela RAND foi preparada de uma maneira estocástica, utilizando o ruído eletrônico de um tubo de vácuo. Mais ainda, a errata referia-se a 100 mil desvios normais e não à própria tabela dos números randômicos! O mistério que era tão instrutivo não era mistério nenhum. Os métodos estocásticos requerem uma grande quantidade de trabalho, todavia é mais conveniente deixar um computador gerar uma seqüência utilizando uma regra determinística e depois assegurar-se de que as regularidades não desejadas resultantes na seqüência sejam comparativamente inofensivas nas situações em que os números serão utilizados. Ainda assim, a experiência mostra que utilizar tais seqüências pseudo-randômicas como se estas fossem randômicas pode ser perigoso.

Li recentemente que um conjunto de número pseudo-randômicos utilizado em numerosos laboratórios mostraram-se seriamente não-randômicos. Como conseqüência, certos tipos de cálculos realizados com aqueles números estavam grosseiramente errados. Este incidente pode servir para lembrar-nos de que seqüências de números que surgem de processos determinísticos caóticos ou quase caóticos podem ter uma quantidade considerável de regularidades.

REGULARIDADES NAS FLUTUAÇÕES DE PREÇOS

Algumas vezes, seqüências que eram consideradas randômicas mostraram-se pseudo-randômicas. Por exemplo, durante anos muitos economistas neoclássicos pregaram que as flutuações de preço no mercado finan-

* Um exemplo de gerador de números pseudo-randômicos é dado pela regra $X_n = aX_{n-1} + c$, módulo M , que nos diz que o n -ésimo valor de X é igual ao valor anterior multiplicado por uma constante a , somado com outra constante c , e o resultado dividido por M . Partindo de um valor inicial X_0 , e escolhendo um valor de M suficientemente grande (M é da ordem de 2^{23} quando utilizamos um computador), a regra gera uma seqüência de números cujo período de repetição é tão grande que a seqüência dá a impressão de ser constituída por números ao acaso. (N. do T.)

ceiro em torno dos valores ditados pelos fundamentos do mercado constituem uma “caminhada randômica”,* um processo estocástico. Ao mesmo tempo, a orientação sobre investimentos de mercado tem sido dada pelos “especialistas em gráficos” que examinam exaustivamente as sinuosidades nos gráficos de preços versus tempo, e acham que podem obter destas sinuosidades previsões melhores do que as normais sobre a alta e a baixa dos preços em um futuro próximo. Uma vez li um artigo de um economista que expressava sua fúria ante a própria idéia de alguém pretender utilizar tal evidência a despeito da insistência dos economistas de que as flutuações não significam nada além de um processo ao acaso.

Mas agora foi demonstrado convincentemente que a idéia de processo ao acaso está errada. Estas flutuações são, na verdade, pseudo-randômicas, como no caos determinístico; em princípio, elas contêm regularidades suficientes para que se possa fazer dinheiro a partir delas. Mas isto não significa que toda a panacéia financeira oferecida pelos especialistas em gráficos darão a você uma fortuna; muitos de seus conselhos são provavelmente inúteis. Mas a idéia de que as flutuações de preço são mais do que um processo ao acaso não é em si mesma maluca, como aquele economista furioso acreditava. (Doyne Farmer e Norman Packard, dois físicos que pertencem à família do Instituto Santa Fé, abandonaram seus trabalhos em pesquisa científica e abriram uma firma de investimentos. Eles trabalhavam na teoria determinística do caos e dos processos quase caóticos. Passaram depois a estudar sistemas adaptativos baseados em computadores, como redes neurais e algoritmos genéticos descritos no capítulo 20. Agora utilizam sistemas como estes para descobrir regularidades nas flutuações dos mercados financeiros (especialmente mudanças na volatilidade) e investem de acordo. Eles começaram praticando com dinheiro de mentira e depois passaram a investir fundos reais providenciados por um grande banco. Até agora, eles estão indo muito bem.)

Já encontramos três usos técnicos diferentes da palavra randômico:

1. Uma cadeia randômica de bits é aquela que é tão irregular que não existe regra para encurtar sua descrição.

* A “caminhada randômica” é um problema formulado em estatística que permite a dedução de um tipo particular de distribuição estatística, a chamada distribuição binomial. Em uma dimensão, ele é formulado da seguinte maneira: um bêbado começa sua caminhada a partir de um poste de luz ($x = 0$). Cada passo que ele dá tem o mesmo comprimento l . No entanto, ele está tão bêbado que o sentido de cada um de seus passos tem igual probabilidade de ser para a esquerda ou para a direita, independente do passo anterior. Depois de N passos, qual a probabilidade de que sua distância ao poste seja $x = ml$? Aqui m é um número inteiro entre $-N$ e N . A resposta a este problema leva à distribuição binomial. (N. do T.)

2. Um processo randômico é um processo ao acaso ou estocástico. Ao gerar longas cadeias de bits de determinado tamanho, o processo produzirá muitas vezes cadeias randômicas, e completamente incompressíveis; algumas vezes, produzirá algumas que contêm poucas regularidades, de modo que estas são de alguma forma compressíveis, e muito ocasionalmente, algumas que são extraordinariamente regulares, altamente compressíveis, e absolutamente não-randômicas.
3. Uma tabela de números randômicos é usualmente gerada por um processo pseudo-randômico — um processo computacional determinístico que na verdade não utiliza a aleatoriedade, mas é tão confuso (por exemplo, caótico) que para muitos propósitos simula um processo estocástico razoavelmente bem, e satisfaz alguns dos critérios estatísticos que um processo estocástico usualmente satisfaria. Quando tais processos pseudo-randômicos são utilizados para gerar cadeias de bits, estas se parecem muito com os resultados de um processo gerador aleatório.

SHAKESPEARE E OS MACACOS PROVERBIAIS

Agora estamos prontos para discutir por que a randomicidade algorítmica, ou conteúdo algorítmico de informação, não casa completamente com nossa idéia do que é complexidade. Considere os famosos macacos como datilógrafos, os quais supomos que batam as várias teclas de uma maneira estocástica, com chance igual de escrever qualquer símbolo ou um espaço em cada batida. Duvido que macacos de verdade se comportem desta maneira, mas para os nossos propósitos isto não importa. A questão é: quais são as chances de que os macacos, num certo período de tempo, datilografem os trabalhos de Shakespeare (ou então todos os livros do Museu Britânico — a parte agora chamada Biblioteca Britânica). Obviamente, há uma chance não nula de que, se certo número de macacos datilografasse individualmente um número suficientemente grande de páginas, o texto total incluiria uma passagem relacionada com as obras de Shakespeare (digamos a Edição Fólío).^{*} Entretanto, esta chance é inconcebivelmente pequena. Se todos os macacos do mundo datilografassem oito horas por dia durante 10 mil anos, a chance de que o texto resultante incluiria uma parte coerente com a Edição Fólío de Shakespeare é completamente desprezível.

Em um conto de Russell Maloney chamado *Inflexible Logic*, que

^{*} Referência às edições em fólío de 1623, 1632, 1663 e 1685 publicadas sob o título *Mr. William Shakespeare's Comedies, Histories, and Tragedies*. (N. do T.)

apareceu na revista *The New Yorker* alguns anos atrás, seis chimpanzés começaram a datilografar sistematicamente os livros do Museu Britânico, um após outro, sem hesitações ou erros. Entretanto, aqueles símios tiveram um triste fim; um cientista os matou para preservar sua concepção das leis das probabilidades. Em sua agonia de morte, o último chimpanzé “foi pisoteado antes de sua máquina de escrever. Dolorosamente, com sua mão esquerda ele tirou da máquina a última página já acabada do *Florio* de Montaigne. Tateando para pegar uma folha limpa, ele a inseriu na máquina, e datilografou com um dedo ‘A CABANA DO PAI TOMÁS, de Harriet Beecher Stowe. Cap...’ Então ele também morreu.”

Considere um macaco do tipo proverbial, mas que não lê *The New Yorker*, datilografando um material igual em comprimento à Edição Fólho, e compare o produto típico daquele macaco com a obra de Shakespeare. Qual delas tem maior conteúdo de informação algorítmica? Obviamente, é o trabalho do macaco. Por meio de um processo aleatório (o segundo dos nossos significados de randômico), é extremamente provável que o macaco produza uma seqüência randômica ou quase randômica de símbolos (no sentido da primeira definição de randômico). Se o trabalho do macaco é codificado de algum modo padrão como uma cadeia de bits, as chances de que esta cadeia tenha randomicidade algorítmica máxima, ou quase máxima, para uma cadeia de seu tamanho são excelentes. Os trabalhos de Shakespeare são obviamente menos randômicos. As regras da gramática inglesa, a grafia (a despeito do uso desastrado por parte de Shakespeare de um sistema já por si só desastrado), precisam fazer sentido, e muitos outros fatores contribuem para a não-randomicidade no texto de Shakespeare, dando assim a ele um conteúdo de informação algorítmica (ou randomicidade algorítmica) muito menor do que qualquer provável e igualmente longa passagem datilografada pelos macacos. Tudo isto é verdade para qualquer autor de língua inglesa; e não levamos ainda em conta a unicidade de Shakespeare!

COMPLEXIDADE EFETIVA

Evidentemente, o CIA ou randomicidade algorítmica, embora seja algumas vezes chamado complexidade algorítmica, não corresponde ao que se quer dizer com complexidade na maioria das situações. Para definir complexidade efetiva, precisamos de algo bastante diferente de uma quantidade que atinge o seu máximo em cadeias randômicas. De fato, são somente os aspectos não-randômicos de um sistema ou de uma

cadeia que contribuem para a sua complexidade efetiva, a qual pode ser grosseiramente caracterizada como o tamanho de uma descrição concisa das regularidades daquele sistema ou cadeia. A complexidade rudimentar e o CIA não correspondem ao que usualmente entendemos por complexidade porque elas se referem ao tamanho da descrição concisa de todo o sistema ou cadeia, incluindo todos os seus aspectos randômicos, e não apenas as regularidades.

Para discutir com maior abrangência o conceito de complexidade efetiva, é essencial examinar em detalhe a natureza dos sistemas adaptativos complexos. Veremos que seu aprendizado ou evolução exige, entre outras coisas, a habilidade de distinguir até certo ponto o randômico do regular. A complexidade efetiva é então relacionada com a descrição das regularidades de um sistema pelo sistema adaptativo complexo que o está observando.

CAPÍTULO 5

UMA CRIANÇA APRENDENDO UMA LÍNGUA

Quando minha filha estava aprendendo a falar, uma de suas primeiras frases foi “papaizinho vai bi-bi”, que ela recitava todas as manhãs quando eu ia para o trabalho. Eu estava orgulhoso porque a frase era a meu respeito, e deliciado porque ela estava realmente falando, mesmo que seu inglês necessitasse ser trabalhado. Só recentemente me dei conta de como certas características da gramática inglesa já estavam presentes naquele balbuciar. Considere, por exemplo, a ordem das palavras. No inglês, o sujeito vem antes do verbo (enquanto em algumas outras línguas, como o galês, o havaiano, o malgache, isto não acontece). A ordem do sujeito e do verbo já estava correta, assim como a posição da palavra “bi-bi”. Na frase gramatical (em inglês) “[Daddy] [is going away] [in his car]”,* a ordem dos três elementos é exatamente a mesma que na fala aproximada do bebê.

À medida que minha filha ia ficando mais velha, naturalmente sua gramática foi se aperfeiçoando, e em poucos anos, como todas as outras crianças, ela estava falando corretamente. Qualquer criança nova normal criada por um responsável, um pai ou uma mãe que fala uma língua em particular e a usa regularmente para dirigir-se à criança, aprenderá em um período de poucos anos como falar aquela língua de modo gramatical (alguns americanos, é claro, acham que esta afirmação não se aplica a muitos colegiais dos EUA). De fato, a maioria das crianças é capaz de aprender duas ou mesmo três línguas com uma fluência nativa, especialmente se cada um dos dois ou três responsáveis por ela a utiliza correta e habitualmente com a criança. Isto é verdade mesmo que a criança seja apresentada a uma língua por meio da única pessoa que a emprega. Mas, para uma determinada língua, como a criança aprende quais as maneiras gramaticalmente corretas de construir uma frase e as que não são?

* “Papaizinho está indo embora no seu carro.” (N. do T.)

Imagine que existem apenas 50 mil frases possíveis, e que a mãe e a criança testam sistematicamente cinquenta frases novas todos os dias durante mil dias, com a mãe indicando pacientemente “muito bem” ou “errada” para cada uma delas. Se supusermos este cenário absurdo, mais uma memória perfeita de parte da criança, então depois de três anos o jovem conheceria quais das 50 mil frases são gramaticalmente corretas.

Um cientista da computação poderia dizer que esta criança fictícia construiu em sua mente uma “tabela de consulta” em que cada frase candidata está listada junto com o rótulo “gramaticalmente correta” ou “gramaticalmente incorreta”. É claro que uma criança de carne e osso não prepara uma tabela deste tipo. Por uma razão simples: 50 mil frases é muito pouco.

Em qualquer língua há um número ilimitado de frases possíveis, as quais podem conter arbitrariamente muitas orações, cada uma delas cheia de palavras modificadoras e expressões. O comprimento de uma frase é limitado apenas pelo tempo disponível, pela paciência e capacidade de memorizar da pessoa que fala e da que ouve. Mais ainda, tipicamente há um vocabulário de milhares de palavras que podem ser utilizadas. Não há chance de a criança ouvir ou tentar falar todas as frases possíveis e armazená-las em uma tabela de consulta. Ainda assim, ao final do processo real de aprendizagem, a criança pode dizer se uma frase que não foi previamente ouvida é gramatical ou não.

As crianças devem criar, mesmo não estando completamente conscientes disto, conjuntos de regras provisórias para distinguir o que é gramaticalmente correto do que não é. Então, à medida que elas continuam a ouvir frases gramaticalmente corretas e (ocasionalmente) tentam emitir uma frases e são corrigidas, continuam a alterar o conjunto de regras, de novo sem estar necessariamente conscientes disto. Por exemplo, em inglês é fácil para uma criança aprender a construção regular ou “fraca” do pretérito perfeito adicionando *-ed* ou *-d* a um verbo. Então, depois de encontrar “sing” e “sang” (passado e presente de um verbo “forte”), a criança tenta um conjunto de regras modificadas que inclui esta exceção. Entretanto, aquele novo conjunto pode levar a criança a dizer “bring” e “brang”, os quais serão finalmente corrigidos para “bring” e “brought”. E assim por diante. Gradualmente, o conjunto interno de regras é aperfeiçoado. A criança está construindo uma espécie de gramática em sua mente.

Uma criança que aprende uma língua realmente usa a informação gramatical adquirida ao longo dos anos a partir de exemplos gramaticalmente corretos e frases gramaticalmente incorretas. Mas, em vez de

construir uma tabela de consulta, a criança de alguma forma comprime essa experiência em um conjunto de regras, uma gramática interna, que funciona mesmo para aquelas frases novas que nunca foram encontradas antes.

Mas é a informação obtida do mundo externo, por exemplo, de um dos pais que fala a língua em questão, suficiente para construir tal gramática interna? A questão foi respondida negativamente por Noam Chomsky e seus seguidores, que concluíram que a criança deve vir já equipada desde seu nascimento com uma grande quantidade de informação aplicável à gramática de qualquer língua natural. A única fonte plausível de tal informação é uma tendência inata, biologicamente desenvolvida, para falar línguas com certas características gramaticais gerais comuns a todas as línguas naturais. A gramática de cada língua em particular também contém características adicionais, não programáveis biologicamente. Muitas destas variam de língua para língua, embora algumas sejam provavelmente universais como as inatas. As características adicionais são as que as crianças devem aprender.

A GRAMÁTICA COMO UM ESQUEMA PARCIAL

Se uma frase declarativa é gramaticalmente correta ou não depende bastante, é claro, do fato de ser factual ou não. As pessoas que falam inglês sabem que é gramaticalmente correto dizer "the sky is green, with purple and yellow stripes",* mesmo que provavelmente não seja verdade, pelo menos na Terra. Mas há muitas outras circunstâncias além da mera veracidade que influenciam a escolha das frases gramaticalmente corretas enunciadas em determinada ocasião.

Ao construir uma gramática interna, a criança separa efetivamente características gramaticais de todos os outros fatores, alguns estocásticos, que levaram às frases particulares que ele ou ela ouvem. Somente daquela maneira a compressão em um conjunto manejável de regras gramaticais é possível.

A criança que faz isto exibiu a primeira característica de um sistema adaptativo complexo. Ela, ou ele, comprimiu certas regularidades identificadas com um conjunto de experiências em um esquema, o qual inclui regras que governam aquela experiência mas omite as circunstâncias especiais nas quais as regras devem ser aplicadas.

* "O céu é verde, com listras roxas e amarelas." (N. do T.)

Entretanto, a gramática não abarca todas as regularidades encontradas em uma língua. Há também as regras dos sons (constituindo o que os lingüistas chamam “fonologia” de uma língua), as regras de semântica (relacionando o que faz sentido ou não), e outras. Portanto, o esquema gramatical não é o conjunto total de regras para falar uma língua, e a gramática não é tudo aquilo que resta quando as características arbitrárias do fluxo de informações lingüísticas são postas de lado. Não obstante, a aquisição de uma gramática por parte da criança é um excelente exemplo da construção de um esquema — um esquema parcial.

O processo de aprendizado de uma gramática também demonstra outras características de um sistema adaptativo complexo em operação. Um esquema é sujeito a variações, e variantes diferentes são testadas no mundo real. Para testá-las, é necessário preencher os detalhes, como aqueles que foram jogados fora na criação do esquema. Isto faz sentido, porque no mundo real o mesmo tipo de fluxo de informações é encontrado de novo. Finalmente, o que acontece no mundo real determina quais variantes do esquema sobreviverão.

Na aquisição de uma gramática inglesa o esquema é variado, por exemplo, quando a regra de construção do pretérito perfeito com um verbo com *-ed* ou *-d* é modificada por exceções como aquelas para *sing-sang* e *bring-brang*. Para testar estas variantes, a criança deve usar o esquema em uma frase real, restaurando assim circunstâncias especiais do tipo das que foram postas de lado para tornar o esquema possível. Por exemplo, a criança pode dizer, “We sang a hymn yesterday”.* Esta frase passa pela revisão. Entretanto, se a criança diz “I brang something to show you”,** os pais podem responder, “It’s very nice of you show me that cockroach you found at Aunt Bessie’s, but you ought to say ‘I brought home something...’.”*** Esta experiência acabaria provavelmente com a criança tentando um novo esquema, que permita utilizar ambos, *sing-sang* e *bring-brought*. (Em muitos casos, é claro, a criança tenta um novo esquema simplesmente esperando que alguma outra pessoa fale.)

* “Nós cantamos um hino ontem de manhã”. Observe o uso do pretérito perfeito (*sang*) do verbo *to sing* (cantar). (N. do. T)

** “Trouxe para casa algo para mostrar-lhes.” Observe que, no exemplo, a criança utiliza erroneamente o pretérito perfeito (*brang*) do verbo *to bring* (trazer). A forma correta é *brought*. (N. do T.)

*** “É muito gentil de sua parte trazer-me esta barata que você encontrou na casa de tia Bessie, mas você deveria dizer ‘I (eu) brought (trouxe)...’.” (N. do. T)

SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS E COMPLEXIDADE EFETIVA

A operação de um sistema adaptativo complexo foi mostrada no diagrama da página 42. Como um sistema adaptativo complexo separa as regularidades do que é randômico, ele permite a possibilidade de definir complexidade em termos do tamanho do esquema utilizado por um sistema adaptativo complexo para descrever e predizer as propriedades de um fluxo de informações que está chegando. Tipicamente, é claro, aquelas informações relativas ao funcionamento de algum outro sistema que o sistema adaptativo complexo está observando.

Utilizar o tamanho de um esquema não significa um retorno ao conceito de complexidade rudimentar, porque o esquema não é uma descrição completa do fluxo de informações ou do sistema observado, mas apenas das regularidades identificadas e abstraídas da informação disponível. Em alguns casos, como o da gramática, apenas regularidades de certo tipo são incluídas, enquanto o resto é posto de lado, o resultado sendo um esquema parcial.

Pode-se pensar a complexidade gramatical em termos de um livro-texto de gramática. Grosseiramente falando, quanto maior o livro-texto, mais complexa é a gramática. Isto combina muito bem com a noção de complexidade enquanto tamanho de um esquema. Toda exceção pequena e desagradável aumenta o tamanho do livro e a complexidade gramatical da língua.

Como sempre, há fontes de arbitrariedades, como a granulosidade rudimentar e a divisão do conhecimento ou do entendimento inicial. No caso de um livro-texto de gramática, a granulosidade rudimentar corresponde ao nível de detalhamento atingido pelo texto. Será ele uma gramática elementar que deixa de fora muitas regras obscuras e listas de exceções, cobrindo apenas os pontos principais necessários a um viajante que não se importa de cometer um erro aqui e ali? Ou será um pesado volume acadêmico? Se for assim, será ele do tipo antigo e familiar ou uma gramática geratriz que está atualmente em moda? Obviamente o tamanho do livro dependerá de tais distinções. Quanto ao nível de conhecimento inicial, considere uma gramática fora de moda de uma língua estrangeira escrita em inglês para pessoas que falam inglês. Ela não terá de introduzir muitas idéias novas ao leitor se for uma gramática de holandês (razoavelmente similar ao inglês e estreitamente relacionado com este) em vez de navajo, que é muito diferente do inglês em sua estrutura. A gramática de navajo deveria ser maior. Da mesma forma, uma gramática de holandês hipotética escrita para pessoas que falam navajo deveria presumivelmente ser maior do que uma gramática de holandês escrita para pessoas que falam inglês.

Mesmo levando em conta estes fatores, é ainda razoável relacionar a complexidade gramatical de uma língua com o tamanho do livro-texto que descreve sua gramática. Todavia, em vez disso, seria mais interessante se fosse possível olhar dentro do cérebro de uma pessoa que fala a língua desde seu nascimento (como a tecnologia em desenvolvimento poderá fazer um dia) e ver como a gramática está codificada lá. O tamanho do esquema representado por aquela gramática interna forneceria uma medida de alguma forma menos arbitrária da complexidade gramatical. (Naturalmente, a definição de tamanho neste caso pode ser sutil, dependendo de como os bits de informação gramatical estão realmente codificados. Estarão eles localmente inscritos nos neurônios e sinapses, ou distribuídos de alguma maneira por toda a rede?)

Definimos complexidade efetiva de uma entidade, relativa ao sistema adaptativo complexo que o está observando e construindo um esquema, como o tamanho do esquema utilizado para descrever suas regularidades. Podemos usar o termo “complexidade efetiva interna” quando o esquema de alguma forma governa o sistema em discussão (como gramática armazenada no cérebro que regula a fala), em vez de ser meramente utilizado por um observador externo, tal como o autor de um texto gramatical.

SEPARANDO A REGULARIDADE DA RANDOMICIDADE

A utilidade do conceito de complexidade efetiva, especialmente quando não é interna, depende de o sistema adaptativo complexo que o observa fazer ou não um bom trabalho de identificação e compressão das regularidades e de descarte do que é incidental. Se não é o caso, a complexidade efetiva do sistema observado tem mais a ver com as limitações do observador particular do que com as propriedades do sistema observado. Acontece que o observador é muitas vezes razoavelmente eficiente, mas o conceito de eficiência desperta questões profundas. Já sabemos que a noção de compressão otimizada pode encontrar o obstáculo da não computabilidade. Mas, deixando a compressão de lado, o que dizer da identificação real das regularidades? É realmente um problema bem definido identificar as regularidades no fluxo de informações?

A tarefa seria mais fácil se o fluxo de informações fosse em algum sentido indefinidamente longo, como no caso de um discurso ou texto de tal maneira alongado que ele abrange uma amostra representativa das frases possíveis (até um certo comprimento) que podem ser pronunciadas em uma determinada língua. Aqui, mesmo uma rara regularidade gramatical se mostraria repetidamente sob condições similares e assim tenderia

a ser distinguível de uma regra falsa que surge de uma mera flutuação ao acaso. (Por exemplo, em um texto curto em inglês, o pretérito perfeito pode não ocorrer, sugerindo erroneamente que ele não existe na língua inglesa. Em um texto muito longo, isto provavelmente não ocorreria.)

IDENTIFICANDO CERTAS CLASSES DE REGULARIDADES

Muitos físicos teóricos, como Jim Crutchfield da Universidade da Califórnia em Berkeley e do Instituto Santa Fé, têm feito progressos consideráveis na compreensão de como distinguir regularidade de randomicidade em cadeias indefinidamente longas de bits. Eles definem uma ampla classe particular de regularidades e mostram como um computador poderia ser usado, em princípio, para identificar quaisquer regularidades que pertencem àquelas categorias. Entretanto, mesmo seus métodos não fornecem um algoritmo capaz de selecionar todos os tipos de regularidades. *Não há tal algoritmo*. Todavia, eles mostram como um computador, tendo encontrado em uma cadeia de bits regularidades que pertencem a certas classes, pode deduzir que novas regularidades pertencentes a classes mais amplas estão presentes e podem ser identificadas. Isto é chamado “aprendizado hierárquico”.

Tipicamente, uma classe de regularidades corresponde a um conjunto de modelos matemáticos relacionados com o modo pelo qual o fluxo de informações pode ser gerado. Suponha que o fluxo de informações é uma cadeia de bits sabidamente gerada por um processo que é, pelo menos em parte, estocástico — digamos que estão envolvidos lançamentos de moedas. Um exemplo muito simples de um conjunto de modelos seria então uma seqüência de lançamentos de moedas viciadas, na qual a probabilidade de cara (que produz dígitos 1 na cadeia de bits) tem algum valor fixo entre zero e um para cada modelo, enquanto que a probabilidade de coroa (que produz dígitos 0 na cadeia de bits) é um menos a probabilidade de cara.

Se a probabilidade de cara é um meio, então qualquer regularidade aparente em tal seqüência seria resultante apenas do acaso. À medida que o fluxo de informações fica cada vez maior, a probabilidade de sermos enganados por tais regularidades ao acaso torna-se cada vez menor, e a probabilidade de reconhecer que a seqüência surge de um lançamento equivalente de moedas que não são viciadas aumenta. No extremo oposto, considere uma cadeia de dois bits. A chance de ambos os bits serem 1 (um caso de regularidade perfeita) é uma sobre quatro para moedas não viciadas. Mas tal seqüência poderia também surgir do lançamento de uma moeda da qual ambas as faces são caras. Assim,

uma cadeia curta de bits surgindo de um lançamento de moedas não viciadas pode ser muitas vezes confundida com uma seqüência fortemente viciada. Em geral, a vantagem de um fluxo de informações indefinidamente longo é que este aumenta bastante as chances de discriminação entre os modelos, onde cada modelo corresponde a uma classe particular de regularidades.

Outro exemplo de modelos, ligeiramente mais complicados do que seqüências de lançamentos de moedas viciadas, poderia ter a regra adicional de que seriam jogadas fora todas as seqüências para as quais ocorrem duas caras sucessivas. A regularidade resultante, que a cadeia de bits nunca tem dois dígitos 1 sucessivos, seria bastante fácil de ser reconhecida em uma cadeia longa. Um modelo ainda mais complicado poderia consistir de seqüências de lançamentos de moedas viciadas em que qualquer seqüência que contém um número par de caras sucessivas seria descartada.

Quando um sistema adaptativo complexo recebe um fluxo de informações arbitrariamente longo, digamos na forma de uma cadeia de bits, ele pode procurar sistematicamente regularidades de determinadas classes (que correspondem aos modelos de determinadas classes), mas não há tal procedimento para encontrar todos os tipos de regularidades. Quaisquer que sejam as regularidades identificadas, estas podem ser então incorporadas a um esquema que descreve o fluxo de informações (ou a um sistema que dá origem a este fluxo).

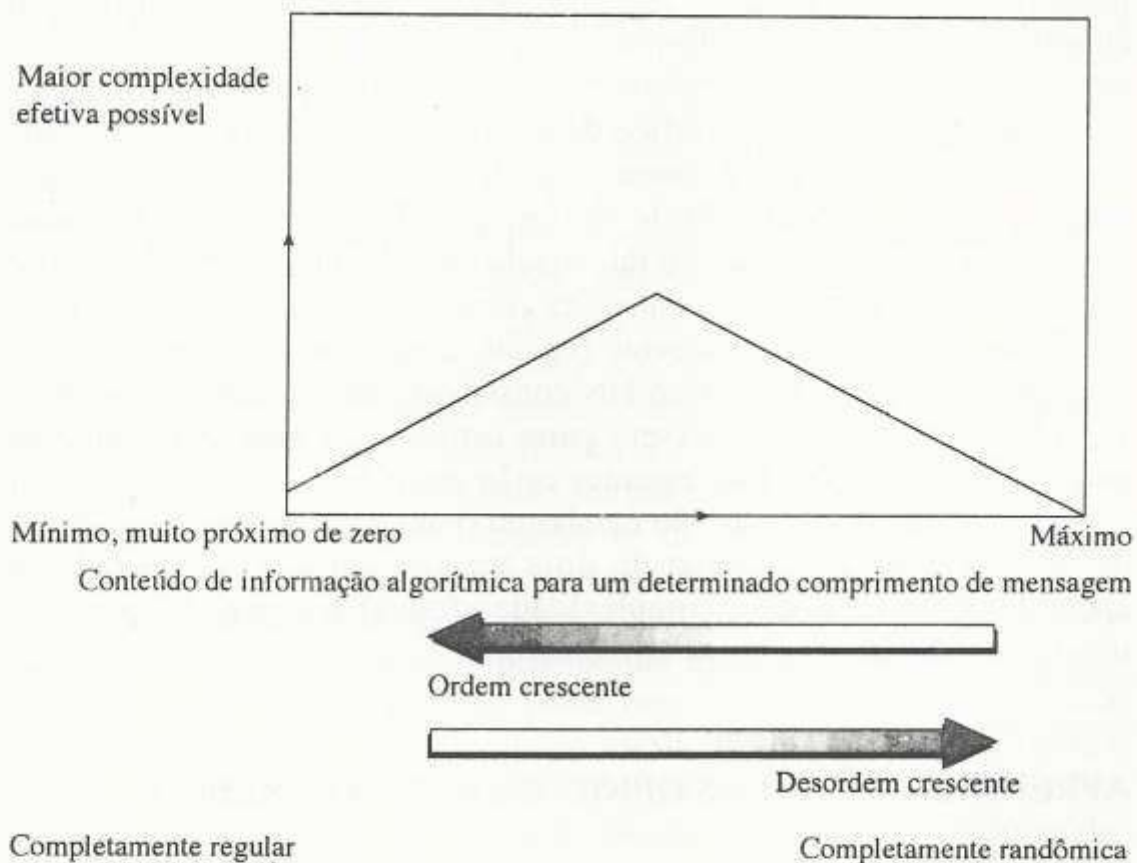
DIVIDINDO O FLUXO DE INFORMAÇÕES EM PARTES — INFORMAÇÃO MÚTUA

Ao identificar regularidades no fluxo de informações que chega, um sistema adaptativo complexo tipicamente divide aquele fluxo em muitas partes, que são de algum modo comparáveis umas com as outras, e procura as suas características comuns. A informação comum às muitas partes, chamada “informação mútua”, é o diagnóstico de regularidades. No caso de um fluxo de texto em uma determinada língua, as frases poderiam servir como partes a ser comparadas. A informação gramatical mútua entre as sentenças apontaria as regularidades gramaticais.

Todavia, a informação mútua é utilizada apenas para identificar regularidades, e a sua quantidade não é uma medida direta da complexidade efetiva. Ao contrário, uma vez que as regularidades tenham sido identificadas e uma descrição concisa delas tenha sido dada, o tamanho da descrição mede a complexidade efetiva.

COMPLEXIDADE EFETIVA GRANDE E CIA INTERMEDIÁRIO

Suponha que não há regularidades no sistema que está sendo descrito, como será muitas vezes (mas não sempre!) o caso em uma passagem datilografada pelos macacos proverbiais. Um sistema adaptativo complexo que opera apropriadamente seria então incapaz de descobrir qualquer esquema, já que um esquema sumariza regularidades e não há nenhuma. Em outras palavras, o único esquema teria tamanho nulo, e o sistema adaptativo complexo atribuiria complexidade efetiva nula ao lixo randômico que está estudando. Isto é absolutamente apropriado; uma gramática constituída puramente por um palavreado sem sentido deve ter tamanho zero. Embora o conteúdo de informação algorítmica de uma cadeia randômica de bits seja a máxima para seu tamanho, a complexidade efetiva é nula.



Um esboço mostrando grosseiramente como a maior complexidade efetiva possível varia com o CIA.

No outro extremo da escala do CIA, quando está próxima do zero, a cadeia de bits é inteiramente regular, consistindo, por exemplo, apenas em dígitos 1. A complexidade efetiva — o tamanho de uma descrição concisa que descreve as regularidades de tal cadeia de bits — deve ser muito próxima de zero, já que a mensagem “todos os dígitos são 1” é tão curta.

Para que a complexidade efetiva seja considerável, o CIA então não deve ser nem muito baixo nem muito alto; em outras palavras, o sistema não pode ser nem muito ordenado nem muito desordenado.

O diagrama da página anterior ilustra grosseiramente como a maior complexidade efetiva possível de um sistema (em relação a um sistema adaptativo complexo funcionando adequadamente como observador) varia com o CIA, atingindo altos valores apenas na região intermediária entre ordem e desordem excessivas. Muitas quantidades importantes que surgem em discussões sobre simplicidade, complexidade e sistemas adaptativos complexos têm a propriedade comum de só poderem ser grandes naquela região intermediária.

Quando um sistema adaptativo complexo observa outro sistema e identifica algumas de suas regularidades, o conteúdo de informação algorítmica do fluxo de informações que vem do sistema observado é expresso como a soma de dois termos: o conteúdo aparentemente regular e o aparentemente estocástico de informação. A complexidade efetiva do sistema observado é essencialmente a mesma da porção aparentemente regular do conteúdo de informação. Para um fluxo de dados randômico, reconhecido como tal, aquela complexidade efetiva é zero e aquela do CIA inteiro é reconhecida como o resultado do acaso. Para um fluxo de dados perfeitamente regular, e reconhecido como tal (por exemplo, uma longa cadeia de bits consistindo inteiramente em dígitos 1), o CIA inteiro é regular (sem parte estocástica) mas extremamente pequeno. As situações interessantes estão entre estes extremos, quando o CIA é considerável, mas não é máximo (para o comprimento do fluxo de dados), e este é a soma de dois termos apreciáveis, a porção aparentemente regular (a complexidade efetiva) e a porção aparentemente estocástica.

APRENDENDO COM OS GENES OU COM O CÉREBRO

Embora nosso exame dos sistemas adaptativos complexos tenha começado com o exemplo do aprendizado em um rebento humano, não é necessário apelar para algo tão sofisticado para ilustrar o conceito. Nossos parentes primatas — aqueles caricaturados no conto dos datiló-

grafos — poderiam igualmente ser utilizados. Assim como um cachorro. De fato, um dos modos pelo qual deparamos com o aprendizado em outros mamíferos é por meio do treinamento de nossos animais domésticos.

Ensinar um cachorro a ficar parado envolve a aplicação de uma abstração a muitas situações diferentes: ficar sentado, imóvel no chão, ficar parado em um carro quando a porta é aberta, ficar próximo em vez de perseguir um esquilo tentador. O cachorro aprende, por meio de recompensas e/ou castigos, o esquema para a ordem de ficar. Esquemas alternativos, por exemplo, um que faça uma exceção da caça aos gatos, são (pelo menos em teoria) rejeitados como técnica de treinamento. Mas mesmo que o cachorro adote um esquema que permita a exceção, um sistema adaptativo complexo ainda está em funcionamento. Como resultado das pressões seletivas do treinamento e do instinto de caçar gatos, um outro esquema, que não é aquele que o treinador pretendia, sobrevive.

Quando é dada a ordem de ficar parado, o cão treinado preenche os detalhes apropriados à situação particular e executa o esquema no mundo real do comportamento, onde o castigo ou a recompensa acontecem e ajudam a determinar se o esquema sobrevive ou não. Todavia, a tendência de caçar gatos ou esquilos, que também influencia a competição entre os esquemas, não foi aprendida pelo cão individualmente. Ao contrário, ela foi geneticamente programada como resultado da evolução biológica.

Todos os organismos têm tais programas. Considere uma formiga vagando em busca de um pouco de comida. Ela está seguindo um procedimento internalizado que evoluiu em milhões de anos. Herbert Simon, o notável especialista em psicologia, economia e ciência da computação da Universidade Carnegie-Mellon, há muito tempo utilizou o movimento das formigas para ilustrar o conceito do que eu chamo de complexidade efetiva. O caminho seguido pela formiga pode parecer complexo, mas as regras do processo de busca são simples. O intrincado caminho da formiga apresenta uma quantidade considerável de conteúdo de complexidade algorítmica (CIA), do qual apenas uma parte origina-se das regras, o que corresponde mais ou menos às regularidades da busca. Aquela pequena parte, entretanto, constitui (pelo menos aproximadamente) a complexidade efetiva total. O resto do CIA, o grosso da complexidade aparente, vem de características incidentais, bastante randômicas, do terreno que a formiga está explorando. (Recentemente discuti a história da formiga com Herb, que exclamou com um sorriso “Obtive bastante quilometragem daquela formiga”.)

Em uma seqüência de organismos cada vez menos sofisticados, digamos um cachorro, um peixe dourado, uma minhoca e uma ameba, o

aprendizado individual tem um papel cada vez menor comparado com aquele desempenhado pelos instintos armazenados por meio da evolução biológica. Mas a evolução biológica em si mesma pode ser descrita como um sistema adaptativo complexo, mesmo no mais humilde dos organismos.

CAPÍTULO 6

BACTÉRIAS QUE DESENVOLVEM RESISTÊNCIA ÀS DROGAS

Quando eu era jovem, tinha o hábito de folhear enciclopédias (um hábito que persiste até hoje, provocando o divertimento de minha família). Em um dado ponto deparei com um artigo sobre a doença do bronze, que me fez pensar pela primeira vez sobre algumas das questões centrais deste livro.

A doença do bronze é um conjunto de reações químicas que podem corroer as superfícies tratadas com bronze, criando pontos verde-azulados que crescem e se espalham. Sob certas condições de umidade, as reações podem realmente espalhar a doença através do ar, de uma superfície para outra, e arruinar uma coleção inteira de objetos de bronze. Como os vasos de bronze chineses da dinastia Shang, por exemplo, podem valer 1 milhão de dólares cada um, a proteção contra a doença do bronze não é um assunto sem importância. Entretanto, como garoto pobre, quando eu li pela primeira vez sobre isto obviamente não estava pensando do ponto de vista de um colecionador.

Em vez disso, eu me perguntei: “De que maneira a doença do bronze é diferente de uma praga provocada por um organismo vivo? Será porque a doença do bronze está meramente obedecendo às leis da física e da química?” Mas, mesmo sendo uma criança, rejeitei, como os cientistas sérios têm feito por gerações, a idéia de que a vida é caracterizada por quaisquer “forças vitais” especiais externas à física e à química. Não, uma bactéria também obedece às leis da física e da química. Mas, então, qual é a diferença? Ocorreu-me que as bactérias (como todas as outras coisas vivas) exibem uma variação hereditária e são sujeitas à seleção natural, enquanto que para a doença do bronze não há qualquer evidência de algo semelhante. De fato, esta distinção é crítica.

Para explorar mais a mesma distinção, considere o exemplo de um fluxo turbulento de fluido ao longo de uma tubulação. Há mais de um

século é sabido que a energia é dissipada dos grandes redemoinhos turbulentos para redemoinhos cada vez menores. Ao descrever estes redemoinhos, os físicos muitas vezes citaram Jonathan Swift:

So, Nat'ralists observe, a Flea
Hath smaller fleas that on him prey,
And these have smaller fleas to bite'em,
And so proceed ad infinitum.*

Mais ainda, o físico e polímata L. F. Richardson criou seus próprios versos humorísticos especificamente aplicáveis aos redemoinhos:

Big whorls have little whorls,
Which feed on their velocity;
And little whorls have lesser whorls,
And so on to viscosity.**

Em certo sentido, os redemoinhos maiores dão origem aos menores. Se a tubulação tem curvas e estrangulamentos, pode haver alguns redemoinhos grandes que chegam ao seu fim sem terem gerado rebentos, enquanto outros sobrevivem e geram muitos redemoinhos pequenos, e assim por diante. Assim, os redemoinhos parecem exibir um tipo de variação e seleção. Ainda assim, ninguém sugeriu que eles lembram a vida. Que característica importante os redemoinhos turbulentos não têm e os organismos vivos possuem? O que realmente distingue o fluxo turbulento da evolução biológica?

A diferença está na maneira como a informação é manipulada nos dois casos. Não há indicação de que em um fluxo turbulento qualquer processamento significativo de informações esteja acontecendo, qualquer compressão de regularidades. Entretanto, na evolução biológica, a experiência representada pela variação passada e pela seleção natural é transmitida para as futuras gerações em um pacote altamente comprimido de informações, o "genoma" (ou conjunto de genes) de um organismo. Cada gene pode ter diferentes formas alternativas, que em algumas ligações são chamadas "alelos". O conjunto dos alelos particulares de todos os genes de um determinado organismo é conhecido como o "genótipo".

* E assim os naturalistas observam uma pulga/que tem pulgas menores a predá-la/ E estas têm pulgas menores a mordê-las/ E assim até o infinito. (N. do T.)

** Grandes redemoinhos têm pequenos redemoinhos/ que se alimentam de suas velocidades/ E pequenos redemoinhos têm redemoinhos ainda menores/ E assim por diante, até a viscosidade. (N. do T.)

Os biólogos enfatizam a distinção entre o genótipo, que descreve a informação herdada contida nos genes de um organismo individual, e o fenótipo, que descreve a aparência e comportamento do organismo no decurso da história de sua vida. Mudanças no genótipo, como uma alteração num determinado gene de um alelo para outro, podem, é claro, afetar o fenótipo por meio da influência do gene sobre os processos químicos no organismo. Mas, durante o desenvolvimento do organismo, o fenótipo também é influenciado por uma grande variedade de outras circunstâncias, muitas delas randômicas. Pense em todas as circunstâncias acidentais que afetam o desenvolvimento do ser humano, desde a célula embrião e os estágios fetais até a infância e a pré-adolescência, antes que a procriação se torne possível na idade adulta. O genótipo de um ser humano individual é como uma receita básica, que permite grandes variações no prato que o cozinheiro realmente prepara. Um único genótipo permite uma das muitas alternativas possíveis e diferentes para que um adulto emerja a partir do processo de desenvolvimento. No caso de gêmeos idênticos, que sempre dividem o mesmo genótipo, duas das diferentes alternativas adultas coexistem. Quando criados separadamente, eles podem fornecer informações preciosas sobre os papéis da “natureza” e da “criação” na formação do fenótipo adulto.

No decurso da evolução biológica, mudanças randômicas acontecem no genótipo de geração para geração. Junto com os acidentes do desenvolvimento que ocorrem em uma determinada geração, elas contribuem para as mudanças fenotípicas que ajudam a determinar se um organismo é ou não viável e capaz de atingir a maturidade, reproduzir-se e passar seu genótipo, completo ou em parte, aos seus descendentes. A distribuição de genótipos em uma população é assim o resultado do acaso combinado com a seleção natural.

A EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÀS DROGAS NAS BACTÉRIAS

Um caso de evolução biológica de grande significado para a humanidade contemporânea é o desenvolvimento da resistência aos antibióticos nas bactérias. Por exemplo, depois de muitas décadas de uso indiscriminado de penicilina para controlar certas espécies de bactérias patogênicas (que causam doenças), têm aparecido cepas destes organismos que não são particularmente sensíveis a esta droga. Para enfrentar as doenças causadas por estes germes modificados, novos tipos de antibióticos são necessários, muito sofrimento humano e mesmo mortes podem ocorrer enquanto as novas drogas estão sendo aperfeiçoadas. Da mesma

forma, o bacilo que causa a tuberculose se rendeu por décadas a certos antibióticos, mas nos últimos anos tem desenvolvido cepas resistentes. A tuberculose é novamente uma grande ameaça à saúde, mesmo em lugares onde anteriormente estava sob controle.

Na aquisição de resistência às drogas por parte de uma bactéria, um papel importante é muitas vezes desempenhado pela troca de material genético entre duas bactérias individuais quando elas se juntam, se fundem e depois se separam novamente. Este processo, o mais próximo da atividade sexual a que tal organismo primitivo pode chegar, foi pela primeira vez observado por Joshua Lederberg quando era um estudante de pós-graduação em Yale. Naquele tempo eu era estudante de graduação, e lembro-me da atenção do público atraída pela descoberta do sexo no reino dos germes; houve mesmo um artigo na revista *Time*. Josh recebeu um impulso em sua carreira, a qual finalmente o conduziu à presidência da Universidade Rockefeller.* Ao discutir a resistência bacteriana às drogas, ignorarei, para manter a simplicidade, o sexo (com desculpas a Josh).

Pela mesma razão, me proponho a ignorar outro mecanismo muito importante de transferência de material genético entre as células, no qual o portador é um vírus — bacteriófago (ou “fago”) — que infecta as bactérias. Experiências com este processo, chamado transdução, foram as precursoras do primeiro trabalho em engenharia genética.

A pesquisa cuidadosa sobre bactérias centralizou-se nas espécies *Escherichia coli* (ou *E. coli*), comuns, inofensivas, e mesmo úteis no intestino humano, mas muitas vezes patogênicas ao infestar outras partes do corpo (e também em certas formas mutantes, perigosas mesmo no trato digestivo). Cada *E. coli* é uma única célula com seu material genético constituído por uns poucos milhares de genes. Um gene típico é uma seqüência de algo como um milhar de “nucleotídeos” (conhecido coletivamente como ADN). Aqueles ADN constituintes, que formam todos os genes em todos os organismos, vêm em quatro tipos chamados A, C, G e T por causa das letras iniciais dos seus nomes químicos.** Qualquer gene é parte de um filamento maior composto por nucleotídeos e forma par com outro filamento, constituindo a famosa hélice dupla. A estrutura da hélice dupla foi descoberta em 1953 por Francis Crick e James Watson, que utilizaram o trabalho de Rosalind Franklin e Maurice Wilkins.*** Na *E. coli*, há dois filamentos helicoidais de aproximadamente 5 milhões de nucleotídeos cada um.

* Joshua Lederberg foi agraciado com o prêmio Nobel de medicina em 1958. (N. do T.)

** Adenina (A), citosina (C), guanina (G) e timina (T). (N. do T.)

*** Crick, Watson e Wilkins dividiram o prêmio Nobel de medicina em 1962. (N. do T.)

Os nucleotídeos dispostos ao longo de um filamento são complementares àqueles no outro filamento no sentido de que A e T estão sempre opostos um ao outro, da mesma forma que G e C. Como qualquer uma das hélices é determinada pela outra, precisamos observar apenas uma delas para ler a mensagem completa.

Suponha que o número de nucleotídeos seja realmente 5 milhões. A pode ser codificada como 00, C como 01, G como 10, e T como 11, de tal forma que os 5 milhões de nucleotídeos são representados por um filamento de 10 milhões de dígitos 0 e 1, em outras palavras, por uma cadeia de 10 milhões de bits. Esta cadeia representa a informação que cada bactéria *E. coli* transmite à sua progênie, a qual surge pela divisão da célula em duas, a hélice dupla dando origem a duas novas hélices duplas, uma para cada nova célula.

Cada um dos milhares de genes na bactéria pode existir de muitas formas. As possibilidades matemáticas são bastante numerosas, é claro. Para uma cadeia de, digamos, um milhar de nucleotídeos, o número de seqüências concebíveis diferentes é igual a $4 \times 4 \times 4 \times \dots \times 4 \times 4$, um produto de mil fatores 4. Este número, quando escrito no sistema decimal usual, tem aproximadamente seiscentos dígitos! Apenas uma pequena fração das seqüências teoricamente possíveis pode ser encontrada na natureza (a existência de todas elas exigiria muito mais átomos do que o universo contém). Na prática, em um dado momento, cada gene pode ter algumas centenas de alelos diferentes que realmente ocorrem com probabilidade significativa na população bacteriana, e são diferenciados pelos seus diferentes efeitos biológicos e químicos.

Como conseqüência de vários tipos de acidentes, por exemplo, a passagem randômica de um raio cósmico ou a presença de algum produto químico forte no meio ambiente, qualquer gene pode sofrer mutação de uma forma para outra. Mesmo uma única mutação pode ter um efeito significativo no comportamento celular. Por exemplo, a mutação de um certo gene em uma célula de *E. coli* em um determinado alelo novo poderia, em princípio, levar à resistência daquela célula a uma droga como a penicilina. Esta resistência poderia então ser transmitida à progênie da célula, à medida que elas se multiplicam por meio de divisões celulares repetidas.

Mutações são tipicamente processos ao acaso. Suponha que uma única bactéria em um tecido hospedeiro produza uma colônia de descendentes, todos com o mesmo genótipo. Podem ocorrer então mutações nesta colônia, com as formas mutantes dando origem às suas próprias colônias. Desta maneira, a população de bactérias no tecido chega a conter vários genótipos. Se a penicilina é introduzida em quantidade suficiente, apenas as colônias resistentes a ela continuarão a crescer. O

ponto importante é que as bactérias mutantes resistentes muitas vezes já estão lá, usualmente por meio da mutação de um ancestral, quando a droga começa a exercer uma pressão seletiva a seu favor. Mesmo que elas já não estejam presentes, estão em algum outro lugar, ou pelo menos existiram ocasionalmente por meio de um processo ao acaso e então desapareceram. Como Lederberg mostrou há muito tempo, as mutações não são induzidas pela penicilina.

A mutação de um gene para um alelo que corresponde à resistência a drogas tem presumivelmente alguns efeitos desfavoráveis na operação de uma célula de *E. coli*. De outro modo aquele alelo quase certamente já teria estado presente em um grande número de bactérias de *E. coli*, e a penicilina não teria dado certo logo de início. Todavia, como a penicilina continua a ser amplamente usada, a sobrevivência de cepas resistentes a ela são favorecidas, enquanto que a desvantagem seletiva, qualquer que seja, é superada pela vantagem de resistência à droga. (Um antibiótico diferente, que não exista de forma tão disseminada na natureza como a penicilina, pode servir ainda melhor como exemplo, já que esta espécie de bactéria teria tido muito pouco contato com ele antes que este fosse introduzido na medicina.)

O desenvolvimento da resistência às drogas acontece então por meio de uma mudança no genótipo, a cadeia de alguns milhões de bits que é transmitida pela célula às suas descendentes. É por meio dos genes que a bactéria “aprende” a enfrentar esta ameaça à sua sobrevivência. Mas o genótipo contém uma vasta quantidade de outras informações que permite o funcionamento da bactéria. Os genes contêm as lições aprendidas em bilhões de anos de evolução biológica sobre como sobreviver enquanto bactéria.

A experiência das espécies de *E. coli* e suas formas ancestrais de vida não foram registradas meramente para servir de referência em uma tabela de consulta; as regularidades naquela experiência foram identificadas e comprimidas em uma cadeia representada pelo genótipo. Algumas delas são regularidades que surgiram recentemente, como a prevalência sobre os antibióticos. A maioria delas é bastante antiga. O genótipo varia um pouco de indivíduo para indivíduo (ou de uma colônia de indivíduos geneticamente idênticos para outra), e mutações podem ocorrer a qualquer momento por acidente e ser transmitidas à progênie.

Este tipo de aprendizado difere de um modo interessante do tipo que acontece por meio do uso de um cérebro. Temos enfatizado que formas mutantes de uma bactéria que exhibe resistência a um antibiótico podem estar facilmente presentes por acaso quando a droga é introduzida, e que de qualquer forma, ocasionalmente, aquelas formas existiram

no passado. Todavia, as idéias na maior parte das vezes surgem mais como resposta a um desafio em vez de estarem já disponíveis quando este se apresenta. (Existe uma leve evidência de que as mutações genéticas na biologia surgem como resposta a uma necessidade, mas, se o fenômeno realmente existe, ele é insignificante quando comparado com as mutações ao acaso.)

A EVOLUÇÃO COMO UM SISTEMA ADAPTATIVO COMPLEXO

Em que medida o processo evolutivo pode ser descrito como operação de um sistema adaptativo complexo? O genótipo satisfaz os critérios de um esquema, encapsulando em uma forma altamente comprimida a experiência do passado e sendo sujeito a variações por meio da mutação. O próprio genótipo não é usualmente testado pela experiência. Ele controla, em grande medida, a química do organismo, mas o destino final de cada indivíduo depende também das condições ambientais que não estão absolutamente sob o controle dos genes. Em outras palavras, o fenótipo é determinado conjuntamente pelo genótipo e por todas as condições externas, muitas delas randômicas. Tal desdobramento de esquemas, com adição de novas informações, para produzir efeitos no mundo real é característico de um sistema adaptativo complexo.

Por último, a sobrevivência de um genótipo particular em um organismo unicelular é relacionada ao fato de as células com aquele genótipo sobreviverem até que possam dividir-se, e suas descendentes também sobreviverem até que possam dividir-se, e assim por diante. Isto preenche a exigência de um circuito de realimentação que envolve pressões seletivas. A população bacteriana é certamente um sistema adaptativo complexo.

A complexidade efetiva da bactéria, no nosso sentido de tamanho de um esquema, é evidentemente relacionada com o comprimento do genoma. (Se partes da hélice dupla de ADN são apenas tapa-buracos e não contribuem para a informação genética, como parece ser o caso nos organismos mais desenvolvidos, o comprimento destas partes não seria levado em conta.) O comprimento da parte relevante do genoma nos dá uma medida interna rudimentar da complexidade efetiva. Ela é interna porque diz respeito ao esquema que o organismo utiliza para descrever sua própria herança aos seus descendentes, e não um esquema projetado por algum observador externo. (Esta medida lembra o tamanho da gramática interna no cérebro de uma criança aprendendo sua língua nativa, e não o tamanho de um livro que descreve a gramática daquela língua.) Ela é apenas uma medida rudimentar porque a evolução biológica, co-

mo outros sistemas adaptativos complexos, realiza a tarefa de compressão das regularidades com eficiência variável em casos diferentes. Algumas vezes tais variações podem invalidar a medida, como em certos organismos que são obviamente bastante simples mas têm anormalmente longos genomas.

Mas uma comparação dos genomas de organismos diferentes revela deficiências no uso da noção completa de complexidade efetiva, com base no tamanho de um esquema como a única medida da complexidade de uma espécie. Por exemplo, ao considerarmos diferenças sutis porém importantes como aquelas que distinguem nossa espécie de nossos parentes próximos, os grandes macacos, temos de incluir idéias mais sofisticadas.

Aquelas comparativamente poucas mudanças genéticas que permitem a uma criatura simiesca desenvolver uma linguagem, pensamento avançado e cultura elaborada, todas manifestando grande complexidade efetiva, têm maior significado do que a maior parte dos conjuntos de alterações comparáveis no material genético. A complexidade efetiva do novo genoma (humano), medido grosseiramente pelo seu comprimento, não é em si mesma uma medida satisfatória da complexidade dos organismos correspondentes (pessoas), já que o genoma levemente alterado deu origem a tanta complexidade efetiva de um novo tipo (complexidade cultural).

Portanto, acharemos necessário complementar a complexidade efetiva com o conceito de *complexidade potencial*. Quando uma modesta mudança em um esquema permite a um sistema adaptativo complexo criar uma grande quantidade de complexidade efetiva nova em um certo período de tempo, o esquema modificado pode ser enunciado como tendo aumentado enormemente o valor da complexidade potencial em relação àquele intervalo de tempo. Exploraremos este assunto mais adiante, mas no momento retornemos às idéias da adaptação à resistência às drogas como um sistema adaptativo complexo e compararemos este modelo com uma teoria incorreta de como tal resistência aparece.

ADAPTAÇÃO DIRETA

Parece óbvio hoje que a resistência às drogas desenvolve-se principalmente por meio de um mecanismo genético como aquele que temos considerado. Entretanto, nem sempre foi assim. Nos anos 40, quando a penicilina estava apenas começando a ser utilizada e as drogas derivadas da sulfa eram ainda as armas glamourosas na batalha contra a infecção bacteriana, a resistência às drogas já era um problema, e alguns cientis-

tas apresentaram diferentes modelos de seu desenvolvimento. Um destes cientistas era o notável químico inglês Cyril (mais tarde sir Cyril) Hinshelwood. Lembro-me de ter visto seu livro sobre o assunto quando era estudante, e de ter ficado bastante cético, mesmo então, em relação a suas idéias sobre este assunto em particular.

A teoria errônea de Hinshelwood sobre a resistência às drogas era, naturalmente, uma teoria química. Seu livro estava cheio de equações que descreviam a velocidade das reações químicas. A idéia geral era que a presença da droga provocava mudanças no balanço químico da célula bacteriana que eram prejudiciais à reprodução desta. Entretanto, uma exposição prolongada da bactéria a altas doses produzia, por meios químicos diretos, ajustes no metabolismo da célula que limitavam o efeito prejudicial da droga e permitiam que as células sobrevivessem e se dividissem. Na divisão celular, a teoria dizia, esta forma simples de resistência às drogas era transmitida mecanicamente para as células irmãs por meio da composição química do material celular ordinário. O mecanismo proposto era uma realimentação negativa direta em um conjunto de reações químicas. (Se seu carro começa a sair da estrada e você aplica uma correção com o volante, isto é outro exemplo de retroalimentação negativa.)

Na teoria de Hinshelwood, os genes bacterianos não estavam envolvidos. Não havia sistema adaptativo complexo subjacente ao desenvolvimento da resistência bacteriana às drogas: não havia compressão de informação, não havia esquema, não havia variação ao acaso e não havia seleção. De fato, um capítulo do livro é dedicado a refutar a idéia de seleção das variantes espontâneas.

Podemos descrever a teoria de Hinshelwood como envolvendo "adaptação direta". Tais processos são muito comuns. Considere o funcionamento de um termostato ajustado para uma temperatura particular; o dispositivo faz com que o sistema de aquecimento funcione quando a temperatura cai abaixo do ponto escolhido e deixe de funcionar quando a temperatura é novamente igual a este ponto. No lugar de um conjunto de esquemas que evoluem e competem entre si, o termostato tem um único programa fixo, e muito simples. O dispositivo fica apenas resmungando consigo mesmo: "Está muito frio. Está muito frio. Está um pouquinho quente. Está muito frio...", e age de acordo.

É útil comparar a adaptação direta com o funcionamento dos sistemas adaptativos complexos, mas não pretendo sugerir que a adaptação direta é desinteressante. Na verdade, a maior parte da excitação em torno da cibernética ao final da Segunda Guerra Mundial era relacionada com o processo de adaptação direta, especialmente a estabilização de sistemas por meio de realimentação negativa. O princípio básico é o

mesmo do termostato, mas os problemas que ela apresenta podem ser muito mais desafiadores.

ADAPTAÇÃO DIRETA, SISTEMAS ESPECIALISTAS E SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS

A palavra “cibernética” foi introduzida pelo grande mas excêntrico professor de matemática do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Norbert Wiener, que quando criança tinha sido considerado um prodígio e nunca se livrou da necessidade de mostrar-se de maneira bizarra. Como estudante de pós-graduação no MIT, ocasionalmente o encontrava dormindo nas escadarias, criando um obstáculo real ao tráfego com sua figura portentosa. Uma vez ele enfiou a cabeça através da porta da sala do meu orientador de tese, Viki Weisskopf, e falou algumas palavras que Viki achou completamente incompreensíveis. “Oh, pensei que todos os intelectuais europeus sabiam chinês”, disse Wiener e correu para o saguão.

A palavra deriva do grego antigo *kubernetes*, que significa timoneiro. A palavra começa com a letra grega “kapa”, e é responsável pelo “kapa” de “Phi Beta Kappa”, a sociedade acadêmica honorífica cujo lema significa “filosofia, timoneira da vida”. Depois de ter sido emprestada pelo grego ao latim, e deste último emprestada para o francês e do francês para o inglês, a mesma palavra deu origem ao verbo “governar”, e na verdade a cibernética relaciona as duas, orientação e governabilidade, como ao controlar um robô. Mas, nos dias da cibernética, os robôs não eram usualmente capazes de criar um sistema evolutivo a partir de suas impressões sensoriais. Só agora estamos entrando na era dos robôs que são realmente sistemas adaptativos complexos.

Considere um robô móvel, por exemplo. No começo da era cibernética, ele poderia ter sido equipado com sensores para indicar a presença de uma parede próxima e ativar um dispositivo que permitisse evitá-la. Outros sensores poderiam detectar saliências à frente e mudar a forma de locomoção de modo predeterminado, de maneira a fazer com que o robô passasse por cima delas. O objetivo do projeto era fornecer uma resposta direta aos estímulos ambientais.

A próxima era foi a do “sistema especialista”, na qual a informação suprida por especialistas humanos em um campo era passada para um computador na forma de um “modelo interno” que poderia ser utilizado para interpretar os dados de entrada. Os avanços no planejamento de robôs obtidos desta maneira não eram dramáticos, mas é um exemplo de que um campo diferente pode ser usado para ilustrar esta

abordagem. O diagnóstico médico pode ser automatizado até certo ponto com a ajuda de conselhos especializados dos médicos e pela construção de uma “árvore de decisões” para o computador, com uma regra definida para a tomada de decisões em cada entroncamento baseada nas informações particulares que dizem respeito ao paciente. Tal modelo interno é fixo, ao contrário dos esquemas utilizados pelos sistemas adaptativos complexos. O computador pode diagnosticar a doença, mas não aprende cada vez mais sobre diagnósticos a partir de sua experiência com pacientes sucessivos. Ele continua a utilizar o mesmo modelo interno desenvolvido pela consulta aos especialistas.

É claro que os especialistas podem ser consultados novamente e o modelo interno reprojetoado para levar em conta os sucessos e os fracassos dos diagnósticos por computador. Neste caso, o sistema acrescido, consistindo de computador, projetistas de modelos e especialistas, pode ser considerado um sistema adaptativo complexo, um sistema artificial com “humanos no circuito”.

Hoje estamos entrando na era dos computadores e dos robôs que operam como sistemas adaptativos complexos sem humanos no circuito. Muitos dos futuros robôs terão esquemas elaborados sujeitos a variação e seleção. Considere um robô móvel de seis pernas com um conjunto de sensores para cada perna que detectam obstáculos, e um processador de informação que responde de uma maneira predeterminada aos sinais destes sensores para controlar os movimentos daquela perna, fazendo-a mover-se para cima ou para baixo, para trás ou para frente. Tais pernas lembram um conjunto de dispositivos cibernéticos antigos.

Hoje em dia este projeto pode incluir uma forma de comunicação entre as pernas, mas não através de uma unidade de processamento central. Em vez disso, cada perna teria a capacidade de influenciar o comportamento das outras por meio de elos de comunicação. O padrão da intensidade de influência das pernas umas sobre as outras seria um esquema sujeito a variações produzidas, por exemplo, pelos dados de entrada vindos de um gerador de números pseudo-randômicos. As pressões seletivas que influenciam a adoção ou a rejeição de padrões candidatos podem se originar de sensores adicionais que medem o que está acontecendo não apenas a uma perna individualmente, mas também ao robô como um todo, por exemplo, se este está se movendo para frente ou para trás e se sua barriga está suficientemente afastada do solo. Desta maneira o robô tenderia a desenvolver um esquema que lhe daria um modo de andar adaptado ao terreno sobre o qual ele está se locomovendo, e este está sujeito a alterações quando o tipo de terreno muda. Tal robô pode ser considerado, pelo menos, uma forma primitiva de sistema adaptativo complexo.

Fui informado de que um robô de seis pernas parecido com este foi construído no MIT e que foi descoberto, entre outros modos de andar, um que é comumente utilizado pelos insetos: as pernas dianteiras e traseiras de um lado se movem junto com a perna do meio no outro lado. Dependendo do terreno o robô utiliza este modo de andar.

Considere agora, em vez de um robô que aprende umas poucas propriedades úteis do terreno que precisa atravessar, um sistema adaptativo complexo que explora as propriedades gerais, assim como um vasto conjunto de características detalhadas, de um terreno muito maior, isto é, o universo como um todo.

CAPÍTULO 7

O EMPREENDIMENTO CIENTÍFICO

O conceito de sistema adaptativo complexo é maravilhosamente ilustrado pelo empreendimento científico humano. Os esquemas são teorias, e o que acontece no mundo real é a confrontação entre teoria e observação. Novas teorias devem competir com as já existentes, em parte com base na coerência e generalidade, mas essencialmente se elas explicam as observações existentes e predizem corretamente novas observações ou não. Cada teoria é uma descrição altamente condensada de uma ampla classe de situações e, como tal, necessita ser complementada com detalhes de uma ou mais situações para que possa fazer previsões específicas.

O papel da teoria na ciência deveria ser bastante óbvio, e mesmo no meu próprio caso, embora eu tenha devotado toda minha carreira à ciência teórica, precisei de um longo tempo para obter uma intuição real dela. Foi apenas quando entrei na escola de pós-graduação do MIT que finalmente percebi como a física teórica funciona.

Como estudante de graduação em Yale, consegui obter notas altas nos cursos de ciência e matemática sem compreender sempre o tópico que eu estava aprendendo. Na maioria dos casos, assim me parecia, o que se exigia era meramente regurgitar nos exames aquilo com que nos tinham alimentado na sala de aula. Meus pontos de vista mudaram quando assisti a uma das sessões dos seminários teóricos Harvard-MIT. Eu achava que o seminário era algum tipo de aula magna. Na verdade, o seminário não era absolutamente uma aula, mas uma discussão séria em grupo sobre tópicos de física teórica, particularmente da física dos núcleos atômicos e das partículas elementares. Professores, recém-doutores e estudantes de pós-graduação de ambas as instituições compareciam ao seminário; um teórico ministrava uma palestra e então havia uma discussão geral do tópico que ele tinha apresentado. Eu era incapaz de apreciar tal atividade científica de modo apropriado porque

meu modo de pensar ainda estava limitado pelas noções de aulas, notas e em agradar o professor.

Nesta ocasião o palestrante era um estudante de pós-graduação de Harvard que tinha apenas terminado sua dissertação de doutorado sobre as características do estado mais baixo de energia de um núcleo chamado boro dez (B^{10}), composto por cinco prótons e cinco nêutrons. Por meio de um método de aproximação que parecia promissor, mas que não tinha a garantia de funcionar, ele havia descoberto que o estado mais baixo de energia deveria ter um momento angular intrínseco, ou "spin", de uma unidade quântica,* como se acreditava em geral ser o caso. Quando ele terminou sua palestra, me perguntei que tipo de impressão sua dedução aproximada do resultado esperado tinha produzido sobre os teóricos notáveis sentados na fileira da frente. Entretanto, a primeira pessoa a fazer comentários não era em absoluto um teórico, mas um homem pequeno com uma barba de três dias que dava a impressão de ter simplesmente se esgueirado do porão do MIT. Ele disse: "Ei, o spin não é um. É três. Eles o mediram!" De repente, compreendi a principal função do teórico: não é impressionar os professores sentados na fila da frente mas sim concordar com as observações. (É claro que os experimentais podem cometer erros; neste caso, entretanto, a observação a que se referia o homem malvestido se revelou correta.)

Fiquei envergonhado por não ter compreendido mais cedo que o empreendimento científico funcionava desta maneira. O processo pelo qual as teorias são selecionadas de acordo com sua concordância ou não com a observação (assim como sua coerência e generalidade) não é tão diferente da evolução biológica, na qual os padrões genéticos são selecionados de acordo com a tendência de levar ou não os organismos a formar uma progênie. Mas não pude apreciar completamente o paralelismo entre os dois processos até muitos anos depois, quando aprendi mais sobre simplicidade e complexidade, e sobre sistemas adaptativos complexos.

Hoje, a maior parte dos físicos são teóricos, ou experimentais. Algumas vezes os teóricos estão na frente ao formular um esquema teórico altamente bem-sucedido, e capaz de fazer previsões repetidamente confirmadas pela observação. Outras vezes os experimentais encontram um resultado inesperado, e os teóricos têm de voltar ao quadro-negro. Mas a existência destas duas classes distintas de pesquisadores não deveria ser considerada garantida. Não foi sempre

* O momento angular, que na mecânica clássica pode assumir valores contínuos, na mecânica quântica assume valores que são múltiplos inteiros ou semi-inteiros de uma constante fundamental, a constante de Planck. (N. do T.)

assim na física, e em muitos campos — incluindo a antropologia cultural, a arqueologia e a maior parte da biologia — ainda há apenas uns poucos teóricos profissionais e estes não são necessariamente tratados com grande respeito. Na biologia molecular, uma matéria de muito prestígio hoje em dia, a maior parte dos quebra-cabeças teóricos que apareceram foram resolvidos facilmente pela engenhosidade dos experimentais. Como consequência, muitos biólogos moleculares proeminentes não se deixam impressionar com a necessidade de teóricos na biologia.

Em contrapartida, o campo da biologia das populações tem uma longa e honrosa tradição como teoria matemática, personificada por figuras notáveis como sir Ronald Fisher, J. B. S. Haldane e Sewall Wright. Por causa de seus trabalhos e dos de muitos outros teóricos, numerosas predições detalhadas em genética populacional foram feitas e confirmadas pela observação, e mesmo a literatura matemática foi enriquecida.

A teoria tende a emergir como profissão à medida que a ciência amadurece e a profundidade e o poder dos métodos teóricos aumentam. Mas os papéis da teoria e da observação deveriam ser considerados distintos haja ou não classes separadas de praticantes das duas atividades. Vejamos como a interação entre os dois se harmoniza com a noção de sistema adaptativo complexo.

Tipicamente, as teorias surgem como resultado de uma grande quantidade de observações no decurso das quais é feito um esforço deliberado para separar o joio do trigo, para extrair regras a partir de circunstâncias especiais ou acidentais. Uma teoria é formulada como um princípio simples ou um conjunto de princípios, expressos em uma mensagem comparativamente curta. Como Stephen Wolfram enfatizou, uma teoria é um pacote comprimido de informações aplicável a muitos casos. Em geral, há teorias que competem entre si, cada uma delas compartilhando essas características. Para fazer predições sobre um caso particular, cada teoria deve ser esmiuçada ou sofrer adições, isto é, a afirmação geral comprimida que constitui a teoria deve ser suplementada com informação detalhada sobre o caso especial. As teorias podem então ser testadas por observações adicionais, muitas vezes feitas no decorrer das experiências. O sucesso de uma teoria na predição de resultados daquelas observações — em competição com as outras — ajuda a determinar se ela sobreviverá ou não. Teorias em desacordo sério com os resultados de experiências bem projetadas e cuidadosas (especialmente experiências que foram repetidas com resultados consistentes) tendem a ser substituídas por outras melhores, enquanto que teorias que predizem e explicam as observações com sucesso tendem a ser aceitas e

utilizadas como base para mais especulações teóricas (isto é, enquanto elas mesmas não forem questionadas por observações posteriores).

FALSIFICABILIDADE E SUSPENSE

Foi muitas vezes enfatizado, particularmente pelo filósofo Karl Popper, que a característica essencial da ciência é que suas teorias são falsificáveis. Elas fazem previsões e observações adicionais que podem verificar estas previsões. Quando uma teoria é contradita por observações que foram repetidas até ganharem aceitação, esta teoria deve ser considerada errada. A possibilidade de fracasso de uma idéia está sempre presente, dando um ar de suspense a toda a atividade científica.

Algumas vezes a demora em confirmar ou desaprovar uma teoria é tão grande que seu proponente morre antes que o destino de sua idéia seja conhecido. Aqueles dentre nós que vêm trabalhando na física fundamental nas últimas décadas têm tido a sorte de ver suas idéias teóricas testadas ainda em vida. A excitação em saber que nossa previsão foi realmente confirmada, e que o novo esquema subjacente está basicamente correto, pode ser difícil de transmitir, mas é irresistível.

Foi muitas vezes dito que as teorias, mesmo quando contraditas por novas evidências, só morrem quando seus proponentes morrem. Embora esta observação seja usualmente dirigida às ciências físicas, minha impressão é que, se ela é válida, o é mais para as complexas e difíceis ciências da vida e do comportamento. Minha primeira esposa, Margaret, estudante de arqueologia clássica, achou-a válida para seu campo de atividades nos anos 50. Ficou impressionada ao descobrir que muitos físicos na verdade mudavam de opinião quando confrontados com evidências que contradiziam suas idéias favoritas.

Quando parece estar faltando suspense em um campo particular, podem surgir controvérsias sobre se ele é realmente científico ou não. A psicanálise é freqüentemente criticada por não ser falsificável, e me inclino a concordar. Aqui quero dizer a psicanálise como uma teoria que descreve como o comportamento humano é influenciado por processos mentais externos à percepção consciente, e como os próprios processos mentais são iniciados pelas experiências, especialmente as primeiras. (Não discutirei o tratamento, que é quase um assunto completamente à parte. O tratamento poderia ser útil por causa de um relacionamento construtivo entre o analista e o analisando sem com isso confirmar as idéias da psicanálise. Da mesma forma, o tratamento pode ser ineficiente mesmo que muitas destas idéias estejam corretas.)

Acredito que há provavelmente uma dose considerável de verdade no conjunto de crenças desenvolvido pelos psicanalistas, mas no presente momento este não se constitui em uma ciência precisamente porque não é falsificável. Há alguma afirmação feita pelo paciente, ou qualquer comportamento que possa ser demonstrado por este, que poderia de alguma forma não ser compatível com as idéias subjacentes à psicanálise? Se não há, estas idéias não podem realmente equivaler a uma teoria científica.

Por volta dos anos 60, brinquei com a idéia de passar da física teórica para a psicologia observacional ou psiquiatria. Queria isolar um subconjunto das idéias da psicanálise que eram falsificáveis, e portanto poderiam equivaler a uma teoria, e então tentar descobrir maneiras de testá-las. (O conjunto de idéias poderia não corresponder exatamente àquelas de uma escola psicanalítica particular, mas pelo menos estariam estreitamente relacionadas com as da psicanálise em geral. Elas seriam concernentes ao papel dos processos mentais externos à percepção na vida cotidiana de pessoas razoavelmente normais assim como aos padrões de comportamento repetido, e aparentemente não adaptável, exibido por pessoas classificadas como neuróticas.)

Por alguns meses visitei vários psicanalistas e psicólogos acadêmicos notáveis (naquele tempo ainda fortemente influenciados pelo behaviorismo — a psicologia cognitiva ainda estava na infância). Uns e outros desencorajaram, embora por razões opostas. Muitos dos psicólogos tendiam a achar que os processos mentais inconscientes não eram importantes ou eram muito difíceis de ser estudados, ou ambos, e que a psicanálise era tão tola que não merecia qualquer atenção séria. Os analistas tendiam a achar que sua disciplina estava tão bem estabelecida que não era necessário qualquer esforço elaborado para incorporar algumas de suas idéias à ciência, e que qualquer pesquisa necessária para refinar seus preceitos poderia ser mais bem realizada pelos próprios psicanalistas no decurso de seu trabalho com os pacientes. Finalmente desisti e continuei a trabalhar em física, mas muitos anos mais tarde tive a oportunidade de fazer uma contribuição indireta a um esforço renovado com o objetivo de incorporar à ciência certas idéias sobre processos mentais conscientes e inconscientes, e seus efeitos sobre os padrões de comportamento. Este esforço está dando alguns resultados encorajadores.

PRESSÕES SELETIVAS SOBRE O EMPREENDIMENTO CIENTÍFICO

Na prática, o empreendimento científico não se ajusta de forma precisa a qualquer modelo bem definido de funcionamento. Idealmente, os cien-

tistas realizam experiências ou de uma maneira exploratória ou para testar propostas teóricas sérias. Pressupõe-se que eles julguem uma teoria pelo grau de precisão, generalidade e coerência da descrição que ela apresenta dos dados experimentais. Eles não podem exibir traços como egoísmo, desonestidade ou preconceito.

Mas, apesar de tudo, os praticantes da ciência são seres humanos. Eles não são imunes às influências normais do egoísmo, interesse econômico próprio, modismo, veleidades e preguiça. Um cientista pode tentar roubar créditos de financiamento iniciando conscientemente um projeto inútil, só pelos ganhos, ou considerar uma idéia convencional como estabelecida, em vez de procurar uma explicação melhor. De tempos em tempos, alguns cientistas chegam mesmo a camuflar seus resultados, quebrando um dos tabus mais sérios de sua profissão.

Não obstante, o filósofo ocasional, o historiador ou sociólogo da ciência que se aproveita destes lapsos de retidão científica ou da prática científica ideal para condenar todo o empreendimento como corrupto não conseguiu entender o objetivo da ciência. Por sua própria natureza, o empreendimento científico é autocorretivo e tende a se erguer acima de quaisquer abusos que possam ocorrer. Reivindicações extravagantes e sem fundamentos como aquelas feitas sobre a água polivalente, ou a fusão a frio, são logo desconsideradas. Fraudes como a do Homem de Piltdown* são finalmente expostas. Preconceitos como aqueles contra a teoria da relatividade são superados.

Um estudioso dos sistemas adaptativos complexos diria que no empreendimento científico as pressões seletivas que *caracterizam* a ciência são acompanhadas pelas pressões familiares que geralmente ocorrem nos assuntos humanos. Mas, caracteristicamente, as pressões seletivas científicas têm um papel crucial no avanço da compreensão da natureza. Observações repetidas e cálculos (e comparações entre estes) tendem a varrer, especialmente a longo prazo, as imperfeições (isto é, aquelas características imperfeitas do ponto de vista científico) introduzidas por outras pressões. Enquanto que os detalhes de qualquer descoberta científica são de algum modo confusos, o resultado líquido pode ser algumas vezes um esclarecimento brilhante e geral, como na formulação e verificação de uma teoria unificadora.

* Em 1911, em Piltdown, no condado de Sussex, Inglaterra, foi descoberto um crânio humano que deu origem a um escândalo científico. Considerado como pertencente a um ancestral do homem, somente em 1953, após exaustivas análises, foi demonstrado que o crânio era uma fraude. (N. do T.)

TEORIAS QUE UNIFICAM E SINTETIZAM

Algumas vezes uma teoria consegue uma síntese notável, condensando em uma afirmação breve e elegante as regularidades encontradas em uma ampla classe de fenômenos previamente descritos separada e inadequadamente. Um exemplo esplêndido extraído da física fundamental é o trabalho feito por James Clerk Maxwell entre 1850 e 1860 sobre a teoria do eletromagnetismo.

Desde tempos antigos algumas pessoas estavam familiarizadas com certos fenômenos simples da eletricidade estática, por exemplo que o âmbar (*elektron* em grego) tinha o poder, quando atritado com a pele do gato, de atrair fragmentos de penas. Da mesma forma, elas tinham conhecimento sobre certas propriedades do magnetismo, incluindo o fato de que o mineral magnetita (um óxido de ferro assim chamado por ser muito comum na Magnésia, Ásia Menor) é capaz de atrair pequenos pedaços de ferro e também de magnetizá-los de forma tal que estes podem fazer o mesmo com outros pedacinhos de ferro. William Gilbert, um dos primeiros cientistas modernos, incluiu algumas observações importantes sobre a eletricidade em seu famoso tratado de magnetismo de 1600.* Mas a eletricidade e o magnetismo eram ainda considerados classes separadas de fenômenos; somente no século XIX se compreendeu que estavam intimamente relacionados.

A invenção da primeira bateria por Alessandro Volta, a pilha voltaica, em 1800, resultou em experiências sobre correntes elétricas que abriram o caminho para a descoberta da interação entre a eletricidade e o magnetismo. A ciência do eletromagnetismo nasceu por volta de 1820, quando Hans Christian Oersted descobriu que a corrente elétrica em um fio produz um campo magnético em torno deste. Em 1831, Michael Faraday descobriu que um campo magnético variável pode induzir uma corrente elétrica em um fio com a forma de uma espiral; este efeito foi mais tarde interpretado como a afirmação de que um campo magnético variável no tempo dá origem a um campo elétrico.

Na década de 1850, quando Maxwell começou seu trabalho sobre uma descrição matemática completa dos efeitos eletromagnéticos, a maioria das peças individuais do quebra-cabeça eletromagnético tinha sido formulada como leis científicas. O que Maxwell fez foi escrever um conjunto de equações que reproduziram aquelas leis, como é mostrado aqui na página seguinte. Hoje nos livros-texto para estudantes de gradu-

* *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure*, publicado pela primeira vez em Londres, no ano de 1600. William Gilbert (1544-1603), médico da rainha Elizabeth I, foi o cientista mais notável de seu tempo. (N. do T.)

Em uma notação mais ou menos como aquela utilizada nos livros-texto de graduação hoje em dia:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{E}} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (4)$$

Em uma notação menos condensada como aquela utilizada quando Maxwell começou seu trabalho:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{1}{c} \dot{B}_z &= 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{1}{c} \dot{B}_x &= 0 \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} + \frac{1}{c} \dot{B}_y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{1}{c} \dot{E}_z &= \frac{4\pi}{c} j_z \\ \frac{\partial B_y}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{1}{c} \dot{E}_x &= \frac{4\pi}{c} j_x \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{1}{c} \dot{E}_y &= \frac{4\pi}{c} j_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Em notação relativística mais condensada:

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} j^\mu \quad (1 \text{ e } 4)$$

$$\epsilon^{\mu\nu\kappa\lambda} \partial_\nu F_{\kappa\lambda} = 0 \quad (2 \text{ e } 3)$$

Três maneiras de escrever as equações de Maxwell.

ação, elas são usualmente escritas como quatro equações. A primeira reafirma a lei de Coulomb, descrevendo como as cargas elétricas reproduzem um campo elétrico. A segunda equação incorpora a conjectura de Ampère de que não há cargas magnéticas verdadeiras (e portanto todo o magnetismo pode ser atribuído às correntes elétricas). A terceira equação reformula a lei de Faraday que descreve a criação de um campo elétrico por um campo magnético variável. A quarta equação, como Maxwell a escreveu primeiramente, reproduz meramente a lei de Ampère que descreve como um campo elétrico dá origem a um campo magnético. Olhando para suas quatro equações, Maxwell viu que havia algo errado

com elas e corrigiu a falha alterando a última equação. O raciocínio que ele na verdade utilizou na época parece bastante obscuro para nós hoje, mas há uma versão modificada de seu argumento que atrai a mente contemporânea e deixa claro que tipo de alteração era necessário.

A conservação da carga elétrica total (sua constância no tempo) é uma lei simples e bela, bem estabelecida pela observação, que na época de Maxwell já era um princípio importante. Entretanto, suas equações originais não obedeciam àquele princípio. Que tipo de alteração nas equações faria com que elas o obedecessem? A terceira equação tem um termo que descreve a geração de um campo elétrico por um campo magnético variável. Por que não se poderia inserir um termo correspondente na quarta equação e que descreveria a geração de um campo magnético por um campo elétrico variável? É claro que, para um valor particular do coeficiente (fator de multiplicação) do novo termo, a equação tornou-se consistente com a conservação da carga elétrica. Além do mais, aquele valor era tão pequeno que Maxwell pôde adicioná-lo seguramente sem contradizer os resultados de qualquer experiência conhecida. Com o novo termo chamado “corrente de deslocamento”, as equações de Maxwell estavam completas. As ciências da eletricidade e do magnetismo foram completamente unificadas por meio de uma descrição consistente e elegante dos fenômenos eletromagnéticos.

As conseqüências da nova descrição podiam agora ser exploradas. Em breve se descobriu que as equações, com o novo termo incluído, tinham “soluções ondulatórias” — ondas eletromagnéticas de todas as freqüências eram geradas por cargas elétricas de um modo que podia ser calculado. No vácuo, as ondas viajariam todas com a mesma velocidade. Computando essa velocidade, Maxwell descobriu que esta era idêntica, dentro da margem de erro que prevalecia naquela época, à famosa velocidade da luz, cerca de 300 mil quilômetros por segundo. Poderia a luz consistir de ondas eletromagnéticas dentro de uma certa banda de freqüências? Esta conjectura tinha sido feita antes, de um modo mais vago, por Faraday, mas ganhou enormemente em clareza e plausibilidade a partir do trabalho de Maxwell. Embora tenha levado anos para ser provada pela experiência, a idéia estava absolutamente correta. As equações de Maxwell também exigiam a existência de ondas de freqüências maiores do que as da luz visível (o que chamamos agora raios ultravioleta, raios X etc.) e de freqüências mais baixas do que o visível (o que chamamos agora raios infravermelhos, microondas, ondas de rádio etc.). Finalmente todas estas formas de radiação eletromagnética foram descobertas experimentalmente, não apenas confirmando a teoria mas também conduzindo aos avanços extraordinários na tecnologia com os quais somos todos familiares.

A SIMPLICIDADE DAS TEORIAS GRÃ-UNIFICADORAS*

As equações de Maxwell descrevem o comportamento do eletromagnetismo por todo o universo em umas poucas linhas. (O número exato depende da compacidade da notação, como na figura.) Dadas as condições de contorno,** as cargas e as correntes, os campos elétrico e magnético podem ser calculados. Os aspectos universais do eletromagnetismo estão contidos nas equações — apenas detalhes especiais necessitam ser fornecidos. As equações identificam as regularidades com precisão e as condensam em um pequeno pacote matemático de imenso poder. O que poderia ser um exemplo mais elegante de um esquema?

Como o tamanho do esquema é praticamente nulo, assim também é a complexidade efetiva, como a definimos. Em outras palavras, as leis do eletromagnetismo são extremamente simples.

Um crítico pode queixar-se de que, embora as equações de Maxwell sejam deveras curtas, não obstante exigem alguma preparação para que se possa entender a notação nas quais elas são expressas. Quando Maxwell publicou pela primeira vez as equações, ele utilizou um modo menos compacto de escrevê-las do que é hoje utilizado no ensino dos estudantes de graduação, e o conjunto de equações era de alguma forma maior. De modo equivalente, podemos usar agora uma notação relativística que as torna mais curtas. (Ambas as versões, a mais longa e a mais curta, são ilustradas.) O crítico pode exigir que em cada caso incluamos no esquema não apenas as equações mas também uma explicação da notação.

Esta não é uma exigência absurda. Já dissemos, com relação à complexidade rudimentar, que seria falso empregar uma linguagem especial apenas para reduzir o tamanho de uma descrição. De fato, a matemática subjacente às equações de Maxwell não é particularmente difícil de se explicar, mas mesmo que este não fosse o caso, ainda assim ela exigiria apenas uma quantidade finita de interpretação. Isto se reduz à insignificância quando consideramos que as equações se aplicam a todos os campos elétricos e magnéticos, em todo o universo. A compressão obtida é ainda enorme.

* É uma constante na história da física teórica as tentativas de formular teorias abrangentes — o eletromagnetismo é um exemplo bem-sucedido. Hoje em dia os teóricos tentam formular teorias que abranjam todas as interações fundamentais da matéria. A estas tentativas dá-se o nome geral de teorias grã-unificadoras ou grã-unificadas. (N. do T.)

** Condições de contorno (ou fronteira) são aquelas impostas ao campo eletromagnético sobre as superfícies que delimitam as regiões do espaço em que este existe. Por exemplo, em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico sobre a superfície de uma placa condutora deve ser perpendicular à superfície, caso contrário haverá corrente elétrica e o equilíbrio será rompido. (N. do T.)

GRAVITAÇÃO UNIVERSAL — NEWTON E EINSTEIN

Outra notável lei universal é a da gravitação. Isaac Newton desenvolveu a primeira versão, a qual dois séculos e meio mais tarde foi sucedida pela teoria relativística geral da gravitação de Albert Einstein, mais precisa.

Newton teve sua intuição brilhante da universalidade da gravitação quando era um jovem de 23 anos. Em 1665 a Universidade de Cambridge foi forçada a fechar por causa da peste e Newton, bacharel recém-formado, retornou à casa de sua família em Woolsthorpe, Lincolnshire. Lá, em 1665 e 1666, ele começou a desenvolver o cálculo integral e diferencial, assim como a lei da gravitação e suas três leis do movimento. Além disso, realizou a famosa experiência com um prisma, mostrando que a luz branca era constituída pelas cores do arco-íris. Cada um destes trabalhos foi uma grande inovação, e, embora os historiadores da ciência gostem de enfatizar que Newton não os completou todos em um único *annus mirabilis*, ou ano maravilhoso, ainda assim admitem que ele nesta época deu um bom impulso a cada um. Como minha esposa, a poetisa Marcia Southwick, gosta de dizer, ele poderia ter escrito uma redação impressionante intitulada “O que eu fiz durante minhas férias”.

A lenda associa a concepção de Newton de uma lei universal para a gravitação com a queda de uma maçã. Há realidade em tal incidente? Os historiadores da ciência não estão certos, mas não descartam a possibilidade, porque há quatro fontes independentes que se referem a ele. Uma delas, Conduitt, escreveu:

No ano de 1666 ele partiu novamente de Cambridge... para sua mãe em Lincolnshire e enquanto meditava num jardim passou pela sua cabeça que o poder da gravidade (que havia feito cair uma maçã da árvore ao chão) não era limitado até uma certa distância a partir da Terra, mas que este poder devia se estender muito mais longe do que usualmente se pensava. Por que não até a Lua, disse ele para si próprio, e se é assim ele deve influenciar seu movimento e talvez mantê-la em sua órbita, após o que ele começou a calcular qual seria o efeito de tal suposição, mas privado de livros e considerando a estimativa comum corrente entre os geógrafos e nossos marinheiros antes que Norwood tivesse medido a Terra, na qual sessenta milhas inglesas eram contidas em um grau de latitude sobre a sua superfície, seu cálculo não concordou com sua teoria e o deixou inclinado a considerar a noção de que, junto com a força da gravidade, poderia haver uma mistura com aquela força que a Lua teria se fosse carregada por um vórtice...

Nesta história vemos muitos dos processos que podem acontecer ocasionalmente na vida de um cientista teórico. Uma idéia surge em um momento inesperado. Ela torna possível uma relação entre dois conjuntos de fenômenos que se pensava previamente distintos. Uma teoria é então formulada. Algumas de suas conseqüências podem ser preditas; em física, o teórico começa a calcular para fazer estas predições. Elas podem não concordar com a observação mesmo que a teoria seja correta, ou por causa de um erro nas observações registradas (como no caso de Newton), ou porque o teórico cometeu um erro conceitual ou matemático ao aplicar a teoria. O teórico pode então modificar a teoria correta (com sua simplicidade e elegância) e construir uma mais complicada para acomodar o erro. Observe ao final da citação de Conduitt a passagem sobre a obscura força devida ao "vórtice" que Newton pensou em adicionar à força da gravidade!

Depois de um longo tempo, a discrepância entre teoria e observação foi resolvida e a teoria da gravitação universal de Newton aceita, até que foi substituída mais ou menos em 1915 pela teoria relativística geral de Einstein, que concorda exatamente com a de Newton no limite em que todos os corpos se movem muito vagarosamente em comparação com a velocidade da luz. No sistema solar, satélites e planetas movem-se com velocidades da ordem de 16 quilômetros por segundo, enquanto a velocidade da luz é de cerca de 300 mil quilômetros por segundo. As correções de Einstein à teoria de Newton são portanto muito pequenas e até agora só foram detectadas em umas poucas observações. Em todos os testes realizados, a teoria de Einstein é confirmada.

A substituição de uma excelente teoria por uma ainda melhor é descrita de uma maneira particular por Thomas Kuhn no seu livro *A estrutura das revoluções científicas*,* e seu ponto de vista tornou-se extremamente influente. Ele dá atenção especial às "mudanças de paradigmas", usando "paradigma" com um sentido bastante especial (alguns podem dizer que ele está utilizando mal a palavra!). Sua abordagem enfatiza mudanças em questões de princípio à medida que a teoria aperfeiçoada assume o controle.

No caso da gravitação, Kuhn pode apontar para o fato de que a teoria de Newton utiliza "ação à distância", isto é, uma força gravitacional que atua instantaneamente, enquanto na teoria gravitacional de Einstein as influências se propagam, como as eletromagnéticas, com a veloci-

* Publicado no Brasil pela Editora UnB, coleção Debates. (N. do T.)

dade da luz. Na teoria não relativística de Newton, o espaço e o tempo são tratados como separados e absolutos, e a gravitação não é relacionada com a geometria; na teoria de Einstein, o espaço e o tempo são misturados (como eles sempre são na física relativística), e a gravitação einsteiniana pode ser considerada intimamente relacionada com a geometria do espaço-tempo. A relatividade geral, ao contrário da gravitação newtoniana, também é baseada no princípio da equivalência que afirma ser impossível diferenciar localmente um campo gravitacional de um sistema de referência acelerado (como um elevador); a única coisa que podemos sentir ou medir localmente é a diferença entre a nossa aceleração e a aceleração local da gravidade.

A abordagem da mudança de paradigma está relacionada com estas diferenças profundas em filosofia e linguagem entre uma teoria antiga e uma nova. Kuhn não gosta de realçar o fato (embora o mencione, é claro) de que a teoria antiga pode ainda fornecer uma aproximação suficientemente boa para os cálculos e previsões no domínio para o qual ela foi desenvolvida (neste caso o limite de campos fracos e velocidades relativas muito baixos). Não obstante, gostaria de chamar atenção especial para esta característica para enfatizar que, em uma competição de esquemas no empreendimento científico, o triunfo de um esquema sobre outro não significa necessariamente que o perdedor é abandonado e esquecido. De fato, ele pode ser utilizado bem mais freqüentemente do que seu sucessor mais preciso e sofisticado. Isto é certamente verdade para a mecânica newtoniana do sistema solar *versus* a mecânica einsteiniana. A vitória na competição entre teorias científicas pode ser muito mais uma questão de rebaixamento da teoria antiga e promoção da nova do que uma questão de morte do vencido (é claro que muitas vezes acontece de a velha teoria não ter mais qualquer valor, então são principalmente os historiadores da ciência que se dão o trabalho de discuti-las).

A equação relativística geral de Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi k\tau_{\mu\nu}$$

é para a gravitação o que as equações de Maxwell são para o eletromagnetismo. O lado esquerdo da equação relaciona-se com a curvatura do espaço-tempo (e portanto ao campo gravitacional) e o lado direito com a densidade de energia etc., da matéria, mas não do campo gravitacional. Ela expressa em uma única fórmula curta as características universais dos campos gravitacionais por todo o cosmo. Dadas as massas, posições e velocidades da matéria, podemos calcular o campo gravitacional (e assim o efeito da gravitação sobre o movimento de um corpo de prova) em qualquer lugar e tempo. Estamos tratando com um esquema notavel-

mente poderoso que comprimiu em uma breve mensagem as propriedades gerais da gravitação em todas as partes.

Novamente, um crítico poderia exigir que incluíssemos como parte do esquema não apenas a fórmula, mas também uma explicação dos símbolos. Meu pai, que como leigo inteligente se esforçou em aprender a teoria de Einstein, costumava dizer: "Veja como é simples e bela esta teoria, mas o que são $T_{\mu\nu}$ e $G_{\mu\nu}$?" Como no caso do eletromagnetismo, mesmo se um plano de estudos é incluído no esquema, a equação de Einstein é ainda um achado em termos de compressão, já que descreve o comportamento de todos os campos gravitacionais em todas as partes. O esquema é ainda notavelmente curto e sua complexidade baixa. Portanto, a teoria relativística geral da gravitação de Einstein é simples.

CAPÍTULO 8

O PODER DA TEORIA

O modo de pensar do cientista teórico não é útil apenas para testar os segredos essenciais do universo, mas também em muitas outras tarefas. Por toda parte em torno de nós há fatos que se relacionam uns com os outros. Eles podem, é claro, ser considerados entidades separadas e compreendidos desta maneira. Mas que diferença faz quando os vemos como parte de um padrão! Muitos fatos então se tornam mais do que apenas itens a serem memorizados — suas correlações permitem-nos utilizar uma descrição condensada, uma espécie de teoria, um esquema, para apreendê-los e os lembrar. Eles começam a fazer algum sentido. O mundo torna-se um lugar mais compreensível.

Padrões de reconhecimento surgem naturalmente em nós humanos; afinal, nós mesmos somos sistemas adaptativos complexos. Está em nossa natureza, por herança biológica, e também por meio da transmissão de cultura, ver padrões, identificar regularidades, construir esquemas em nossas mentes. Entretanto, estes esquemas são muitas vezes promovidos ou rebaixados, aceitos ou rejeitados, em resposta às pressões seletivas que são muito diferentes das que operam nas ciências, onde a concordância com a observação é tão crítica.

Desde tempos imemoriais, abordagens não científicas à construção de modelos do mundo que nos cerca têm caracterizado muito do pensamento humano, e elas são ainda bastante difundidas. Considere, por exemplo, a versão de magia empática baseada na idéia de que coisas similares devem estar relacionadas. Parece natural a muitas pessoas em todo o mundo que, na falta de chuva, elas devam realizar uma cerimônia na qual a água é retirada de um lugar especial e derramada sobre o solo. A similaridade entre a ação e o fenômeno desejado sugere que deveria haver uma conexão causal. As pressões seletivas que ajudam a manter tal crença não incluem o sucesso objetivo, o critério que é utilizado na

ciência (pelo menos quando a ciência está funcionando de modo apropriado). Em vez disso, outros tipos de seleção estão operando. Por exemplo, pode haver indivíduos poderosos que realizem a cerimônia e encorajem a crença para perpetuar sua autoridade.

A mesma sociedade pode também ser familiar com a magia empática que funciona por meio de um efeito sobre as pessoas, digamos, comer o coração de um leão para aumentar a bravura de um guerreiro. Agora, isto pode levar a algum sucesso objetivo, simplesmente por meios psicológicos: se um homem acredita que comeu algo que aumentará sua coragem, isto pode lhe dar a confiança para agir bravamente. Da mesma forma, a bruxaria destrutiva (baseada na magia empática ou não) pode ser objetivamente bem-sucedida se a vítima acredita nela e sabe que a mesma está sendo praticada. Digamos que você queira que eu padeça de dor e faz um boneco de cera que me representa, com alguns cabelos e pedaços de minhas unhas embebidas nele, então finca alfinetes no boneco. Se eu acredito, mesmo um pouco, na eficácia de tal magia e sei que você está envolvido nela, posso sentir dor nos lugares apropriados e ficar doente (e, em um caso extremo, talvez mesmo morrer) em razão de efeitos psicossomáticos. O sucesso ocasional (ou freqüente!) da magia empática em tais casos pode então encorajar a crença de que tal magia funciona, mesmo quando ela não pode obter sucesso objetivo exceto por acaso, como na cerimônia para produzir chuvas.

Retornaremos ao assunto dos modelos não-científicos, assim como às muitas razões de seu apelo, no capítulo sobre superstição e ceticismo, mas no momento estamos preocupados com o valor de teorizar *de maneira científica* sobre o mundo em torno de nós, observando como as conexões e as relações de funcionamento se encaixam nos devidos lugares.

“MERAMENTE TEÓRICO”

Muitas pessoas parecem ter dificuldades com a idéia de teoria porque elas têm dificuldades com a própria palavra, que é comumente utilizada de dois modos bastante distintos. De um lado ela pode significar um sistema coerente de regras e princípios, uma explicação mais ou menos verificada ou estabelecida dos fenômenos ou fatos conhecidos. Por outro lado, pode referir-se à especulação, a uma suposição ou conjectura, ou a uma hipótese, idéia ou opinião não testadas. Aqui a palavra é utilizada com o primeiro conjunto de significados, mas muitas pessoas pensam no segundo quando ouvem “teoria” ou “teórico”. Um dos meus colegas na junta de diretores da Fundação John D. e Catherine T. MacArthur é inclinado a comentar, quando algum projeto de pesquisa

razoavelmente ousado é proposto para financiamento: “Acho que deveríamos correr o risco e apoiar isto, mas sejamos cuidadosos e não gastemos dinheiro com qualquer coisa *teórica*.” Para um teórico profissional, aquelas deveriam ser palavras de ordem, mas compreendo que eu e ele usemos teórico com sentidos diferentes.

TEORIZANDO SOBRE NOMES DE LUGARES

Pode ser útil teorizar sobre quase qualquer aspecto do mundo em torno de nós. Considere os nomes de lugares. Na Califórnia, as pessoas familiarizadas com os nomes hispânicos dos lugares ao longo da costa não ficam surpresas ao saber que muitos deles são relacionados com a religião católica romana, da qual os exploradores espanhóis e colonos eram usualmente devotados. Todavia, acredito que poucas pessoas perguntem por que a cada um destes lugares foi dado o seu nome particular. Ainda assim, não é absurdo perguntar se poderia haver algum sistema por trás da atribuição de nomes de santos como San Diego, Santa Catalina e Santa Bárbara, assim como outros nomes religiosos como Concepción (Conceição) ou Santa Cruz, a ilhas, baías e cabos ao longo da costa. Temos um palpite quando observamos no mapa cabo Año Nuevo (Ano-Novo). Poderiam os outros nomes referir-se também aos dias do ano? É claro! No calendário católico romano encontramos, além de 1º de janeiro, Ano-Novo, os seguintes nomes:

San Diego	(são Diogo de Alcalá de Henares) 12 de novembro
Santa Catalina	(santa Catarina de Alexandria) 25 de novembro
San Pedro	(são Pedro de Alexandria) 26 de novembro
Santa Bárbara	(santa Bárbara, Virgem e Mártir) 4 de dezembro
San Nicolás	(são Nicolau de Mira) 6 de dezembro
La Purísima Concepción	(Imaculada Conceição) 8 de dezembro

Talvez em uma viagem de exploração as características geográficas fossem batizadas em ordem do sudeste para o noroeste, de acordo com os dias em que foram avistadas. Certamente os eruditos verificaram nos

registros históricos que em 1602 o explorador Sebastián Viscaíno batizou em 12 de novembro a baía de San Diego, em 25 de novembro a ilha de Santa Catalina, em 26 de novembro a baía de San Pedro, em 4 de dezembro a baía de Santa Bárbara, em 6 de dezembro a ilha de San Nicolás e em 8 de dezembro o cabo Concepción. O cabo Año Nuevo foi aparentemente o primeiro ponto avistado no novo ano de 1603, embora em 3 de janeiro e não no dia de Ano-Novo. Em 6 de janeiro, Dia de Reis, Viscaíno batizou o cabo Reyes (Reis).

A teoria funciona, mas será ela geral? O que dizer sobre Santa Cruz? O dia da Santa Cruz é 14 de setembro, que não se enquadra na seqüência. Teria sido ela batizada em uma viagem de exploração diferente? O esquema está começando a adquirir um pouco de complexidade. De fato, muitos nomes religiosos espanhóis ao longo da costa correspondem a datas apenas em umas poucas viagens de exploração, assim, a complexidade efetiva não é tão grande.

Neste modo de fazer teoria, a construção de esquemas rudimentares para descrever os resultados da atividade humana, exceções arbitrárias podem ser encontradas, as quais afortunadamente não infestam esquemas como as equações de Maxwell para o eletromagnetismo. San Quentin, por exemplo, localizada ao norte de San Francisco e bem conhecida por sua prisão estadual, soa como se tivesse sido batizada por algum explorador espanhol primitivo no dia de San Quentin. Todavia, pesquisa realizada pelos especialistas em nomes de lugares revela que o "San" (são) foi acrescentado erroneamente ao nome inicial Quentin, que vem do espanhol Quintín, o nome de um chefe índio lá capturado no ano de 1840.

TEORIA EMPÍRICA — A LEI DE ZIPF

No exemplo dos nomes de lugares, teorizar conduziu não apenas à identificação de regularidades mas também a uma explicação plausível destas, e à confirmação da explicação. Esta é a situação ideal. Entretanto, muitas vezes encontramos casos que são menos do que ideais. Podemos encontrar regularidades, predizer que regularidades similares ocorrerão em outras partes, descobrir que a predição é confirmada, e assim identificar um padrão sólido: entretanto, ele pode ser um padrão para o qual a explicação continua a nos escapar. Neste caso falamos de uma teoria "empírica" ou "fenomenológica", utilizando palavras elegantes para dizer basicamente que podemos ver o que está acontecendo mas ainda não entendemos. Há muitas destas teorias empíricas que relacionam entre si os fatos encontrados no cotidiano.

Suponha que peguemos um livro de fatos estatísticos, por exemplo

o *World Almanac*. Ao consultá-lo descobrimos uma lista de áreas metropolitanas dos EUA em ordem decrescente de população, junto com o número de habitantes. Pode haver também listas correspondentes às cidades em cada estado individualmente e em outros países. Em cada lista, a toda cidade pode ser atribuída uma classificação, igual a 1 para a cidade mais populosa, 2 para a que vem a seguir, e assim por diante. Haverá uma regra geral para todas estas listas que descreva a maneira pela qual a população decresce à medida que a classificação aumenta? Grosso modo, sim. Com precisão razoável, a população é inversamente proporcional à sua classificação; em outras palavras, as sucessivas populações são aproximadamente proporcionais a 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9, 1/10, 1/11, e assim por diante.

Agora olhemos na lista das maiores firmas comerciais em ordem decrescente de seu volume de negócios (digamos, o valor monetário das vendas durante um determinado ano). Haverá uma regra aproximada que descreva como os números referentes às vendas das firmas variam com sua classificação? Sim, e esta é a mesma regra que se aplica às populações. O volume de negócios está aproximadamente na proporção inversa em relação à classificação da firma.

E as exportações de um dado país em determinado ano em ordem decrescente do valor monetário? Novamente, descobrimos que a mesma regra é uma aproximação razoável.

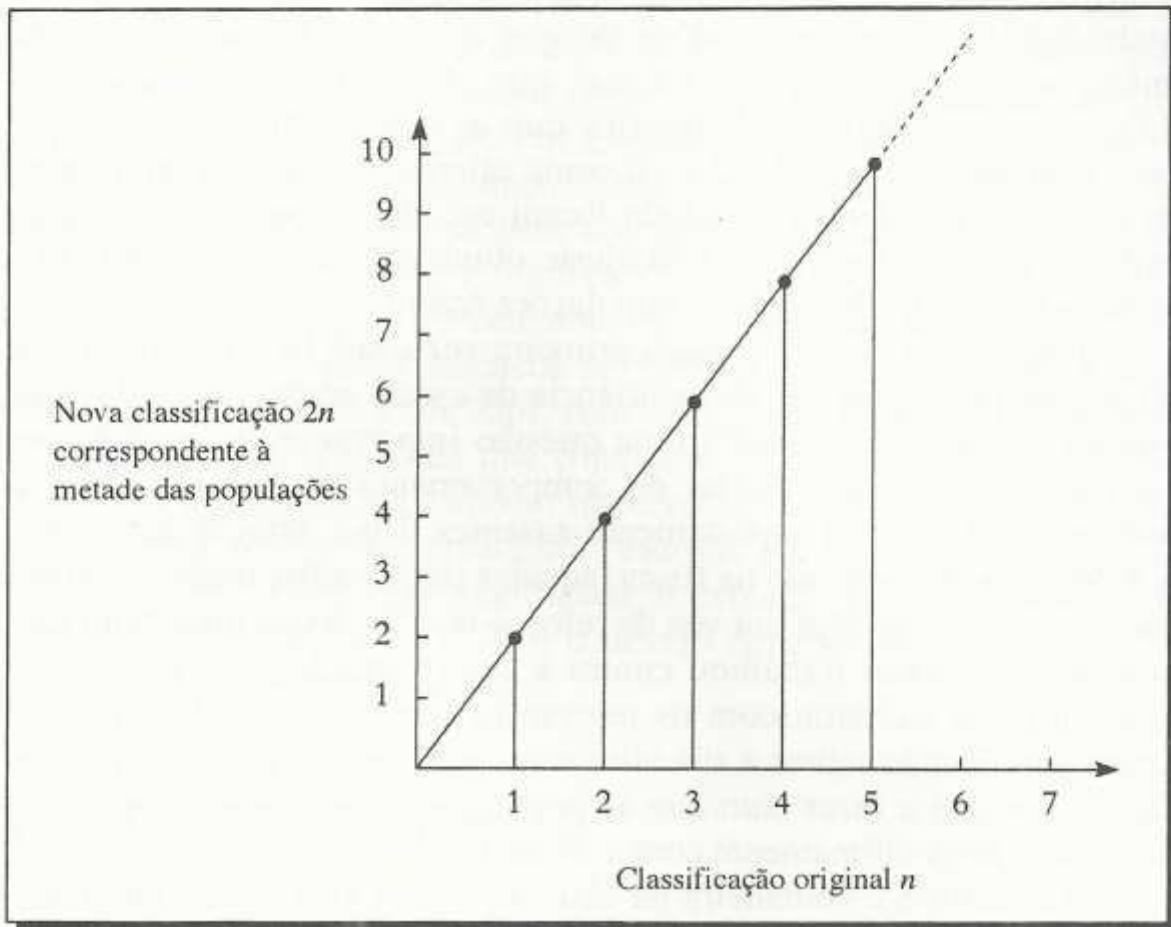
Uma consequência interessante desta regra é facilmente verificada bisbilhotando-se quaisquer das listas mencionadas, por exemplo uma lista de cidades com suas populações. Vamos olhar primeiro para, digamos, o terceiro dígito de cada número que representa a população. Como esperado, o terceiro dígito é distribuído randomicamente; as quantidades de dígitos 0, 1, 2, 3 etc. na terceira posição são todas aproximadamente iguais. Entretanto, uma situação totalmente diferente acontece com a distribuição dos primeiros dígitos. Há uma espantosa preponderância de dígitos 1 seguidos de 2, e assim por diante. A porcentagem dos números populacionais que começam com 9 é extremamente pequena. Este comportamento do primeiro dígito é predito pela regra, a qual, se obedecida exatamente, daria uma proporção de dígitos 1 iniciais em relação a dígitos 9 iniciais de 45 para 1.

O que acontece se deixarmos de lado o *World Almanac* e apanharmos um livro de códigos secretos contendo uma lista das palavras mais comuns em um certo tipo de texto em inglês dispostas em ordem decrescente da frequência de ocorrência? Qual é a regra aproximada para a frequência de ocorrência de cada palavra em função da sua classificação? Novamente, encontraremos a mesma regra, que também funciona para outras línguas.

Classifi- cação n	Cidade	População (1990)	Lei de Zipf sem alterações 10.000.000 divididos por n	Lei de Zipf modificada: 5.000.000 divididos por $(n-2/5)^{3/4}$
1	Nova York	7.322.564	10.000.000	7.334.265
7	Detroit	1.027.974	1.428.571	1.214.261
13	Baltimore	736.014	769.231	747.639
19	Washington, D. C.	606.900	526.316	558.258
25	Nova Orleans	496.938	400.000	452.656
31	Kansas City, Mo.	434.829	322.581	384.308
37	Virginia Beach, Va.	393.089	270.270	336.015
49	Toledo	332.943	204.082	271.639
61	Arlington, Texas	261.721	163.934	230.205
73	Baton Rouge, La.	219.531	136.986	201.033
85	Hialeah, Fla.	188.008	117.647	179.243
97	Bakersfield, Calif.	174.820	103.093	162.270

Populações de cidades dos EUA extraídas do *World Almanac* de 1994 comparadas com a lei de Zipf original e com uma versão modificada.

Muitas destas relações foram observadas no começo dos anos 30 por um certo George Kingsley Zipf, que ensinava alemão em Harvard, e elas são aspectos do que agora é chamado lei de Zipf. Hoje diríamos que a lei de Zipf é um dos muitos exemplos das assim chamadas leis de invariância de escala ou leis do expoente, encontradas em muitas áreas das ciências físicas, biológicas e do comportamento. Mas nos anos 30 tais leis eram ainda algo como uma novidade. Na lei de Zipf, a quantidade sob escrutínio é inversamente proporcional à classificação, isto é, proporcional a $1, 1/2, 1/3, 1/4$ etc. Benoît Mandelbrot mostrou que uma lei do expoente mais geral (quase a mais geral) é obtida submetendo-se esta seqüência a dois tipos de modificações sucessivas. A primeira alteração é adicionar uma constante à classificação, dando $1/(1 + \text{constante}), 1/(2 + \text{constante}), 1/(3 + \text{constante}), 1/(4 + \text{constante})$ etc. A outra alteração permite, em vez destas frações, seus quadrados, ou cubos, ou suas raízes quadradas, ou qualquer outra potência delas. Por exemplo, a escolha dos quadrados daria a seqüência $1/(1 + \text{constante})^2, 1/(2 + \text{constante})^2, 1/(3 + \text{constante})^2, 1/(4 + \text{constante})^2$ etc. A potência na lei mais geral do expoente é 1 para a lei de Zipf, 2 para os quadrados, 3



Como uma lei do expoente (neste caso a lei original de Zipf) exhibe invariância de escala.

para os cubos, $1/2$ para as raízes quadradas, e assim por diante. A matemática dá também um significado aos valores intermediários dos expoentes, tais como $3/4$ ou $1,0237$. Em geral podemos pensar no expoente como 1 mais uma segunda constante. Assim como a primeira constante foi adicionada à classificação, da mesma forma a segunda é adicionada ao expoente. A lei de Zipf é então um caso especial no qual estas duas constantes são nulas.

A generalização de Mandelbrot da lei de Zipf é ainda muito simples: a complexidade adicional está apenas na introdução das duas constantes ajustáveis novas, um número adicionado à classificação, e um número adicionado ao expoente 1. (A propósito, uma constante ajustável é chamada um “parâmetro”, uma palavra que tem sido amplamente mal utilizada nos últimos tempos, talvez sob a influência da palavra algo similar “perímetro”. A lei do expoente modificada tem dois parâmetros adicionais.) Em qualquer caso considerado, em vez de comparar dados com a lei de Zipf original, podemos introduzir estas duas constantes e adaptá-las para obter um ajuste otimizado dos dados. Podemos ver na tabela da página 110 como uma versão ligeiramente

modificada da lei de Zipf ajusta-se a alguns dados populacionais de modo significativamente melhor do que a lei de Zipf original (com ambas as constantes iguais a zero), que já funciona bastante bem. "Ligeiramente modificada" significa que as novas constantes têm valores bem pequenos na lei do expoente alterada utilizada como comparação. (As constantes na tabela foram escolhidas por meio de uma inspeção simples dos dados. Um ajuste otimizado teria dado uma concordância ainda melhor com as populações reais.)

Quando Zipf descreveu pela primeira vez a sua lei, em uma época em que muito poucas leis de invariância de escala eram conhecidas, ele tentou fazer de seu princípio uma questão importante, na medida em que este distinguia as ciências do comportamento das ciências físicas, onde tais leis estavam supostamente ausentes. Hoje, após a descoberta de tantas leis do expoente na física, aquelas observações tendem a manchar a reputação de Zipf em vez de reforçá-la. Diz-se que uma outra circunstância também trabalhou contra a sua reputação, isto é, que ele mostrou certa simpatia com os rearranjos territoriais da Europa por Hitler, justificando talvez a sua atitude ao argumentar que aquelas conquistas tendiam a fazer com que as populações dos países europeus se ajustassem mais intimamente com a lei de Zipf.

Se a história é verdadeira ou não, ela ensina uma lição importante sobre a aplicação das ciências do comportamento à política: só porque certas relações tendem a ocorrer isto não significa que elas devam ser sempre necessariamente consideradas desejáveis. Deparei com esta questão em um recente seminário no Instituto Aspen, em que mencionei a tendência das distribuições de riqueza ou de renda de obedecer, sob certas condições, determinadas leis de escala. Foi-me imediatamente perguntado se tal situação deveria ser considerada uma coisa boa ou não. Tanto quanto eu me lembro, sacudi meus ombros. Afinal de contas, a inclinação da curva de distribuição, que determina a concentração das desigualdades de riqueza ou de renda, depende do expoente que ocorre na lei.

A lei de Zipf permanece essencialmente inexplicada, e o mesmo é verdade para muitas outras leis do expoente. Benoît Mandelbrot, que tem feito contribuições realmente importantes ao estudo de tais leis (especialmente sua conexão com os fractais),* admite francamente que no começo de sua carreira foi bem-sucedido em parte porque deu mais ênfase à descoberta e descrição das leis do expoente do que à tentativa de explicá-las. (No seu livro, *The Fractal Geometry of Nature*, ele re-

* Fractais são figuras geométricas de dimensão fracionária. (N. do T.)

fere-se à sua “inclinação em enfatizar mais as conseqüências do que as causas”.) Entretanto, Benoît observa rapidamente que em alguns campos, especialmente nas ciências físicas, explicações bastante convincentes foram apresentadas. Por exemplo, o fenômeno do caos na dinâmica não-linear é intimamente associado com os fractais e leis do expoente de modos bastante bem compreendidos. Benoît também tem construído, ocasionalmente, modelos nos quais aparecem as leis do expoente. Por exemplo, ele calculou a freqüência das palavras nos textos datilografados pelos macacos proverbiais.* Elas obedecem a uma versão modificada da lei de Zipf, com o expoente tendendo a 1 (o valor original de Zipf) à medida que o número de símbolos fica cada vez maior. (A propósito, ele também observou que quando as freqüências das palavras nos textos verdadeiros, escritos em linguagem normal, se ajustam a uma lei de Zipf modificada, o expoente pode diferir de uma maneira significativa de 1, com o desvio dependendo da riqueza do vocabulário do texto em questão.)

INDEPENDÊNCIA DE ESCALA

Nos últimos anos, um progresso crescente tem sido alcançado em direção a uma explicação de certas leis do expoente. Um dos esforços envolve o que é chamado “criticalidade auto-organizada”, um conceito proposto pelo físico teórico dinamarquês Per Bak, em colaboração com Chao Tang e Kurt Wiesenfeld. Sua aplicação inicial da idéia foi às dunas de areia, como aquelas que podemos ver em um deserto ou em uma praia. As dunas são aproximadamente cônicas, e cada uma tem uma pente razoavelmente bem definida. Se examinarmos estas pentes, observaremos que elas são na maior parte das vezes iguais. Como isto acontece? Suponha que os ventos continuem a depositar grãos de areia adicionais sobre as dunas (ou um físico no laboratório continua a derramar areia de um recipiente sobre dunas de areia experimentais). À medida que cada duna vai se erguendo, suas encostas se tornam cada vez mais íngremes, mas apenas até que a pente alcance um valor crítico. Uma vez alcançada esta pente crítica, a adição de mais areia começa a produzir avalanches que reduzem a altura da duna.

Se a pente é maior do que o valor crítico, uma situação instável acontece, na qual avalanches de areia ocorrem muito prontamente e reduzem a pente até que ela volte ao valor crítico. Assim, as dunas

* Isto é, de uma simulação matemática dos textos. (N. do T.)

de areia são naturalmente “atraídas” para o valor crítico da pendente, sem necessidade de qualquer ajuste externo especial (daí o nome criticidade “auto-organizada”).

O tamanho de uma avalanche é usualmente medida pelo número de grãos de areia que dela participam. Observações revelam que, quando a pendente das dunas está próxima de seu valor crítico, os tamanhos das avalanches obedecem com boa aproximação a uma lei do expoente.

Neste caso, a constante adicionada à lei do expoente de Zipf é muito grande. Em outras palavras, se são atribuídas às avalanches classificações numéricas por ordem de tamanho, o número de grãos de areia participantes decresce muito rápido com a classificação. A distribuição de avalanches nas dunas de areia é um exemplo de uma lei do expoente que tem sido estudada com sucesso tanto por meios teóricos como experimentais. A simulação numérica do processo das avalanches feita por Bak e seus colegas reproduziu a lei e o valor aproximado do maior expoente.

A despeito do declínio pronunciado do tamanho à medida que a classificação aumenta, aproximadamente todas as escalas de tamanho de avalanches estão presentes em algum grau. Em geral, uma distribuição que segue a lei do expoente é uma lei que é “independente de escala”. Esta é a razão por que as leis do expoente são também chamadas “leis de invariância de escala”. Mas o que significa exatamente, para uma lei de distribuição, ser independente de escala?

A independência de escala das leis do expoente é bem ilustrada pela regra original de Zipf, de acordo com a qual as populações das cidades, por exemplo, são proporcionais a $1/1$: $1/2$: $1/3$: $1/4$: $1/5$... Por questões de simplicidade, consideremo-las iguais a 1 milhão, meio milhão, um terço de milhão, e assim por diante. Multipliquemos estas populações por uma fração fixa, digamos $1/2$; as novas populações, em milhões, tornam-se $1/2$, $1/4$, $1/6$, $1/8$, $1/10$... Elas são apenas as populações às quais foram atribuídas previamente as classificações 2, 4, 6, 8, 10... Assim, uma redução de um fator dois em todas as populações é equivalente a dobrar as classificações das cidades partindo da seqüência 1, 2, 3, 4... para a seqüência 2, 4, 6, 8... Se, em um gráfico, as novas populações são colocadas no eixo vertical e as velhas no eixo horizontal, temos uma linha reta, como é mostrado no diagrama da página 111.

Esta relação que resulta em uma linha reta pode servir como definição de lei de invariância de escala para qualquer tipo de quantidade: a redução de todas as quantidades por qualquer fator constante (no exemplo, $1/2$) é equivalente a escolher novas classificações para o conjunto original de quantidades, de forma tal que o gráfico das novas classificações (eixo vertical) contra as velhas (eixo horizontal) conduz a

uma linha reta. (As novas classificações não serão sempre números inteiros, mas em todos os casos a fórmula do tamanho em função da classificação dará uma curva simples e suave que pode ser utilizada para fazer a interpolação entre os números inteiros.)

No caso das avalanches das dunas de areia, como os seus tamanhos estão distribuídos de acordo com uma lei do expoente, uma redução de todos os tamanhos por qualquer fator comum é equivalente a uma simples redistribuição das classificações na seqüência original de avalanches. É evidente que para tal lei nenhuma escala particular está sendo escolhida, exceto nos extremos do espectro de tamanho, onde limitações óbvias são encontradas. Nenhuma avalanche pode ter menos do que um grão participando dela; evidentemente, a lei do expoente deve falhar na escala de um único grão. No outro extremo do espectro, nenhuma avalanche pode ser maior do que a duna de areia em questão. Mas, de qualquer maneira, a avalanche maior é escolhida ao lhe ser atribuída a classificação um.

Pensar sobre a avalanche maior faz lembrar uma característica freqüente das distribuições de tamanho de eventos na natureza que seguem a lei do expoente. Os maiores ou mais catastróficos, com classificações numéricas muito baixas, mesmo que eles caiam mais ou menos sobre a curva ditada pela lei do expoente, podem ser considerados eventos históricos particulares com muitas conseqüências notáveis, enquanto que os eventos menores, de classificação numérica muito alta, são usualmente considerados a partir de um ponto de vista estatístico. Grandes terremotos, que alcançam intensidades em torno de 8,5 na escala Richter, são registrados com manchetes gritantes pelos jornais e nos livros de história (especialmente se estiverem envolvidas as grandes cidades). Os registros do grande número de terremotos de intensidade 1,5 na escala Richter permanecem dormentes nos bancos de dados dos sismólogos, a maioria destinada a estudos estatísticos. Ainda assim, a energia liberada nos terremotos realmente obedece a uma lei do expoente, descoberta há muito tempo pelo próprio Charles Richter e seu mentor Beno Gutenberg, ambos colegas do Caltech já falecidos. (Gutenberg era o professor que estava tão absorto em conversações sobre sismologia com Einstein, num dia em 1933, que nenhum deles percebeu o terremoto de Long Beach sacudindo o campus do Caltech.) Da mesma forma, os meteoritos muito pequenos que estão sempre atingindo a Terra são notados apenas nos levantamentos estatísticos pelos especialistas, enquanto que a grande colisão que ajudou a provocar a extinção do Cretáceo há 65 milhões de anos é considerada um grande evento particular da história da biosfera.

Como foi mostrado que as leis do expoente funcionam nos casos

de criticalidade auto-organizada, a expressão já popular “auto-organizado”, muitas vezes ligada à palavra “emergente”, ganhou uma popularidade ainda maior. Cientistas, incluindo muitos membros da família do Instituto Santa Fé, estão tentando arduamente entender os modos pelos quais as estruturas surgem sem a imposição de exigências especiais vindas de fora. Em uma variedade de contextos impressionante, emergem dos sistemas estruturas ou comportamentos aparentemente complexos caracterizados por regras muito simples. Estes sistemas são referidos como auto-organizados e suas propriedades como emergentes. O maior exemplo é o próprio universo, cuja complexidade total emerge a partir de regras simples somadas com a ação do acaso.

Em muitos casos o estudo de estruturas emergentes tem sido bastante facilitado pelos computadores modernos. A emergência de novas características é muitas vezes mais fácil de se acompanhar por meio de tais máquinas, em vez de escrevermos equações em uma folha de papel. Os resultados são muitas vezes particularmente espantosos nos casos em que uma grande quantidade de tempo real é gasta no decurso do surgimento de uma emergência, porque o computador pode efetivamente acelerar o processo de um fator enorme. Ainda assim, a computação pode exigir muitos passos, e isto levanta uma questão inteiramente nova.

PROFUNDIDADE E CRIPTICIDADE

Até agora, nas nossas discussões sobre complexidade, consideramos descrições comprimidas de um sistema ou de suas regularidades (ou programas de computador curtos para gerar descrições codificadas), e relacionamos os vários tipos de complexidade com os tamanhos destas descrições ou programas. Entretanto, demos pouca atenção ao tempo, trabalho ou engenhosidade necessários para realizar a compressão ou identificar as regularidades. Como o trabalho de um cientista teórico consiste precisamente em reconhecer regularidades e comprimir sua descrição na forma de teorias, temos efetivamente atribuído um valor nulo ao trabalho do teórico, o que é claramente um crime monstruoso.

Alguma coisa deve ser feita para retificar este erro. Vimos que diversos conceitos diferentes são necessários para captar adequadamente nossas noções intuitivas sobre o que é complexidade. Agora é tempo de complementar nossa definição de complexidade efetiva com definições de outras quantidades, as quais caracterizarão quanto tempo demora um computador para passar de um programa curto para a descrição de um sistema e vice-versa. (Em alguma medida estas quantidades devem fazer lembrar a complexidade computacional de um pro-

blema, a qual definimos anteriormente como o tempo mais curto em que um computador pode produzir uma solução.)

Tais conceitos adicionais têm sido estudados por muitas pessoas, mas são tratados de um modo especialmente superior por Charles Bennett, um pensador brilhante da IBM, a quem é dado tempo de gerar idéias, publicá-las e dar palestras sobre elas aqui e ali. Gosto de comparar suas peregrinações com aquelas de um trovador do século XII, viajando de corte em corte no que é agora o sul da França. Em vez de um amor galante, Charlie "canta" a complexidade e a entropia, os computadores e as codificações quânticas. Tive o prazer de trabalhar com ele em Santa Fé e também em Pasadena, onde ele passou um período visitando nosso grupo no Caltech.

Duas quantidades particularmente interessantes denotadas por Charlie, "profundidade" e "cripticidade", são relacionadas com a complexidade computacional e têm uma relação recíproca uma com a outra. O estudo de cada uma destas quantidades ilumina o caso de um sistema aparentemente complexo que, não obstante, tem um baixo conteúdo de informação algorítmica e uma baixa complexidade efetiva porque sua descrição pode ser gerada por um programa curto. A dificuldade está nas respostas às seguintes questões: 1) Qual é o trabalho efetuado para passar de um programa curto ou esquema altamente comprimido para uma descrição detalhada do próprio sistema ou de suas regularidades? 2) Qual é o trabalho efetuado, começando a partir de um sistema, para comprimir sua descrição (ou uma descrição de suas regularidades) em um programa ou esquema?

Aproximadamente, a profundidade é uma medida do primeiro tipo de dificuldade e a cripticidade, uma medida do segundo. Evidentemente, é a cripticidade que está relacionada com o valor atribuível ao trabalho de um teórico (embora uma descrição mais sutil do ato de teorizar possa incluir uma tentativa de diferenciar a engenhosidade do simplesmente trabalhoso).

UM EXEMPLO HIPOTÉTICO

Para ilustrar como uma boa parcela de simplicidade pode ser associada com uma grande profundidade, retornemos à conjectura de Goldbach que afirma que todo número par maior do que 2 é a soma de dois números primos. Como foi mencionado antes, a conjectura nunca foi provada ou condenada, mas tem sido verificada para todos os números pares até um limite grande, determinado pelas capacidades do computador utilizado e pela paciência dos investigadores.

Anteriormente permitíamo-nos imaginar que a conjectura de Goldbach era tecnicamente indecidível (com base nos axiomas da teoria dos números), e, portanto, realmente verdadeira. Em vez disso, desta vez imaginemos que a conjectura de Goldbach é falsa. Neste caso, algum número par gigantesco g é o menor número par maior do que 2 que *não* é a soma de dois números primos. O número hipotético g tem uma descrição muito simples, a qual acabamos de dar. Da mesma forma, há programas muito curtos para calculá-lo. Por exemplo, podemos simplesmente procurar de forma metódica números primos cada vez maiores e testar a conjectura de Goldbach com todos os números pares até 3 mais o maior número primo encontrado. Desta maneira, o menor número par g que viola a conjectura de Goldbach será finalmente descoberto.

Se a conjectura de Goldbach é realmente falsa, então é provável que o tempo de computação de qualquer programa curto para obter g é deveras muito grande. Neste caso hipotético, então, o número g tem um conteúdo algorítmico e complexidade efetiva razoavelmente baixas mas profundidade considerável.

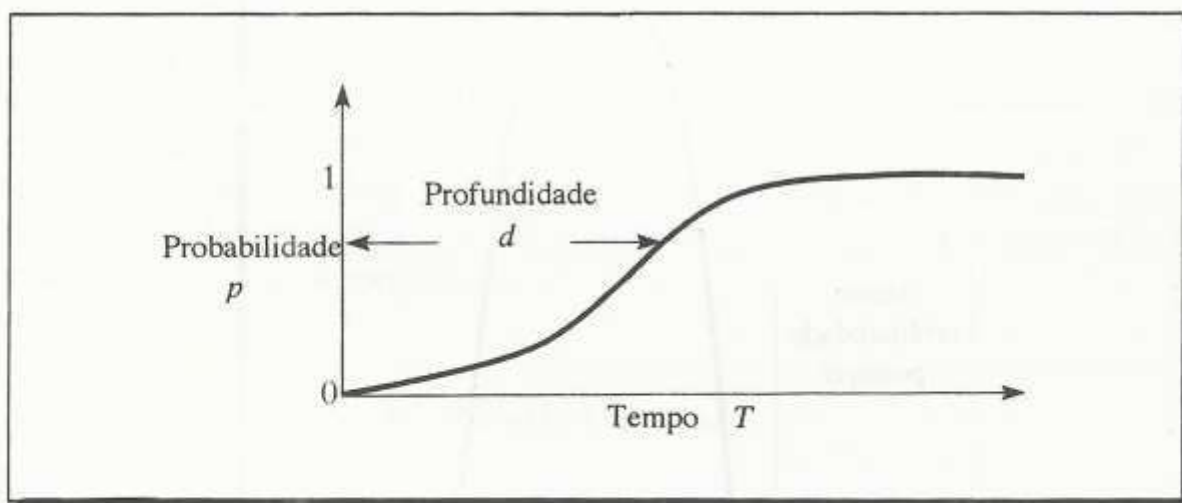
UMA OLHADA MAIS INCISIVA NA PROFUNDIDADE

A definição técnica de Charlie envolve um computador, e é do mesmo tipo que introduzimos em conexão com o conteúdo de informação algorítmica: um computador ideal para todo tipo de trabalho que pode aumentar sua capacidade de memória tanto quanto for necessário, em qualquer instante de tempo (ou para começar, que tem memória infinita). Ele começa com uma mensagem na forma de uma cadeia de bits que descreve o sistema sendo estudado. Então considera não apenas o programa mais curto que fará com que o computador imprima aquela cadeia e então pare (como na definição de conteúdo de informação algorítmica), mas um conjunto completo de programas razoavelmente curtos que produzem o mesmo efeito. Para cada um destes programas, ele pergunta quanto tempo de computação é necessário para passar do programa para a cadeia de mensagem. Finalmente, faz a média do tempo gasto pelos programas utilizando um método para médias que enfatiza os programas mais curtos.

Bennett também reescreveu a definição de uma forma ligeiramente diferente, usando a metáfora de Greg Chaitin. Imagine que os macacos proverbiais são postos a trabalhar datilografando não prosa, mas programas de computador. Vamos concentrar nossa atenção apenas naqueles raros programas que farão o computador imprimir nossa mensagem particular em forma de cadeia e então parar. Para todos estes programas,

qual é a probabilidade de o tempo de computação necessário ser menor do que algum tempo particular T ? Chamemos esta probabilidade de p . A profundidade d será então um tipo particular de média de T , uma média que depende da curva de p contra T .

A ilustração desta página fornece um quadro rudimentar de como a probabilidade p varia com o tempo máximo permitido de computação T . Quando T é muito pequeno, é bastante inusitado que os macacos produzam um programa que compute o resultado desejado em um tempo curto, assim p é próximo de 0. Quando T é extremamente longo, a probabilidade naturalmente se aproxima de 1. A profundidade d é, aproximadamente, o tempo de crescimento da curva de T contra p . Ela nos diz que tempo de computação máximo permitido T é necessário para se obter uma boa parcela dos programas que farão com que o computador imprima a mensagem em forma de uma cadeia de bits e então pare. A profundidade é portanto uma medida grosseira do tempo necessário para gerar a cadeia.



A profundidade como tempo de ocorrência.

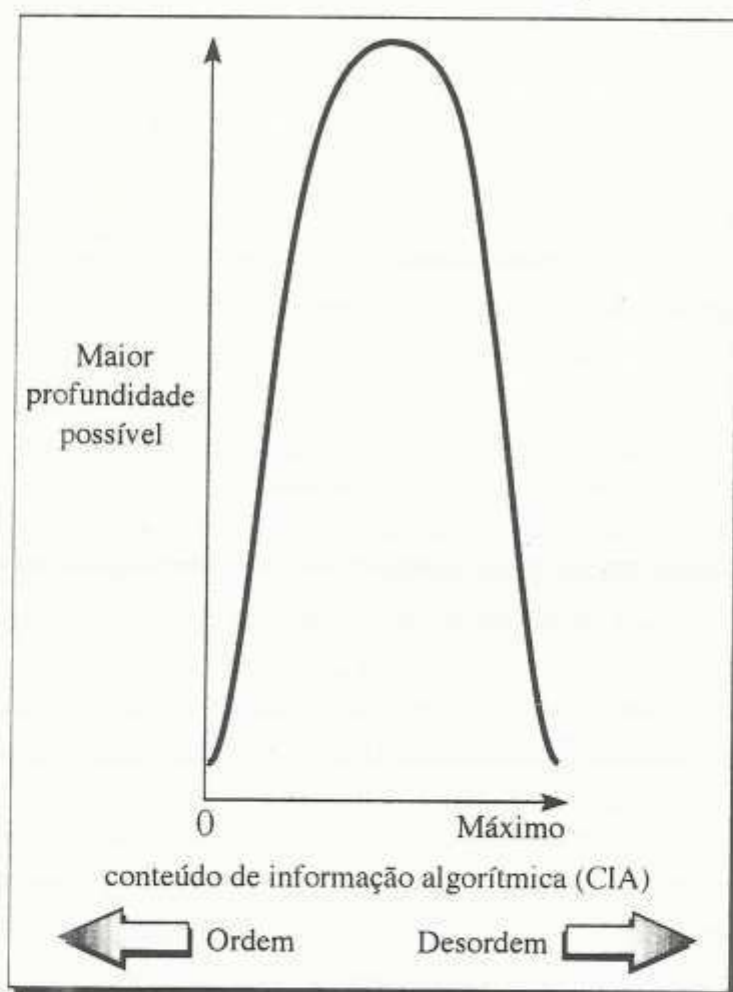
Quando um sistema que ocorre na natureza tem bastante profundidade, isto é uma indicação de que ele precisou de um longo tempo para evoluir ou que se origina de algo que necessitou também de um longo tempo para evoluir. As pessoas que mostram interesse pela conservação da natureza ou preservação histórica estão tentando proteger tanto a profundidade como a complexidade efetiva, no modo pelo qual estas se manifestam nas comunidades naturais ou na cultura humana.

Mas a profundidade, como Charlie demonstrou, tende a se transmitir aos *subprodutos* dos processos longos de evolução. Podemos encontrar evidências de profundidade não apenas nas formas de vida encon-

tradas hoje, incluindo os humanos, nos gloriosos trabalhos de arte produzidos pelas mãos humanas, nos restos fossilizados dos dinossauros ou nos mamíferos da Idade do Gelo, mas também numa tampa de lata de cerveja jogada na praia ou nos grafites feitos com spray nas paredes de um desfiladeiro. Os preservacionistas não precisam defender todas as manifestações de profundidade.

PROFUNDIDADE E CIA

Embora a profundidade seja uma média do tempo de processamento com relação aos comprimentos dos programas, sendo a média ponderada de forma tal a enfatizar os programas mais curtos, podemos muitas vezes ter uma boa idéia da profundidade verificando o tempo de processamento do programa mais curto. Suponha, por exemplo, que a cadeia de mensagem em forma de bits seja completamente regular, com conteúdo de informação algorítmica quase zero. Então o tempo de proces-



A maior profundidade possível esboçada de forma rudimentar em função do conteúdo de informação algorítmica.

samento do programa mais curto não é muito longo — o computador não precisa “raciocinar” muito para executar um programa como “PRINT (imprima) 12 trilhões de zeros” (é claro que a impressão pode levar algum tempo se a impressora é lenta). Se o conteúdo de informação algorítmico é baixo, a profundidade é baixa.

E que dizer sobre uma cadeia randômica, que tem o máximo conteúdo de informação algorítmica para um determinado tamanho de mensagem? Passar do programa mais curto — PRINT seguido da cadeia — para a impressão da cadeia propriamente dita não exigirá novamente “raciocínio” por parte do computador. Assim, a profundidade é baixa quando o conteúdo de informação algorítmica é máximo, assim como quando é muito pequeno. A situação tem alguma semelhança com o modo pelo qual a complexidade efetiva máxima varia em função do conteúdo de informação algorítmica, como no esboço da figura da página 75. Aqui, podemos ver de modo muito aproximado como a profundidade máxima varia com o conteúdo de informação algorítmica. Ela é baixa bem próximo de ambos os extremos, mas pode ser apreciável em qualquer ponto entre os mesmos, na região intermediária entre a ordem e a desordem. É claro que nesta região intermediária a profundidade não precisa ser grande.

Observe que esta figura tem uma forma diferente daquela da página 75. Mesmo que sejam ambas esboços grosseiros, elas mostram que a profundidade pode ser grande mesmo para valores de CIA razoavelmente próximos da ordem ou da desordem completas, onde a complexidade efetiva é ainda pequena.

CRIPTECIDADE E TEORIZAÇÃO

A definição de cripticidade se refere a uma operação que é o inverso daquela utilizada na definição de profundidade. A cripticidade de uma mensagem em forma de cadeia de bits é o tempo mínimo exigido por um computador comum para encontrar um dos programas mais curtos que fará com que a máquina imprima a cadeia e então pare.

Suponha que a mensagem em forma de cadeia de bits tenha se originado da codificação de um fluxo de dados estudado por um teórico. A cripticidade da cadeia é então uma medida aproximada da dificuldade da tarefa do teórico, que por definição não é tão diferente daquela do computador. O teórico identifica o máximo possível de regularidades, na forma de informações mútuas relacionando partes diferentes do fluxo, e então constrói hipóteses, as mais simples e coerentes possíveis, para explicar as regularidades observadas.

As regularidades são características compressíveis do fluxo de informações. Elas se originam em parte das leis fundamentais da natureza e em parte de resultados particulares de eventos acidentais que poderiam ter resultado de outra forma. Mas o fluxo de informações também tem características randômicas que surgem dos eventos ao acaso que *não* resultaram em regularidades. Estas características são incompressíveis. Assim, ao comprimir as regularidades do fluxo de informações tanto quanto é possível, o teórico está ao mesmo tempo descobrindo uma descrição concisa do fluxo completo, uma descrição constituída por regularidades comprimidas e informação randômica suplementar incompressível. Da mesma forma, um programa curto que faz com que o computador imprima a mensagem em forma de cadeia (e então pare) pode ser escrito de modo a constituir um programa básico, que descreva as regularidades da cadeia, suplementado por informações de entrada que descrevem circunstâncias acidentais específicas.

Embora nossas discussões sobre a teoria tenham apenas arranhado a superfície do assunto, já mencionamos a teorização sobre nomes de lugares, sobre fórmulas empíricas para a estatística, sobre a altura das dunas de areia e sobre o eletromagnetismo clássico e a gravitação. Embora haja uma grande parcela de similaridade formal entre estes vários modos de fazer teoria, eles envolvem descobertas em muitos níveis diferentes entre os quais é útil fazer uma distinção. São as leis básicas da física que estão sendo estudadas? Ou são as leis aproximadas que se aplicam a objetos físicos confusos como as dunas de areia? Ou são as leis rudimentares mas gerais sobre as instituições humanas como as cidades e as firmas de negócios? Ou são as regras específicas, com muitas exceções, sobre os nomes de lugares utilizados pelas pessoas em uma área geográfica particular? Há claramente diferenças importantes em precisão e em generalidade entre os vários tipos de princípios teóricos. Frequentemente estas diferenças são discutidas em termos de quais são mais fundamentais do que as outras. Mas o que isto significa?

CAPÍTULO 9

O QUE É FUNDAMENTAL?

O quark e o jaguar se encontram quase nos extremos opostos da escala do que é fundamental. A física das partículas elementares e a cosmologia são as disciplinas científicas mais básicas, enquanto o estudo das coisas vivas, que são muito complexas, é muito menos básico, embora obviamente da maior importância. Para discutir esta hierarquia das ciências é necessário resolver pelo menos dois problemas diferentes, um que tem a ver com meras convenções, e o outro com as relações reais entre os diferentes assuntos.

Disseram-me que a faculdade de ciências de uma universidade francesa costumava discutir um tópico relacionando vários assuntos em uma ordem fixa: primeiro matemática, depois física, depois química, depois fisiologia e assim por diante. Parece que as preocupações dos biólogos devem ter sido muitas vezes um pouco negligenciadas com este arranjo.

Da mesma forma, no testamento do magnata sueco da dinamite Alfred Nobel, que criou os prêmios Nobel, os prêmios para as ciências são listados com a física em primeiro lugar, a química em segundo e a fisiologia e a medicina em terceiro. Como consequência, o prêmio de física é sempre concedido no começo da cerimônia em Estocolmo. Se há apenas um ganhador do prêmio de física e este ganhador é um homem casado, é sua esposa que é conduzida ao jantar pelo braço do rei da Suécia. (Quando meu amigo Abdus Salam, cidadão do Paquistão e muçulmano, recebeu uma parte do prêmio de física em 1979, ele apareceu na Suécia com suas duas esposas, provocando sem dúvida o surgimento de alguns problemas de protocolo.) O ganhador ou ganhadores do prêmio de química vêm em segundo no protocolo e os de fisiologia e de medicina em terceiro. A matemática foi omitida do testamento de Nobel por razões que não são realmente compreendidas. Há um rumor

persistente de que Nobel estava furioso com um matemático sueco, Mittag-Leffler, que lhe teria roubado as atenções de uma mulher, mas, tanto quanto eu saiba, isto é apenas um rumor.

Esta hierarquia de assuntos pode em parte ser traçada até o filósofo francês do século XIX Auguste Comte, que afirmava ser a astronomia o assunto científico mais fundamental, a física o segundo, e assim por diante. (Ele considerava a matemática mais como uma ferramenta lógica do que uma ciência.) Estaria ele correto? E, se é assim, em que sentido? Aqui é necessário colocar de lado questões de prestígio e tentar entender o que tal hierarquia realmente significa em termos científicos.

O CARÁTER ESPECIAL DA MATEMÁTICA

Antes de tudo, é verdade que a matemática não é realmente em absoluto uma ciência, se a ciência é entendida como uma disciplina devotada à descrição da natureza e de suas leis. A matemática está mais preocupada em provar as conseqüências lógicas de certos conjuntos de afirmações. Por esta razão, ela pode ser completamente omitida da lista das ciências (como foi do testamento de Nobel) e tratada como um assunto interessante por si próprio (matemática pura), assim como uma ferramenta extremamente útil para a ciência (matemática aplicada).

Um outro modo de olhar a matemática é considerá-la aplicada quando relacionada com estruturas que surgem nas teorias científicas, enquanto que a matemática pura contém não apenas estas estruturas, mas também todas aquelas que poderiam ter surgido (ou ainda podem surgir) na ciência. A matemática é então o estudo rigoroso de mundos hipotéticos. Deste ponto de vista, ela é um tipo de ciência — a ciência do que pode ter sido ou pode ser, assim como do que é.

Tratada desta maneira, a matemática seria então a ciência mais fundamental? E o que dizer sobre os assuntos restantes? O que se quer dizer com a afirmação de que a física é mais fundamental do que a química, ou a química mais fundamental do que a biologia? O que dizer sobre as diferentes partes da física, algumas não são mais fundamentais do que as outras? De maneira geral, o que faz uma ciência mais fundamental do que outra?

Sugiro que a ciência A é mais fundamental do que a ciência B quando:

1. As leis da ciência A abrangem em princípio os fenômenos e as leis da ciência B.

2. As leis da ciência A são mais gerais do que aquelas da ciência B. (Isto é, as da ciência B são válidas sob condições mais especiais do que são as da ciência A.)

Se a matemática é considerada uma ciência, ela é então, de acordo com estes critérios, mais fundamental do que qualquer outra. Todas as estruturas matemáticas concebíveis estão ao seu alcance, enquanto aquelas que são úteis para descrever os fenômenos naturais constituem apenas um pequeno subconjunto das que são ou podem ser estudadas pelos matemáticos. Por meio deste subconjunto, as leis da matemática realmente abrangem todas as teorias utilizadas em outras ciências. Mas o que dizer sobre estas outras ciências? Quais as relações entre elas?

A FÍSICA E A QUÍMICA DO ELÉTRON

Quando o notável físico teórico inglês Paul Adrien Maurice Dirac* publicou sua equação quântica relativística para o elétron em 1928, dizia-se que ele teria comentado que sua fórmula explicava a maior parte da física e toda a química. É claro que ele estava exagerando. Ainda assim podemos entender o que ele queria dizer, particularmente em relação à química, que está principalmente preocupada com o comportamento de objetos como os átomos e as moléculas, eles mesmos compostos por núcleos pesados com elétrons leves movendo-se em torno deles. Muitos fenômenos da química são governados principalmente pelo comportamento dos elétrons, na medida em que eles interagem com os núcleos e com outros elétrons por meio dos efeitos eletromagnéticos.

A equação de Dirac, que descreve o elétron em interação com o campo eletromagnético, deu origem em poucos anos a uma teoria quântica relativística detalhada do elétron e do eletromagnetismo. Esta teoria é a eletrodinâmica quântica, ou QED,** que tem sido verificada experimentalmente com um número enorme de casas decimais em muitas experiências (e, portanto, merece plenamente sua abreviatura, que faz lembrar a alguns de nós o tempo do colégio, quando usávamos “QED” ao final de uma demonstração matemática no lugar de *quod erat demonstrandum*, em latim, “conforme queríamos demonstrar”).

A QED realmente explica, em princípio, uma grande parte da

* Por seus trabalhos em mecânica quântica, Dirac recebeu o prêmio Nobel de física em 1930. (N. do T.)

** Abreviatura em inglês de “Quantum Electrodynamics”. Mantivemos a abreviatura original para que a observação seguinte, entre parênteses, do autor não perdesse o sentido para o leitor brasileiro. (N. do T.)

química. Ela é rigorosamente aplicável àqueles fenômenos em que os núcleos pesados podem ser aproximados por partículas pontuais fixas, portadoras de uma carga elétrica. Extensões simples da QED permitem o tratamento dos movimentos nucleares, assim como dos tamanhos finitos dos núcleos.

Em princípio, ao utilizar a QED, um físico teórico pode calcular o comportamento de qualquer sistema químico para o qual a estrutura interna detalhada dos núcleos atômicos não é importante. Onde quer que cálculos de tais processos químicos possam ser feitos na prática, utilizando-se aproximações justificadas à QED, estes são bem-sucedidos na predição dos resultados da observação. De fato, na maioria dos casos, uma aproximação particular e bem justificada à QED será suficiente. Esta aproximação é chamada equação de Schrödinger com forças coulombianas,* e é aplicável quando o sistema químico é “não-relativístico”, o que quer dizer que os elétrons, assim como os núcleos, se movem muito lentamente quando comparados com a velocidade da luz. Esta aproximação foi descoberta nos primórdios da mecânica quântica, três anos antes do aparecimento da equação relativística de Dirac.

Para deduzir as propriedades químicas a partir da teoria física fundamental, é necessário, por assim dizer, fazer perguntas químicas à teoria. Devemos inserir nos cálculos não apenas as equações básicas, mas também as condições que caracterizam o sistema químico ou processo em questão. Por exemplo, o estado mais baixo de energia de dois átomos de hidrogênio é a molécula de hidrogênio H_2 . Uma questão importante em química é o valor da energia de ligação nesta molécula, isto é, o quanto a energia da molécula é menor do que a soma das energias dos dois átomos que a constituem. A resposta pode ser obtida com a QED. Mas primeiro é necessário “perguntar à equação” a respeito das propriedades do estado mais baixo de energia daquela molécula particular.

As condições de baixa energia sob as quais tais questões químicas surgem não são universais. No centro do Sol, a uma temperatura de dezenas de milhões de graus, os átomos de hidrogênio são decompostos em seus elétrons e prótons constituintes. Lá, nem átomos nem moléculas têm probabilidade significativa de estar presentes. Não há, por assim dizer, química no centro do Sol.

A QED satisfaz os dois critérios para ser considerada mais fundamental do que a química. As leis da química podem em princípio ser

* Por forças coulombianas entendem-se forças de origem eletrostática, estudadas por Charles de Coulomb (1736-1806). Erwin Schrödinger (1887-1961) é um dos criadores da versão ondulatória da mecânica quântica e recebeu o prêmio Nobel de física em 1933. (N. do T.)

deduzidas da QED desde que a informação adicional que descreve apropriadamente as condições químicas seja fornecida às equações; além do mais, estas condições são especiais — não valem para todo o universo.

A QUÍMICA NO SEU PRÓPRIO NÍVEL

Na prática, mesmo com a ajuda dos maiores e mais rápidos computadores disponíveis hoje em dia, apenas os problemas químicos mais simples são passíveis de cálculos reais a partir da teoria física básica. O número de tais problemas solúveis está crescendo, mas a maioria das situações em química é ainda descrita utilizando-se conceitos e fórmulas no nível da química em vez do da física.

Em geral, os cientistas estão acostumados a desenvolver teorias que descrevem os resultados observacionais de um campo de atividades particular sem deduzi-los a partir de teorias de um campo mais fundamental. Tal dedução, embora possível em princípio quando a informação especial suplementar é fornecida, é na prática, para a maioria dos casos, em qualquer época determinada, difícil ou impossível.

Por exemplo, os químicos estão preocupados com os diferentes tipos de ligações químicas entre os átomos (incluindo a ligação entre dois átomos de hidrogênio em uma molécula de hidrogênio). No decurso de sua vivência, eles desenvolveram numerosas idéias práticas sobre as ligações químicas que lhes permitem predizer o comportamento das reações químicas. Ao mesmo tempo, os químicos teóricos se esforçam por deduzir essas idéias, tanto quanto é possível, a partir de aproximações à QED. Em todos os casos, exceto os simples, eles são apenas parcialmente bem-sucedidos, mas não duvidam de que em princípio, com ferramentas de cálculo suficientemente poderosas, possam obter resultados bastante precisos.

ESCADAS (OU PONTES) E REDUÇÃO

Somos assim conduzidos à metáfora comum sobre os diferentes níveis da ciência, com a mais fundamental na base e a menos fundamental no topo. A química não nuclear ocupa um nível “acima” do da QED. Em casos muito simples, uma aproximação à QED é diretamente utilizada para predizer os resultados no nível químico. Entretanto, na maioria dos casos, são desenvolvidas leis no nível superior (química) para explicar e predizer fenômenos naquele nível, e tentativas são então feitas para

deduzir aquelas leis, tanto quanto é possível, a partir do nível mais baixo (QED). A ciência é praticada em ambos os níveis e além disso são empreendidos esforços para construir escadas (ou pontes) entre eles.

A discussão não necessita ser limitada aos fenômenos não nucleares. Desde que a QED foi desenvolvida, por volta de 1930, ela tem sido bastante generalizada. A disciplina completa da física das partículas elementares cresceu. A teoria das partículas elementares, com a qual tenho trabalhado a maior parte de minha vida, tem como tarefa a descrição não apenas do elétron e do eletromagnetismo, mas de todas as partículas elementares (os blocos fundamentais que constituem toda a matéria) e de todas as forças da natureza. A teoria das partículas elementares descreve o que acontece no interior do núcleo atômico, assim como o que acontece entre os elétrons. Portanto, a relação entre a QED e a parte da química que trata com os elétrons pode ser agora considerada um caso especial da relação entre a física das partículas elementares (como um todo) no nível mais fundamental e a química (como um todo, incluindo a química nuclear) em um menos fundamental.

O processo de explicar o nível mais alto em termos do mais baixo é muitas vezes chamado "redução". Não conheço qualquer cientista sério que acredite que há forças químicas especiais que não se devem às forças físicas subjacentes. Embora alguns químicos possam não gostar de colocar a questão desta maneira, a consequência é que a química é em princípio dedutível a partir da física das partículas elementares. Neste sentido, somos todos reducionistas, pelo menos no que diz respeito à química e à física. Mas o próprio fato de que a química é mais especial do que a física das partículas elementares, sendo aplicável apenas sob condições particulares que permitam que os fenômenos químicos ocorram, significa que a informação sobre aquelas condições especiais deve ser fornecida às equações da física das partículas elementares para que as leis da química possam ser deduzidas, mesmo em princípio. Sem esta advertência, a noção de redução é incompleta.

Uma lição a ser aprendida de tudo isto é que, embora as várias ciências realmente ocupem níveis diferentes, elas formam parte de uma única estrutura conexa. A unidade desta estrutura é cimentada pelas relações entre as partes. Uma ciência em um dado nível abrange as leis de uma ciência menos fundamental em um nível acima. Mas esta última, sendo mais especial, exige informações adicionais além das leis da primeira. Em cada nível existem leis a ser descobertas, importantes por si mesmas. O empreendimento da ciência envolve a investigação destas leis em todos os níveis, ao mesmo tempo que trabalha também, de cima para baixo e de baixo para cima, para construir escadas entre eles.

Tais considerações se aplicam também à física. As leis da física

das partículas elementares são válidas para toda a matéria, por todo o universo, sob todas as condições. Entretanto, durante os primeiros momentos da expansão do universo, a física nuclear não era na verdade aplicável, porque a densidade era muito alta para permitir a formação de núcleos, ou mesmo de nêutrons e prótons separadamente. Ainda assim, a física nuclear é crucial para o entendimento do que acontece no centro do Sol, onde reações termonucleares (algo parecido com o que acontece em uma bomba de hidrogênio) estão produzindo sua energia, mesmo que lá as condições sejam muito desfavoráveis à química.

A física da matéria condensada, que se preocupa com sistemas como cristais, vidros e líquidos, ou supercondutores e semicondutores, é da mesma forma um assunto muito especial, aplicável apenas sob condições (como temperatura suficientemente baixa) que permitam a existência das estruturas que ela estuda. Apenas quando essas condições são especificadas a física da matéria condensada é dedutível, mesmo em princípio, a partir da física das partículas elementares.

A INFORMAÇÃO EXIGIDA PARA A REDUÇÃO DA BIOLOGIA

O que dizer sobre a relação da biologia com a física e a química, que estão em outro nível na hierarquia? Existem hoje, como costumava haver nos séculos passados, cientistas sérios que acreditam que há “forças vitais” particulares na biologia que não são de origem físico-química? Se existem, devem ser muito poucos. Virtualmente, todos nós estamos convencidos de que a vida depende, em princípio, das leis da física e da química exatamente como as leis da química surgem das leis da física, e neste sentido somos novamente uma espécie de reducionistas. Ainda assim, como a química, a biologia vale a pena ser estudada em seus próprios termos, e no seu próprio nível, mesmo que o trabalho de construção das pontes de ligação esteja ainda em andamento.

Além do mais, a biologia terrestre é muitíssimo especial, referindo-se como o faz aos sistemas vivos deste planeta, os quais podem diferir amplamente de muitos dos sistemas adaptativos complexos diferentes que certamente existem nos planetas que orbitam em torno de estrelas distantes em várias partes do universo. Em alguns destes planetas, talvez os únicos sistemas adaptativos complexos sejam aqueles que nós não descreveríamos necessariamente como vivos se os encontrássemos. (Considere um exemplo trivial de ficção científica: imagine uma sociedade composta por robôs e computadores muito avançados que descendem daqueles construídos há muito tempo por uma raça de seres extintos, que teríamos descrito como “vivos” enquanto existissem.)

Entretanto, mesmo se restringirmos nossa atenção aos seres “vivos”, muitos deles presumivelmente exibem propriedades muito diferentes daqueles da Terra. Uma quantidade enorme de informação específica adicional deve ser fornecida, além das leis da física e da química, para caracterizar os fenômenos biológicos terrestres.

Para começar, muitas características comuns a todas as formas de vida sobre a Terra podem ser os resultados de acidentes que ocorreram na história primitiva da vida sobre o planeta, mas que poderiam ter acontecido de forma diferente. (Na verdade, as formas de vida para as quais estes acidentes deram outros resultados podem também ter existido há muito tempo sobre a Terra.) Mesmo a regra de que os genes devem ser constituídos por quatro nucleotídeos abreviados A, C, G e T, que parece ser verdade para todas as formas de vida do nosso planeta hoje, pode não ser universal em uma escala cósmica do espaço e do tempo. Pode haver muitas outras regras possíveis que são obedecidas em outros planetas; e seres que obedeciam a outras regras podem também ter vivido sobre a Terra há uns poucos bilhões de anos, até que foram suplantados pela vida baseada nos nucleotídeos familiares A, C, G e T.

BIOQUÍMICA — COMPLEXIDADE EFETIVA VERSUS PROFUNDIDADE

Não é apenas o conjunto particular de nucleotídeos que caracteriza o ADN de toda a vida terrestre hoje que pode ser ou não único. A mesma questão é debatida em relação a cada propriedade geral que caracteriza a química de toda a vida sobre a Terra. Alguns teóricos afirmam que a química da vida deve assumir numerosas formas nos diferentes planetas espalhados por todo o universo. O caso terrestre seria então o resultado de um número muito grande de eventos ao acaso, tendo cada um contribuído para as regularidades notáveis da bioquímica da Terra, as quais teriam conseqüentemente adquirido uma boa parcela de complexidade efetiva.

Do outro lado da questão estão aqueles que acreditam que esta bioquímica é essencialmente única, que as leis da química, baseadas nas leis fundamentais da física, deixam pouco espaço para uma química da vida que não seja aquela encontrada na Terra. O que os proponentes deste ponto de vista na verdade estão dizendo é que passar das leis fundamentais para as leis da bioquímica não envolve quase nenhuma informação nova, e assim isto contribui muito pouco para a complexidade efetiva. Entretanto, um computador poderia ser obrigado a fazer uma grande quantidade de cálculos para deduzir a quase unicidade da bioquímica como proposição teórica a partir das leis fundamentais da físi-

ca. Neste caso, a bioquímica ainda teria uma grande parcela de profundidade, mesmo que não tenha muita complexidade efetiva. Um outro modo de apresentar a questão sobre a quase unicidade da bioquímica terrestre é perguntarmos se a bioquímica depende principalmente de se formular as perguntas corretas à física, ou se depende também, de uma maneira importante, da história.

VIDA: COMPLEXIDADE EFETIVA ALTA — ENTRE A ORDEM E A DESORDEM

Mesmo que a química subjacente à vida terrestre dependa pouco da história, ainda assim há uma enorme quantidade de complexidade efetiva na biologia, muito mais do que em áreas como a química ou a física da matéria condensada. Considere o número imenso de mudanças evolutivas que aconteceram por acaso durante os mais ou menos 4 bilhões de anos desde a origem da vida na Terra. Alguns destes acidentes (provavelmente uma pequena fração, mas ainda assim muitos) tiveram os papéis principais na história subsequente da vida neste planeta e no caráter das diversas formas de vida que enriquecem a biosfera. As leis da biologia realmente dependem das leis da física e da química, mas dependem também de uma vasta quantidade de informação adicional sobre como estes acidentes aconteceram. Aqui, muito mais do que no caso da física nuclear, da física da matéria condensada ou da química, podemos ver uma grande diferença entre o tipo de redução às leis fundamentais da física que é possível em princípio e o tipo trivial que a palavra “redução” pode despertar na mente de um leitor ingênuo. A ciência da biologia é muito mais complexa do que a física fundamental porque muitas das regularidades da biologia terrestre surgem a partir de eventos ao acaso, assim como das leis fundamentais.

Mas mesmo o estudo dos sistemas adaptativos complexos de todos os tipos, e em todos os planetas, é ainda bastante especial. O meio ambiente exibe regularidade suficiente para que os sistemas explorem a aprendizagem ou a adaptação, mas ao mesmo tempo não tanta regularidade de modo que nada aconteça. Por exemplo, se o meio ambiente em questão é o centro do Sol, a uma temperatura de dezenas de milhões de graus, há uma randomicidade quase total, conteúdo de informação algorítmica próximo do máximo, e não há espaço para a complexidade efetiva ou uma grande profundidade — nada parecido com a vida pode existir. Nem pode haver uma coisa parecida com a vida se o meio ambiente é um cristal perfeito, a uma temperatura de zero absoluto, com quase nenhum conteúdo de informação algorítmica e, novamente, sem espaço

para muita complexidade efetiva ou grande profundidade. Para que um sistema adaptativo complexo funcione, são exigidas condições intermediárias entre a ordem e a desordem.

A superfície do planeta Terra fornece um meio ambiente com conteúdo de informação algorítmica intermediário, onde tanto a profundidade como a complexidade efetiva podem existir, e esta é parte da razão pela qual a vida foi capaz de evoluir aqui. É claro que, sob as condições que prevaleceram sobre a Terra há vários bilhões de anos, apenas formas muito primitivas de vida evoluíram em primeiro lugar, mas então aquelas mesmas coisas vivas alteraram a biosfera, particularmente pela adição de oxigênio à atmosfera, criando uma situação mais parecida com a presente e permitindo que formas superiores de vida, com organizações mais complexas, evoluíssem. Condições intermediárias entre a ordem e a desordem caracterizam não apenas o meio ambiente no qual a vida pode surgir, mas também a própria vida com sua alta complexidade efetiva e grande profundidade.

PSICOLOGIA E NEUROBIOLOGIA — A MENTE E O CÉREBRO

Os sistemas adaptativos complexos da Terra dão origem a diversos níveis de ciência que estão “acima” da biologia. Um dos mais importantes é a psicologia dos animais, e especialmente do animal com a psicologia mais complexa de todas, o ser humano. Aqui, novamente, deve ser raro um cientista contemporâneo que acredite que existam “forças mentais” particulares que não são biológicas, e em última análise de natureza psicoquímica. Novamente, neste sentido, todos nós somos virtualmente reducionistas. Ainda assim, com relação a assuntos como a psicologia (e algumas vezes a biologia), ouvimos a palavra “reducionista” jogada como um epíteto, mesmo entre cientistas. (Por exemplo, o Instituto de Tecnologia da Califórnia, onde fui professor por quase quarenta anos, é muitas vezes ridicularizado como reducionista; de fato, eu mesmo posso ter usado o termo ao deplorar o que considero certas limitações do nosso Instituto.) Como isto pode acontecer? Qual é na verdade a razão da discussão?

A razão é que a psicologia humana, embora sem dúvida dedutível em princípio a partir da neurofisiologia, da endocrinologia, dos neurotransmissores e assim por diante, vale a pena também ser estudada no seu próprio nível. Muitas pessoas acreditam, e eu também, que, quando se constroem escadas entre a psicologia e a biologia, a melhor estratégia é trabalhar de cima para baixo, assim como de baixo para cima. E é esta proposição que não tem aprovação universal, por exemplo, no Caltech, onde muito pouca pesquisa sobre a psicologia humana é realizada.

Onde o trabalho em biologia e psicologia realmente é feito, e se constroem escadas partindo dos dois extremos, a ênfase no extremo biológico é sobre o cérebro (assim como o resto do sistema nervoso, o sistema endócrino etc.), enquanto no extremo psicológico a ênfase é sobre a mente, isto é, as manifestações fenomenológicas do que o cérebro e os órgãos relacionados estão fazendo. Cada degrau é uma ponte ligando o cérebro e a mente.

No Caltech, é principalmente o cérebro que é estudado. A mente é negligenciada, e em alguns círculos mesmo a palavra é suspeita (um amigo meu a chama de a palavra M).^{*} Ainda assim, pesquisas psicológicas muito importantes foram desenvolvidas alguns anos atrás no Caltech, particularmente o célebre trabalho do psicobiólogo Roger Sperry e seus colegas sobre as correlações mentais dos hemisférios esquerdo e direito do cérebro humano. Eles utilizaram pacientes nos quais, como consequência de um acidente ou de cirurgia indicada para a epilepsia, o *corpus callosum* que relaciona a parte esquerda e a parte direita do cérebro tinha sido cortado. Era sabido que a fala tende a ser associada com a parte esquerda do cérebro, junto com o controle do lado direito do corpo, enquanto o controle do lado esquerdo é usualmente associado com a parte direita do cérebro. Eles descobriram, por exemplo, que um paciente cujo *corpus callosum* tinha sido cortado podia mostrar inabilidade em expressar verbalmente as informações que se relacionavam com a parte esquerda do corpo, ao mesmo tempo em que dava sinais indiretos de que possuía esta informação.

Como Sperry se tornou menos ativo com o passar do tempo, a pesquisa que ele tinha iniciado foi continuada por seus antigos estudantes, pós-doutores e por muitos novos recrutas neste campo em outras instituições. Foram encontradas mais evidências de que a metade esquerda do cérebro se sobressai não apenas na linguagem verbal, mas também na lógica e na análise, enquanto o lado direito do cérebro se sobressai em linguagem não-verbal, nos aspectos afetivos da linguagem, e em tarefas integrativas, como o reconhecimento facial. Alguns pesquisadores relacionaram o lado direito do cérebro com a intuição e com a percepção do todo. Infelizmente, a popularização exagerou e distorceu muitos destes resultados, e grande parte da discussão resultante ignorou a advertência acauteladora de Sperry de que “os dois hemisférios no cérebro normal intacto tendem, com regularidade, a funcionar estreitamente correlacionados, como uma unidade...” Não obstante, o que tem sido descoberto é realmente notável. Eu, em particular, estou intrigado com a

^{*} M de *mind* (mente). (N. do T.)

pesquisa que vem sendo feita sobre até que ponto é verdadeira a afirmação de que os amadores em geral escutam música predominantemente com o lado direito do cérebro, enquanto os músicos profissionais em geral a executam principalmente com a metade esquerda.

CONCENTRAÇÃO NO MECANISMO OU NA EXPLICAÇÃO — “REDUCIONISMO”

Por que são realizadas tão poucas pesquisas em psicologia no Caltech hoje em dia? É verdade, a faculdade é pequena e não pode fazer tudo. Mas por que tão pouco sobre biologia evolutiva? (Algumas vezes digo gracejando que uma instituição criacionista dificilmente poderia fazer menos.) Por que tão pouca pesquisa sobre ecologia, lingüística ou arqueologia? Somos levados a suspeitar que estes temas têm alguma coisa em comum que irrita a maioria do nosso corpo docente.

A agenda da pesquisa científica do Caltech tende a favorecer o estudo dos mecanismos, dos processos subjacentes e explicações. Tenho naturalmente uma simpatia por esta abordagem, já que a mesma caracteriza a física das partículas elementares. De fato, a ênfase dada aos mecanismos subjacentes levou a sucessos impressionantes em diversos campos. T. H. Morgan* foi trazido para o Caltech para fundar a divisão de biologia nos anos 20, quando estava mapeando os genes da mosca-das-frutas, criando assim as bases da genética moderna. Max Delbrück, que chegou nos anos 40, se tornou um dos fundadores da biologia molecular.

Se um tema é considerado muito descritivo e fenomenológico, não tendo atingido ainda o estágio no qual mecanismos podem ser estudados, nosso corpo docente o considera insuficientemente “científico”. Se no tempo de Darwin o Caltech tivesse existido com estas mesmas propensões, a instituição o teria convidado para fazer parte de seu corpo docente? Afinal de contas, ele formulou sua teoria da evolução sem muitas pistas sobre os processos subjacentes. Seus escritos indicam que, se pressionado a explicar o mecanismo da variação, ele provavelmente teria optado por algo parecido com a idéia incorreta de Lamarck (os lamarckianos acreditavam que, ao se cortar as caudas dos camundongos por algumas gerações, produziriam uma variedade sem caudas, ou que os longos pescoços das girafas eram explicados pelas gerações de ancestrais que esticavam seus pescoços para alcançar mais ao alto os espinhos amarelos das acácias). Ainda assim sua contribuição à biologia foi monumental. Em particular, sua teoria da evolução criou as bases do princí-

* Por seus trabalhos em genética, Thomas Hunt Morgan (1866-1945) recebeu o prêmio Nobel de medicina em 1933. (N. do T.)

pio simples e unificador da descendência comum de todos os organismos vivos a partir de um único ancestral. Que contraste com a complexidade da noção prévia, amplamente difundida, da estabilidade das espécies, cada uma delas especialmente criada por meios sobrenaturais!

Mesmo que eu concorde que assuntos como a psicologia não são ainda suficientemente científicos, minha vontade seria estudá-los para participar do divertimento que deve haver em transformá-los em mais científicos. Além de favorecer, como regra geral, o método “de baixo para cima” na construção dos degraus entre as disciplinas — a partir da mais fundamental e explicativa, em direção àquela que é menos fundamental — em muitos casos (e não apenas no da psicologia) eu gostaria de encorajar também uma abordagem de cima para baixo. Tal abordagem começa com a identificação de regularidades importantes no nível menos fundamental e adia para mais tarde a compreensão dos mecanismos subjacentes mais fundamentais. Mas a atmosfera do campus no Caltech é permeada por um forte preconceito em favor da abordagem de baixo para cima, que tem produzido a maioria das realizações espetaculares responsáveis pela reputação da instituição. Este preconceito é o que atrai a acusação de reducionismo com sua conotação pejorativa.

Assuntos como a psicologia, a biologia evolutiva, a ecologia, a lingüística e a arqueologia se relacionam todos com os sistemas adaptativos complexos. Todos eles são estudados no Instituto Santa Fé, onde é dada bastante ênfase às similaridades entre estes sistemas e à importância de se estudar suas propriedades em seus próprios níveis, e não apenas como conseqüências de disciplinas científicas mais fundamentais. Neste sentido, a fundação do Instituto Santa Fé é parte de uma rebelião contra os excessos do reducionismo.

SIMPLICIDADE E COMPLEXIDADE: DO QUARK AO JAGUAR

Embora eu acredite que o Caltech esteja cometendo um sério erro ao negligenciar a maioria das “ciências da complexidade”, gostei do apoio dado lá à física das partículas elementares e à cosmologia, as ciências mais fundamentais de todas, e que envolvem a descoberta das leis básicas do universo.

Um dos grandes desafios da ciência contemporânea é identificar a mistura de simplicidade e complexidade, regularidade e randomicidade, ordem e desordem, desde o primeiro degrau da escada, a física das partículas elementares e a cosmologia, até o reino dos sistemas adaptativos complexos. Precisamos também compreender como a simplicidade, a regularidade e a ordem do universo primordial deram origem no

decorrer do tempo às condições intermediárias entre a ordem e a desordem que prevaleceram em muitos lugares em épocas posteriores, tornando possível, entre outras coisas, a existência de sistemas adaptativos complexos como os organismos vivos.

Para fazer isto, devemos examinar a física fundamental a partir do ponto de vista da simplicidade e da complexidade e perguntar qual o papel desempenhado pela teoria unificada das partículas elementares, pelas condições iniciais do universo, pelas indeterminações da mecânica quântica e pelos caprichos do caos clássico ao produzirem os padrões de regularidade e randomicidade no universo em que os sistemas adaptativos complexos têm se mostrado capazes de evoluir.

PARTE II

O UNIVERSO QUÂNTICO

CAPÍTULO 10

SIMPLICIDADE E RANDOMICIDADE NO UNIVERSO QUÂNTICO

Qual é a situação das leis fundamentais da matéria e do universo hoje? O que está bem estabelecido e o que é conjectura? Como ficam estas leis em relação à simplicidade e à complexidade, ou em relação à regularidade e à randomicidade?

As leis fundamentais estão sujeitas aos princípios da mecânica quântica, e em todos os estágios de nosso pensamento teremos de nos referir à abordagem quântica. A descoberta da mecânica quântica é uma das grandes realizações da raça humana, mas é também uma das mais difíceis de ser apreendidas pela mente humana, mesmo para aqueles dentre nós que a têm utilizado em nosso trabalho durante décadas. Ela viola nossa intuição, ou melhor, nossa intuição foi construída de um modo que ignora o comportamento quântico. Esta circunstância torna ainda mais necessário explorar o significado da mecânica quântica, examinando especialmente algumas das maneiras recentemente desenvolvidas de pensar sobre ela. Pode ser então que seja mais fácil compreender por que nossa intuição parece não dar atenção a algo tão importante.

O universo consiste em matéria, e a matéria é composta de muitos tipos diferentes de partículas elementares, como os elétrons e os fótons. Estas partículas não têm individualidade — todos os elétrons no universo são idênticos entre si, e da mesma forma todos os fótons são intercambiáveis. Entretanto, qualquer partícula pode ocupar um dentre um número infinito de “estados quânticos” diferentes. Há duas grandes classes de partículas. Os férmions, como os elétrons, obedecem ao princípio de exclusão de Pauli: duas partículas do mesmo tipo não podem ocupar o mesmo estado ao mesmo tempo. Os bósons, como os fótons, obedecem a uma espécie de princípio de antiexclusão: duas ou mais partículas exibem uma preferência em ocupar o mesmo estado ao

mesmo tempo. Esta propriedade dos fótons torna possível a operação de um laser, onde os fótons em um determinado estado estimulam a emissão de mais fótons para este mesmo estado. Todos estes fótons têm a mesma frequência e viajam na mesma direção formando o feixe de laser. Originalmente, LASER era o acrônimo para “light amplification by stimulated emission of radiation”.

Por causa de sua tendência a se amontoar no mesmo estado quântico, os bósons podem atingir suas densidades de modo a comportar-se quase como campos clássicos, como nos casos do eletromagnetismo e da gravitação. Portanto, as partículas bosônicas podem ser consideradas os quanta — pacotes quantizados de energia — destes campos. O quantum do campo eletromagnético é o fóton. Da mesma forma, a teoria exige a existência do quantum do campo gravitacional, um bóson chamado gráviton. De fato, qualquer força fundamental deve ser associada com uma partícula elementar que é o quantum do campo correspondente. Algumas vezes se diz que o quantum “transporta” a força associada a ele.

Quando a matéria é descrita como sendo composta por partículas elementares, isto é, por férmions e bósons, deveria ser enfatizado que sob certas condições alguns bósons podem se comportar mais como um campo do que como partículas, por exemplo como no caso de um campo elétrico em torno de uma carga. Os férmions também podem ser descritos em termos de campos; embora estes campos não se comportem como campos clássicos, eles são, não obstante, associados em um certo sentido com forças.

Toda matéria possui energia e toda energia está associada com a matéria. Quando as pessoas se referem descuidadamente à matéria sendo convertida em energia (ou vice-versa), elas simplesmente querem dizer que certos tipos de matéria e energia estão sendo convertidos em outros tipos. Por exemplo, um elétron e uma partícula relacionada, porém de carga oposta, chamada pósitron podem colidir e transformar-se em dois fótons, um processo muitas vezes descrito como “aniquilação” ou mesmo “aniquilação da matéria conduzindo à criação de energia”. Todavia, o processo é simplesmente a transformação de matéria em outro tipo de matéria, de certas formas de energia em outras formas.

O MODELO PADRÃO

Todas as partículas elementares conhecidas, exceto o gráviton, cuja existência é exigida por considerações teóricas, são hoje provisoria-

mente descritas por uma teoria que acabou sendo chamada de modelo padrão. Nós a examinaremos com algum detalhe um pouco mais tarde. Ela parece estar em excelente harmonia com as observações, embora existam umas poucas características ainda não confirmadas pela experiência. Os físicos esperavam que estas características fossem testadas, junto com novas e excitantes idéias que vão além do modelo padrão, com o acelerador de partículas de alta energia que estava parcialmente construído no Texas (o Superconducting Supercollider ou SSC). Mas o projeto foi rejeitado pela câmara de deputados dos EUA com prejuízos evidentes para a civilização humana. Agora a única esperança de verificação de idéias teóricas fundamentais está no acelerador de energia mais baixa que está sendo criado, com a conversão de uma máquina já existente, no CERN (Centro Europeu para a Pesquisa Nuclear), perto de Genebra, Suíça. Infelizmente sua energia pode ser muito baixa.

Aqueles dentre nós que ajudaram a desenvolver o modelo padrão estão naturalmente bastante orgulhosos, já que ele produziu uma boa parcela de simplicidade a partir de uma variedade assombrosa de fenômenos. Entretanto, há muitas razões para acreditarmos que ele não pode ser a teoria final das partículas elementares.

Primeiro, as forças têm formas muito similares e clamam por uma unificação por meio de uma teoria na qual elas apareçam como manifestações diferentes da mesma interação subjacente; no entanto, no modelo padrão elas são tratadas como diferentes umas das outras e não-unificadas (ao contrário do que é afirmado algumas vezes). Segundo, o modelo não é ainda suficientemente simples; ele contém mais de sessenta tipos de partículas elementares e muitas interações entre elas, mas nenhuma explicação para toda esta diversidade. Terceiro, ele contém mais de uma dúzia de constantes arbitrárias que descrevem estas interações, incluindo as que conduzem às várias massas dos diferentes tipos de partículas; é difícil aceitar como fundamental uma teoria em que tantos números importantes são incalculáveis em princípio. Finalmente, a gravitação não está incluída, e qualquer tentativa para incorporá-la de um modo direto leva a dificuldades desastrosas: os resultados de cálculos de quantidades físicas conduzem à inclusão de correções infinitas, tornando-os sem significado.

AS ASSIM CHAMADAS TEORIAS GRÃ-UNIFICADAS

Os teóricos das partículas elementares tentaram sanar estes defeitos de duas maneiras. A maneira mais direta envolve a generalização do modelo padrão no que alguns têm chamado uma “teoria grã-unificada”, em-

bora haja poucas justificativas para este nome. Vejamos o que tal generalização faz a respeito dos quatro problemas mencionados.

Primeiro, no modelo padrão as interações que exigem unificação são de fato unificadas, juntamente com novas interações, para energias muito altas, dando uma descrição natural de como, para as energias mais baixas das experiências de hoje, as interações parecem estar separadas. Segundo, todas as partículas elementares da teoria são agrupadas em uns poucos conjuntos, com os membros de cada conjunto intimamente relacionados; desta maneira obtém-se uma boa parcela de simplificação, mesmo que o número de espécies de partículas seja substancialmente aumentado, com algumas das novas partículas tendo massas tão grandes que não poderão ser observadas no futuro próximo. Terceiro, a teoria contém ainda mais constantes arbitrárias do que o modelo padrão, e são ainda incalculáveis em princípio. Finalmente, a gravitação é omitida, e é tão difícil incorporá-la quanto antes.

Tal teoria pode possivelmente ser válida para um amplo domínio de energias. O terceiro e quarto pontos, todavia, tornam claro que ela não é verossímil como a teoria fundamental das partículas elementares.

O SONHO DE EINSTEIN

A busca da teoria fundamental unificada conduz à segunda maneira de transcender o modelo padrão. A busca faz lembrar o sonho de Einstein de uma teoria de campo que unificasse de um modo natural sua teoria geral da gravitação e a teoria de Maxwell do eletromagnetismo. Na sua velhice, Einstein publicou um conjunto de equações que afirmavam realizar esta tarefa, mas infelizmente seus atrativos eram puramente matemáticos — elas não descreviam interações físicas plausíveis da gravitação e do eletromagnetismo. O maior físico dos tempos modernos havia perdido seus poderes. Em 1979, em uma comemoração em Jerusalém do centésimo aniversário do nascimento de Einstein, deplorei o fato de que uma moeda especial comemorativa tivesse sido cunhada com as equações erradas no verso — que vergonha para um cientista que tinha produzido equações tão belas, corretas e crucialmente importantes quando jovem. Da mesma forma, fico incomodado com as muitas fotos e estátuas de Einstein (como a escultura na sede da National Academy of Sciences, em Washington) que o mostram velho, quando já não fazia contribuições importantes, e não como o jovem bastante bonito e bem-vestido que tinha feito todas aquelas descobertas notáveis.*

* Albert Einstein (1879-1955) realizou seus trabalhos mais importantes, o estudo do movimento browniano, o efeito fotoelétrico e a teoria da relatividade especial, em 1905. A teoria da relatividade geral data de 1916. Einstein recebeu o prêmio Nobel em 1921. (N. do T.)

A tentativa de Einstein de obter uma teoria unificada estava condenada não apenas pelo declínio de suas habilidades, mas também por falhas específicas em sua abordagem. Entre outras coisas, ele ignorou três características importantes do problema:

A existência de outros campos além do gravitacional e do eletromagnético. (Einstein sabia de um modo geral que devia haver outras forças mas não tentou descrevê-las.)

A necessidade de discutir não apenas os campos que a teoria quântica revela serem compostos por bósons como o fóton e o gráviton, mas também por férmions. (Einstein acreditava, por exemplo, que o elétron de algum modo surgiria das equações.)

A necessidade de construir uma teoria unificada dentro do arcabouço da mecânica quântica. (Einstein nunca aceitou a mecânica quântica, embora ele tivesse ajudado a estabelecer suas bases.)

Ainda assim, nós, físicos teóricos, temos sido inspirados, de uma forma moderna, pelo sonho de Einstein: uma teoria quântica unificada abarcando não apenas o fóton, o gráviton e todos os outros bósons fundamentais, com seus campos eletromagnético, gravitacional e outros, associados, mas também os férmions, como o elétron. Tal teoria estaria contida em uma fórmula simples explicando a grande multiplicidade de partículas elementares e suas interações, e conduziria, nas aproximações convenientes, às equações de Einstein para a teoria geral da gravitação e às equações de Maxwell para o eletromagnetismo.

A TEORIA DAS SUPERCORDAS — O SONHO TALVEZ CONCRETIZADO

Agora este sonho talvez tenha sido concretizado. Um novo tipo de teoria chamada teoria das “supercordas” parece ter as propriedades certas para realizar a unificação. Em particular, a “teoria das supercordas heteróticas” é a primeira candidata viável a uma teoria quântica de campos unificada de todas as partículas elementares e suas interações.

A teoria das supercordas nasceu de uma idéia chamada de “o princípio do cordão dos sapatos”, relacionada com o velho ditado sobre o homem que podia se elevar por meio de seus próprios cordões de sapatos. A idéia era que um conjunto de partículas elementares poderia ser tratado como se fosse composto de um modo autoconsistente de combinação destas mesmas partículas. Todas as partículas serviriam como constituintes, todas as partículas (e, num certo sentido, até os férmions)

serviriam como quanta dos campos de força que mantêm os constituintes unidos. Quando, há muitos anos, tentei descrever a idéia para uma audiência na Hughes Aircraft Company, o engenheiro que então chefiava o programa do satélite geoestacionário, Harold Rosen, me perguntou se isto era algo parecido com o que ele e sua equipe tinham encontrado quando tentaram explicar um sinal intruso nos circuitos que estavam construindo. Eles finalmente foram bem-sucedidos ao presumir que o sinal já estava lá e mostrando que este então produzia a si mesmo. Concordei que a idéia do cordão do sapato era de fato algo deste tipo: as partículas, se assumirmos sua existência, produzem forças que as mantêm unidas umas às outras; os estados ligados resultantes são as próprias partículas, e elas são as mesmas que transmitem as forças. Tal sistema de partículas, se existe, dá origem a si mesmo.

A forma mais antiga da teoria das supercordas foi proposta por John Schwarz e André Neveu em 1971, com o apoio de algumas idéias de Pierre Ramond. Embora a teoria parecesse artificial na época, convidei ambos, Schwarz e Ramond, ao Caltech, acreditando que as supercordas eram tão belas que tinham de servir para alguma coisa. Schwarz e vários colaboradores, especialmente Joël Scherk e Michael Green, desenvolveram mais ainda a teoria nos quinze anos seguintes ou mais.

No começo a teoria foi aplicada apenas a um subconjunto de partículas, as mesmas que os teóricos tinham tentado descrever utilizando o princípio do cordão de sapatos. Foi apenas em 1974 que Scherk e Schwarz sugeriram que a teoria das supercordas poderia descrever *todas* as partículas elementares. O que os convenceu foi a descoberta de que a teoria predisse a existência do gráviton, e assim a gravitação einsteiniana. Quase dez anos mais tarde, quatro físicos de Princeton, conhecidos coletivamente como o “quarteto de cordas de Princeton”, descobriram a forma particular chamada teoria das supercordas heteróticas.

A teoria das supercordas, em particular a forma heterótica, pode realmente ser a teoria quântica de campos unificada que há muito buscamos. Numa aproximação conveniente, ela implica, como deveria, a teoria de Einstein da gravitação. Além do mais, incorpora a gravitação einsteiniana e outros campos em uma teoria quântica dos campos sem encontrar as dificuldades usuais que envolvem quantidades infinitas. Ela também explica por que há uma grande multiplicidade de partículas elementares; o número de tipos diferentes é na verdade infinito, mas apenas um número finito (provavelmente algumas centenas) delas tem massa suficientemente pequena para serem descobertas no laboratório. E também a teoria não contém, pelo menos à primeira vista, quaisquer números ou relação de partículas e interações arbitrárias, embora algum grau de arbitrariedade possa reaparecer se examinada mais de perto.

Finalmente, a teoria das supercordas emerge de um simples e belo princípio de autoconsistência, originalmente presente na idéia do cordão dos sapatos.

MAS NÃO A TEORIA DE TUDO

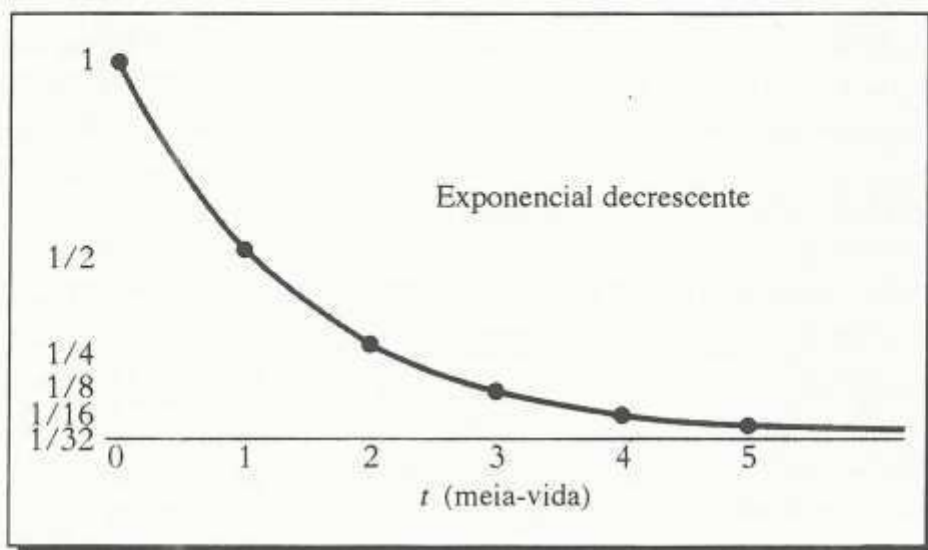
De todas as questões importantes sobre a teoria das supercordas heteróticas, aquela que particularmente nós interessa aqui é a seguinte: supondo-a correta, será ela realmente a teoria de tudo? Algumas pessoas têm utilizado esta expressão, e mesmo a abreviação TOE,* ao descrevê-la. Entretanto, esta é uma caracterização enganosa, a menos que “tudo” queira dizer apenas a descrição das partículas elementares e de suas interações. A teoria em si mesma não pode nos dizer tudo o que é possível ser conhecido sobre o universo e sobre a matéria que este contém. Outros tipos de informação também são necessários.

A CONDIÇÃO INICIAL E A(S) SETA(S) DO TEMPO

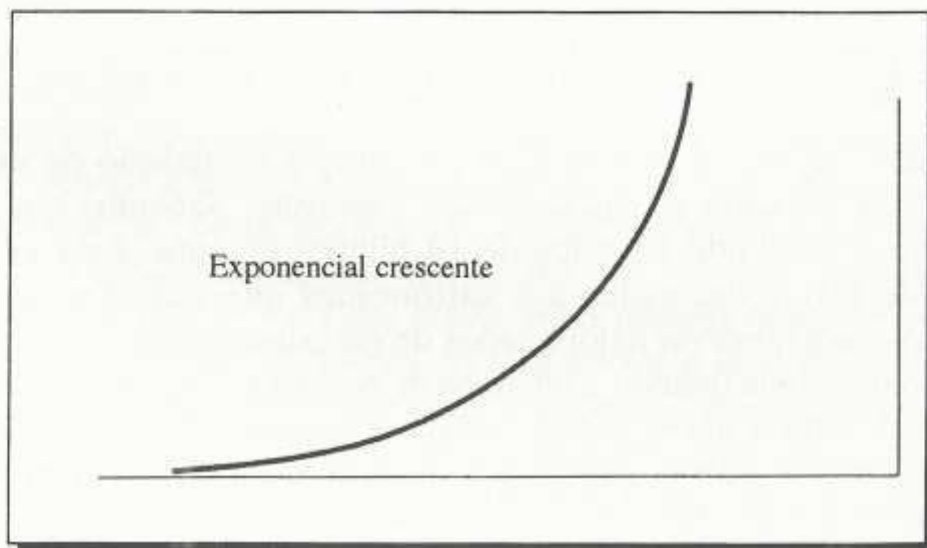
Uma destas parcelas de informação adicional é a condição do universo no início ou próximo ao início de sua expansão. Sabemos que o universo vem expandindo há cerca de 10 bilhões de anos. Esta expansão aparece de forma dramática aos astrônomos que utilizam potentes telescópios para observar aglomerados de galáxias distantes, mas ela não é em absoluto óbvia quando a olhamos de perto. O sistema solar não está expandindo, nem a nossa galáxia ou o aglomerado de galáxias ao qual ela pertence. As outras galáxias e aglomerados também não estão expandindo. Mas os diferentes aglomerados *estão* se afastando um dos outros, e isto é o que revela a expansão do universo, que tem sido comparada com o ato de assar o pão de passas. Sob a influência do fermento, o pão (o universo) expande, mas as passas (os aglomerados de galáxias) não o fazem, embora fiquem mais afastadas umas das outras.

O comportamento do universo desde o começo de sua expansão depende obviamente não apenas das leis que governam o comportamento das partículas que o compõem, mas também das condições iniciais. Mas a condição inicial não é algo que apareça apenas em obscuros problemas de física e astronomia. Longe disto. Ela tem uma influência enorme sobre o que observamos em torno de nós todos os dias. Em particular, ela determina a seta (ou setas) do tempo.

* Abreviatura de Theories of Everything. (N. do T.)



A curva exponencial decrescente para a fração de núcleos radioativos que não decaíram após um tempo t .



Uma exponencial crescente.

Imagine um filme de um meteorito adentrando velozmente a atmosfera da Terra, brilhando por causa do calor à medida que risca os céus, com a maior parte de sua matéria constituinte consumida pelo fogo, e, então, diminuído em tamanho e massa, colidindo com a Terra. Se passássemos o filme ao contrário, veríamos a rocha parcialmente enterrada no solo, erguendo-se no ar por vontade própria, aumentando em tamanho e massa à medida que descreve um arco na atmosfera, recuperando matéria no caminho, e finalmente, grande e frio, voando de volta para o espaço. O filme com reversão temporal é claramente uma seqüência impossível de eventos — podemos identificá-lo imediatamente como um filme sendo passado ao contrário.

Esta assimetria do comportamento do universo entre o tempo “normal” e o tempo retrógrado é conhecida como a seta do tempo. Algumas vezes vários aspectos da assimetria são discutidos separadamente e caracterizados como setas diferentes do tempo. Entretanto, estão todos relacionados; eles têm a mesma origem fundamental. Agora, qual é esta origem?

A explicação para a seta ou as setas do tempo poderia ser encontrada nas leis fundamentais das partículas elementares? Se a troca do sinal da variável tempo deixa a forma das equações que descrevem estas leis invariável, as equações são ditas simétricas em relação ao tempo progressivo e ao tempo retrógrado. Se a reversão da variável temporal altera a forma das equações, diz-se que existe uma assimetria entre o tempo progressivo e o tempo retrógrado, ou uma violação da simetria temporal. Tal violação poderia, em princípio, explicar a origem da seta do tempo. De fato, sabe-se que uma pequena violação deste tipo existe, mas é um efeito muito particular para dar origem a um fenômeno tão geral como a seta do tempo.

Em vez disso, a explicação é que, se olharmos para ambas as direções do tempo, descobriremos que, há cerca de 10 ou 15 bilhões de anos em uma destas direções, o universo está em um estado muito especial. Esta direção tem um nome arbitrário: o passado. A outra direção é chamada o futuro. No estado correspondente à condição inicial, o universo era diminuto, mas isto em nenhuma hipótese caracteriza completamente o estado, o qual era também especialmente simples. Se, no futuro muito distante, o universo parar de expandir e começar a contrair, tornando-se finalmente diminuto de novo, há muitas razões para acreditar que seu estado final resultante será bem diferente do inicial. A assimetria entre passado e futuro será assim mantida.

UMA CANDIDATA A CONDIÇÃO INICIAL

Já que surgiu uma candidata viável para a lei unificada das partículas elementares, é razoável perguntar se temos também ou não uma teoria plausível para a condição inicial do universo. De fato, existe uma. Ela foi sugerida por James Hartle e Stephen Hawking por volta de 1980. Hawking gosta de chamá-la “a condição de ausência de fronteira”. Este é um nome apropriado mas não transmite o que é particularmente interessante na proposta com relação ao “acompanhamento da informação”. Se as partículas elementares são mesmo descritas por uma teoria unificada (a qual Hartle e Hawking não assumem explicitamente), então a

versão convenientemente modificada de sua condição inicial pode ser em princípio calculada a partir daquela teoria unificada, e as duas leis fundamentais da física, a das partículas elementares e a do universo, se tornam uma única lei.

EM VEZ DE TUDO, APENAS PROBABILIDADES PARA AS HISTÓRIAS

Seja a idéia de Hartle e Hawking correta ou não, ainda podemos perguntar o seguinte: se especificarmos tanto a teoria unificada das partículas elementares *como* a condição inicial do universo, poderemos, em princípio, predizer o comportamento do universo e de tudo o que ele contém? A resposta é não, porque as leis da física são quânticas e a mecânica quântica não é determinística. Permite apenas a predição de probabilidades. As leis fundamentais da física permitem, em princípio, apenas o cálculo das probabilidades de várias histórias alternativas para o universo, que, dada a condição inicial, descrevem os diferentes modos pelos quais os eventos poderiam ocorrer. A informação sobre qual destas seqüências de eventos está na verdade ocorrendo pode ser obtida apenas pela observação, e é suplementar às próprias leis fundamentais. Assim, não há como as leis fundamentais fornecerem uma teoria de tudo.

A natureza probabilística da teoria quântica pode ser ilustrada com um exemplo simples. Um núcleo atômico radiativo tem o que é chamado uma "meia-vida", que é o tempo durante o qual ele tem 50% de chance de se desintegrar. Por exemplo, a meia-vida do Pu^{239} , o isótopo mais comum do plutônio, é cerca de 25 mil anos. A chance de que um Pu^{239} existente hoje ainda exista daqui a 25 mil anos é de 50%; depois de 50 mil anos, é de apenas 25%; depois de 75 mil anos, é de 12,5%; e assim por diante. O caráter quântico da natureza significa que, para um determinado núcleo de Pu^{239} , este tipo de informação é tudo o que podemos saber a respeito de quando ele decairá; não há maneira de predizer o momento exato da desintegração, apenas uma curva de probabilidade em função do tempo como é mostrada na página 146. (Esta curva é conhecida como uma exponencial decrescente; a curva inversa, uma exponencial crescente, também é mostrada. Qualquer curva exponencial dá, para intervalos de tempos iguais, uma progressão geométrica, por exemplo, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16,... para cada acréscimo de uma unidade no eixo horizontal.)

Embora o instante da desintegração radiativa não possa ser predito com precisão, a direção do decaimento é completamente imprevisível. Suponha que o núcleo de Pu^{239} esteja em repouso e que ele decaia em dois fragmentos eletricamente carregados, um muito maior do que o

outro e os dois viajando em direções opostas. Então todas as direções são igualmente prováveis para o movimento de um dos fragmentos, digamos o menor. Não há maneira de prever que direção o fragmento tomará.

Se é de antemão impossível conhecer tanto sobre um núcleo atômico, imagine o quanto é fundamentalmente imprevisível em relação ao universo, mesmo se a teoria unificada das partículas elementares e a condição inicial do universo forem determinadas. Além destes princípios presumivelmente simples, cada história alternativa do universo depende dos resultados de um número inconcebivelmente grande de acidentes.

REGULARIDADES E COMPLEXIDADE EFETIVA A PARTIR DE ACIDENTES CONGELADOS NO TEMPO

Estes acidentes têm resultados ao acaso, como é exigido pela mecânica quântica. Os resultados têm ajudado a determinar as características de galáxias individuais (como as da nossa Via Láctea), de estrelas e planetas particulares (como o Sol e a Terra), da vida terrestre e de espécies particulares que evoluíram em nosso planeta, de organismos individuais, como por exemplo, nós mesmos, e de eventos da história humana e de nossas vidas pessoais. O genótipo de qualquer ser humano tem sido influenciado por numerosos acidentes quânticos, não apenas mutações no idioplasma ancestral, mas mesmo eventos que afetam a fertilização de um óvulo particular por um espermatozóide particular.

O conteúdo de informação algorítmica de cada história alternativa do universo recebe evidentemente uma contribuição diminuta das leis simples fundamentais, junto com uma contribuição gigantesca de todos os acidentes quânticos que surgem ao longo do caminho. Mas não é apenas o CIA do universo que é dominado por estes acidentes. Embora eles sejam eventos ao acaso, seus efeitos contribuem fortemente também para a complexidade efetiva.

A complexidade efetiva do universo é o tamanho de uma descrição concisa de suas regularidades. Como o conteúdo de informação algorítmica, a complexidade efetiva recebe apenas uma pequena contribuição das leis fundamentais. O resto vem de numerosas regularidades que resultam de “acidentes congelados”. Estes são eventos ao acaso dos quais resultados particulares têm uma multiplicidade de conseqüências de longo prazo, todas relacionadas pelo seu ancestral comum.

As conseqüências de alguns desses acidentes podem ser amplas. O caráter de todo o universo foi afetado por acidentes que ocorreram pró-

ximo do começo de sua expansão. A natureza da vida na Terra depende de eventos ao acaso que ocorreram há cerca de 4 bilhões de anos. Uma vez especificado o resultado, as conseqüências de longo prazo de tal evento podem assumir o caráter de uma lei em qualquer nível menos o fundamental. Uma lei da geologia, da biologia ou da psicologia humana pode se originar de um ou mais eventos quânticos amplificados, cada um podendo ter se realizado de forma diferente. As amplificações podem surgir por meio de uma variedade de mecanismos, incluindo o fenômeno do caos, que introduz em certas situações suscetibilidades indefinidamente grandes entre resultado e estímulo.

Para entender completamente o significado dos eventos ao acaso é necessário pesquisar mais fundo o significado da mecânica quântica, que nos ensina que o acaso desempenha um papel fundamental na descrição da natureza.

CAPÍTULO 11

UMA VISÃO CONTEMPORÂNEA DA MECÂNICA QUÂNTICA

A mecânica quântica e a aproximação clássica

Quando a mecânica quântica foi descoberta, as pessoas ficaram impressionadas pelo contraste entre seu caráter probabilístico e as certezas da física clássica mais antiga, na qual a informação exata e completa sobre uma situação inicial permitiria em princípio calcular, dada a teoria correta, a especificação exata e completa da situação final. Um determinismo deste tipo nunca é perfeitamente aplicável à mecânica quântica, mas ele muitas vezes se aplica de maneira aproximada às condições que freqüentemente são encontradas, as quais podem ser chamadas de domínio quase clássico, onde a física clássica é aproximadamente correta. Este domínio pode ser grosseiramente caracterizado como aquele que envolve o comportamento de objetos que possuem massa muito grande. Por exemplo, o movimento dos planetas em torno do Sol pode ser calculado, na prática, sem quaisquer correções quânticas, que são completamente desprezíveis em tal tipo de problema. Em primeiro lugar, se o domínio quase clássico não fosse tão relevante, os físicos nunca teriam desenvolvido e utilizado a física clássica, e teorias clássicas como as de Maxwell e Einstein não teriam obtido seus sucessos maravilhosos ao predizer resultados de observações. Este é um outro caso onde o velho paradigma (como Kuhn o teria chamado) não é descartado quando um novo é adotado, mas permanece como uma aproximação válida em um limite conveniente, como a teoria da gravitação de Newton, que é ainda imensamente útil como uma aproximação à de Einstein quando as velocidades são pequenas quando comparadas à da luz. Ainda assim, a física clássica é apenas uma aproximação, enquanto a mecânica quântica, até onde sabemos, é absolutamente correta. Embora muitas décadas tenham se passado desde a descoberta da mecânica quântica em 1924, os físicos apenas agora estão chegando a uma interpretação satisfatória, que permite compreensão profunda de como o do-

mínio quase clássico da experiência cotidiana surge do caráter quântico subjacente da natureza.

A MECÂNICA QUÂNTICA APROXIMADA DE SISTEMAS MENSURÁVEIS

Quando a mecânica quântica foi formulada pela primeira vez por seus descobridores, ela era apresentada de um modo curiosamente restritivo e antropocêntrico, e até hoje freqüentemente ainda é assim. É mais ou menos pressuposto que alguma situação experimental, por exemplo, o decaimento radiativo de um tipo particular de núcleo, é reproduzida de modo idêntico repetidas vezes. O resultado da experiência é registrado a cada vez, de preferência por um físico utilizando o mesmo equipamento. Pressupõe-se que é importante que o físico e o equipamento sejam externos ao sistema que está sendo estudado. O físico registra as freqüências com que os possíveis e diferentes resultados ocorrem, por exemplo, os tempos de decaimento. À medida que o número de tentativas cresce sem limite, estas freqüências tendem a se aproximar das probabilidades, previstas pela teoria quântica, de se obter os vários resultados possíveis. A probabilidade do decaimento radiativo em função do tempo é intimamente relacionada à fração de núcleos que permanecem sem decair depois de decorridos vários intervalos de tempo, como é mostrado na figura da página 146. A probabilidade de decaimento segue uma curva similar.

Esta interpretação original da mecânica quântica, restrita a experiências repetíveis realizadas por observadores externos, é demasiado particular para ser aceita hoje em dia como sua caracterização fundamental, especialmente porque tem ficado cada vez mais claro que a mecânica quântica deve ser válida para todo o universo. A interpretação original não está errada, mas é válida apenas para as situações para as quais ela foi desenvolvida. Além disso, num contexto mais amplo esta interpretação deve ser considerada não apenas como particular mas também como aproximada. Podemos nos referir a ela como a “mecânica quântica aproximada dos sistemas que podem ser medidos”.

A ABORDAGEM MODERNA

Para descrever o universo, uma interpretação mais geral da mecânica quântica é evidentemente necessária, já que, para observar as muitas cópias do universo, não existe qualquer observador ou equipamento externo, e não há oportunidade de repetição da medida. (De qualquer

modo se presume que o universo não se importe se seres humanos evoluíram ou não em algum planeta obscuro para estudar a sua história; ele, o universo, segue obedecendo às leis quânticas da física sem levar em consideração as observações feitas pelos físicos.) Esta é uma das razões pelas quais o que eu chamo de interpretação moderna da mecânica quântica tem sido desenvolvida nas últimas décadas. A outra razão principal é a necessidade de uma compreensão mais clara da relação entre a mecânica quântica e a descrição clássica aproximada do mundo que nos cerca.

Nas primeiras discussões sobre a mecânica quântica muitas vezes estava implícito, e algumas vezes explicitamente afirmado, que havia um domínio clássico *separado* da mecânica quântica, de tal modo que a teoria física básica de alguma forma exigiria leis clássicas além das quânticas. Para uma geração educada com as noções da física clássica, este arranjo deve ter parecido satisfatório, mas hoje, para muitos de nós, parece tão bizarro quanto desnecessário. Na interpretação moderna da mecânica quântica, propõe-se que o domínio quase clássico surge a partir das leis da mecânica quântica, incluindo-se aí a condição inicial no começo da expansão do universo. Compreender como se dá este surgimento é um grande desafio.

O pioneiro da abordagem moderna foi o falecido Hugh Everett III, um dos estudantes de pós-graduação de John A. Wheeler em Princeton e mais tarde membro do Grupo de Avaliação de Sistemas de Armamentos do Pentágono. Muitos físicos teóricos têm trabalhado nela desde então, incluindo eu e James Hartle. Hartle, da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara e do Instituto Santa Fé, é um cosmólogo teórico notável e um especialista na teoria geral da gravitação de Einstein. No começo dos anos 60, quando era meu orientando de doutoramento, sua tese foi sobre a teoria das partículas elementares. Mais tarde, ele e Stephen Hawking escreveram um artigo seminal intitulado "A função de onda do universo", que teve um papel vital na conformação do campo da cosmologia quântica. Desde 1986, Jim e eu temos trabalhado juntos para ajudar a clarificar como a mecânica quântica deveria ser concebida, particularmente em relação ao domínio quase clássico.

Consideramos o trabalho de Everett útil e importante, mas acreditamos que há muito mais a ser feito. Também em alguns casos, sua escolha da terminologia e a dos comentaristas de seu trabalho que vieram a seguir ajudaram a criar confusão. Por exemplo, sua interpretação é muitas vezes descrita em termos de "muitos mundos" enquanto acreditamos que deva ser "muitas histórias alternativas do universo" o que realmente se quer dizer. E ainda mais, os muitos mundos são descritos como "todos igualmente reais", enquanto que acreditamos ser menos

confuso falar de “muitas histórias, todas tratadas da mesma forma pela teoria exceto por suas probabilidades diferentes”. Usar a linguagem que recomendamos é referir-se à noção familiar de que um determinado sistema pode ter diferentes histórias possíveis, cada uma delas com sua própria probabilidade; não é necessário se sentir desconfortável tentando conceber os muitos “universos paralelos” como sendo todos igualmente reais. Um físico notável, bem versado em mecânica quântica, inferiu a partir de certos comentários sobre a interpretação de Everett que qualquer um que a aceitasse deveria querer jogar roleta-russa para valer, porque em alguns destes mundos “igualmente reais” o jogador sobreviveria e seria rico.

Um outro problema lingüístico é que Everett evitou a palavra “probabilidade” na maioria das conseqüências lógicas, utilizando em seu lugar a noção menos familiar mas matematicamente equivalente de “medida”; Hartle e eu não vemos vantagem nisto. Todavia, palavras à parte, Everett deixou muitas questões importantes sem resposta, e o principal desafio não é uma questão de linguagem mas sim preencher os espaços vazios na nossa compreensão da mecânica quântica.

Jim Hartle e eu somos parte de um grupo internacional de teóricos que tentam de diversas formas construir a interpretação moderna da mecânica quântica. Entre aqueles que têm feito contribuições particularmente notáveis estão Robert Griffiths e Roland Omnès, cuja crença na importância do conceito de histórias nós compartilhamos, assim como Erich Joos, Dieter Zeh e Wojciech (“Wojtek”) Zurek, que têm pontos de vista de algum modo diferentes. A formulação da mecânica quântica em termos de histórias foi desenvolvida por Dick Feynman, que se apoiou em trabalho anterior de Paul Dirac. Esta formulação não ajuda apenas a clarificar a interpretação moderna; ela é também particularmente útil para descrever a mecânica quântica sempre que a gravitação einsteiniana é levada em conta, como deve ser na cosmologia. Então, a geometria do espaço-tempo é submetida à indeterminação quântica, e o método baseado nas histórias dá conta da situação perfeitamente bem.

O ESTADO QUÂNTICO DO UNIVERSO

Fundamental para qualquer tratamento da mecânica quântica é a noção de estado quântico. Consideremos um quadro algo simplificado do universo no qual cada partícula não tem outros atributos que a posição e o momento, e a indistinguibilidade de todas as partículas de um mesmo tipo, da qual a permutabilidade de todos os elétrons é um exemplo, é colocada de lado. Então, o que significa um estado quântico para todo o

universo? É melhor começar com a discussão do estado quântico de uma única partícula, e depois de duas partículas, antes de discutir o estado quântico de todo o universo.

Na física clássica, teria sido válido especificar exatamente ambos, a posição e o momento de uma determinada partícula, ao mesmo tempo, mas na mecânica quântica, como é bem sabido, isto é proibido pela indeterminação ou princípio de incerteza. A posição de uma partícula pode ser especificada exatamente, mas seu momento então será completamente indeterminado; esta situação caracteriza um tipo particular de estado quântico de uma única partícula, um estado de posição definida. Em um outro tipo de estado quântico, o momento é especificado mas a posição é completamente indeterminada. Há também uma variedade infinita de outros estados quânticos possíveis para uma única partícula nos quais nem a posição nem o momento são exatamente especificados, apenas uma distribuição espalhada de probabilidades para cada. Por exemplo, no átomo de hidrogênio, que consiste em um único elétron (negativamente carregado), no campo elétrico de um único próton (positivamente carregado), o elétron pode se encontrar no estado quântico de energia mais baixa, no qual sua posição se espalha sobre uma região cujo tamanho é da ordem do tamanho do átomo e seu momento também é distribuído da mesma forma.

Agora considere um “universo” com dois elétrons. É tecnicamente possível que seu estado quântico seja tal que cada um dos elétrons esteja em um estado quântico definido. Todavia, isto na realidade não acontece frequentemente porque os dois elétrons interagem, especialmente por meio da repulsão elétrica mútua. O átomo de hélio, por exemplo, consiste de dois elétrons no campo de um núcleo central com carga positiva dupla. Para o estado de energia mais baixo do átomo de hélio, não é verdadeiro que cada um dos elétrons esteja em um estado quântico definido próprio, embora esta situação seja às vezes considerada uma aproximação. Em vez disso, como consequência da interação entre os elétrons, seu estado quântico conjunto é aquele no qual os estados dos dois elétrons estão correlacionados um com o outro. Se você está interessado em apenas um dos elétrons, pode “somar” todas as posições (ou os momentos, ou os valores de qualquer outro atributo) do segundo elétron, e seu elétron então não está em um estado quântico (“puro”) definido, ao contrário, tem um conjunto de probabilidades para os vários estados quânticos puros de um único elétron. Diz-se que seu elétron está num “estado quântico misto”.

Podemos passar agora diretamente às considerações sobre o universo como um todo. Se o universo está num estado quântico puro, este é um estado quântico tal que os estados individuais das partículas que ele con-

tém estão entrelaçados uns com os outros. Se somarmos todas as situações em algumas partes do universo, então o resto do universo (aquilo que é “acompanhado”, que não é somado) está em um estado misto.

O universo como um todo pode estar num estado quântico puro. Ao lançar esta hipótese, Hartle e Hawking propuseram uma forma particular de estado puro que teria existido próximo ao início da expansão do universo. Como foi observado anteriormente, sua hipótese — convenientemente generalizada para uma teoria unificada das partículas elementares — especifica este estado quântico inicial do universo em termos da teoria unificada das partículas elementares. Além disso, a mesma teoria unificada determina como o estado quântico varia no tempo. Mas, ainda assim, uma especificação completa do estado quântico de todo o universo, não apenas inicialmente mas para todos os instantes de tempo, não fornece uma interpretação para a mecânica quântica.

O estado quântico do universo é como um livro que contém as respostas de uma variedade infinita de questões. Um livro assim não é realmente útil sem uma lista de perguntas que devem ser feitas. A interpretação moderna da mecânica quântica está sendo construída por meio de uma discussão sobre as perguntas relevantes que devem ser feitas sobre o estado quântico do universo.

Como a mecânica quântica é probabilística e não determinística, estas perguntas são inevitavelmente sobre probabilidades. Hartle e eu, assim como Griffiths e Omnès, utilizamos o fato de que em última instância as perguntas sempre se relacionam com as histórias alternativas do universo. Por “história” não queremos nem enfatizar o passado às custas do futuro, nem nos referir principalmente a registros escritos como na história humana. A história é apenas uma narrativa de uma seqüência temporal de eventos — passados, presentes ou futuros. As perguntas sobre as histórias alternativas podem ser do tipo: “Qual é a probabilidade de ocorrência desta história particular do universo e não de outras?” ou ainda, “Dadas estas asserções sobre a história do universo, qual é a probabilidade de estas afirmações adicionais serem verdadeiras?” Muitas vezes este último tipo de pergunta assume a forma: “Dadas estas asserções sobre o passado ou sobre o presente, qual é a probabilidade destas afirmações sobre o futuro se tornarem verdadeiras?”

HISTÓRIAS ALTERNATIVAS NA PISTA DE CORRIDAS

Um lugar para se encontrar probabilidades é a pista de corridas, onde elas estão relacionadas com o que podemos chamar de chances reais. Se as chances reais de que um cavalo não vença uma corrida são de 3 para 1,

então a probabilidade de que este cavalo vença é $1/4$; se as chances reais contrárias são de 2 para 1, então a probabilidade de vencer é $1/3$, e assim por diante. É claro que as chances realmente cotadas não são as chances verdadeiras, e, portanto, não correspondem às verdadeiras probabilidades. Retornaremos a este ponto. Se há dez cavalos na corrida, cada um deles tem alguma probabilidade positiva de vencer (ou probabilidade nula num caso realmente desesperador!), e a soma destas probabilidades é 1, se deve haver exatamente um vencedor entre os dez cavalos. Os dez resultados alternativos são então *mutuamente exclusivos* (apenas um pode ocorrer), e *exaustivos* (um deles deve ocorrer). Uma propriedade óbvia das dez probabilidades é que elas são *aditivas*: por exemplo, a probabilidade de que o terceiro ou o quarto cavalo vença é simplesmente a soma das duas probabilidades individuais de vitória do terceiro e do quarto.

Um paralelo mais próximo entre a experiência com as corridas de cavalos e as histórias do universo pode ser obtido considerando-se uma seqüência de corridas, digamos oito corridas com dez cavalos em cada uma. Por simplicidade suponha que importa apenas vencer (e não a "colocação" ou o "show") e que há apenas um vencedor para cada corrida (não há corridas canceladas). Cada lista de oito vencedores é então um tipo de história, e estas histórias são mutuamente exclusivas e exaustivas, como no caso de uma única corrida. O número de histórias alternativas é o produto de oito fatores de dez, um para cada corrida, ou no total uma centena de milhões.

As probabilidades para as diferentes seqüências de vitórias têm a mesma propriedade aditiva que os cavalos individuais têm de vencer uma única corrida: a probabilidade de que uma ou outra seqüência particular de vitórias ocorra é a soma das probabilidades individuais para as duas seqüências. Uma situação em que uma ou outra seqüência ocorre pode ser chamada uma "história combinada".

Denotemos duas histórias alternativas individuais por A e B. A propriedade aditiva exige que a probabilidade da história combinada, "A ou B", seja a probabilidade de A mais a probabilidade de B. Em outras palavras, a probabilidade de que eu vá para Paris amanhã ou fique em casa é a soma da probabilidade de que eu vá para Paris com a probabilidade de que eu fique em casa. Uma quantidade que não obedece a esta regra não é uma probabilidade.

HISTÓRIAS ALTERNATIVAS NA MECÂNICA QUÂNTICA

Suponha que um conjunto de histórias alternativas do universo seja especificado, e que estas histórias sejam exaustivas e mutuamente

exclusivas. Poderá a mecânica quântica atribuir sempre uma probabilidade a cada uma delas? Surpreendentemente, ela nem sempre poderá fazê-lo. Em vez disto, a mecânica quântica atribui a cada *par* destas histórias uma quantidade denotada por D , e fornece a regra para o seu cálculo em termos do estado quântico do universo. As duas histórias que formam um determinado par podem ser diferentes, como as alternativas A e B , ou podem ser as mesmas, digamos, A e A . O valor de D será indicado por uma expressão como $D(A, B)$, que se lê D de A e B . Se as duas histórias que formam o par são ambas A , temos então $D(A, A)$. Se ambas são a história combinada A ou B , então o valor de D é denotado por $D(A \text{ ou } B, A \text{ ou } B)$.

Quando as duas histórias que formam o par são as mesmas, D é um número entre zero e um, como uma probabilidade. De fato, sob certas condições, D pode ser interpretado como a probabilidade de ocorrência da história. Para vermos que condições são estas, examinemos a relação entre as seguintes quantidades:

- $D(A \text{ ou } B, A \text{ ou } B)$.
- $D(A, A)$.
- $D(B, B)$.
- $D(A, B)$ mais $D(B, A)$.

As três primeiras quantidades são números entre zero e um, e portanto lembram probabilidades. A última quantidade pode ser positiva, negativa ou zero e não é uma probabilidade. Na mecânica quântica, a regra para calcular D é tal que a primeira quantidade é a soma das outras três. Mas, se quando A e B são diferentes a última quantidade é sempre zero, então $D(A \text{ ou } B, A \text{ ou } B)$ é simplesmente igual a $D(A, A)$ mais $D(B, B)$. Em outras palavras, se D é sempre zero quando duas histórias são diferentes, então D de uma história e desta mesma história possui sempre a propriedade aditiva e, portanto, pode ser interpretado como a probabilidade para esta história.

A quarta quantidade da lista é chamada de termo de interferência entre as histórias A e B . Se ela *não* for zero para cada par de histórias diferentes pertencentes ao conjunto, então a mecânica quântica não pode atribuir probabilidades a estas histórias. Elas “interferem” uma com a outra.

Como em qualquer situação o melhor que a mecânica quântica pode fazer é atribuir probabilidades, ela não pode fazer nada no caso em que as histórias interferem uma com a outra. Tais histórias são úteis apenas para construir histórias combinadas que não interferem.

HISTÓRIAS DO UNIVERSO FINAMENTE GRANULADAS

Histórias completas do universo finamente granuladas são histórias que dão uma descrição tão completa quanto possível de todo o universo, em todos os instantes de tempo. O que a mecânica quântica tem a dizer sobre elas?

Continuemos a utilizar um modelo do universo no qual as partículas não têm outros atributos além de sua posição e de seu momento, e no qual a indistinguibilidade entre as partículas de determinado tipo é posta de lado. Se a física clássica determinística fosse exatamente correta, as posições e os momentos de todas as partículas do universo poderiam ser especificados exatamente em todos os instantes de tempo. A dinâmica clássica poderia então, em princípio, predizer com certeza as posições e os momentos de todas as partículas em instantes de tempo futuros. (O fenômeno do caos produz situações em que a menor imprecisão nas posições e momentos iniciais pode conduzir a incertezas arbitrariamente grandes nas previsões futuras, mas, na teoria clássica, o determinismo perfeito ainda seria em princípio correto, dando uma informação perfeita.)

Qual é a situação correspondente na mecânica quântica, para a qual a física clássica é apenas uma aproximação? Para começar, não faz mais sentido especificar tanto a posição como o momento exatos para o mesmo instante de tempo; isto faz parte do célebre princípio de incerteza. Na mecânica quântica, portanto, a condição do universo simplificado em um dado instante de tempo poderia ser caracterizada apenas pela especificação das posições de todas as partículas (ou pelas posições de algumas e pelos momentos de outras, ou pelos momentos de todas, ou de infinitas outras maneiras). Na mecânica quântica, um tipo de história completamente de granulação fina do universo simplificado consistiria nas posições das partículas em todos os instantes de tempo.

Como a mecânica quântica é probabilística e não determinística, poderíamos esperar que ela fornecesse uma probabilidade para cada história finamente granulada. Entretanto, este não é o caso. Os termos de interferência entre histórias finamente granuladas usualmente não desaparecem, e portanto não é possível atribuir probabilidades a tais histórias.

No entanto, na pista de corrida, o apostador não tem por que se preocupar com quaisquer termos de interferência entre uma seqüência de vencedores e outra. E por que não? Como é possível que o apostador trate com probabilidades verdadeiras que se somam de modo apropriado, enquanto a mecânica quântica fornece, no nível finamente granulado, apenas quantidades para as quais a adição é atrapalhada pelos ter-

mos de interferência? A resposta é que, para termos probabilidades reais, é necessário considerar histórias que têm uma granulação suficientemente grosseira.

HISTÓRIAS COM GRANULAÇÃO GROSSEIRA

A seqüência de oito corridas de cavalos serve não apenas como uma metáfora, mas também como um exemplo real de uma história do universo com uma granulação muito grosseira. Como apenas a lista de vencedores é considerada, a granulação grosseira consiste no seguinte:

1. Ignorar todos os instantes de tempo da história do universo, exceto aqueles nos quais as corridas são vencidas.
2. Nos instantes de tempo considerados, acompanhar apenas os cavalos que participaram das corridas e ignorar todos os outros objetos no universo.
3. Destes cavalos, acompanhar apenas aquele que vence a corrida; ignorar todas as partes do cavalo exceto a ponta de seu focinho.

Para histórias do universo na mecânica quântica, a granulação grosseira tipicamente significa acompanhar certas coisas em certos instantes de tempo e apenas até certo nível de detalhe. Uma história com granulação grosseira pode ser considerada uma classe de histórias alternativas finamente granuladas, todas concordando sobre um relato particular do que está sendo acompanhado, mas diferindo sobre todos os comportamentos possíveis do que não está sendo acompanhado, que devem ser somados. No caso das corridas de cavalos, cada história com granulação grosseira é a classe de todas as histórias finamente granuladas que tem a mesma seqüência de oito cavalos vencedores naquela tarde particular, naquela pista particular, embora as histórias finamente granuladas na classe variem sobre todas as possíveis alternativas para o que acontece com quaisquer outras características da história do universo!

Assim, todas as histórias finamente granuladas do universo são agrupadas em classes de tal maneira que cada uma delas pertence a uma e apenas uma classe. Estas classes, exaustivas e mutuamente exclusivas, são as histórias com uma granulação grosseira, como as diferentes seqüências possíveis de vencedores das oito corridas quando não há empates. Suponha que uma determinada classe contenha apenas duas histórias finamente granuladas, J e K; a história com granulação grosseira será então apenas "J ou K", o que significa que acontece J ou K. Da mesma forma, se a classe contém muitas histórias finamente granuladas,

a história com granulação grosseira será a história combinada na qual qualquer uma destas histórias finamente granuladas acontece.

Os matemáticos chamariam estas histórias com granulação grosseira de “classes equivalentes” de histórias finamente granuladas. Cada história finamente granulada pertence a uma e apenas uma classe de equivalência, e os membros da classe são tratados como equivalentes.

Imagine que as únicas coisas no universo sejam os cavalos nas oito corridas e um certo número de moscas que os acompanham, e que tudo o que um cavalo pode fazer é vencer ou não. Cada história finamente granulada deste mundo absurdamente simplificado consiste de uma seqüência de cavalos vencedores e de alguma história particular sobre as moscas. Se as histórias com granulação grosseira acompanham apenas os cavalos e suas vitórias e ignoram as moscas, então cada uma de tais histórias será o conjunto de histórias finamente granuladas na qual existe uma seqüência particular de cavalos vencedores e um destino qualquer para as moscas. Em geral, cada história com granulação grosseira é uma classe equivalente de histórias finamente granuladas caracterizadas por uma narrativa particular que descreve os fenômenos acompanhados e por qualquer das possíveis narrativas alternativas que descrevem tudo aquilo que é ignorado.

A GRANULAÇÃO GROSSEIRA PODE DESCARTAR OS TERMOS DE INTERFERÊNCIA

Para as histórias quânticas do universo, como pode o agrupamento de histórias finamente granuladas em classes de equivalência conduzir a histórias com granulação grosseira com probabilidades verdadeiras? Como é possível que histórias com granulações grosseiras convenientes não tenham termos de interferência entre elas? A resposta é que o termo de interferência entre duas histórias com granulação grosseira é a soma de todos os termos de interferência entre pares de histórias finamente granuladas que pertencem a estas duas histórias. A soma de todos estes termos, com seus sinais algébricos positivos e negativos, pode produzir uma grande quantidade de cancelamentos e dar um resultado pequeno com qualquer um dos sinais, ou zero. (Lembre que D de uma história e da própria história estão sempre entre zero e um, como uma probabilidade real; quando tais quantidades são somadas, elas não se podem cancelar.)

Qualquer comportamento de qualquer coisa no universo que seja ignorado nas histórias grosseiramente granuladas pode ser considerado como “somado” no processo de adição. Todos os detalhes deixados de

lado nas histórias com granulação grosseira, todos os tempos, lugares e objetos que não são acompanhados, são somados. Por exemplo, as classes equivalentes poderiam agrupar todas as histórias finamente granuladas em que certas partículas têm posições especificadas em todos os instantes, enquanto todas as outras partículas no universo simplificado podem estar em qualquer parte. Diríamos então que as posições do primeiro conjunto de partículas são acompanhadas em cada instante, enquanto aquelas do segundo conjunto são ignoradas ou somadas.

Uma granulação grosseira maior poderia consistir em acompanhar as posições do primeiro conjunto de partículas apenas em certos instantes de tempo, de modo que tudo o que acontece nos outros instantes de tempo seja somado.

A DECOERÊNCIA DAS HISTÓRIAS COM GRANULAÇÃO GROSSEIRA — PROBABILIDADES VERDADEIRAS

Se o termo de interferência entre cada par de histórias com granulação grosseira é zero, seja exatamente ou com uma aproximação extraordinariamente boa, então todas as histórias com granulação grosseira são referidas como *decoerentes*. A quantidade D de cada história com granulação grosseira, e dessa mesma história, é então uma verdadeira probabilidade, com a propriedade aditiva. Na prática, a mecânica quântica é sempre aplicada a conjuntos de histórias com granulação grosseira que perdem a coerência, e esta é a razão pela qual ela é capaz de prever probabilidades. A propósito, D é chamado de *funcional de decoerência*; a palavra “funcional” indica que D depende das histórias.

No caso de uma tarde nas corridas, a granulação grosseira empregada pode ser resumida como se segue: o destino de tudo no universo é somado, exceto os vencedores das corridas naquela pista particular, e os eventos em todos os instantes de tempo são somados, exceto os instantes deste dia particular nos quais as vitórias nas oito corridas acontecem. As histórias com granulação grosseira resultantes perdem a coerência e têm probabilidades verdadeiras. Em vista da nossa experiência cotidiana, não deve ser surpresa para nós que as coisas funcionem desta maneira, mas deveríamos ficar curiosos sobre como isto acontece.

ENTRELAÇAMENTO E MECANISMOS DE DECOERÊNCIA

Qual é a explicação subjacente para a decoerência, o mecanismo que faz com que os termos de interferência dêem soma nula e permite a atribui-

ção de probabilidades? É o entrelaçamento do que é acompanhado nas histórias com granulação grosseira com o que é ignorado ou somado. Os cavalos e jóqueis nas corridas estão em contato com as moléculas de ar, partículas de areia e de excrementos dos cavalos na pista, fótons provindos do Sol e moscas, todos somados nas histórias com granulação grosseira das corridas. Os diferentes resultados possíveis das corridas são correlacionados com os diferentes destinos de tudo aquilo que é ignorado nas histórias com granulação grosseira. Mas estes destinos são somados, e a mecânica quântica nos diz que na soma, sob condições apropriadas, os termos de interferência entre histórias que envolvem destinos diferentes do que é ignorado desaparecem. Em razão deste entrelaçamento, os termos de interferência entre os diferentes resultados das corridas também dão zero.

É perturbador considerar, em vez destas histórias que perdem sua coerência, um caso extremo de histórias finamente granuladas com termos de interferência diferentes de zero e que não dão probabilidades verdadeiras. Tais histórias podem acompanhar, durante o tempo total de duração da corrida, cada partícula elementar contida em cada cavalo e tudo o que entra em contato com ele. Todavia, não precisamos ir a tais extremos para encontrar histórias suficientemente livres de entrelaçamento para poder interferir umas com as outras. Considere a famosa experiência na qual um fóton emitido por uma fonte diminuta pode passar livremente através de uma das duas fendas sobre uma tela que está em seu caminho em direção a um determinado ponto sobre um detector — estas duas histórias interferem e a elas não podemos atribuir probabilidades. Dizer então por qual fenda o fóton passou não tem sentido.

PROBABILIDADES E CHANCES COTADAS

Para maior clareza, deve ser enfatizado mais uma vez que, para histórias com granulação grosseira suficiente, as probabilidades fornecidas pela mecânica quântica junto com uma teoria física correta são as melhores probabilidades que podem ser calculadas. Para uma seqüência de corridas, elas correspondem ao que temos chamado de chances verdadeiras. As chances que na verdade são cotadas na pista de corridas têm um caráter bastante diferente. Simplesmente refletem as opiniões dos apostadores sobre as corridas futuras. Além do mais, as probabilidades correspondentes somadas nem mesmo dão 1, já que o hipódromo necessita lucrar.

A DECOERÊNCIA DE UM OBJETO EM ÓRBITA

Para ilustrar a generalidade da decoerência, podemos passar do mundano para o celestial com outro exemplo: uma descrição aproximada da órbita de um objeto no sistema solar. O objeto pode variar de tamanho desde uma macromolécula até um planeta; entre estes extremos, o objeto pode ser um grão de poeira, um cometa ou um asteroide. Considere histórias com granulação grosseira nas quais o destino de todas as outras coisas no universo é somado, assim como são todas as propriedades internas do objeto propriamente dito, sobrando apenas a posição de seu centro de massa em todos os instantes de tempo. Além disso, suponha que a própria posição seja tratada apenas de forma aproximada, de modo que apenas pequenas regiões do espaço sejam consideradas e todas as possibilidades para a posição dentro de cada região somadas. Finalmente, suponha que a história com granulação grosseira faça a soma do que acontece na maior parte do tempo, acompanhando a posição aproximada do objeto apenas durante seqüências discretas de intervalos de tempo, com pequenos intervalos entre estes.

Digamos que o objeto tem massa M , as dimensões lineares das pequenas regiões do espaço são da ordem de X , e os intervalos de tempo da ordem de T . As diferentes histórias com granulação grosseira possíveis do objeto no sistema solar perderão a coerência com alto grau de precisão sobre um amplo domínio de valores das quantidades M , X e T . O mecanismo responsável pela decoerência é novamente a interação freqüente com objetos cujos destinos são somados. Em um exemplo famoso, estes objetos são os fótons que constituem a radiação eletromagnética de fundo deixada para trás pela expansão inicial do universo (o assim chamado big-bang). Nosso objeto orbitante encontrará repetidamente tais fótons e os espalhará. A cada vez que isto acontece, o objeto e os fótons sairão da colisão com seus movimentos alterados. Mas as diferentes direções e energias de todos os fótons são somadas, e isto apaga os termos de interferência entre tais direções e energias, e conseqüentemente os termos de interferência entre as diferentes histórias com granulação grosseira do objeto em órbita.

As histórias, especificando as posições aproximadas sucessivas do centro de massa do objeto no sistema solar em instantes particulares de tempo, perdem a coerência em razão de interações repetidas do objeto com coisas que são somadas, como os fótons da radiação de fundo.

Este processo responde a uma questão que Enrico Fermi me fez no começo dos anos 50, quando eramos colegas na Universidade de Chicago: já que a mecânica quântica é correta, por que o planeta Marte não está todo distribuído ao longo de sua órbita? Uma resposta antiga:

A DECOERÊNCIA DE UM OBJETO EM ÓRBITA

Para ilustrar a generalidade da decoerência, podemos passar do mundano para o celestial com outro exemplo: uma descrição aproximada da órbita de um objeto no sistema solar. O objeto pode variar de tamanho desde uma macromolécula até um planeta; entre estes extremos, o objeto pode ser um grão de poeira, um cometa ou um asteroide. Considere histórias com granulação grosseira nas quais o destino de todas as outras coisas no universo é somado, assim como são todas as propriedades internas do objeto propriamente dito, sobrando apenas a posição de seu centro de massa em todos os instantes de tempo. Além disso, suponha que a própria posição seja tratada apenas de forma aproximada, de modo que apenas pequenas regiões do espaço sejam consideradas e todas as possibilidades para a posição dentro de cada região somadas. Finalmente, suponha que a história com granulação grosseira faça a soma do que acontece na maior parte do tempo, acompanhando a posição aproximada do objeto apenas durante seqüências discretas de intervalos de tempo, com pequenos intervalos entre estes.

Digamos que o objeto tem massa M , as dimensões lineares das pequenas regiões do espaço são da ordem de X , e os intervalos de tempo da ordem de T . As diferentes histórias com granulação grosseira possíveis do objeto no sistema solar perderão a coerência com alto grau de precisão sobre um amplo domínio de valores das quantidades M , X e T . O mecanismo responsável pela decoerência é novamente a interação freqüente com objetos cujos destinos são somados. Em um exemplo famoso, estes objetos são os fótons que constituem a radiação eletromagnética de fundo deixada para trás pela expansão inicial do universo (o assim chamado big-bang). Nosso objeto orbitante encontrará repetidamente tais fótons e os espalhará. A cada vez que isto acontece, o objeto e os fótons sairão da colisão com seus movimentos alterados. Mas as diferentes direções e energias de todos os fótons são somadas, e isto apaga os termos de interferência entre tais direções e energias, e conseqüentemente os termos de interferência entre as diferentes histórias com granulação grosseira do objeto em órbita.

As histórias, especificando as posições aproximadas sucessivas do centro de massa do objeto no sistema solar em instantes particulares de tempo, perdem a coerência em razão de interações repetidas do objeto com coisas que são somadas, como os fótons da radiação de fundo.

Este processo responde a uma questão que Enrico Fermi me fez no começo dos anos 50, quando erámos colegas na Universidade de Chicago: já que a mecânica quântica é correta, por que o planeta Marte não está todo distribuído ao longo de sua órbita? Uma resposta antiga:

porque Marte está em um lugar definido a cada vez que as pessoas olham para ele, era familiar a ambos, mas parecia tola tanto para ele quanto para mim. A explicação real chegou muito depois de sua morte, com o trabalho de Dieter Zeh, Erich Joos e Wojtek Żurek sobre mecanismos de perda de coerência, como por exemplo aquele que envolve os fótons da radiação de fundo.

Os fótons provenientes do Sol e que são espalhados por Marte são somados, contribuindo para a perda de coerência das diferentes posições do planeta, e são justamente estes fótons que permitem que os seres humanos vejam Marte. Assim, enquanto a observação humana de Marte é uma pista falsa, o processo físico que torna a observação possível não é em absoluto uma pista falsa, e pode ser considerado parcialmente responsável pela perda de coerência das diferentes histórias com granulação grosseira do movimento do planeta em torno do Sol.

HISTÓRIAS DECOERENTES FORMAM UMA ÁRVORE RAMIFICADA

Estes mecanismos de decoerência tornam possível a existência do domínio quase clássico que inclui a experiência ordinária. Este domínio consiste de histórias com granulação grosseira que perderam a coerência, as quais podem ser visualizadas como uma estrutura em forma de árvore. Jorge Luis Borges, em um de seus brilhantes contos, descreveu uma representação de tal estrutura como um “jardim de caminhos ramificados”. Em cada ramificação, há alternativas mutuamente exclusivas. Um par de tais alternativas tem sido muitas vezes comparado com uma bifurcação em uma estrada, como no poema de Robert Frost “The road not taken”.

Primeiro a estrutura se ramifica em possibilidades alternativas no momento, ou logo após, o começo da expansão do universo. Cada ramo então se divide novamente um pouco depois em alternativas adicionais, e assim por diante e sempre. Em cada ramificação, há probabilidades bem definidas para as alternativas. Não há interferência quântica entre elas.

Isto é bem ilustrado pelo que acontece na pista de corridas. Cada corrida envolve uma ramificação em dez alternativas para os diferentes vencedores, e para cada vencedor há uma ramificação adicional em dez alternativas para o vencedor da corrida seguinte.

Na pista, usualmente não existe uma grande dose de influência exercida pelo resultado de uma corrida sobre as probabilidades para a próxima, por exemplo, um jogador deprimido por ter perdido a corrida anterior. Todavia, na árvore ramificada das histórias alternativas do uni-

verso, o resultado numa ramificação pode afetar profundamente as probabilidades nas ramificações subseqüentes, e mesmo afetar a natureza das alternativas nestas ramificações. Por exemplo, a condensação de matéria necessária para formar o planeta Marte pode ter dependido de um acidente quântico ocorrido há bilhões de anos; decorre daí que, nas ramificações em que este planeta não aparece, as ramificações seguintes explicitamente relacionadas com os destinos alternativos de Marte não devem existir.

A estrutura semelhante a uma árvore das histórias alternativas do universo com granulação grosseira e com perda de coerência é diferente das árvores evolutivas como a das línguas humanas ou das espécies biológicas. No caso de árvores evolutivas, todos os ramos estão presentes no mesmo registro histórico. Por exemplo, as línguas românicas se originam todas de uma versão tardia do latim, mas elas não são alternativas. O francês, o espanhol, o português, o italiano, o catalão e outras línguas são faladas hoje, e mesmo as agora extintas línguas românicas, como por exemplo o dálmata, foram na verdade faladas um dia. Em contrapartida, os ramos da árvore das histórias alternativas que perdem a coerência são mutuamente exclusivos, e apenas um ramo é acessível ao observador. Mesmo os intérpretes do trabalho de Hugh Everett que falam de muitos mundos, igualmente reais, não pretendem ter observado mais do que um destes mundos que se ramificam.

GRANDE INÉRCIA E COMPORTAMENTO QUASE CLÁSSICO

A decoerência por si só (dando origem à ramificação de histórias em alternativas distintas com probabilidades bem definidas) não é a única propriedade importante do domínio quase clássico que inclui a experiência cotidiana. O domínio exibe também um comportamento predominantemente clássico, portanto “quase clássico”. Não são apenas as sucessivas posições do planeta Marte em uma seqüência de instantes de tempo bastante próximos um do outro que têm realmente probabilidades verdadeiras. Para estes instantes de tempo, estas posições são também altamente correlacionadas umas com as outras (probabilidades extremamente próximas de um), e elas correspondem, em excelente aproximação, a uma órbita clássica bem definida em torno do Sol. Esta órbita obedece às equações clássicas para o movimento de Newton no campo gravitacional do Sol e dos outros planetas, com pequenas correções devidas à teoria clássica relativística geral de Einstein, e a uma pequena força de atrito que surge das colisões com objetos mais leves como os fótons de fundo. Lembre que todos estes objetos são ignorados e portan-

to somados nas histórias com granulação grosseira que acompanham o movimento de Marte, e que esta é a razão pela qual as histórias com granulação grosseira perdem a coerência.

Como é possível que o planeta siga uma órbita clássica determinística quando está sendo continuamente atingido por golpes ao acaso dados pelos fótons que ele encontra? A resposta é que, quanto mais pesado for um objeto em órbita, menos ele exibirá um comportamento errático e mais pacificamente prosseguirá em sua órbita. É a massa M do planeta, sua inércia, que resiste aos golpes e permite que ele se comporte classicamente com uma ótima aproximação. Um átomo ou uma pequena molécula é muito leve para seguir uma órbita com qualquer grau de consistência na presença de todos os objetos do sistema solar contra os quais acabaria por colidir. Um grão de poeira grande é suficientemente pesado para seguir uma órbita razoavelmente bem, e uma pequena astronave o faz ainda melhor. Mas mesmo esta astronave é sacudida um pouco pelo vento solar composto pelos elétrons emitidos pelo Sol. As colisões da nave com estes elétrons seriam suficientes para perturbar certas experiências muito delicadas utilizadas para testar a gravitação einsteiniana; por esta razão, seria desejável que estas experiências utilizassem um radar instalado em Marte em vez de um numa sonda espacial.

Embora tivéssemos atribuído um comportamento quase clássico à ponderabilidade dos objetos, seria mais adequado atribuí-lo aos movimentos com inércia suficientemente grande. Um banho de hélio líquido muito frio pode ser grande e pesado, e não obstante, em razão de alguns de seus movimentos internos que possuem uma inércia pequena, exibir efeitos quânticos bizarros, como subir pelas paredes do recipiente aberto que o contém e transbordar.

FLUTUAÇÕES

Os físicos algumas vezes tentam fazer uma distinção entre as flutuações quântica e clássica, onde estas últimas poderiam ser, por exemplo, flutuações térmicas associadas com os movimentos das moléculas num gás aquecido. A granulação grosseira exigida para obter perda de coerência na mecânica quântica implica que muitas variáveis devem ser somadas, e estas variáveis podem facilmente incluir algumas daquelas que descrevem estes movimentos moleculares. Deste modo, flutuações térmicas clássicas tendem a se misturar com as flutuações quânticas. Um objeto pesado que segue uma órbita clássica razoavelmente bem está resistindo a ambos os tipos de flutuação ao mesmo tempo. Da mesma forma, um objeto mais leve pode ser significativamente afetado por ambas.

Movimentos erráticos provocados por colisões repetidas contra coisas minúsculas foram observados no começo do século XIX pelo botânico Robert Brown, e em sua homenagem o fenômeno é chamado de movimento browniano. O movimento browniano pode ser facilmente observado vertendo-se uma gota de tinta na água e observando-se as suas gotículas com um microscópio. Os movimentos bruscos das gotículas foram explicados quantitativamente por Einstein como provocados pelas flutuações nas colisões contra as moléculas de água, tornando assim pela primeira vez as moléculas efetivamente sujeitas à observação.

O GATO DE SCHRÖDINGER

No domínio quase clássico, os objetos obedecem aproximadamente às leis clássicas. Eles estão sujeitos a flutuações, mas estas são eventos individualizados superpostos a um padrão de comportamento razoavelmente clássico. Contudo, uma vez ocorrida na história de um objeto que de outro modo é clássico, a flutuação pode ser amplificada em níveis arbitrários. Um microscópio pode ampliar a imagem de uma partícula de tinta atingida por uma molécula e uma fotografia pode preservar a imagem ampliada indefinidamente.

Isto nos faz lembrar a famosa experiência hipotética com o gato de Schrödinger, na qual um evento quântico é amplificado para que se possa controlar se o gato é envenenado ou não. Uma amplificação deste tipo é perfeitamente possível, mesmo que não seja muito agradável. Um dispositivo pode ser instalado de maneira a fazer com que a vida ou a morte do gato dependa, por exemplo, da direção do movimento de um fragmento nuclear emitido num decaimento radiativo. Utilizando armas nucleares, hoje poderíamos fazer com que o destino de uma cidade fosse determinado da mesma maneira.

A discussão habitual sobre o gato de Schrödinger prossegue com a descrição de supostos fenômenos de interferência quântica entre cenários em que o gato está vivo e outros em que este está morto. Entretanto, o gato vivo tem uma interação considerável com o resto do mundo, por exemplo, por meio da respiração, e o gato, mesmo morto, interage em alguma medida com o ar. Não ajuda muito colocar o gato numa caixa porque esta interagirá com o mundo externo e também com o gato. Portanto, há muitas oportunidades de perda de coerência entre histórias com granulação grosseira nas quais o gato vive e histórias com granulação grosseira nas quais ele morre. Os cenários para o gato vivo e para o gato morto perdem a coerência; não há interferência entre eles.

Talvez seja o aspecto de interferência na história do gato que fez Stephen Hawking exclamar: “Quando ouço falar sobre o gato de Schrödinger, saco meu revólver.” De qualquer modo, ele está parodiando a observação (muitas vezes atribuída a um ou outro líder nazista, mas que na verdade aparece em uma antiga peça pró-nazista, *Schlageter*, de Hanns Johst): “Quando ouço a palavra cultura, solto a trava de segurança da minha Browning.”

Suponha que o evento quântico que determina o destino do gato já tenha ocorrido, mas que não sabemos o que aconteceu até abrir a caixa que contém o gato. Como os dois resultados perdem a coerência, esta situação não é diferente da situação clássica em que abrimos uma caixa dentro da qual o pobre animal, chegando de uma longa viagem de avião, pode estar vivo ou morto, com alguma probabilidade para cada resultado. Ainda assim, resmas e resmas de papel têm sido desperdiçadas com um suposto estado quântico fantástico do gato, morto e vivo ao mesmo tempo. Nenhum objeto quase clássico real pode exibir tal comportamento porque a interação com o resto do universo conduzirá à perda de coerência das alternativas.

GRANULAÇÃO GROSSEIRA ADICIONAL PARA A INÉRCIA E A QUASE CLASSICALIDADE

Um domínio quase clássico requer de modo natural histórias que tenham granulação grosseira suficiente para que possa perder a coerência com uma excelente aproximação; também requer que elas sejam ainda mais grosseiramente granuladas para que o que é acompanhado nestas histórias tenha inércia suficiente para resistir, em um grau considerável, às flutuações inevitavelmente associadas com o que é somado. Restam então pequenos desvios contínuos do comportamento clássico e ocasionalmente alguns grandes.

A razão pela qual uma granulação grosseira adicional é exigida quando se trata de uma inércia grande é que porções apreciáveis de matéria podem então ser acompanhadas, e estas porções podem ter grandes massas. Se algumas partículas elementares estáveis, ou quase estáveis, com massas consideráveis fossem disponíveis, elas seriam uma fonte diferente de inércia grande. Tais partículas não têm sido encontradas na nossa experiência, embora possam existir e, se fosse assim, poderiam ter desempenhado um papel importante nos momentos iniciais da expansão do universo.

MEDIÇÕES E SITUAÇÕES EM QUE PODEM SER FEITAS

Um evento quântico pode tornar-se completamente correlacionado com alguma coisa no domínio quase clássico. Isto é o que acontece na parte sensória da história do gato, onde tal evento se torna correlacionado com o destino do animal. Um exemplo mais simples e menos fantasioso seria o de um núcleo radiativo que se encontra alojado como impureza em cristal de mica e que decai, digamos, em apenas dois fragmentos eletricamente carregados que se movem em direções opostas. A direção de movimento de um fragmento é completamente indeterminada até que o decaimento aconteça, mas depois ela se correlaciona perfeitamente com o rastro deixado na mica. Histórias quase clássicas, que efetuam a soma de coisas como a radiação branda emitida quando o rastro foi formado, fazem com que as diferentes direções, cada uma definindo um rastro de largura pequena, percam a coerência. Para temperaturas ordinárias, rastros duram dezenas de milhares de anos ou até mais, e é claro que a simples persistência destes rastros é um exemplo (embora trivial) de uma história clássica. O decaimento radiativo entrou em contato com o domínio quase clássico.

A acumulação em minerais de rastros deixados pelos produtos espontâneos da fissão nuclear é utilizada algumas vezes para datar estes minerais; o método é conhecido como datação por meio de rastros produzidos por fissão, e pode ser aplicado a rochas de até centenas de milhares de anos. Suponha que um físico engajado em uma pesquisa deste tipo observe um rastro particular. Enquanto realiza seu trabalho de datação, ele ou ela pode também afirmar que realizou uma medição da direção de decaimento do núcleo radiativo. Contudo, o rastro estivera ali desde sua formação; ele não passa a existir a partir do momento em que o físico o observa, como algumas descrições toscas da mecânica quântica poderiam sugerir. Uma situação passível de medição existira desde o momento em que o núcleo decaiu e o rastro se formou; isto é, quando foi estabelecida uma correlação forte com o domínio quase clássico. A medição real poderia ter sido efetuada por uma barata ou qualquer outro sistema adaptativo complexo. Ela consiste em “notar” que uma alternativa particular foi escolhida a partir de um conjunto de alternativas que perderam a coerência e que têm várias probabilidades. Exatamente a mesma coisa acontece no hipódromo quando se “observa” um determinado cavalo vencer uma das corridas. Um registro da vitória, já presente em algum lugar no domínio quase clássico, é reproduzido na memória do observador, seja este observador altamente inteligente ou não. Entretanto, muitos comentaristas sensatos e mesmo brilhantes têm escrito sobre a suposta importância da consciência humana no processo de

medição. Será ela realmente tão importante? O que o ato de perceber e observar realmente significa?

UM SCUI — UM SISTEMA ADAPTATIVO COMPLEXO COMO OBSERVADOR

Neste contexto, uma observação significa uma espécie de podagem da árvore das histórias ramificadas. Numa ramificação particular, apenas um dos ramos é preservado (ou, mais precisamente, em cada ramo apenas este ramo é preservado!). Os ramos podados são jogados fora junto com todas as partes da árvore que crescem a partir destes.

Em certo sentido, a mica com os seus rastros produzidos pela fissão já realizou a operação de podagem por meio do registro da direção real do movimento do fragmento produzido pela fissão, tendo assim descartado todas as outras direções. Mas um sistema adaptativo complexo que observa os rastros faz a podagem de um modo mais explícito, ao incluir a observação no fluxo de informações que dá origem à evolução de seus esquemas. O comportamento subsequente do sistema pode refletir então sua observação da direção particular do rastro.

Um sistema adaptativo complexo que atua como observador provavelmente merece um nome especial. Jim Hartle e eu o chamamos um SCUI, sistema de coleta e utilização de informações. Se o SCUI possui consciência ou autopercepção em um grau significativo, de modo que possa se dar conta de que está percebendo a direção do rastro provocado pela fissão, tanto melhor. Mas por que isto é necessário? Uma medição feita por um ser humano qualquer, mesmo um com inteligência muito baixa, terá realmente significado maior do que uma feita por um gorila ou um chimpanzé? E, se não é o caso, por que não substituir um macaco por uma chinchila ou uma barata?

Quando se dá a poda da árvore ramificada das histórias, talvez uma distinção deva ser feita entre um observador humano, que sabe alguma coisa sobre a mecânica quântica (e portanto está a par das origens da árvore), e um que a desconhece. Em certo sentido, a diferença entre eles é maior do que aquela entre um ser humano que ignora a mecânica quântica e uma chinchila.

Um SCUI pode fazer algo mais além de eliminar os ramos alternativos quando um resultado particular é conhecido: ele pode apostar neste resultado de antemão, utilizando alguma versão aproximada das probabilidades fornecidas pela mecânica quântica. Apenas um sistema adaptativo complexo pode fazer isto. Ao contrário de um pedaço de mica, um SCUI pode incorporar suas probabilidades estimativas de even-

tos futuros em um esquema e nele basear seu comportamento futuro. Por exemplo, um mamífero que habita o deserto pode caminhar um longo trecho em direção a uma cacimba profunda alguns dias depois da última chuva, mas não em direção a uma rasa, já que a probabilidade de que ainda reste água na cacimba profunda é maior.

A podagem dos ramos substitui o que na interpretação tradicional da mecânica quântica é usualmente chamado de “colapso da função de onda”. As duas descrições são relacionadas matematicamente, mas o colapso é muitas vezes apresentado como um fenômeno misterioso peculiar à mecânica quântica. Entretanto, como a podagem é apenas o reconhecimento de que uma ou outra de um conjunto de alternativas que perdem a coerência ocorreu, ela é bastante familiar. Isto é mostrado observando-se, por exemplo, que eu apesar de tudo não fui para Paris, mas fiquei em casa. Todos os ramos da história que dependiam da minha ida para Paris foram descartados; suas probabilidades são agora nulas, não importando que valor tiveram antes.

O ponto que muitas vezes fica obscuro nas discussões sobre o assim chamado colapso é que, mesmo que a podagem envolva a medição de um evento quântico, ela é ainda uma discriminação comum entre alternativas que perdem a coerência. Os eventos quânticos podem ser detectados apenas no nível do domínio quase clássico. Lá a situação é apenas a que envolve probabilidades clássicas, como no jogo de dados ou arremessos de uma moeda, com as probabilidades passando para um e zero quando o resultado é conhecido. O domínio quase clássico admite a possibilidade de registros razoavelmente persistentes dos resultados, que podem ser amplificados ou copiados e recopiados em uma cadeia quase clássica de concordâncias quase certas de cada registro com o anterior. Uma vez que um evento quântico é correlacionado com o domínio quase clássico, criando uma situação passível de medição, o resultado particular em determinado ramo de história se torna um fato.

AUTOPERCEPÇÃO E LIVRE-ARBÍTRIO

Como a questão da consciência foi levantada, façamos uma breve digressão e a exploremos um pouco mais. O cérebro humano tem os lóbulos frontais bastante grandes quando os comparamos com os de nossos parentes próximos, os grandes macacos. Os neurobiólogos identificaram áreas nos lóbulos frontais que parecem estar associadas com a autopercepção e a intenção, as quais se pensa serem especialmente bem desenvolvidas nos seres humanos.

Em conjunto com muitos elementos paralelos de processamento no

pensamento humano, a consciência ou atenção parece referir-se a um processo seqüencial, uma espécie de holofote que pode ser dirigido de uma idéia ou estímulo sensorial para outro em sucessão rápida. Quando acreditamos estar prestando atenção a muitas coisas diferentes ao mesmo tempo, podemos estar na verdade utilizando o holofote no modo *time-sharing*, movendo-o ao redor entre os vários objetos que despertam nossa atenção. Os elementos paralelos de processamento diferem entre si em sua acessibilidade à consciência, e algumas fontes do comportamento humano estão enterradas sob camadas de pensamento difíceis de trazer à percepção consciente.

Não obstante, dizemos que a elocução e outras ações estão, em um grau considerável, submetidas a um controle consciente, e esta afirmação reflete não apenas o reconhecimento do holofote da percepção mas também a forte crença de que temos um grau de livre-arbítrio, que podemos escolher entre alternativas. A possibilidade de escolha é uma característica importante, por exemplo, de "The road not taken".

Quais os fenômenos objetivos que dão origem à impressão subjetiva do livre-arbítrio? Dizer que uma decisão é tomada livremente significa que ela não é estritamente determinada pelo que aconteceu antes. Qual é a fonte desta indeterminação aparente?

Uma explicação tentadora é aquela relacionada com as indeterminações fundamentais, presumivelmente as da mecânica quântica reforçadas por fenômenos clássicos como o caos. Uma decisão humana deveria ter então características imprevisíveis, as quais retrospectivamente seriam rotuladas como de livre escolha. Entretanto, poderíamos nos perguntar que característica do córtex cerebral humano torna as contribuições das flutuações quânticas e do caos particularmente proeminentes aqui.

Em vez de invocar apenas estes efeitos físicos diretos, poderíamos também considerar processos associados com o cérebro e a mente de forma mais direta. Lembre que, para uma determinada granulação grosseira, *todos* os fenômenos que são somados (e não acompanhados) podem contribuir com indeterminações aparentes (por exemplo, flutuações térmicas) que se acumulam com as flutuações quânticas. Como há sempre muitos elementos do pensamento que não são iluminados pelo farol da consciência, estes elementos são somados nas histórias com granulação extremamente grosseira que são conscientemente lembradas. Pareceria que as indeterminações resultantes provavelmente contribuem mais para a impressão subjetiva de livre-arbítrio do que as indeterminações estreitamente associadas à física. Em outras palavras, os seres humanos provavelmente agem por motivos ocultos com mais frequência do que utilizam os resultados do gerador de números randômicos ou

pseudo-randômicos interno. Mas o assunto todo é ainda pouco compreendido, e no momento podemos apenas especular. Especulações sobre estas questões estão longe de ser novidade e são, em geral, bastante vagas. Contudo, não vejo razão por que o tema não deva ser estudado em termos de uma investigação científica no que diz respeito ao possível papel das várias indeterminações no funcionamento do córtex cerebral humano e os processos mentais correspondentes.

O QUE CARACTERIZA O DOMÍNIO QUASE CLÁSSICO FAMILIAR?

Nas histórias com granulação grosseira do domínio quase clássico que incorporam a experiência familiar, certos tipos de variáveis são acompanhadas enquanto as restantes são somadas, o que significa que elas são ignoradas. Quais os tipos que são acompanhadas? Grosseiramente falando, o domínio quase clássico usual acompanha os campos gravitacional e eletromagnético e as quantidades exatamente conservadas como a energia, o momento e a carga elétrica, assim como as quantidades que são aproximadamente conservadas, como o número de deslocamentos em um cristal produzidos pela passagem de uma partícula carregada. Uma quantidade é dita conservada quando seu montante total existente em um sistema fechado permanece invariável com o tempo; é aproximadamente conservada quando o montante total em um sistema fechado varia apenas um pouco à medida que o tempo passa. Uma quantidade conservada como a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada. Os deslocamentos em um cristal, contudo, obviamente podem ser criados, por exemplo, pela passagem de uma partícula carregada; ainda assim, eles podem durar dezenas ou centenas de milhares de anos, e neste sentido eles são aproximadamente conservados.

O domínio quase clássico familiar envolve a soma de tudo, exceto os possíveis valores destes campos e das quantidades conservadas e aproximadamente conservadas em pequenos volumes do espaço, mas volumes suficientemente grandes para que tenham a inércia necessária para resistir às flutuações associadas com os efeitos de todas as variáveis que são somadas. Isto quer dizer que as flutuações são suficientemente rechaçadas para que as quantidades acompanhadas exibam um comportamento quase clássico.

Estas quantidades devem ser acompanhadas em intervalos de tempo, não muito próximos um do outro, assim as histórias com granulação grosseira podem perder a coerência. Em geral, se a granulação se tornar muito fina (porque os intervalos de tempo são muito curtos, os volumes

muito pequenos, ou o intervalo dos valores das quantidades acompanhadas muito estreito), o perigo de interferência entre histórias aparece.

Consideremos um conjunto de histórias com granulação grosseira alternativas que são refinadas ao máximo, de modo que qualquer granulação fina adicional arruinaria ou a perda de coerência ou o caráter aproximadamente clássico das histórias ou ambos. Os pequenos volumes nos quais as quantidades conservadas ou aproximadamente conservadas são acompanhadas em intervalos de tempo convenientes podem então cobrir todo o universo, somente com uma granulação grosseira no espaço e no tempo (e nos intervalos dos valores das quantidades) que é precisamente suficiente para conduzir à perda de coerência e a histórias alternativas aproximadamente clássicas.

A experiência dos seres humanos e dos sistemas com os quais estamos em contato é com um domínio que tem muito mais granulação grosseira do que tal domínio quase clássico máximo. Uma vasta quantidade de granulação grosseira adicional é necessária para passar daquele domínio quase clássico máximo para o domínio acessível à observação efetiva. O domínio acessível acompanha apenas regiões muito limitadas do espaço-tempo, e a cobertura das variáveis nestas regiões é muito irregular. Por exemplo, os interiores das estrelas e de outros planetas são quase inteiramente inacessíveis e o que acontece nas suas superfícies pode ser detectado apenas de uma maneira com muita granulação grosseira.

Em contraste, as histórias com granulação grosseira do domínio quase clássico máximo não precisam ser somados sobre todas as variáveis inacessíveis à observação humana. Em vez disso, estas histórias podem incluir descrições de resultados alternativos de processos arbitrariamente remotos no espaço e no tempo. Elas podem cobrir mesmo eventos próximos ao início da expansão do universo, quando presumivelmente não havia sistemas adaptativos complexos em nenhum lugar para atuar como observadores.

Em resumo, um domínio quase clássico máximo é um conjunto exaustivo de histórias com granulação grosseira mutuamente exclusivas do universo que cobrem todo o espaço-tempo, que são decoerentes uma em relação à outra e aproximadamente clássicas na maior parte do tempo, e que são refinadas ao máximo em harmonia com outras condições. Neste tipo particular de domínio quase clássico máximo que estamos discutindo, as quantidades acompanhadas são os intervalos de valores das quantidades conservadas e aproximadamente conservadas em pequenos volumes. O domínio da experiência humana familiar é obtido deste domínio máximo pela utilização de uma quantidade extrema de granulação grosseira adicional que corresponde às capacidades de nossos sentidos e instrumentos.

A DEPENDÊNCIA NO RAMO DAS QUANTIDADES ACOMPANHADAS

É importante enfatizar de novo que as quantidades específicas acompanhadas em um determinado instante de tempo podem depender do resultado de uma ramificação prévia das histórias. Por exemplo, a distribuição de massa na Terra, representada pela quantidade de energia contida em cada um do vasto número de pequenos volumes dentro do planeta, será presumivelmente acompanhada por histórias com granulação grosseira enquanto a Terra existir. Mas o que acontecerá se a Terra um dia explodir em minúsculos pedaços em razão de alguma catástrofe que no momento não podemos prever? O que acontecerá se esta catástrofe vaporizar o planeta como em um filme classe B? Presumivelmente, nas histórias em que isto acontece, as quantidades que são subsequente-mente acompanhadas por histórias com granulação grosseira serão diferentes das que existiam antes da catástrofe. Em outras palavras, no caso de uma determinada granulação grosseira de histórias, o que é acompanhado pode ser dependente do ramo.

OBJETOS INDIVIDUAIS

Discutimos o domínio quase clássico que inclui a experiência familiar em termos de intervalos de valores dos campos e de quantidades exata ou aproximadamente conservadas em pequenos volumes do espaço. Mas como objetos individuais, como um planeta, entram na história?

Cedo na história do universo, massas materiais começaram a condensar sob a influência da atração gravitacional. As narrativas das várias histórias com granulação grosseira alternativas depois daquele tempo são muito mais concisas quando descritas em termos dos objetos assim formados. É muito mais simples registrar o movimento de uma galáxia do que listar separadamente todas as mudanças de coordenadas nas densidades de matéria em trilhões e trilhões de pequenos volumes do espaço à medida que a galáxia se move.

À medida que as galáxias dão origem a estrelas, planetas, rochas e em alguns lugares a sistemas adaptativos complexos como os seres vivos da Terra, a existência de objetos individuais tornou-se cada vez mais o aspecto marcante do domínio quase clássico. Muitas das regularidades do universo são mais concisamente descritas em termos de tais objetos; assim as propriedades das coisas individuais representam uma grande parcela da complexidade efetiva do universo.

Na maioria dos casos a descrição dos objetos individuais é mais

simples quando a definição permite a adição ou a perda de quantidades comparativamente pequenas de matéria. Quando um planeta absorve um meteorito ou um gato respira, a identidade do planeta ou do gato não é alterada.

Mas como a individualidade deve ser medida? Uma maneira é olhar para um conjunto de objetos comparáveis e, para uma determinada granulação grosseira, descrever o mais brevemente possível as propriedades que os distinguem (como as penas perdidas dos onze condores da Califórnia que vi se banquetando sobre um bezerro). O número de bits na descrição de um indivíduo típico pode então ser comparado com o número de bits necessários para contar os indivíduos no conjunto. Se, para a granulação grosseira particular envolvida, a descrição contém muito mais bits do que a enumeração, os objetos no conjunto estão mostrando individualidade.

Considere o conjunto de todos os seres humanos, perfazendo agora cerca de 5,5 bilhões. Atribuir um número diferente para cada pessoa exige cerca de 32 bits, porque 2 multiplicado por si mesmo 32 vezes é 4.294.967.296. Mas mesmo uma olhada casual em cada pessoa próxima, acompanhada de uma breve entrevista, pode facilmente revelar muito mais que 32 bits de informação. Quando estudadas mais de perto, elas mostrarão bem mais individualidade. Imagine agora quanta informação adicional será disponível quando seus genomas individuais puderem ser lidos.

As estrelas na nossa galáxia, não contando as possíveis estrelas do tipo escuro que os astrônomos podem um dia descobrir, perfazem uns 100 bilhões. Atribuir a cada estrela um número de série exigiria cerca de 37 bits. Sobre o Sol, que está perto, muito mais informação do que esta é disponível para os astrônomos, mas a granulação para outras estrelas é muito mais grosseira. A posição no céu, o brilho, o espectro de luz emitido e o movimento podem todos ser medidos em algum grau, mais ou menos precisamente dependendo da distância. O número total de bits de informação tipicamente não é muito maior do que 37, e em alguns casos pode ser menos. Como são vistas hoje pelos astrônomos, outras estrelas além do Sol realmente exibem alguma individualidade, mas não muita.

A granulação grosseira particular característica das observações de hoje pode ser evitada mudando-se para um domínio quase clássico máximo, que consiste em histórias alternativas, cobrindo o espaço-tempo todo, e que não são apenas decoerentes e aproximadamente clássicas, mas também em algum sentido máxima e finamente granuladas dada a sua decoerência e quase classicalidade. Quando é conveniente, estas histórias podem ser expressas em termos de objetos individuais, que são acompanhados com detalhes extraordinários e exibem correspondentemente um alto grau de individualidade.

No domínio quase clássico máximo usual, a informação sobre qualquer estrela é enormemente maior do que sabemos sobre o Sol. Da mesma forma, a informação sobre qualquer ser humano é muito mais rica do que a que nos é disponível hoje. De fato, nenhum sistema adaptativo complexo que observe uma estrela ou um ser humano poderia possivelmente utilizar tal quantidade gigantesca de informação. Além disso, muito da informação se referiria a flutuações randômicas ou pseudo-randômicas de densidades de matéria em um interior estelar ou no de um osso ou de um músculo. É difícil imaginar que uso um sistema adaptativo complexo poderia fazer do grosso de tal informação. Ainda assim, as regularidades nas informações poderiam ser muito úteis; de fato, os médicos utilizam apenas tais regularidades quando empregam o método de formação de imagens por ressonância magnética (MRI) ou a tomografia de raios X computadorizada (varreduras CAT) para diagnosticar doenças. Como sempre, um esquema descritivo formulado por um sistema adaptativo complexo que observa é uma listagem concisa de regularidades, e o tamanho de tal listagem é uma medida da complexidade efetiva da coisa observada.

O CARÁTER PROTÉICO DA MECÂNICA QUÂNTICA

Como as situações probabilísticas clássicas, como uma série de corridas de cavalo, as histórias com granulação grosseira alternativas do universo que constituem o domínio quase clássico máximo formam uma estrutura semelhante a uma árvore ramificada, com probabilidades bem definidas para as diferentes possibilidades em cada ramificação. Como então a mecânica quântica difere da mecânica clássica? Uma diferença óbvia é que na mecânica quântica a granulação grosseira é necessária para que a teoria forneça qualquer coisa útil, enquanto a granulação grosseira é introduzida na mecânica clássica apenas em razão da imprecisão das medidas ou alguma outra limitação prática. Mas uma outra diferença pode explicar, mais do que qualquer outra coisa, a natureza não-intuitiva da mecânica quântica — ela é protéica. Lembre que Proteu, na mitologia clássica, era um profeta relutante que podia se transformar em qualquer tipo de criatura uma após a outra. Para levá-lo a fazer predições, era necessário segurá-lo firmemente à medida que passava por muitas mudanças de forma.

Suponhamos que retornamos às nossas histórias finamente granuladas do universo, as quais especificam a posição de cada partícula no universo em cada instante de tempo. Na mecânica quântica a posição é uma escolha arbitrária. Embora o princípio de incerteza de Heisenberg

torne impossível especificar a posição e o momento de uma determinada partícula ao mesmo tempo com precisão arbitrária, ele não impede que o momento, em vez da posição, seja especificado em alguns destes instantes. Conseqüentemente, histórias finamente granuladas podem ser escolhidas de muitas maneiras diferentes, com cada partícula sendo caracterizada em certos instantes de tempo pelo seu momento e nos restantes por sua posição. Além do mais, há uma variedade infinita de outros modos mais sutis de construir histórias finamente granuladas do universo.

EXISTIRÃO MUITOS DOMÍNIOS QUASE CLÁSSICOS EQUIVALENTES?

Para cada um daqueles conjuntos de histórias finamente granuladas é possível considerar muitas granulações grosseiras e perguntar quais — se há alguma — conduzem a um domínio quase clássico máximo caracterizado por histórias grosseiramente granuladas decoerentes que exibam comportamento aproximadamente clássico, com pequenos desvios contínuos e ocasionalmente alguns grandes. Além disso, podemos perguntar se há realmente distinções significativas entre os domínios ou se eles são mais ou menos os mesmos.

Jim Hartle e eu, entre outros, estamos tentando responder esta questão. A menos que o contrário seja demonstrado, permanecerá concebível que há um grande conjunto de domínios quase clássicos máximos inequivalentes, dos quais o familiar é apenas um único exemplo. Se isto é verdade, o que diferencia o domínio quase clássico familiar de todos os outros?

Aqueles que adotam a visão inicial da mecânica quântica podem dizer que os seres humanos escolheram medir certas quantidades e que nossa escolha ajuda a determinar o domínio quase clássico com que tratamos. Ou, de uma maneira um pouco mais geral, eles podem dizer que os seres humanos são capazes de medir apenas certos tipos de quantidades e que o domínio quase clássico deve se basear, pelo menos em parte, em tais quantidades.

UM LAR PARA OS SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS

É verdade que a quase classicalidade garante a todos os seres humanos e a todos os sistemas em contato conosco a possibilidade de comparar registros, assim estamos todos tratando com o mesmo domínio. Mas somos nós que *selecionamos* este domínio? Tal ponto de vista pode ser

desnecessariamente antropocêntrico, como outros aspectos da interpretação ultrapassada da mecânica quântica.

Outra abordagem, menos subjetiva, é começar com um domínio quase clássico máximo e observar que ao longo de certos ramos, durante certos períodos de tempo, e em certas regiões do espaço, ele pode exibir justamente o tipo de mistura de regularidade e randomicidade que favorece a evolução destes temas adaptativos complexos. O comportamento aproximadamente clássico provê a regularidade, enquanto os desvios do determinismo — flutuações — fornecem o elemento de acaso. Mecanismos de amplificação, incluindo aqueles que envolvem o caos, permitem que algumas destas flutuações ao acaso entrem em correlação com o domínio quase clássico e dêem origem a ramificações. Portanto, quando sistemas adaptativos complexos evoluem, eles o fazem em relação a um domínio quase clássico máximo particular, que não precisa ser considerado como escolhido de alguma forma por estes sistemas de acordo com suas capacidades. Ao contrário, a locação e as capacidades dos sistemas determinam o grau de granulação grosseira adicional, no nosso caso, deveras grosseira, que é aplicada a um domínio quase clássico máximo particular para chegar ao domínio percebido pelos sistemas.

Suponha que a mecânica quântica do universo permita matematicamente vários domínios quase clássicos máximos que são genuinamente inequivalentes. Suponha também que os sistemas adaptativos complexos evoluíram para explorar alguma granulação grosseira de cada um destes domínios quase clássicos máximos. Cada domínio provê então um conjunto de histórias com granulação grosseira alternativas do universo, e sistemas de coleta e utilização de informação (SCUI) registram em cada caso o resultado das várias ramificações probabilísticas na árvore das histórias possíveis, uma árvore que seria bem diferente nos dois casos!

Se há algum grau de concordância nos fenômenos acompanhados pelos dois domínios quase clássicos que de outra forma são distintos, os dois SCUI podem se tornar conscientes um do outro e mesmo comunicar-se em alguma medida. Mas uma grande parte do que é acompanhado por um SCUI poderia não ser apreendida diretamente pelo outro. Apenas por meio de um cálculo quântico ou medição poderia um SCUI obter qualquer apreciação da extensão completa dos fenômenos percebidos pelo outro (isto pode lembrar a algumas pessoas as relações entre homens e mulheres).

Poderia um observador utilizando um domínio se tornar realmente consciente de que outros domínios, com seus próprios conjuntos de histórias ramificadas e seus próprios observadores, eram disponíveis como

descrições alternativas das possíveis histórias do universo? Esta fascinante questão foi levantada pelos escritores de ficção científica (que algumas vezes, de acordo com o teórico russo Starobinsky, usam a expressão “mundos duendes”) mas apenas agora está recebendo atenção suficiente dos teóricos da mecânica quântica para ser apropriadamente estudada.

Aqueles de nós que trabalham para construir a interpretação moderna da mecânica quântica têm como objetivo dar um fim à era para a qual a observação de Niels Bohr é válida: “Se alguém diz que pode pensar sobre a física quântica sem ficar atordoado, isto mostra apenas que ele não entendeu qualquer coisa que seja sobre ela.”

CAPÍTULO 12

MECÂNICA QUÂNTICA E TOLICES

Embora muitas questões sobre a mecânica quântica não estejam ainda completamente resolvidas, não faz sentido introduzir mistificações desnecessárias onde de fato não existe qualquer problema. Ainda assim, uma grande parcela dos escritos recentes sobre a mecânica quântica faz justamente isto.

Em razão do fato de a mecânica quântica predizer apenas probabilidades, ela ganhou em alguns círculos uma reputação de permitir quase qualquer coisa. Será verdade que na mecânica quântica vale tudo? Isto depende de eventos com probabilidades baixíssimas serem incluídos ou não. Como estudante de graduação, lembro-me de ter recebido como tarefa o problema de calcular a probabilidade de que um objeto macroscópico pesado saltasse, num certo intervalo de tempo, 30 centímetros no ar em consequência de uma flutuação quântica. A resposta era em torno de um dividido pelo número um seguido de 62 zeros. O objetivo do problema era nos ensinar que não há diferença na prática entre este tipo de probabilidade e zero. Qualquer coisa tão improvável é efetivamente impossível.

Quando olhamos para o que realmente pode acontecer com probabilidade significativa, descobrimos que muitos fenômenos que eram impossíveis na física clássica são ainda efetivamente impossíveis na mecânica quântica. Entretanto, a compreensão disto por parte do público tem sido prejudicada nos últimos anos por um surto de referências enganosas em livros e artigos a um certo trabalho teórico excelente realizado pelo falecido John Bell e aos resultados de uma experiência relacionada. Alguns relatos da experiência, que envolve dois fótons que se movem em sentidos opostos, têm dado aos leitores a falsa impressão de que, ao se medir as propriedades de um fóton, instantaneamente o outro é afetado. Conclui-se daí que a mecânica quântica permite comunica-

ções mais rápidas do que a velocidade da luz, e mesmo que supostos fenômenos “paranormais” como a premonição são deste modo respeitáveis! Como isto pode ter acontecido?

AS OBJEÇÕES DE EINSTEIN À MECÂNICA QUÂNTICA

A história começa, de certo modo, com a atitude de Albert Einstein em relação à mecânica quântica. Embora tivesse ajudado a preparar o caminho para ela no começo do século XX com seu brilhante trabalho sobre os fótons, em que considerou seriamente a hipótese quântica original de Max Planck, Einstein nunca gostou da mecânica quântica em si. Na Conferência Solvay* realizada em Bruxelas em 1930, Einstein apresentou o que pretendia ser uma demonstração de que a mecânica quântica era inconsistente. Niels Bohr e seus aliados trabalharam freneticamente nos dias seguintes para descobrir uma falha no argumento do grande homem. Efetivamente, antes que a conferência acabasse, eles foram capazes de mostrar que Einstein tinha esquecido algo; curiosamente, era o efeito da relatividade geral que ele tinha esquecido. Uma vez incluído este efeito, a suposta inconsistência desapareceu.

Depois disso, Einstein desistiu de tentar mostrar que a mecânica quântica era inconsistente. Em vez disso, concentrou-se em identificar o princípio que ela violava e que ele acreditava ser obedecido por uma estrutura teórica correta. Em 1935, junto com dois jovens colegas, Podolsky e Rosen, ele publicou um trabalho descrevendo este princípio e uma situação experimental hipotética em que a mecânica quântica não se enquadraria. O princípio, ao qual ele denominou “princípio de completicidade”, desafiava a natureza essencial da mecânica quântica.

O que Einstein exigia era, grosso modo, o seguinte: se, por meio de certa medição, o valor de uma quantidade particular Q pudesse ser previsto com certeza, e se, por meio de uma medição alternativa bastante diferente, o valor de uma outra quantidade R também pudesse ser previsto com certeza, então, de acordo com a noção de completicidade, deveríamos ser capazes de atribuir valores exatos simultaneamente a ambas as quantidades, Q e R . A seguir, Einstein e seus colegas escolheram estas quantidades entre aquelas a que a mecânica quântica não pode atribuir simultaneamente valores exatos, isto é, a posição e o momento de um objeto. Deste modo, uma contradição direta entre a mecânica quântica e a completicidade ficou estabelecida.

* Assim denominada em homenagem a Ernest Solvay (1838-1922), químico, industrial e filantropo belga. (N. do T.)

Qual é na mecânica quântica a relação real entre uma medida que permite a atribuição de um valor exato para a posição de uma partícula em um determinado instante e uma outra que permite que seu momento seja ao mesmo tempo exatamente especificado? Estas medidas acontecem em dois ramos diferentes, perdem a coerência entre si (como o ramo de história no qual um cavalo vence uma determinada corrida e um outro no qual um cavalo diferente é o vencedor). A exigência de Einstein é equivalente a dizer que os resultados de dois ramos alternativos devem ser aceitos *juntos*. Isto claramente exige o abandono da mecânica quântica.

VARIÁVEIS ESCONDIDAS

Na verdade, Einstein queria substituir a mecânica quântica por um tipo diferente de estrutura teórica. Em comentários feitos em outros lugares, ele deixou transparecer sua crença de que o sucesso da mecânica quântica se originava de resultados teóricos que eram apenas aproximadamente corretos e que representavam uma espécie de média estatística de previsões de outro tipo de teoria.

A idéia de Einstein assumiu uma forma mais definida quando vários teóricos, em momentos diferentes, sugeriram que a mecânica quântica poderia ser substituída por uma estrutura determinística, clássica — mas uma na qual haja um número muito grande de “variáveis escondidas”. Estas variáveis podem ser concebidas como descrevendo moscas invisíveis zumbindo por todos os lugares no universo, mais ou menos ao acaso, interagindo com as partículas elementares e afetando seu comportamento. Enquanto as moscas forem indetectáveis, o melhor que o teórico pode fazer no que diz respeito a previsões é realizar médias estatísticas de seus movimentos. Mas estas moscas invisíveis causarão flutuações imprevisíveis, criando indeterminações. A esperança era que estas indeterminações de alguma forma se enquadrassem com as da mecânica quântica, de modo que as previsões do esquema concordassem com as previsões quânticas nos muitos casos em que as observações confirmam esta última.

BOHM E EINSTEIN

Conheci um teórico que vacilou, pelo menos uma vez, entre acreditar na mecânica quântica e a idéia de que ela poderia ser substituída por algo

semelhante a uma abordagem do tipo das “variáveis escondidas”. Este teórico era David Bohm, que se preocupou durante toda a sua carreira com a compreensão do significado da mecânica quântica.

Em 1951, quando eu era um recém-doutor, e fazia pós-doutoramento no Instituto de Estudos Avançados em Princeton, David era professor assistente na Universidade de Princeton. Éramos ambos solteiros e algumas vezes passávamos a noite caminhando em torno de Princeton discutindo física. David contou-me que como marxista tinha tido dificuldades em acreditar na mecânica quântica. Marxistas tendem a preferir que suas teorias sejam completamente determinísticas. Como a mecânica quântica era imensamente bem-sucedida e não era contrariada por qualquer observação, ele tentara se convencer de que ela era, apesar de tudo, filosoficamente aceitável. Ao tentar reconciliar suas convicções marxistas com a mecânica quântica, ele havia escrito um livro-texto elementar sobre a teoria quântica, enfatizando o problema da interpretação. Este livro estava quase sendo lançado, e David ansiava por mostrar a Einstein os capítulos relevantes e verificar se poderia suplantar as objeções do grande homem. David pediu-me para arranjar um encontro. Respondi que eu não era a pessoa indicada para fazê-lo, já que eu mal conhecia Einstein, mas que falaria com a Sra. Dukas, a formidável secretária de Einstein, e veria o que poderia ser feito.

Quando encontrei David um ou dois dias mais tarde e comecei a lhe contar que estava trabalhando para obter o encontro, ele me interrompeu excitadamente para dizer que isto era desnecessário. Seu livro tinha aparecido e Einstein já o lera e lhe telefonara para dizer que o livro de David era a melhor apresentação de um argumento que lhe era contrário e que eles deveriam se encontrar para discuti-lo. Naturalmente, na vez seguinte em que vi David eu estava morrendo de curiosidade para saber como a conversação entre eles tinha ido, e lhe perguntei sobre ela. Ele me olhou bastante envergonhado e disse: “Ele me convenceu de que eu estava errado. Estou de volta ao ponto que estava antes de escrever o livro.” Daí em diante, por mais de quarenta anos, David tentou reformular e reinterpretar a mecânica quântica para superar suas dúvidas. Recentemente, soube com grande tristeza que ele tinha morrido.

A EXPERIÊNCIA EPBR

Há muitos anos David Bohm propôs a substituição da experiência hipotética para testar a “completicidade” de Einstein, Podolsky e Rosen (que

não é necessário descrever aqui) por uma versão modificada e mais prática. A experiência de Bohm (chamada EPBR em homenagem aos quatro físicos) envolve o decaimento de uma partícula em dois fótons. Se a partícula está em repouso e não tem momento angular intrínseco (spin), então os fótons viajam em direções opostas, têm a mesma energia e polarizações idênticas. Se um dos fótons é circularmente polarizado para a esquerda (girando para a esquerda), o outro também o será; da mesma forma, se um dos fótons é circularmente polarizado para a direita (girando para a direita), o outro também será polarizado para a direita. Mais ainda, se um dos fótons é plano-polarizado (linearmente polarizado) ao longo de um eixo particular, isto é, o seu campo elétrico vibra ao longo deste eixo, o outro será plano-polarizado ao longo de uma direção definida. Há dois casos que dependem da natureza da partícula sem spin. Em um dos casos os eixos do plano de polarização dos dois prótons são os mesmos. No outro, eles são perpendiculares. Por simplicidade vamos considerar o primeiro caso, embora em uma situação prática (onde a partícula que decai é um méson pi neutro) o segundo caso se aplique.

Presume-se que o arranjo experimental é tal que nada perturba nenhum dos fótons até que interajam com um detector. Se a polarização circular de um dos fótons for medida pelo detector, a polarização circular do outro fóton é com certeza a mesma. Da mesma forma, se a polarização linear de um dos fótons for medida, a polarização linear do outro, novamente, é com certeza a mesma do primeiro fóton. A completicidade de Einstein implicaria que a polarização circular e a polarização linear do segundo fóton poderiam ter então valores definidos. Mas os valores da polarização circular e o da polarização linear de um fóton não podem ser especificados exatamente ao mesmo tempo (não mais do que a posição e o momento podem sê-lo). Conseqüentemente, do ponto de vista da mecânica quântica, a exigência de completicidade neste caso é tão irracional quanto no caso discutido por Einstein e seus colegas. As duas medidas, uma da polarização circular e a outra da polarização linear, são alternativas; elas ocorrem em diferentes ramos de história e não há razão para que os resultados de ambas sejam considerados juntos.

EPBR E A ALTERNATIVA DAS VARIÁVEIS ESCONDIDAS

Mais tarde, certos trabalhos teóricos de John Bell revelaram que o arranjo experimental EPBR poderia ser utilizado para distinguir a mecânica quântica das teorias hipotéticas de variáveis escondidas, por meio de certas medidas de polarização de ambos os fótons. O teorema de Bell, também chamado desigualdades de Bell, diz respeito a uma quantidade

particular que especifica a correlação entre a polarização dos dois fótons. Na mecânica quântica, esta quantidade pode alcançar valores que não são permitidos por uma teoria clássica de variáveis escondidas.

Depois da publicação do trabalho de Bell, várias equipes de físicos experimentais realizaram a experiência EPBR. O resultado era ansiosamente esperado, embora virtualmente todos os físicos estivessem apostando na correção da mecânica quântica, a qual foi, de fato, confirmada pelo resultado. Poderíamos esperar que todas as pessoas interessadas no mundo inteiro dariam um suspiro de alívio ao ouvir as novas e então prosseguiriam suas vidas. Em vez disso, uma onda de relatos começou a se espalhar alegando que a mecânica quântica mostrara ter propriedades estranhas e perturbadoras. É claro que era a mesma e velha mecânica quântica. Nada era novo exceto sua confirmação e a subsequente torrente de tolices.

A HISTÓRIA DISTORCIDA

A principal distorção que se disseminou nos meios de comunicação e em vários livros é a implicação, e mesmo a reivindicação explícita, de que, ao se medir a polarização, circular ou linear, de um dos fótons, de alguma maneira o outro é afetado. Na verdade, a medida não faz com que qualquer efeito físico se propague de um fóton para o outro. Então, o que acontece? Se, num ramo particular de história, a polarização linear de um fóton for medida e portanto especificada com certeza, então no mesmo ramo de história a polarização linear do outro fóton é também especificada com certeza. Em um ramo diferente de história a polarização circular de um dos fótons pode ser medida, neste caso a polarização circular de ambos os fótons é especificada com certeza. Em cada ramo, a situação é igual às meias de Bertlmann, descrita por John Bell em um dos seus trabalhos. Bertlmann é um matemático que sempre usa uma meia cor-de-rosa e a outra verde. Se você olhar para apenas um dos seus pés e observar uma meia verde, saberá imediatamente que seu outro pé calça uma meia cor-de-rosa. Ainda assim, nenhum sinal se propaga de um pé para o outro. Da mesma forma, nenhum sinal é transmitido de um fóton para o outro na experiência que confirma a mecânica quântica. Nenhuma ação à distância acontece. (O rótulo “não-local” aplicado por alguns físicos aos fenômenos quânticos como o efeito EPBR é, portanto, um abuso de linguagem. O que eles querem dizer é que, *se interpretado classicamente em termos de variáveis escondidas*, o resultado indicaria uma não-localidade, mas é claro que esta interpretação clássica está errada.)

O falso relato de que ao se medir um fóton o outro é imediatamente afetado conduz a todo tipo de conclusões infelizes. Antes de mais

nada, o efeito alegado, sendo instantâneo, violaria a exigência da teoria da relatividade de que nenhum sinal, ou efeito físico, pode viajar mais rápido do que a velocidade da luz. Se um sinal assim o fizesse, pareceria a observadores em certos estados de movimento que o sinal está viajando para trás no tempo. Daí o poema humorístico:

There was a young lady named Bright
Who could travel much faster than light.
She set out one day, in a relative way,
And returned home the previous night.*

A seguir, certos escritores alegaram a aceitação por parte da mecânica quântica de supostos fenômenos “paranormais” como a premonição, nos quais se pretende que os resultados de processos ao acaso sejam conhecidos de antemão por indivíduos “paranormais”. É desnecessário dizer que tais fenômenos seriam tão perturbadores na mecânica quântica quanto na mecânica clássica; se genuínos, exigiriam uma revisão completa das leis da natureza como as conhecemos.

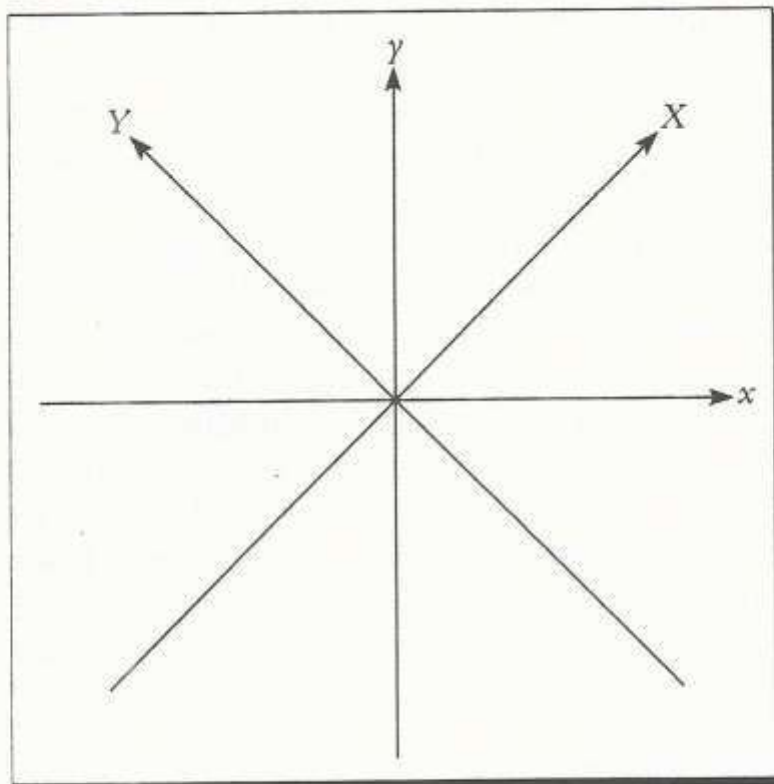
Uma terceira manifestação de tolice é o ato de submeter propostas, por exemplo ao Departamento de Defesa dos EUA, de utilização da mecânica quântica para descobrir tipos de comunicação mais rápidos do que a luz em contextos militares. É de se perguntar se o advento desta nova categoria de pedidos descabidos significa um declínio numérico em áreas mais antigas, como a da antigravidade e a do movimento perpétuo. Se não é o caso, a burocracia que trata destes pedidos deve estar crescendo.

APLICAÇÕES POTENCIALMENTE SÉRIAS DO EPBR

Enquanto isso, pesquisadores sérios começaram a pensar sobre modos pelos quais o efeito EPBR poderia de fato ser posto em prática. Em vez de idéias malucas, eles apresentaram algumas aplicações potencialmente fascinantes. Por exemplo, Charlie Bennett, Gilles Brassard e Artur Ekert têm trabalhado com uma forma de criptografia quântica em que o efeito EPBR é utilizado repetidamente para criar uma cadeia de bits gerados aleatoriamente e que é conhecida por apenas duas pessoas e ninguém mais. Esta cadeia pode então ser utilizada como base de um código inquebrantável para transmitir mensagens entre os dois indivíduos secretamente.

Grosso modo, o método funciona como se segue. Suponha que um suprimento constante de pares de fótons EPBR está disponível a Alice e

* Havia uma jovem chamada Brilho. Que podia viajar muito mais rápido do que a luz. Um dia ela partiu, de um modo relativo. E retornou ao lar na noite anterior. (N. do T.)



Eixos para as polarizações lineares utilizadas na criptografia quântica.

Bob. De cada par, um fóton vai para Alice e o outro para Bob. Eles concordam de antemão em realizar uma longa série de medidas de polarizações lineares de seus respectivos fótons, na metade das vezes distinguindo entre duas direções perpendiculares denotadas por x e y , e na outra metade fazendo a distinção entre duas outras direções mutuamente perpendiculares (a meio caminho entre x e y) denotadas X e Y . Os eixos X e Y são rodados de um ângulo de 45 graus em relação aos eixos x e y , como é mostrado na ilustração acima. Alice escolhe ao acaso para cada um de seus fótons se ele será submetido a uma medida de x contra y , ou a uma medida de X contra Y . Bob faz o mesmo separada e independentemente.

Uma vez o trabalho terminado, Alice diz para Bob que tipo de medidas ela fez com cada um dos seus fótons, x contra y , ou X contra Y , e Bob dá para Alice a informação análoga. A conversa pode ser feita em um telefone público e ser gravada por espiões sem causar qualquer prejuízo. Eles se informam sobre em que ocasiões ambos fizeram o mesmo tipo de medida (que terá acontecido quase na metade do tempo). Para cada medida comum, os resultados obtidos por Alice e Bob devem ser idênticos em razão do efeito EPBR. Os resultados de tais medidas comuns são então conhecidos por ambos e por ninguém mais, presumindo-se que cada um realizou as medidas em segredo e não divulgou o resultado. Estes resultados podem ser denotados por uma cadeia de dígitos 1 (representando x ou X) e dígitos 0 (representando y ou Y) conheci-

da apenas por Alice e Bob. Esta cadeia pode então servir de base para um código secreto inquebrantável a ser utilizado entre eles.

Se Alice e Bob estiverem particularmente preocupados com a segurança, eles podem desperdiçar os resultados de umas poucas medidas que fizeram em comum, comparando os dígitos 1 e 0 correspondentes utilizando uma linha telefônica disponível para se assegurar de que são realmente idênticos, mantendo o resto dos dígitos 1 e 0 para suas mensagens secretas. Qualquer espião ou espiã que tenha de alguma forma feito suas próprias medidas com os fótons teria desta maneira destruído a concordância perfeita entre os resultados de Alice e Bob. A comparação de alguns resultados teria revelado o trabalho do espião.

Na verdade, a criptografia quântica não demanda a existência do efeito EPBR. Subseqüentemente, um grupo de seis físicos (incluindo Bennett) inventou um procedimento engenhoso, no qual o EPBR é essencial para destruir um fóton e criar outro no mesmo estado de polarização mas em outro lugar, isto é, com uma distribuição de probabilidades diferente no espaço.

À medida que continuamos a aprender mais e mais sobre o sistema de partículas elementares, um intercâmbio notável se desenvolveu entre as complexidades aparentes reveladas pela experiência e a simplificação obtida pela teoria. A descoberta de muitos tipos diferentes de partículas e de diversos tipos de interação entre elas criou e reforçou a impressão de que a física das partículas é complicada. Ao mesmo tempo, no lado teórico, o progresso em direção à unificação na descrição das partículas e interações revelou mais e mais a simplicidade subjacente. Embora a física das partículas elementares tenha muito menos do que um século, podemos estar já no estágio onde a unidade do assunto esteja começando a se revelar, na forma de um único princípio que se espera poder prever a existência da diversidade observada das partículas elementares.

CAPÍTULO 13

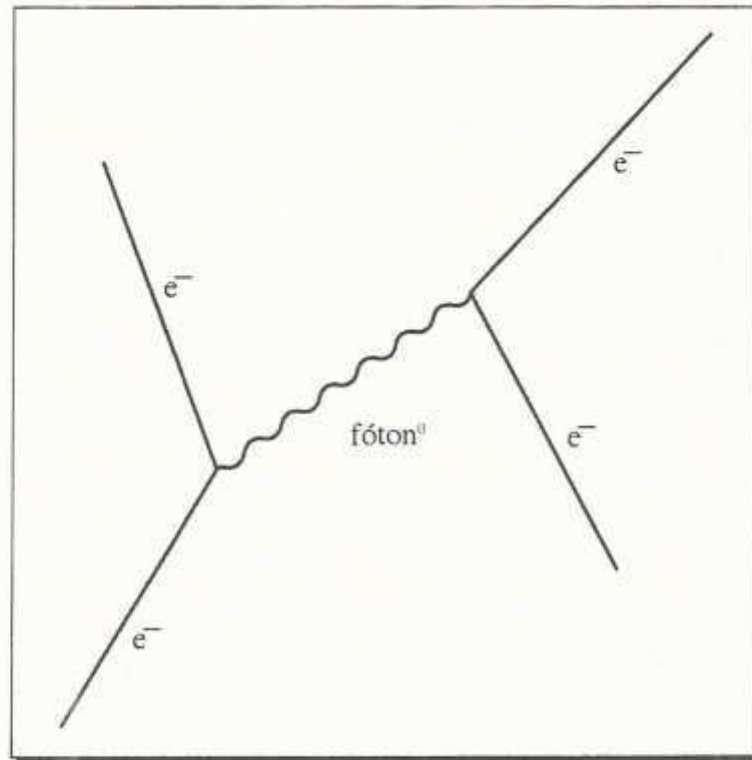
QUARKS E TODOS OS OUTROS: O MODELO PADRÃO

Toda teorização respeitável sobre as partículas elementares é realizada dentro do arcabouço da teoria quântica de campos, que inclui tanto o modelo padrão como a teoria das supercordas. A teoria quântica de campos baseia-se em três suposições fundamentais: a validade da mecânica quântica, a validade do princípio da relatividade de Einstein (da relatividade especial quando a gravitação não é incluída ou de outro modo, da relatividade geral), e da localidade (que significa que todas as forças fundamentais se originam de processos locais e não de ações à distância). Estes processos locais envolvem a emissão e a absorção de partículas.

EDQ — A ELETRODINÂMICA QUÂNTICA

O primeiro exemplo bem-sucedido de teoria quântica de campos foi a eletrodinâmica quântica (EDQ), a teoria do elétron e do fóton. O elétron é um férmion, isto é, ele obedece ao princípio de exclusão de Pauli, e possui uma unidade de carga elétrica fundamental, denotada “negativa” de acordo com uma convenção que data da época de Benjamin Franklin. O fóton é um bóson, em outras palavras, ele obedece ao princípio de antiexclusão e é eletricamente neutro.

Na eletrodinâmica quântica, as forças eletromagnéticas entre dois elétrons surgem pela emissão de um fóton por parte de um dos elétrons e sua absorção pelo outro. Se você sabe um pouco de física clássica, poderá objetar que um elétron que emite um fóton, isto é, que se transforma num elétron mais um fóton, viola o princípio de conservação da energia, o princípio de conservação do momento, ou ambos; o mesmo vale para a absorção de um fóton. Entretanto, se você sabe um



Dois elétrons trocando um fóton virtual, o que dá origem à força eletromagnética entre eles.

pouco de física quântica, provavelmente está ciente de que a conservação de energia pode não ser válida em intervalos finitos de tempo, apenas a longo prazo. Esta propriedade da mecânica quântica pode ser considerada uma manifestação do princípio de incerteza de Heisenberg aplicada à energia e ao tempo. O sistema pode pedir emprestado alguma energia durante um certo tempo de modo a permitir que o primeiro elétron emita um fóton, então a energia pode ser devolvida quando o outro elétron absorve o fóton. Um processo deste tipo é chamado de troca “virtual” de um fóton entre elétrons. O fóton é emitido e absorvido apenas no sentido pickwickiano* da mecânica quântica.

Para qualquer teoria de campos podemos traçar pequenos desenhos engraçados, inventados por meu falecido colega Dick Feynman, que nos dão a ilusão de compreender o que está acontecendo. Em um deles, nesta página, os elétrons estão trocando virtualmente um fóton para dar origem à força eletromagnética entre eles. Cada elétron é denotado por “e”, junto com um sinal de menos para indicar sua única unidade de carga elétrica negativa. Um “e” com sinal positivo denotaria um pósitron, a antipartícula do elétron. Mas o que é uma antipartícula?

* Referência a Mr. Pickwick, personagem central de *Mr. Pickwick's Papers*, de Dickens, que interpreta frases, palavras ou idéias de um modo diferente do usual. (N. do T.)

A SIMETRIA PARTÍCULA – ANTIPARTÍCULA

Acontece que a teoria quântica de campos implica uma simetria fundamental do sistema de partículas elementares entre partículas e suas “antipartículas”. Para cada partícula há uma antipartícula correspondente, que se comporta como uma partícula movendo-se para trás no tempo e no espaço. A antipartícula de uma antipartícula é a própria partícula. Se duas partículas são as antipartículas uma da outra, elas terão cargas elétricas opostas, isto é, cargas de mesma magnitude porém de sinais opostos, e a mesma massa. A antipartícula de um elétron é chamada pósitron em razão de sua carga elétrica positiva. Algumas partículas eletricamente neutras, como o fóton, são suas próprias antipartículas.

Quando Dirac publicou sua equação relativística para o elétron em 1928, abriu o caminho para a descoberta da eletrodinâmica quântica, que se deu pouco tempo depois. A interpretação da equação de Dirac apontou para a necessidade do pósitron, mas na verdade inicialmente Dirac não predisse a existência desta partícula. Em vez disso, ele indicou que, de algum modo, o objeto positivamente carregado esperado poderia ser identificado com o próton, que era bem conhecido experimentalmente, mas quase duas mil vezes mais pesado do que o elétron, do qual difere em outros aspectos também importantes. Quando lhe perguntei, muitas décadas mais tarde, por que não havia previsto imediatamente o pósitron, Dirac respondeu do modo enérgico habitual: “Pura covardia.”

Ficou para os experimentais a tarefa de fazer a descoberta. O pósitron apareceu em 1932 nos laboratórios de meu falecido colega Carl Anderson no Caltech e de Patrick Blackett na Inglaterra; eles dividiram um prêmio Nobel de física poucos anos mais tarde. Suas experiências estabeleceram a simetria partícula-antipartícula da teoria quântica de campos como um fenômeno real.

Em grande parte o modelo padrão pode ser considerado uma generalização da eletrodinâmica quântica. O elétron e o pósitron são suplementados por muitos outros pares fermiônicos de partícula-antipartícula, e os fótons são suplementados por outros quanta. Assim como o fóton é o portador ou quantum de força eletromagnética, da mesma forma os outros quanta são os portadores das outras forças fundamentais.

QUARKS

Durante um longo tempo se pensou que entre as partículas da lista dos férmions fundamentais que acompanham o elétron estariam o nêutron e o próton, os constituintes do núcleo atômico. Entretanto, isto se revelou

falso; o nêutron e o próton não são elementares. Os físicos também aprenderam em outras ocasiões que objetos originalmente não imaginados como fundamentais se revelaram constituídos por coisas menores. Moléculas são compostas por átomos. Os átomos, embora chamados assim porque em grego o termo significa inquebrantável, são compostos por núcleos com elétrons em torno deles. Os núcleos por sua vez são compostos por nêutrons e prótons, como os físicos começaram a compreender por volta de 1932, quando o nêutron foi descoberto. Agora sabemos que o nêutron e o próton são eles mesmos compostos: são compostos por quarks. Os teóricos estão agora bastante seguros de que são os quarks os análogos dos elétrons. Se, como parece improvável hoje, os quarks se revelarem ser compostos, então o elétron deveria ser também composto.

Em 1963, quando atribuí o nome “quark” aos constituintes fundamentais dos núcleons, primeiro eu tinha o som da palavra, sem sua grafia, que poderia ser “kwork”. Então, em uma das minhas olhadelas ocasionais em *Finnegans Wake*, de James Joyce, encontrei a palavra “quark” na frase “Three quarks for Muster Mark”. Como “quark” (que significa, entre outras coisas, o pio da gaivota) tinha a intenção clara de rimar com “Mark”, assim como “bark” e outras palavras semelhantes, eu tinha encontrado uma desculpa para pronunciá-la como “kwork”. Mas o livro representa o sonho de um dono de bar chamado Humphrey Chimpden Earwicker. As palavras no texto são tipicamente retiradas de diversas fontes ao mesmo tempo, como as palavras-valise* de *Through the Looking Glass* (*Alice no país do espelho*). De tempos em tempos, aparecem no livro frases que são parcialmente determinadas pelos pedidos de bebidas no bar. Argumentei, portanto, que talvez uma das múltiplas fontes do grito “Three quarks for Muster Mark” poderia ser “Three quarts for Muster Mark”,** neste caso a pronúncia “kwork” não seria totalmente injustificada. De qualquer modo, o número três ajusta-se perfeitamente ao modo pelo qual os quarks ocorrem na natureza.

A receita para fazer um nêutron ou um próton a partir dos quarks é, aproximadamente, “tome três quarks”. O próton é composto por dois “quarks do tipo *u*” e um “quark do tipo *d*”, enquanto que o nêutron contém dois “quarks do tipo *d*” e um “quark do tipo *u*”. Os quarks *u* e *d* têm valores diferentes de carga elétrica. Nas mesmas unidades em que o elétron tem uma carga elétrica de -1 , o próton tem uma carga elétrica de

* Em inglês, palavras-valise (*portmanteau words*) são palavras formadas com partes de outras palavras, por exemplo, *stagflation* (estagflação), de *stagnation* (estagnação) e *inflation* (inflação), ou *snark*, de *snake* (cobra) e *shark* (tubarão). (N. do T.)

** O *quart* é uma medida de capacidade; a frase citada se traduz por “Três *quarks* (*quarts*) para Mestre Mark”. (N. do T.)

+1, enquanto o nêutron tem carga elétrica 0. A carga do quark u nestas mesmas unidades é $2/3$ e a do quark d é $-1/3$. É óbvio que, se somarmos $2/3$, $2/3$, e $-1/3$, obtemos 1 para a carga do próton; se somarmos $-1/3$, $-1/3$, e $2/3$, obtemos 0 para a carga do nêutron.

Dizemos que os quarks u e d são “sabores” diferentes de quarks. Além do sabor, os quarks têm uma propriedade, mais importante até, chamada “cor”, embora neste contexto ela tenha tanto a ver com a cor real quanto o sabor tem a ver com os sabores de um iogurte congelado. Embora o nome cor seja principalmente uma brincadeira, também serve como uma espécie de metáfora. Há três cores, denotadas vermelho, verde e azul por causa das três cores básicas da luz na teoria simples da visão em cores humana. No caso das tintas, as três cores primárias são muitas vezes consideradas como o vermelho, o amarelo e o azul, mas para a mistura de luzes em vez de tintas, em razão de seu efeito sobre os observadores humanos, o amarelo é substituído pelo verde. A receita de um nêutron ou de um próton é tomar um quark de cada cor, isto é, um quark vermelho, um quark verde e um quark azul, de modo tal que as cores se cancelem. Como para a visão o branco pode ser considerado uma mistura de vermelho, verde e azul, podemos usar da metáfora para dizer que o nêutron e o próton são brancos.

O CONFINAMENTO DOS QUARKS

Os quarks têm a propriedade notável de estar permanentemente presos dentro de partículas “brancas” como o nêutron e o próton. Somente as partículas brancas são observadas diretamente no laboratório. As cores cancelam-se nas partículas observáveis e apenas dentro delas é que podem existir objetos coloridos. Do mesmo modo, a carga elétrica de um objeto observável é sempre um número inteiro (por exemplo, 0, 1, -1 ou 2), e partículas de carga fracionária podem existir somente em seu interior.

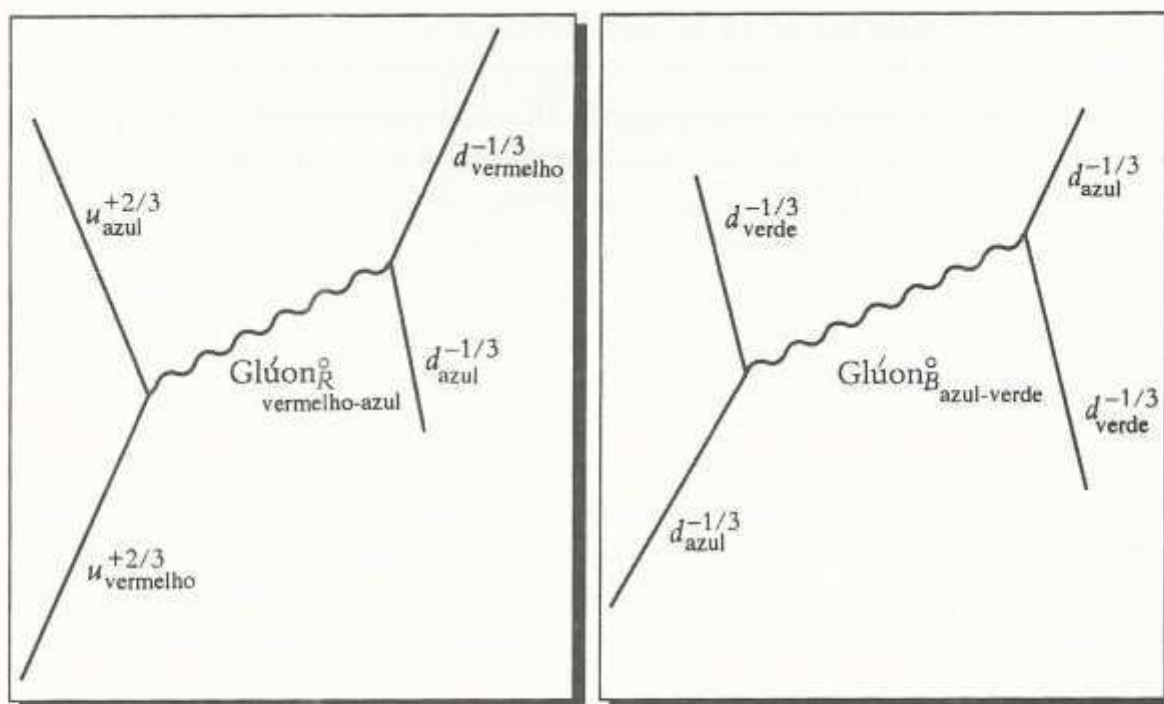
Quando propus a existência dos quarks, acreditava desde o início que eles estavam permanentemente confinados de alguma forma. Referia-me a tais quarks como “matemáticos”, explicando cuidadosamente o que queria dizer com o termo, e os contrastava com o que eu chamava “quarks reais”, que seriam capazes de emergir de modo que pudessem ser detectados separadamente. A razão para esta escolha de terminologia é que eu não desejava deparar com argumentos de críticos com inclinações filosóficas, querendo saber como eu poderia chamar os quarks de reais se eles estavam sempre escondidos. Contudo, a terminologia provou ser infeliz. Numerosos autores, ignorando minha explica-

ção dos termos “matemático” e “real”, assim como o fato de que a situação que estava descrevendo é agora geralmente aceita como correta, afirmaram que eu realmente não acreditava que os quarks estivessem lá! Uma vez que um mal-entendido fica estabelecido na literatura popular, ele tende a perpetuar-se, porque vários escritores muitas vezes simplesmente copiam um ao outro.

GLÚONS COLORIDOS

Para que os quarks estejam confinados do jeito que estão, as forças entre eles devem ser de natureza muito diferente das forças familiares, como por exemplo o eletromagnetismo. Como surge esta diferença?

Assim como a força eletromagnética entre os elétrons é gerada pela troca virtual de fótons, os quarks estão ligados um com o outro por uma força que vem da troca de outros quanta, chamados glúons* porque “colam” os quarks juntos para tornar objetos brancos como o nêutron e o próton observáveis. Os glúons não dão atenção ao sabor — podemos dizer que eles são “indiferentes ao sabor”. Entretanto, são muito sensíveis à cor. De fato, para eles a cor desempenha o mesmo tipo de



Forças entre quarks a partir da troca de glúons.

* O termo *gluon*, em português glúon, vem do inglês *glue*, cola. (N. do T.)

papel que a carga elétrica desempenha para os fótons: os glúons interagem com a cor tanto quanto os fótons com a carga elétrica.

A natureza tríplice da cor exige que os glúons tenham uma propriedade que não é dividida com o fóton: para diferentes situações de cor, há glúons diferentes. No esboço da página anterior, um quark vermelho é mostrado quando se torna azul com a emissão virtual de um glúon vermelho e azul, que é absorvido virtualmente por um quark azul que por sua vez se torna vermelho. Uma outra situação de cor é mostrada no esboço ao lado, em que um quark azul se torna verde emitindo virtualmente um glúon azul-verde, a absorção virtual do qual transforma um quark verde em um quark azul. (A propósito, note que a antipartícula de um glúon é também um glúon; por exemplo, os glúons azul-verdes e verde-azuis são antipartículas um do outro.) Os sabores foram escolhidos de modo diferente nos dois esboços para ilustrar sua irrelevância nos processos coloridos intermediados pelos glúons.

A CROMODINÂMICA QUÂNTICA

Por volta de 1972, muitos de nós contribuimos para a formulação de uma teoria quântica de campos definida dos quarks e dos glúons. Eu a denominei cromodinâmica quântica, usando a raiz grega *chromo*, que significa cor. Ela parece ser a teoria correta e como tal é geralmente reconhecida, embora uma quantidade considerável de trabalho matemático seja ainda necessário antes que possamos estar certos de que suas previsões quantitativas detalhadas concordam com a observação — confirmando que os quarks, antiquarks e os glúons, a partir dos quais todos os objetos nucleares tais como o nêutron e o próton são compostos, se comportam verdadeiramente de acordo com as regras da cromodinâmica quântica.

Para comparar a eletrodinâmica quântica (EDQ) com a cromodinâmica quântica (CDQ), podemos construir a espécie de dicionário mostrada na página seguinte. Na EDQ, elétrons e pósitrons interagem por meio da troca virtual de fótons, enquanto na CDQ os quarks e antiquarks de modo similar interagem por meio da troca virtual de glúons. As forças eletromagnéticas originam-se das cargas elétricas: podemos imaginar que as forças devidas à cor se originam das cargas de cor. Ambas as cargas, a elétrica e a de cor, são perfeitamente conservadas — assim como a carga elétrica não pode ser criada nem destruída, o mesmo acontece com a carga de cor.

Entretanto, há uma diferença crucial entre as duas teorias: na EDQ o fóton, que transporta a interação eletromagnética, é eletricamente neutro, enquanto na CDQ os glúons, que transportam a força de cor, são eles mesmos coloridos. Em razão do fato de os glúons não serem

	EDQ	CDQ	
Férmions	e^-	$u^{+2/3}$ vermelho	$d^{-1/3}$ vermelho
		$u^{+2/3}$ verde	$d^{-1/3}$ verde
		$u^{+2/3}$ azul	$d^{-1/3}$ azul
Quanta (bósons)	Fóton ⁰	Glúons coloridos ⁰	
Férmions	e^+	$\bar{u}^{-2/3}$ vermelho	$\bar{d}^{+1/3}$ vermelho
		$\bar{u}^{-2/3}$ verde	$\bar{d}^{+1/3}$ verde
		$\bar{u}^{-2/3}$ azul	$\bar{d}^{+1/3}$ azul

Antipartículas uma da outra



Comparação entre a EDQ e a CDQ. Os quarks e antiquarks são acoplados ao fóton por meio de suas cargas elétricas, mas o elétron e o pósitron não são acoplados aos glúons.

descoloridos, eles interagem entre si de um modo que os fótons não fazem, e isto dá origem, nas equações da CDQ, a termos que não têm análogos na EDQ. Como consequência, a força colorida comporta-se de maneira muito diferente da força eletromagnética ou qualquer outra força previamente conhecida: ela não esvanece a grandes distâncias. Esta propriedade da CDQ explica por que os quarks e os antiquarks e os glúons multicoloridos estão permanentemente confinados dentro de objetos brancos como o nêutron e o próton. A força de cor atua como se fosse uma mola para mantê-los juntos.

Embora os quarks estejam aprisionados para sempre e não possam ser detectados diretamente no laboratório, experiências belíssimas foram realizadas e confirmam sua existência dentro do próton. Por exemplo, um feixe de elétrons de alta energia pode ser utilizado para fazer uma espécie de micrografia eletrônica do interior do próton, e obviamente a estrutura de quarks é revelada. Fiquei encantado quando meus amigos Dick Taylor, Henry Kendall e Jerry Friedman dividiram o prêmio Nobel

de física por tal experiência. (Quisera eu ter observado de antemão que esta seria uma boa maneira de confirmar a existência de quarks.)

A SIMPLICIDADE REVELADA PELA CDQ

No núcleo atômico, os nêutrons e prótons estão unidos. (Ao contrário dos quarks, eles não estão confinados e podem ser detectados individualmente.) Agora que sabemos que estas partículas são compostas por quarks, como devemos descrever as forças nucleares entre eles? Quando eu era estudante de pós-graduação, o caráter destas forças era um dos grandes mistérios que esperávamos um dia resolver. A maioria dos teóricos acredita agora que a CDQ deu a solução, embora os cálculos relevantes não estejam em absoluto completos. A situação é análoga à das forças entre átomos ou moléculas, que foram explicadas no final dos anos 20 depois da descoberta da mecânica quântica. Estas forças não são de modo algum fundamentais, mas apenas conseqüências indiretas da força eletromagnética tratada quanticamente. Da mesma forma, a força nuclear não é fundamental mas se origina de um efeito indireto da força colorida, que, por sua vez, se origina da interação entre quarks e glúons.

O nêutron e o próton não são as únicas partículas nucleares (brancas) observáveis, embora sejam as mais conhecidas. Centenas de outros estados de partícula nucleares têm sido descobertos desde o final dos anos 40 em colisões de alta energia, primeiro nas experiências com raios cósmicos e depois nos aceleradores de partículas de alta energia. Estes estados de partícula foram agora todos explicados como compostos de quarks, antiquarks e glúons. O esquema dos quarks, incorporado na teoria dinâmica explícita da cromodinâmica quântica, expôs assim a simplicidade subjacente a um padrão aparentemente muito complicado de estados. Além disso, todos estes estados interagem um com o outro por meio da "interação forte", que inclui a força nuclear. As muitas manifestações da interação forte são todas consideradas passíveis de descrição como conseqüências indiretas da interação fundamental entre quarks e glúons. A cromodinâmica quântica revelou assim a simplicidade da interação forte assim como a simplicidade dos estados de partículas nucleares, que participam desta interação.

O ELÉTRON E O NEUTRINO DO TIPO ELÉTRON — A INTERAÇÃO FRACA

Embora sejam muito importantes, sabemos que a matéria é mais do que partículas nucleares e seus constituintes fundamentais. Por exemplo, o

elétron não possui cor e é indiferente à força colorida ou à força nuclear resultante. Em um átomo pesado, os elétrons das camadas mais internas que envolvem o núcleo na verdade passam uma boa parte de seu tempo dentro dele, mas não sentem a força nuclear, embora naturalmente sejam suscetíveis aos efeitos eletromagnéticos como a atração elétrica dos prótons.

Embora o elétron não possua cor, ele tem sabor. Assim como o quark *d* tem no quark *u* o seu parceiro em sabor, da mesma forma o elétron tem no neutrino tipo elétron o seu parceiro. O neutrino tipo elétron é algo como um parceiro silencioso, porque, sendo eletricamente neutro, ignora não apenas a força nuclear (como o elétron o faz), mas também a força eletromagnética. Por exemplo, ele pode atravessar a Terra com uma probabilidade muito pequena de interagir. Os neutrinos produzidos pelas reações termonucleares no centro do Sol alcançam a superfície da Terra e chovem sobre nós durante o dia, mas à noite eles nos chegam através da Terra. Quando o escritor John Updike leu a respeito deste aspecto do comportamento dos neutrinos, ele foi inspirado a escrever o seguinte poema, intitulado “Cosmic Gall”:^{*}

Neutrinos, they are very small.
 They have no charge and have no mass
 And do not interact at all.
 The earth is just a silly ball
 To them, through which they simply pass,
 Like dustmaids down a drafty hall
 Or photons through a sheet of glass.
 They snub the most exquisite gas,
 Ignore the most substantial wall,
 Cold-shoulder steel and sounding brass,
 Insult the stallion in his stall,
 And, scorning barriers of class,
 Infiltrate you and me! Like tall
 And painless guillotines, they fall
 Down through our heads into the grass.
 At night, they enter at Nepal
 And pierce the lover and his lass
 From underneath the bed — you call
 It wonderful; I call it crass.**

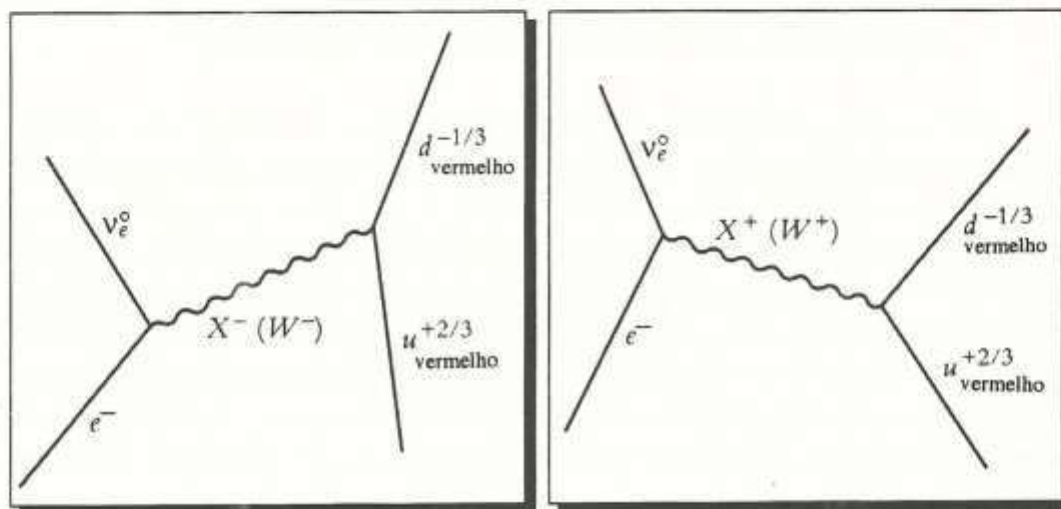
^{*} Em inglês, “A impudência cósmica”. (N. do T.)

^{**} Neutrinos, eles são muito pequenos / Não têm carga ou massa / E não interagem de modo algum / A Terra é apenas uma bola tola / Para eles, através da qual simplesmente passam / Como

Na terceira linha é tentador empregar licença científica e alterar “do not” (não) para “scarcely” (raramente).

Infelizmente a detecção de neutrinos solares é repleta de muitos problemas. A taxa de detecção parece mais baixa do que o previsto, fazendo com que os físicos proponham várias explicações com graus diferentes de plausibilidade. Meu colega Willy Fowler uma vez chegou a propor que talvez a fornalha nuclear no centro do Sol extinguiu-se há algum tempo, mas os mecanismos de transferência de energia no Sol são tão lentos que as notícias ainda não chegaram à superfície. Não são muitas as pessoas que acreditam que esta é a explicação correta, mas, se o é, então estamos caminhando para uma crise de energia real algum dia.

Como podem os neutrinos ser produzidos no centro do Sol e como podem eles ser detectados nos laboratórios aqui na Terra se não estão sujeitos nem à interação forte ou à interação eletromagnética? Uma outra interação, a assim chamada interação fraca, é a responsável. O neutrino do tipo elétron participa desta interação junto com os elétrons. Daí a sugestão de revisar a frase de John Updike “não interagem de modo algum”.



Um elétron transformando-se num neutrino do tipo elétron enquanto um quark *u* transforma-se num quark *d*. Duas versões do mesmo diagrama de Feynman.

ciscos de poeira por um saguão ventoso/ Ou fótons através de uma lâmina de vidro/ Eles desconsideram o gás mais apurado/ Ignoram a parede mais substancial/ Desprezam o aço e o retumbante bronze/ Insultam o garanhão em seu estábulo/ E, troçando das barreiras de classe/ se infiltram em mim e você!/ Como guilhotinas altas e indolores, eles caem/ Através de nossas cabeças e na grama./ À noite eles entram no Nepal/ E perfuram o amante e sua garota/ Debaixo da cama / você acha maravilhoso; eu acho grosseiro.(N. do T.)

A interação fraca dá origem a reações como as que se seguem:

1. Um elétron transforma-se em um neutrino tipo elétron enquanto um próton se transforma em um nêutron. Esta reação é um exemplo de como neutrinos podem ser produzidos; o próton envolvido é parte de um núcleo pesado e o elétron pertence às camadas eletrônicas mais internas em torno deste núcleo, dentro do qual ele passa uma fração considerável de seu tempo.
2. O processo inverso, no qual um elétron do tipo neutrino se transforma em um elétron enquanto um nêutron transforma-se em um próton. Isto ilustra como um neutrino pode ser detectado, com o nêutron alvo dentro do núcleo.

Entretanto, como nem o nêutron nem o próton são elementares, tais reações não são processos básicos, que em vez disto envolvem os quarks:

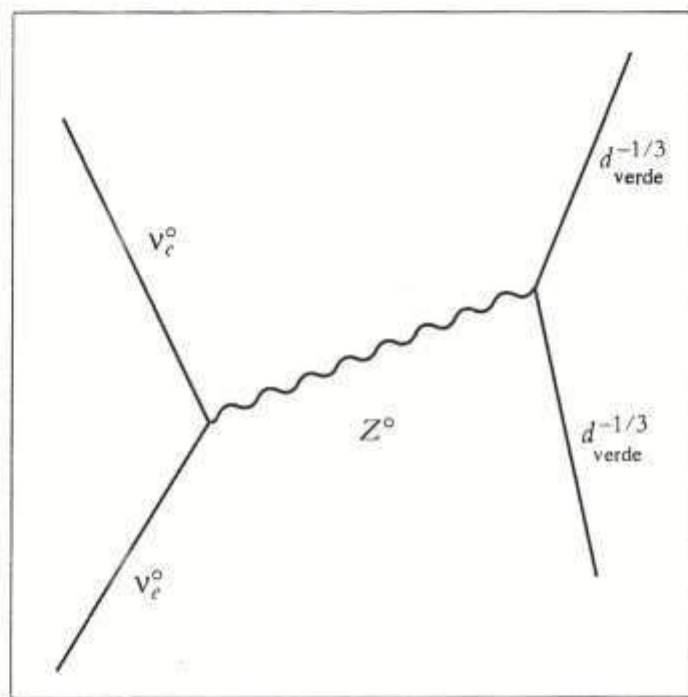
1. Um elétron transforma-se em um neutrino do tipo elétron enquanto um quark u se transforma em um quark d .
2. Um neutrino do tipo elétron transforma-se em um elétron enquanto um quark d se transforma em um quark u .

Estas reações envolvem uma mudança de sabor, do elétron transformando-se em um neutrino do tipo elétron (ou vice-versa) e do quark u transformando-se em um quark d (ou vice-versa). Como em qualquer processo deste tipo na teoria quântica de campos, um quantum é trocado. Para cada uma das reações (a primeira das quais é ilustrada na página anterior) há duas versões do mesmo diagrama de Feynman, uma versão envolvendo a troca de um quantum positivamente carregado e outra a troca de um quantum negativamente carregado. A existência de tais quanta foi discutida pela primeira vez por alguns de nós no final dos anos 50, e foram descobertos no CERN 25 anos mais tarde, em experiências que proporcionaram um prêmio Nobel a Carlo Rubbia e Simon van der Meer. Os quanta são usualmente denotados W^+ e W^- , como foram designados em um célebre trabalho de T.D. Lee e C.N. Yang, mas eu ainda muitas vezes me refiro a eles pelos nomes X^+ e X^- que Dick Feynman e eu costumávamos empregar.

A DINÂMICA QUÂNTICA DO SABOR E A INTERAÇÃO FRACA NEUTRA

Tanto a integração eletromagnética como a fraca podem ser consideradas interações que dependem do sabor, já que a carga elétrica varia com o sabor e a interação fraca envolve a mudança de sabor. Durante os anos 50 e 60, uma espécie de dinâmica quântica do sabor foi formulada, incorporando ambas a eletrodinâmica quântica e uma teoria da interação fraca. A dinâmica quântica do sabor, associada particularmente com os nomes de Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam, predisse com sucesso, entre outras coisas, a existência de uma nova força dependente do sabor que provoca o espalhamento simples de neutrinos do tipo elétron por nêutrons ou prótons sem qualquer mudança no sabor.

Mais fundamentalmente, em termos de quarks, a nova força provoca o espalhamento de elétrons do tipo neutrino por quarks u e d , novamente sem qualquer mudança no sabor. O espalhamento se dá por meio da troca de um novo quantum eletricamente neutro chamado Z^0 como é ilustrado nesta página. A existência deste quantum foi também confirmada por Rubbia, Van der Meer e seus colegas.



Espalhamento de um neutrino de tipo elétron por um quark d .

AS FAMÍLIAS DE FÉRMIONS

O diagrama da página 205 resume o que dissemos até agora sobre partículas e interações. Há uma família de férmions composta pelo elétron e seu neutrino e por dois sabores de quarks tricolores; a antifamília correspondente consiste do pósitron, do antineutrino do tipo elétron e de dois sabores de antiquarks tricolores. Acoplados à variável cor, que não existe para o elétron e seu neutrino, e suas antipartículas, estão os glúons coloridos da cromodinâmica quântica. Acoplados à variável sabor, que não existe para a família inteira nem para a antifamília, há os quatro quanta da dinâmica quântica dos sabores.

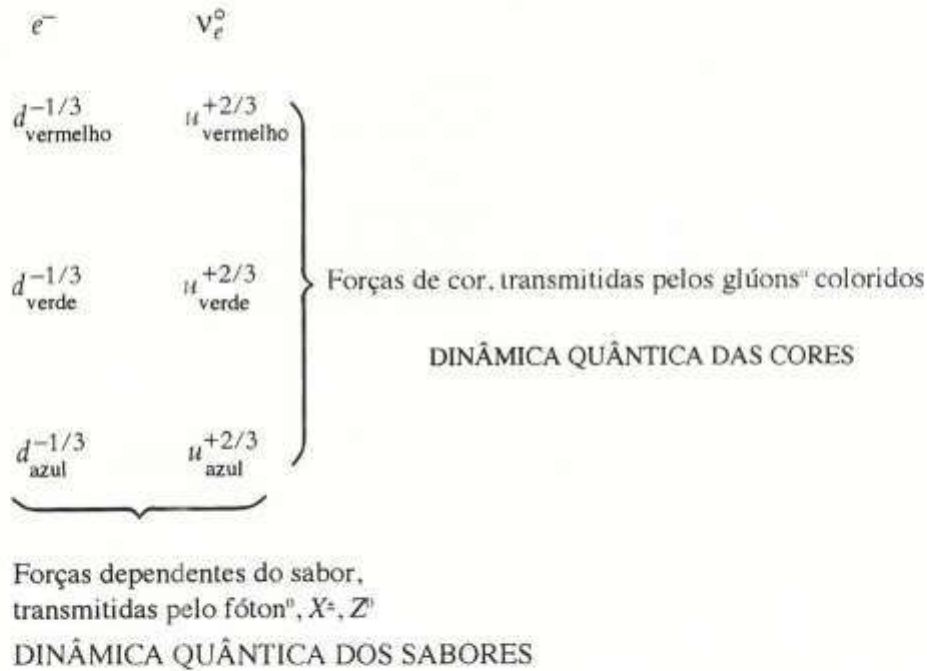
Acontece que esta família fermiônica não está sozinha. Há mais duas destas famílias, com estruturas muito similares. Cada uma delas consiste de uma partícula semelhante ao elétron, um neutrino correspondente e dois sabores de quarks com cargas elétricas $-1/3$ e $+2/3$, como os quarks d e u respectivamente.

A partícula semelhante ao elétron da segunda família é o múon, descoberto por Carl Anderson e Seth Neddermeyer no Caltech em 1937. Ela é uma versão mais pesada do elétron, cerca de duzentas vezes mais pesada, e possui seu próprio neutrino, o do tipo múon. Os quarks da segunda família são o quark “estranho” s (análogo ao quark d) e o quark “charmoso” c (análogo ao quark u). Como o múon, eles são mais pesados do que seus análogos da primeira família.

A terceira família de férmions é também conhecida, e consiste no táuon, cerca de vinte vezes mais pesado do que o múon, do neutrino do tipo táuon, do quark b (ou “bottom”), com carga de $-1/3$; e o quark t (ou “top”), com carga de $+2/3$, para o qual duas equipes diferentes de físicos experimentais recentemente apresentaram evidências convincentes. Se eles não tivessem confirmado a existência do quark top, nós, teóricos teríamos de “nos suicidar com nossas canetas-tinteiro”, como meu antigo colega Marvin “Murph” Goldberger gostava de dizer. No entanto, hoje em dia canetas-tinteiro são raras. Além disso, o antigo herói romano que quis se matar depois de uma derrota tinha um fiel criado para segurar sua espada — não é certo que uma caneta-tinteiro pudesse ser mantida suficientemente firme por um estudante de graduação.

Haverá famílias adicionais de férmions além das três conhecidas? Uma experiência recente sobre a taxa de desintegração do quantum Z^0 esclareceu esta questão. O resultado estava de acordo com as previsões teóricas que permitem o decaimento do Z^0 em quaisquer dos três tipos diferentes de pares de neutrino-antineutrino, correspondendo precisamente ao neutrino do tipo elétron, ao neutrino do tipo múon e ao neutrino do tipo táuon. Não há espaço para um quarto tipo de neutrino a

menos que ele tenha uma massa gigantesca, ao contrário dos outros três que são muito leves. Assim, a quarta família está excluída a menos que seu neutrino seja muito diferente.



As partículas elementares e as forças discutidas até aqui. (Por simplicidade as antipartículas dos férmions foram omitidas do diagrama.)

Com três famílias de férmions, suas antipartículas e os quanta das interações eletromagnética, fraca e gluônica chegamos quase ao fim da nossa descrição do modelo padrão, e ele ainda é uma generalização bastante direta da EDQ. O fóton é acompanhado por outros quanta e o elétron por outros férmions. Os padrões destes quanta e férmions, incluindo suas várias massas e a intensidade das interações mediadas pelos quanta, mostram alguma complexidade aparente. Mas o modelo padrão não é ainda a teoria fundamental, e apenas no nível fundamental a simplicidade total da teoria subjacente deve se revelar.

A APROXIMAÇÃO DE MASSA NULA

Uma maneira de produzir a simplicidade que o modelo padrão realmente possui é considerar uma aproximação na qual são atribuídas massas nulas a todas as partículas até agora mencionadas, o que significa que elas sempre viajam com a velocidade da luz e não podem nunca ser con-

sideradas em repouso. Quando os quanta da interação fraca são tratados como partículas de massa nula, a similaridade das três interações é evidente. A dinâmica quântica dos sabores e a cromodinâmica têm estruturas matemáticas relacionadas; elas pertencem à mesma classe de teorias — as assim chamadas teorias de calibre, ou teorias de Yang-Mills, na forma generalizada por mim e por Shelly Glashow há muito tempo.

Quando se atribui também massa nula aos férmions, uma grande parte da simetria aparece no sistema fermiônico. Em particular, as três famílias têm então propriedades idênticas.

A questão que surge imediatamente é como a aproximação de massa nula é quebrada. Mas antes de descrever o mecanismo que induz massas diferentes de zero devemos dar uma olhada nos valores reais destas.

MASSAS (OU ENERGIAS) GRANDES E PEQUENAS

Ao tratar com massas e energias é essencial utilizar a famosa relação de Einstein entre massa e energia, que nos diz que uma partícula com massa diferente de zero, quando está em repouso, tem uma energia igual à sua massa vezes o quadrado da velocidade da luz c . Esta equivalência da massa e da energia de repouso pode ser utilizada para atribuir uma energia equivalente a qualquer massa. As massas do nêutron e do próton, quando são desta maneira convertidas em energia, são ambas bastante próximas da unidade de energia conhecida como GeV ou giga-elétron-volt. O prefixo giga é assim utilizado para indicar 1 bilhão; um GeV é portanto a energia necessária para acelerar um elétron a partir do repouso por meio de uma diferença de potencial de 1 bilhão de volts. O GeV é uma unidade conveniente para medir o equivalente em energia das massas das partículas.

As massas diferentes de zero das partículas elementares no modelo padrão são bastante diferentes umas das outras. A massa do elétron fica em torno de $1/2.000$ de GeV. As massas dos neutrinos, se elas não forem realmente nulas, são no máximo da ordem de uma centena de milionésimo de GeV. A massa da partícula tau é aproximadamente 2 GeV. Os bósons X (ou W) mais e menos e o Z^0 têm massas em torno de 100 GeV. Espera-se que o quark mais pesado, o quark t , tenha uma massa em torno de 170 GeV. Todas estas massas violam as simetrias especiais da aproximação de massa nula.

VIOLAÇÃO ESPONTÂNEA DE SIMETRIA

O que faz estas massas diferentes de zero, e o que as faz tão diferentes umas das outras? O mecanismo que opera no modelo padrão é pelo menos parcialmente entendido. Ele está relacionado com a existência de um novo tipo (ou novos tipos) de bóson. Pelo menos um deste tipo de bóson pode ser observado com as energias disponíveis no momento ou que estarão em breve disponíveis no novo acelerador do CERN. Este bóson é chamado de bóson de Higgs (ou higgson).^{*} Ele foi na verdade discutido não apenas por Peter Higgs de Edimburgo (em um belo espécimen de trabalho teórico), mas também, de diversas maneiras, por muitos outros físicos de partículas elementares, incluindo Tom Kibble, Gerald Guralnik e C. R. Hagen e Robert Brout e François Englert. Além disso, foi proposto em termos gerais bem antes por meu amigo Philip Anderson, um físico teórico da matéria condensada e atualmente vice-diretor do Conselho Científico do Instituto Santa Fé. Philip ganhou um prêmio Nobel por seu trabalho na física da matéria condensada, mas sua antecipação da idéia geral do bóson de Higgs não foi amplamente reconhecida pelos físicos das partículas elementares. Não posso evitar a vil suspeita de que, se sua contribuição tivesse sido reconhecida de modo mais amplo, seríamos poupados dos seus eloqüentes argumentos públicos contra a construção de novos aceleradores de partículas. Haveria algum modo pelo qual ele pudesse se opor fortemente a uma máquina construída em parte para descobrir o bóson de Anderson-Higgs, ou mesmo de Higgs-Anderson?

Por questão de justiça, sugiro que mantenhamos o termo “higgson” mas utilizemos o termo “Anderson-Higgs” para denotar o mecanismo que quebra a simetria da aproximação de massa nula e é responsável pelas várias massas diferentes de zero das partículas no modelo padrão. O mecanismo de Anderson-Higgs é um caso especial de um processo mais geral chamado quebra espontânea de simetria.

Como exemplo familiar deste processo, imagine um ímã comum no qual todos os ímãs atômicos diminutos estão alinhados uns com os outros. As equações das partículas elementares que compõem o ímã, em interação umas com as outras mas sem estar sujeitas a qualquer influência externa, são perfeitamente simétricas em relação às direções do espaço; elas são indiferentes, por assim dizer, à direção que o ímã aponta. Mas, então, qualquer influência externa, não importa o quão fraca seja, diga-

^{*} Como em geral as partículas elementares têm a terminação *-on* em seus nomes (por exemplo, fóton, bóson), o autor batizou o bóson de Higgs como “higgson”, que em inglês pode ser foneticamente confundido com “Higgs’son”, o filho (son) de Higgs. (N. do T.)

mos um campo magnético externo muito fraco, pode determinar a orientação do ímã, que de outra forma seria completamente arbitrária.

As equações das partículas que compõem o ímã possuem uma simetria porque tratam todas as direções da mesma forma, mas cada solução individual das equações viola a simetria ao apontar para uma direção definida. Contudo, o conjunto de todas estas soluções não-simétricas realmente possui a simetria porque a toda direção corresponde uma solução e o conjunto de todas as soluções é perfeitamente simétrico.

A essência da quebra espontânea de simetria está nesta mesma circunstância: equações com uma simetria particular podem ter soluções que individualmente violem esta simetria, embora o conjunto de todas as soluções seja simétrico.

A maior virtude do mecanismo de Anderson-Higgs de quebra espontânea de simetria é que permite aos férmions e aos quanta de interação fraca adquirir massas diferentes de zero sem introduzir infinitos desastrosos nos cálculos da dinâmica quântica dos sabores. Os teóricos de partículas procuraram durante certo tempo por tais mecanismos “suaves” que produzem partículas com massas diferentes de zero antes que fosse mostrado que o higgs poderia realizar a tarefa.

A VIOLAÇÃO DA SIMETRIA TEMPORAL

O mecanismo de Anderson-Higgs pode ser o responsável não apenas pelas massas diferentes de zero no modelo padrão mas também pelos pequenos desvios de simetria sob reversão temporal observados na física das partículas elementares. Na verdade, a teoria das supercordas heteróticas, a única candidata séria a uma teoria unificada das partículas elementares, possui esta simetria. A violação seria um outro exemplo de equações simétricas tendo um conjunto simétrico de soluções assimétricas, com apenas uma delas encontrada na natureza. Neste caso haveria duas soluções, diferindo na direção do tempo.

Esta violação da simetria temporal no nível das partículas elementares não parece ser de qualquer modo capaz de explicar a seta (ou setas) do tempo — as diferenças conspícuas que observamos continuamente entre eventos que se movem para a frente no tempo e as versões correspondentes destes eventos que se movem para trás. Ao contrário, estas diferenças conspícuas surgem das condições iniciais particulares no começo da expansão do universo, como já mencionamos anteriormente e como deveremos discutir com maiores detalhes mais tarde.

A VIOLAÇÃO DA SIMETRIA MATÉRIA-ANTIMATÉRIA

Se a operação matemática que troca o tempo que evolui para a frente com o tempo que evolui para trás for combinada com a troca da esquerda pela direita e também com a troca de matéria pela antimatéria, a operação resultante, chamada CPT, é uma simetria exata da teoria quântica de campos. Deste modo, não deveria ser uma surpresa completa que a violação da simetria temporal também violasse a simetria entre matéria e antimatéria. Poderá esta violação ser responsável pela assimetria resultante do mundo que vemos à nossa volta, onde quase tudo é composto por matéria, e a antimatéria é produzida apenas nas raras colisões de alta energia?

Esta proposta foi feita muitos anos atrás por Andrei Sakharov, o falecido físico russo bem conhecido por sua proposta (junto com Zel'dovich) da idéia crucial da bomba soviética de hidrogênio e mais tarde por seus esforços em prol da paz e dos direitos humanos na União Soviética. Sakharov reuniu um conjunto de idéias que sofreu modificações consideráveis nas mãos de outros físicos teóricos mas que sempre incluiu o seguinte ponto: bem no início o universo primordial era simétrico em relação à matéria e à antimatéria, mas em breve produziu a presente situação assimétrica por meio do mesmo efeito que produz a violação espontânea da simetria temporal. A proposta de Sakharov parecia bastante estranha à primeira vista, mas com suas transformações sucessivas ela começou a parecer melhor e melhor. Parece que a violação espontânea de simetria é realmente a responsável pela predominância da matéria sobre a antimatéria.

SPIN

O higgson envolvido no mecanismo de Anderson-Higgs de quebra espontânea de simetria é um tipo de bóson diferente dos quanta das interações gluônica, fraca e eletromagnética. Uma diferença muito importante está nos valores de momento angular intrínseco ou spin, que avalia o quanto a partícula gira em torno de seu próprio eixo. A mecânica quântica fornece uma unidade natural para o spin, e em termos desta unidade um bóson pode ter um spin 0, 1, 2, e assim por diante, enquanto um férmion pode ter um spin 1/2, 3/2, 5/2, e assim por diante.

Todos os férmions elementares do modelo padrão têm spin 1/2. Todos os quanta da cromodinâmica quântica e da mecânica quântica dos sabores têm spin 1. Entretanto, o higgson deve ter spin 0.

COMO PODE HAVER TANTAS PARTÍCULAS ELEMENTARES?

A grande multiplicidade dos estados de partícula nuclear observados foi explicada pela descoberta de que eles são compostos, formados de acordo com as regras da cromodinâmica quântica, a partir dos quarks elementares, antiquarks e glúons. Mas os quarks, com suas três cores e seis sabores, e os glúons, que aparecem em oito (em vez de nove) combinações de cores, são já bastante numerosos. Além disso, fora do reino das partículas nucleares que interagem fortemente, encontramos, além do elétron e seu neutrino, o múon e seu neutrino, e a partícula táuon e seu neutrino. E todos os férmions têm antipartículas que são diferentes de si mesmos. Além disso, temos os fótons e os três bósons intermediários das interações fracas. O higgson completa a lista de partículas elementares exigida pelo modelo padrão.

Somemos o número total. Temos 18 quarks, três partículas semelhantes ao elétron e três neutrinos, perfazendo ao todo 24 férmions. Com suas antipartículas, temos 48. Agora temos os quanta conhecidos: os oito glúons, o fóton e os três bósons intermediários das interações fracas, fazendo o total chegar a sessenta. Com o higgson, se existir pelo menos um, obtemos 61.

Para o observador leigo, parece loucura supor que a lei básica de toda a matéria no universo poderia repousar sobre uma coleção tão grande e heterogênea de objetos fundamentais. O especialista em partículas elementares só pode concordar. A solução do quebra-cabeça deve estar na incorporação do modelo padrão a uma teoria maior que tenha uma arbitrariedade menor, de preferência uma teoria unificada de todas as partículas e de todas as suas interações. No momento, enquanto o modelo padrão for apoiado por copiosas evidências experimentais, qualquer teoria unificada deve, na ausência do apoio direto das observações, ser considerada especulativa. Uma teoria unificada deve é claro ser passível de ser testada, isto é, capaz de fazer previsões que possam ser verificadas pela observação. Mas como poderá tal teoria lidar com a profusão de partículas elementares com que deparamos no modelo padrão?

Poderia haver duas saídas. A primeira é supor que as partículas elementares de hoje são na verdade compostas, e que a descrição final da matéria envolve um número menor de novos e verdadeiros constituintes elementares. Não acredito que haja qualquer evidência teórica ou experimental hoje que aponte para esta direção. Além do mais, os novos constituintes hipotéticos teriam eles mesmos de ser bastante numerosos para explicar a grande variedade de propriedades das partículas elementares conhecidas. Portanto, a redução obtida no número de objetos elementares não seria dramática.

Uma idéia relacionada é que o processo recém-discutido, de explicar os objetos aparentemente elementares num nível como compostos por objetos ainda mais elementares no nível mais abaixo, continuaria para sempre. Tal cadeia de composições sem fim foi defendida na República Popular da China pelo falecido presidente Mao (se ele parece um recruta improvável neste campo de conhecimentos, lembre-se de que Lênin escreveu sobre o elétron e Stálin interveio em numerosas controvérsias nas ciências, nas humanidades e nas artes, algumas vezes com conseqüências desastrosas para aqueles que ele atacou). De acordo com as idéias do presidente, o quark foi chamado durante certo tempo “criança camada” em chinês, lembrando o termo “criança alicerce” para o átomo. Sob o poder de Mao e do Bando dos Quatro, era sem dúvida desaconselhável aos cientistas chineses discordar muito da idéia de uma seqüência infinita de camadas. Sob os regimes mais suaves que se seguiram, entretanto, a incursão do falecido presidente na física teórica tem sido bastante ignorada.

A terceira possibilidade é que uma teoria simples seja subjacente ao sistema de partículas elementares, e de acordo com ela o número de tais partículas pode ser considerado infinito, com apenas um número finito delas acessíveis à detecção experimental com as energias disponíveis. A teoria das supercordas pertence a esta categoria de explicações.

CAPÍTULO 14

A TEORIA DAS SUPERCORDAS: UNIFICAÇÃO POR FIM?

Pela primeira vez na história temos na teoria das supercordas — e especificamente na teoria das supercordas heteróticas — uma proposta séria de teoria unificada de todas as partículas elementares e suas interações, e, portanto, de todas as forças da natureza. O próximo passo é extrair previsões da teoria e compará-las com o que é conhecido, e também com o que em breve será mensurável das partículas elementares. Um traço marcante desta comparação é a ocorrência nas equações de uma energia ou massa característica, a massa de Planck, perto da qual a unidade completa da teoria das supercordas começa a se manifestar. Mas o equivalente em energia da massa de Planck é enorme quando comparado com a escala de energia dos fenômenos detectáveis no laboratório. Portanto, as partículas elementares que podem ser estudadas de forma mais ou menos direta no laboratório pertencem todas ao “setor de pequenas massas” da teoria.

O SETOR DE PEQUENAS MASSAS

Um número grande mas finito de partículas, digamos entre uma e duas centenas, têm massas suficientemente pequenas para que possam aparecer nas experiências com aceleradores no futuro próximo. Estas partículas e suas interações constituem o setor de pequenas massas da teoria das supercordas.

Todas as outras partículas elementares, um número infinito delas, são enormemente massivas, de modo que sua presença pode ser verificada apenas por meio de processos virtuais, por exemplo, a geração de forças através da troca virtual de quanta. Alguns destes processos virtuais podem ser de uma importância crítica, tais como aqueles que per-

mitem à gravitação einsteiniana ser parte da teoria sem gerar infinitos embaraçosos.

O modelo padrão, que inclui as três famílias de férmions, suas antipartículas e os 12 quanta conhecidos, forma parte do setor de pequenas massas da teoria unificada. O gráviton, com sua massa nula, obviamente pertence também ao setor de pequenas massas, assim como outras partículas previstas.

A RENORMALIZABILIDADE DO MODELO PADRÃO

O modelo padrão distingue-se da, digamos, teoria do gráviton por uma propriedade maravilhosa chamada renormalizabilidade. Isto significa que ele pode ser separado com uma excelente aproximação do resto da teoria unificada sem encontrar infinitos que tornam os cálculos destituídos de sentido. A porção renormalizável da teoria unificada pode ser utilizada por si só, quase como se fosse a teoria final. Contudo, há um preço a ser pago por esta separação, que no caso do modelo padrão é a ocorrência de mais de uma dúzia de números arbitrários que não podem ser calculados e devem, em vez disso, ser tirados da experiência. Estes números representam a dependência do modelo no resto da teoria fundamental, inclusive o conjunto infinito de estados de massa grande.

A COMPARAÇÃO, DE MODO ALGUM IMPOSSÍVEL, COM A OBSERVAÇÃO

Em razão do fato de as razões entre a massa de Planck e as massas diferentes de zero do setor de pequenas massas serem tão grandes, uns poucos físicos teóricos e muitos autores leigos afirmaram que as previsões da teoria são difíceis ou impossíveis de ser verificadas experimentalmente. Há muitos modos possíveis de confrontar a teoria com os resultados experimentais.

1. Para começar, a teoria das supercordas já prevê, no limite apropriado, a teoria geral da gravitação de Einstein. A incorporação automática da gravitação einsteiniana em uma teoria quântica de campos unificada sem encontrar as dificuldades usuais (com infinitos) já é um grande triunfo.
2. O próximo desafio é determinar se a teoria das supercordas pode predizer ou não, em uma aproximação adequada, o modelo padrão.

3. Mas lembre-se de que o modelo padrão tem um número muito grande de constantes arbitrárias (parâmetros), cujos valores a teoria deveria ser capaz de prever.
4. O setor de pequenas massas da teoria das supercordas contém novas partículas adicionais, cujas propriedades previstas podem ser contrastadas com a observação.
5. Em particular, o modelo padrão está contido em um modelo renormalizável maior que é parte do setor de pequenas massas. As propriedades desta teoria mais abrangente, incluindo seu conteúdo de partículas e as constantes que descrevem as massas e as interações das partículas, podem ser todas comparadas com os resultados das experiências.
6. Além disso, os efeitos virtuais do setor de grandes massas podem introduzir algumas correções observáveis na física do setor de pequenas massas.
7. Finalmente, a teoria das supercordas pode ter conseqüências na cosmologia que são verificáveis pela observação astronômica.

Assim, não precisamos nos desesperar para encontrar modos de comparar as previsões da teoria com os fatos da natureza, mas os teóricos devem prosseguir com a difícil tarefa de obter estas previsões.

UNIDADES BÁSICAS DE ENERGIA E OUTRAS QUANTIDADES

Qual é esta grande quantidade de energia que caracteriza a teoria das supercordas e de onde ela vem? Ela é a unidade básica de energia, deduzida a partir das constantes universais e fundamentais da natureza. Há três dessas constantes: c , a velocidade da luz no espaço vazio; h , a constante de Max Planck; e G , a constante gravitacional de Isaac Newton.

A constante h é a razão universal entre a energia de qualquer quantum de radiação e a frequência de vibração desta mesma radiação. Na prática, ela é usualmente empregada na forma \hbar , que significa h dividido por dois pi, onde dois pi é a razão familiar entre a circunferência de qualquer círculo e o seu raio. Werner Heisenberg costumava usar um prendedor de gravata em forma de \hbar como maneira de mostrar seu orgulho de ter descoberto a mecânica quântica. Este símbolo é tão familiar aos cientistas físicos que meu falecido amigo, o brilhante e divertido matemático Stanislaw Ulam, costumava descrever o \hbar , o “negro” l polonês de seu primeiro nome, como l dividido por dois pi.

G é a constante universal na fórmula de Newton para a força gravitacional entre dois pares quaisquer de partículas puntiformes, que é igual

a G vezes o produto das duas massas dividido pelo quadrado da distância entre elas. (Newton mostrou que esta mesma fórmula se aplica a dois corpos esfericamente simétricos se a distância utilizada for a distância entre os seus centros, deste modo a fórmula pode ser empregada de forma aproximada para o Sol e os planetas, e para satélites como a Lua.)

Multiplicando e dividindo potências convenientes das três constantes universais, c , \hbar , e G , podemos construir a unidade fundamental de qualquer quantidade física, como, por exemplo, o comprimento, o tempo, a energia ou a força. O comprimento fundamental é cerca de 1 centímetro dividido por um número escrito como 1 seguido de 33 zeros. Dividindo este comprimento pela velocidade da luz, obtemos a unidade fundamental de tempo, que é da ordem de um segundo dividido por um número escrito como 1 seguido de 44 zeros.

Como comparação, as unidades com as quais a maioria das pessoas está acostumada são arbitrárias; elas não são construídas a partir das constantes universais da natureza. Embora o pé não seja mais (se é que alguma vez o foi) o comprimento médio do pé calçado dos primeiros dez homens a deixar a igreja no domingo, ainda assim ele não é fundamental. Nem o metro, definido antigamente como o comprimento de uma barra de metal específica guardada em um cofre perto de Paris e hoje em dia como um certo múltiplo do comprimento de onda da luz emitida pelo átomo de criptônio em um determinado estado excitado.

AS MASSAS DAS PARTÍCULAS E A UNIDADE BÁSICA

A unidade fundamental de massa, a massa de Planck, é cerca de uma centena de milionésimo de 1 grama. Ela pode não parecer enorme na escala humana, mas na escala das massas do nêutron e do próton, ambas aproximadamente iguais a um GeV, ela é deveras grande — cerca de 20 bilhões de bilhões de vezes maior. Manipulando a relação, podemos dizer que as massas do nêutron e do próton são extremamente pequenas em termos de unidades fundamentais. A massa do elétron é ainda cerca de 2 mil vezes menor. Por que ocorrem estes números muito pequenos? A resposta curta é que nós ainda não o sabemos. A teoria das supercordas heteróticas não contém explicitamente quaisquer parâmetros ajustáveis. Se ela é de fato a teoria correta, deve gerar por si mesma as razões diminutas entre as massas das partículas conhecidas e a unidade fundamental de massa. Verificar pelo cálculo que ela o faz será um dos testes mais severos da teoria.

Até aqui temos apenas pistas de como os números pequenos podem surgir na teoria. Uma suposição bastante óbvia é a de que há

uma aproximação útil na qual, para todas as partículas do setor de pequenas massas, são atribuídas massas nulas. Correções a esta aproximação que quebram a simetria (inclusive aquelas induzidas pelo mecanismo de Anderson-Higgs) se tornam então responsáveis pelas massas reais, pequenas mas diferentes de zero. Uns poucos valores de massa, incluindo as massas do fóton e do gráviton, não sofrem qualquer correção e permanecem nulas.

As energias disponíveis nas experiências em andamento no presente são da ordem de um milhar de GeV; em breve poderão ser algo dez vezes maior, mas não mais do que isto. Elas ainda são muito pequenas quando as comparamos com a unidade fundamental de energia, cerca de 20 bilhões de bilhões de GeV. Como os experimentais não podem produzir no laboratório partículas com massas maiores do que as energias disponíveis nos seus aceleradores, eles estarão tratando diretamente apenas com partículas que pertencem ao setor de pequenas massas.

O SIGNIFICADO DO TERMO SUPERCORDA

Quais as observações gerais que podem ser feitas sobre o conteúdo de partículas da teoria das supercordas heteróticas? A resposta a esta questão está relacionada com o significado da palavra corda e do prefixo super-.

Corda indica que a teoria pode ser considerada como a que descreve as partículas em termos de pequenos laços em vez de pontos; a dimensão típica de cada laço é aproximadamente a unidade fundamental de comprimento, cerca de um bilionésimo de trilionésimo de trilionésimo de centímetro. Estes laços são tão pequenos que para muitos propósitos há uma descrição equivalente em termos de partículas puntiformes, na verdade uma infinidade de tipos de partículas puntiformes. Como estão estas diferentes partículas relacionadas umas com as outras? Em particular, como estão relacionadas aquelas do setor de pequenas massas com as que têm massas comparáveis à massa de Planck ou massas maiores?

Uma boa analogia é a corda do violino, que tem um modo fundamental de vibração e um número infinito de outros modos (os harmônicos) de frequências musicais cada vez mais altas. Mas na mecânica quântica a energia é a frequência multiplicada pela constante de Planck h . As partículas do setor de pequenas massas podem ser visualizadas como os modos mais baixos dos vários tipos de laços de corda que surgem na teoria das supercordas, enquanto partículas com massas comparáveis à unidade fundamental de massa representam os modos mais baixos seguintes, e as partículas que têm mais massa ainda representam os modos mais altos, e assim por diante.

O prefixo super- indica que a teoria tem "supersimetria" aproximada, o que por sua vez significa que para cada férmion na lista de partículas há um bóson correspondente e vice-versa. Se a supersimetria do sistema de partículas elementares fosse exata, cada férmion teria precisamente a mesma massa que seu bóson correspondente. Entretanto, a supersimetria dá um jeito de "quebrar-se", de um modo que ainda é compreendido de forma obscura, fazendo com que as massas dos férmions e dos bósons correspondentes fiquem separadas pelo que gosto de chamar uma "superlacuna". Esta não é exatamente a mesma para cada par férmion-bóson, mas é provavelmente sempre da mesma ordem geral de magnitude. Se a superlacuna é qualquer coisa da ordem da unidade fundamental de massa, podemos desistir de observar diretamente no laboratório os superparceiros das partículas elementares conhecidas.

OS SUPERPARCEIROS E OS NOVOS ACELERADORES

Se, porém, o equivalente em energia da superlacuna é de apenas centenas ou mesmo milhares de GeV, os superparceiros podem vir a ser observados nos próximos anos, desde que o novo acelerador do CERN seja construído. A chance de observá-los seria maior se o SSC de energia mais alta tivesse sido completado. A análise teórica de certos resultados experimentais indica que a superlacuna tem provavelmente o tamanho certo para que possa ser preenchida pelo SSC e talvez pela máquina do CERN. Assumindo que estas indicações estão corretas, acredito que a perspectiva de descobrir os superparceiros é a mais excitante de todas as motivações específicas para construir novos aceleradores. Além disso, há sempre o objetivo inespecífico de explorar o desconhecido e verificar se surge alguma física imprevista.

Os nomes atribuídos aos superparceiros hipotéticos seguem dois padrões diferentes. Quando a partícula conhecida é um bóson, ao férmion correspondente é dado um nome que termina com o diminutivo italiano *ino*, empregado pela primeira vez (de uma maneira diferente) por Fermi ao nomear o neutrino. Assim, o parceiro esperado do fóton é o fotino, o do gráviton, o gravitino, e assim por diante. Como os bósons eletricamente carregados que transmitem a interação fraca são muitas vezes chamados de *W* mais e *W* menos, os férmions correspondentes previstos adquiriram a denominação bizarra de "winos".* No caso em que a partícula conhecida é um férmion, o parceiro bosônico é chamado pelo mesmo nome que o férmion mas com a letra "s" como prefixo, pre-

* Em inglês, *wino* significa beberão. (N. do T.)

sumivelmente para indicar super-. Desta maneira temos palavras bastante estranhas como squarks e selétrons. Gostaria de enfatizar que não sou responsável por estes nomes, embora deva admitir, relutantemente, ter estado presente quando o sufixo *ino* foi escolhido para os parceiros fermiônicos dos bósons conhecidos.

Como o superparceiro de um bóson é um férmion e vice-versa, os spins dos dois superparceiros devem ser sempre diferentes, sendo um deles um número inteiro e o outro um número inteiro mais $1/2$. De fato, os dois spins devem diferir de $1/2$. Os bósons de Higgs (ou higgsons) têm spin 0 e seus parceiros (higgsinos) têm spin $1/2$. As três famílias de férmions têm spin $1/2$ e seus parceiros, squarks, selétrons e assim por diante, têm spin 0. Os quanta, glúons, fótons, os bósons X ou W e o Z^0 , têm spin 1 e os seus parceiros, gluínos, fotinos, e assim por diante, têm spin $1/2$. O gráviton tem spin 2 e seu parceiro, o gravitino, spin $3/2$.

Na teoria das supercordas, o modelo padrão é incorporado a uma teoria mais abrangente renormalizável, que podemos chamar modelo superpadrão, contendo vinte quanta, os férmions usuais e alguns higgsons, juntamente com os superparceiros de todas estas partículas. A previsão da validade do modelo superpadrão fornece muitos testes experimentais da teoria das supercordas.

A ABORDAGEM À MASSA DE PLANCK

À medida que a energia cresce e o setor de pequenas massas, o setor diretamente acessível à experiência, é deixado para trás, a teoria das supercordas prediz que as interações gluônica, eletromagnética e a fraca convergem uma para a outra em intensidade e revelam sua relação íntima. Extrapolações dos resultados experimentais atuais para altas energias conduzem à mesma conclusão desde que a quebra espontânea de simetria seja assumida, com uma superlacuna que não seja muito grande. Assim, já há alguma evidência indireta da supersimetria. Ao mesmo tempo, as simetrias entre os férmions também se fazem asseverar.

Agora façamos com que a energia continue a crescer. Pode ser que aconteça ou não que, num intervalo de energia um pouco abaixo da massa de Planck, o modelo superpadrão dê lugar temporariamente a uma versão supersimétrica de uma "teoria grã-unificada" antes de exibir, nas vizinhanças da massa de Planck, os primeiros modos excitados da supercorda.

Embora nenhum de nós viva para ver energias comparáveis à massa de Planck produzidas no laboratório, tais energias estiveram disponíveis no universo primordial quando este começou a expandir. A

unidade fundamental de tempo, cerca de uma centena de milionésimo de trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo de segundo, mede o período durante o qual o universo diminuto experimentou os efeitos totais da teoria das supercordas. Haverá hoje qualquer evidência cósmica restante que poderia testar a validade da teoria das supercordas por meio de seus efeitos neste crucial mas remoto instante de tempo?

Os teóricos não estão certos se tal evidência está presente ou não. Aquele breve intervalo foi quase certamente seguido por um período de inflação, uma expansão explosiva do universo que foi sucedida por uma expansão mais gradual que ainda prossegue. A inflação varreu quase totalmente muitas características do universo primordial, e pode ter assim suprimido numerosas conseqüências da teoria das supercordas. Mas, apesar de tudo, os vínculos que ela impõe ao caráter da inflação podem permitir que a teoria seja testada por meios cosmológicos.

O mesmo tipo de raciocínio se aplica à condição inicial do universo, a qual, de acordo com a proposta de Hartle e Hawking, está amarrada à teoria quântica de campos unificada. Assumindo que tanto a idéia deles como a teoria das supercordas estejam corretas, a condição inicial fica determinada de forma única, mas seus efeitos no universo posterior foram filtrados por meio do processo de inflação.

A MULTIPLICIDADE APARENTE DAS SOLUÇÕES

Além da grande disparidade entre a escala característica de energia da teoria das supercordas e as energias disponíveis para as experiências com partículas elementares, há uma outra razão para que uns poucos físicos tenham expressado suas dúvidas sobre se a teoria será passível de teste ou não. Isso tem a ver com a descoberta de numerosas soluções aproximadas das equações da teoria das supercordas heteróticas.

Cada solução fornece, entre outras coisas, uma lista de partículas que têm massa nula na aproximação utilizada. É plausível assumir que estas partículas são as mesmas que constituem o setor de pequenas massas da teoria quando as correções devidas às pequenas massas diferentes de zero são incluídas. O conteúdo de partículas de massa nula de cada solução aproximada pode então ser comparado com o conteúdo do modelo superpadrão. Para certas soluções, há na verdade concordância: o setor de pequenas massas contém o modelo superpadrão e umas poucas partículas adicionais, inclusive o gráviton e o gravitino.

O problema é que milhares de outras aproximações surgiram, e parece que muitas mais serão encontradas. Portanto, não é em absoluto impossível que a situação observada seja compatível com uma solução da teoria das supercordas, mas o que fazer com as demais soluções?

Há muitas respostas possíveis. Uma, é claro, é que a teoria está errada, mas não vejo qualquer razão para chegar a esta conclusão drástica a partir da existência de um excesso de soluções aproximadas. Uma segunda possibilidade é que a dificuldade se origine inteiramente da aproximação, a qual não é em absoluto plenamente justificada, mas meramente conveniente, e que, quando a aproximação for melhorada, todas as soluções menos uma se mostrarão espúrias e poderão ser jogadas fora. Uma versão modificada desta possibilidade é que apenas umas poucas soluções genuínas sobreviverão.

AÇÃO

Para discutir as respostas possíveis restantes ao problema das soluções múltiplas, é útil introduzir uma quantidade importantíssima chamada ação, usualmente designada pelo símbolo S . Ela foi introduzida na física newtoniana há muito tempo e provou ser bastante útil, mas com o advento da mecânica quântica ela se tornou não apenas útil mas essencial. (A ação tem as dimensões de energia vezes o tempo; a constante de Planck dividida por dois pi, \hbar , tem as mesmas dimensões e pode ser considerada como a unidade fundamental de ação.) Lembre que as probabilidades para histórias com granulação grosseira na mecânica quântica são somas sobre os valores da quantidade D para pares de histórias completas e finamente granuladas. Uma teoria na mecânica quântica atribui a cada história finamente granulada um valor particular para a ação S , e são estes valores da ação, junto com a condição inicial, que determinam os valores de D .

É óbvio que é altamente desejável descobrir a fórmula da ação S para a teoria das supercordas heteróticas. Até aqui, contudo, isto tem se mostrado um objetivo elusivo. O que parece estar ao nosso alcance hoje, como consequência do trabalho de meu antigo aluno de doutorado Barton Zwiebach, Michio Kaku e por um grupo em Quioto, é expressar a ação como a soma de uma série infinita, mas a adição desta série permanece uma tarefa tremenda.

Pode ser esclarecedor comparar a situação com um exercício que meu falecido colega Dick Feynman desenvolveu em 1954. (Ele discutiu seu projeto comigo na época em que visitei o Caltech nos idos de 1954, quando me ofereceram e aceitei um emprego lá. De fato, eu mesmo havia começado um projeto similar.) Feynman começou imaginando que Einstein nunca tivera sua brilhante intuição sobre a natureza da gravitação por volta de 1914, a percepção de que ela teria de obedecer ao princípio de invariância da relatividade geral e se relacionar com a geo-

metria do espaço-tempo. Dick se perguntou se seria possível, sem aquela intuição, construir a teoria pela força bruta. Ele descobriu que isto poderia ser feito. Entretanto, a ação surgiu na forma de uma série infinita, e a soma desta série era virtualmente impossível na ausência de um ponto de vista geométrico e do princípio de invariância. Este princípio, a relatividade geral, conduz à resposta de forma direta, sem necessidade do método da força bruta ou da série infinita. De fato, Einstein compreendeu, com base na relatividade geral, que tipo de fórmula precisava para descrever a gravitação; ele foi capaz de aprender a matemática relevante com um antigo colega de classe, Marcel Grossmann, e escrever a fórmula para a ação, a partir da qual a equação da página 103 pode ser deduzida.

Talvez a situação na teoria das supercordas seja similar. Se os teóricos entenderem o princípio de invariância da teoria das supercordas, poderão ser capazes de escrever a fórmula da ação rapidamente, sem lançar mão da soma da série infinita. (Enquanto esperamos que este princípio seja descoberto, como deveríamos chamá-lo? Relatividade marechal-de-campo? Relatividade generalíssima? Certamente ele vai bem além da relatividade geral.) De qualquer modo, uma compreensão profunda da teoria das supercordas caminhará de mãos dadas com a descoberta da fórmula da ação S .

Como observado anteriormente, a idéia que motivou o trabalho que conduziu em primeiro lugar à teoria das supercordas foi o princípio de autoconsistência do “cordão de sapatos”, uma idéia simples e poderosa mas ainda não formulada na linguagem certa para descobrir a ação ou o princípio de simetria completo subjacente à ação. Quando a teoria das supercordas for expressa na linguagem da teoria quântica de campos e quando sua ação e suas simetrias forem descobertas, ela terá verdadeiramente atingido a maturidade.

AÇÃO EFETIVA

Partindo da ação, podemos em princípio calcular uma quantidade relacionada, que denotarei pelo símbolo \bar{s} . Um teórico poderia chamá-la por algo como “ação euclidiana quanticamente corrigida”. Ela é um tipo de média de uma versão modificada da ação \bar{s} , em que a modificação envolve a alteração do caráter da variável tempo. Podemos nos referir à quantidade \bar{s} como a “ação efetiva”. Ela desempenha um papel importantíssimo na interpretação da teoria. Em primeiro lugar, é em termos de \bar{s} que Hartle e Hawking expressaram sua condição inicial para o universo. Em segundo lugar, é para a quantidade \bar{s} que devemos olhar em

busca de orientação sobre se realmente há muitas soluções para a teoria das supercordas. De alguma forma esta quantidade, calculada para as diferentes soluções, deve fazer a discriminação entre elas.

Raciocinando a partir da física clássica, onde o princípio de mínima ação fornece um modo excelente de formular a dinâmica clássica, alguns teóricos poderiam argumentar que para todos os propósitos físicos a solução correta — aquela que caracteriza o universo real — teria de ser aquela com o menor valor para a ação efetiva \bar{s} . Este poderia ser na verdade o critério certo para escolher a solução correta.

Entretanto, como estamos lidando com a mecânica quântica, pode acontecer que não haja uma solução correta única para o universo, mas, ao contrário, uma situação probabilística na qual todas as soluções verdadeiras são alternativas possíveis, cada uma com sua própria probabilidade, que fica cada vez menor à medida que o valor de \bar{s} fica maior. De fato, a fórmula para a probabilidade em termos de \bar{s} seria uma exponencial decrescente, descrita por uma curva como a que é mostrada na página 146. A solução com o menor valor de \bar{s} teria então a maior probabilidade de caracterizar o universo, mas as outras soluções também teriam alguma chance.

UMA SOLUÇÃO PARTICULAR DETERMINADA PELO ACASO?

A solução particular que se aplica ao universo determinaria então a estrutura do sistema de partículas elementares. De fato, ela faria mais do que isto. De modo bastante notável, ela determinaria mesmo o número de dimensões do espaço.

Um modo de pensar sobre o aspecto espacial da corda heterótica é que a teoria começa descrevendo um espaço-tempo com uma dimensão temporal e nove dimensões espaciais; várias soluções então correspondem ao colapso de algumas dimensões espaciais, deixando apenas as restantes que são observáveis. Se a interpretação probabilística de \bar{s} é válida, então o caráter tridimensional do espaço no nosso universo é uma consequência da ocorrência ao acaso de uma solução particular das equações da supercorda, como é, por exemplo, a existência de um número particular de famílias de férmions contendo conjuntos particulares de partículas.

Tal situação probabilística é o resultado mais intrigante possível das tentativas atuais de resolver o quebra-cabeça apresentado pelas muitas soluções aparentes às equações da teoria das supercordas. Suponha que seja o resultado correto. Podemos pensar sobre a árvore ramificada das histórias com granulação grosseira alternativas do universo, com uma

probabilidade para cada uma, começando com uma primeira ramificação que seleciona uma solução particular das equações da supercorda.

As previsões da teoria das supercordas, dependam ou não de tal “escolha” probabilística da solução, terão de ser comparadas com nossa experiência de espaço tridimensional, assim como com todas as propriedades do sistema de partículas elementares.

Se a teoria das supercordas heteróticas realmente se mostrar capaz de fazer as previsões corretas em todos os casos onde é possível testá-la, o problema da teoria fundamental das partículas elementares terá presumivelmente sido resolvido. A dinâmica subjacente à evolução do estado do universo será conhecida. Mas a descrição da história do universo depende da condição inicial, assim como dos resultados ao acaso de todas as ramificações da árvore da história universal.

UNIVERSOS MÚLTIPLOS?

Até aqui a cosmologia quântica que temos discutido se referiu a histórias alternativas do universo, tratado como uma entidade única que abarca toda a matéria em todos os lugares. Mas a cosmologia quântica está em um estado de movimento e são abundantes as idéias especulativas de grande interesse, cujo status está ainda em questão; algumas destas idéias se referem, de um modo ou de outro, aos universos múltiplos. Como *uni* significa um, isto soa como uma contradição de termos, e talvez uma nova palavra ajude a evitar pelo menos a confusão lingüística que poderia surgir se algumas destas idéias se revelarem apenas parcialmente corretas. Podemos empregar o termo “multiversos” para nos referirmos ao conjunto completo de universos, do qual o nosso universo familiar é um membro.

A introdução de universos múltiplos é destituída de sentido a menos que nosso universo seja em grande parte autônomo. Uma proposta é que os outros universos sejam “universos-bebês” virtualmente criados e destruídos nos processos quânticos, como os quanta virtuais que transmitem as forças na teoria quântica de campos. Como foi visualizado por Stephen Hawking e outros, a criação e a destruição virtuais de universos-bebês alteram os resultados dos cálculos na teoria das partículas elementares, mas não desafiam necessariamente de modo essencial o conceito de uma árvore ramificada de história para nosso universo.

Uma outra possibilidade sugerida é que existem numerosos universos, muitos deles comparáveis em tamanho ao nosso, mas que nosso

universo tem um contato limitado, se tiver algum, com os outros, mesmo que tal contato possa ter ocorrido em um passado distante ou se tornar possível em um futuro longínquo. Em um de tais cenários, os universos são como bolhas no multiverso, bolhas que se separaram umas das outras há muito tempo, inaugurando assim uma era sem comunicações entre os universos, que duraria por um tempo extremamente longo. Se este tipo de cenário de universos múltiplos revelar qualquer validade, poderemos tentar identificar o que acontece nas várias bolhas com diferentes ramos possíveis da história do universo. A porta estará aberta então para a noção de que fantasticamente muitos ramos da árvore das histórias com granulação grosseira são realmente concretizados, mas em bolhas diferentes. A probabilidade de cada história seria então essencialmente estatística, a fração dos vários "universos" na qual a história particular acontece.

Agora suponha que a interpretação probabilística das muitas soluções aproximadas da teoria das supercordas esteja correta, de modo que há muitas soluções verdadeiras associadas com os vários padrões de partículas elementares e com as várias dimensões do espaço. Então, se numerosos universos realmente existem como bolhas no multiverso, conjuntos deles poderiam ser caracterizados por diferentes soluções da teoria das supercordas, com o número de ocorrências caindo exponencialmente com o valor da ação efetiva \bar{s} .

Mesmo se tais especulações teóricas se mostrarem sem fundamento, a noção de universos múltiplos, em grande parte independentes, ainda fornece uma agradável (embora abstrata) maneira de *pensar* sobre probabilidades na cosmologia quântica.

“PRINCÍPIOS ANTRÓPICOS”

Alguns cosmólogos quânticos gostam de falar sobre o assim chamado princípio antrópico que exige que as condições no universo sejam compatíveis com a existência de seres humanos. Uma forma fraca do princípio afirma apenas que o ramo particular de história sobre o qual nos encontramos possui as características necessárias para que nosso planeta possa existir e para que a vida, inclusive a humana, possa florescer aqui. Nesta forma, o princípio antrópico é óbvio.

Suponha que a cosmologia correta realmente envolva um multiverso com uma distribuição probabilística de universos exibindo várias soluções da equação fundamental. Talvez aqueles que gostem de invocar um princípio antrópico acreditem que a solução que corresponde ao nosso universo seja improvável, enquanto soluções mais prováveis não

admitem a vida humana em quaisquer de suas histórias ramificadas. Mas neste caso nós teríamos ainda de dizer que o nosso universo deve ser compatível com a existência de todas as coisas observadas, inclusive a vida humana, provável ou não. Novamente, este princípio antrópico na forma fraca é uma trivialidade.

Na sua forma forte, contudo, tal princípio supostamente se aplicaria à dinâmica das partículas elementares e à condição inicial do universo, modelando de alguma forma estas leis fundamentais para produzir seres humanos. Esta idéia me parece tão ridícula que não merece mais discussões.

Não obstante, tentei encontrar alguma versão da idéia de um princípio antrópico que não fosse nem trivial nem absurda. O melhor que pude fazer é o que se segue. Entre as várias soluções das equações fundamentais (se de fato há múltiplas soluções exatas) e entre os vários ramos de história, certas soluções e certas histórias criam em muitos lugares condições favoráveis à evolução de sistemas adaptativos complexos, os quais podem atuar como SCUIs (sistemas de coleta e utilização de informações), observadores dos resultados das ramificações quânticas. (Estas condições incluem a prevalência de uma situação conveniente intermediária entre a ordem e a desordem.) A caracterização destas soluções e ramos coloca um problema teórico de grande interesse, o qual poderia, suponho, ser chamado a busca de condições SCUI. Uma característica menor incidental destas condições favoráveis aos SCUIs seria que a existência da Terra, da vida sobre a Terra, da vida humana em particular seria permitida e ocorreria em certos ramos.

Uma aplicação de tal pesquisa teórica poderia ser o refinamento dos cálculos da probabilidade de receber sinais de sistemas adaptativos complexos inteligentes em planetas que orbitem sistemas distantes (como no projeto SETI, a busca de inteligências extraterrestres). Há muitos fatores que entram em tais cálculos. Um deles é o problema do tempo que uma civilização tecnológica duraria e a capacidade e o interesse que teria em transmitir sinais, já que uma guerra catastrófica ou o declínio da tecnologia poderia dar-lhe um fim. Outro fator é a probabilidade de que um planeta possa abrigar sistemas adaptativos complexos que se assemelhem aos seres humanos, por exemplo. Aqui muitas considerações sutis podem entrar. Harold Morowitz, por exemplo, ao investigar as exigências feitas à atmosfera da Terra no tempo das reações químicas prebióticas que deram início à vida, concluiu que condições bastante restritivas foram impostas para que estas reações acontecessem. Outros especialistas, entretanto, não estão tão seguros.

Parece que no lugar de algum "princípio antrópico" impressionante deparamos com um conjunto de questões fascinantes mas bastante convencionais na ciência teórica sobre as condições para a evolução de sis-

temas complexos adaptativos nos vários ramos de história e em diversos tempos e lugares, dando a teoria fundamental das partículas elementares e o estado quântico inicial do universo.

O PAPEL DA CONDIÇÃO INICIAL

Temos deparado em diversas ocasiões com o papel da condição inicial em suprir a ordem no universo primordial que tornou possível a evolução subsequente, primeiro dos objetos celestes como as galáxias, as estrelas e os planetas, e então dos sistemas adaptativos complexos. Discutimos também uma das mais dramáticas conseqüências da condição inicial, que o tempo flui firmemente para frente através de todo o universo. Vamos agora explorar o fluxo do tempo com mais detalhes.

CAPÍTULO 15

AS SETAS DO TEMPO

Tempo retrógrado e tempo progressivo

Lembre-se do meteorito passando através da atmosfera e aterrissando. Se um filme da seqüência completa de eventos fosse passado para trás, saberíamos de imediato o instante de tempo em que ele foi revertido. Comprendemos que a razão última para a unidirecionalidade do tempo é que o universo estava em um estado muito especial há 10 ou 15 bilhões de anos. Olhando através do tempo em direção àquela configuração simples, estamos contemplando o que chamamos de passado; olhando para a outra direção, estamos contemplando o que chamamos de futuro estendido à nossa frente.

A compaticidade do estado inicial, no instante de tempo que alguns gostam de chamar big-bang, não caracteriza completamente sua simplicidade. Afinal de contas, os cosmólogos consideram possível, e mesmo provável, que em algum instante quase inconcebivelmente distante de tempo no futuro o universo recolapsará em uma estrutura muito pequena. Contudo, se for assim, esta estrutura será bastante diferente daquela que existiu no passado. Durante o período de recolapso, o universo não estará refazendo sua expansão ao contrário. A noção de que a expansão e a contração seriam simétricas em relação uma à outra é o que Stephen Hawking chama de seu “maior erro”.

RADIAÇÃO E REGISTROS

É fácil pensar nas muitas maneiras pelas quais o tempo progressivo e o tempo retrógrado são diferentes. Por exemplo, objetos quentes como estrelas e galáxias irradiam energia para o meio exterior. A forma mais familiar de energia irradiada consiste de fótons — como os de luz, ondas de rádio e raios gama —, os quais tornam possível a astronomia

óptica, a radioastronomia, a astronomia de raios gama e assim por diante. Somando-se à observação dos fótons, a astronomia de neutrinos vem recebendo recentemente o reconhecimento que merece, e algum dia teremos a astronomia de ondas gravitacionais. Todas se baseiam na detecção do fluxo de energia para o meio exterior na forma de partículas e ondas. Da mesma forma, quando vemos a luz que provém do fogo ou de uma lâmpada elétrica, nossos olhos estão detectando uma corrente de fótons emitidos. Se o tempo fosse revertido, a energia em cada um desses casos fluiria ao contrário na direção do meio interior. O fluxo de energia para o meio exterior pode transportar sinais; se uma estrela se transforma em uma supernova e subitamente se torna imensamente brilhante por um certo tempo, esta informação é propagada para o meio exterior com a velocidade da luz.

Uma outra diferença entre o passado e o futuro é a existência de registros do passado, como os traços deixados na mica pelas partículas carregadas emitidas quando da desintegração do núcleo há muito tempo. Registros similares de futuras desintegrações se fazem notar pela sua ausência. Esta assimetria entre passado e futuro é tão óbvia que tendemos a ignorá-la.

Nós humanos utilizamos a radiação para enviar sinais e os registros para aprender sobre o passado. Até fazemos e mantemos registros nós mesmos. Mas a existência de sinais e registros é em geral bastante independente da existência de sistemas adaptativos complexos, como nós, que empregam alguns deles.

A CONDIÇÃO INICIAL E A CAUSALIDADE

A assimetria temporal de sinais e registros é parte da causalidade física, o princípio de que os efeitos seguem as suas causas. A causalidade física remonta diretamente à existência de uma condição inicial simples do universo. Mas como esta condição inicial entra na teoria?

A fórmula quântica para a quantidade D , que dá as probabilidades das histórias alternativas do universo, já contém a assimetria entre passado e futuro. Em um extremo, correspondendo ao que chamamos de passado, ela contém a especificação de um estado quântico do universo primordial ao qual chamamos a condição inicial. No outro extremo, correspondendo ao futuro remoto, a fórmula contém uma soma sobre todos os estados possíveis do universo. Esta soma pode ser descrita como uma condição de completa indiferença quanto ao estado do universo no futuro distante.

Se a condição inicial fosse também de completa indiferença, não

haveria causalidade e nem muita história. Em vez disso, a condição inicial é uma condição simples e especial, até mesmo talvez aquela descrita por Hartle e Hawking, que não requer qualquer informação além da lei dinâmica que governa o sistema de partículas elementares.

Se a condição futura não fosse de completa indiferença, teríamos violações da causalidade e ocorreriam eventos que seriam inexplicáveis (ou pelo menos extremamente improváveis) em termos do passado mas que seriam exigidos (ou quase isso) pela condição especificada para o futuro distante. À medida que a idade do universo aumentasse, mais e mais de tais eventos ocorreriam. Não há evidência de tal situação refletindo predestinação, e evidências consideráveis lhe são contrárias. Portanto, na ausência de qualquer argumento novo e convincente, podemos desconsiderar a possibilidade de que a condição futura seja alguma coisa diferente da condição de indiferença. Entretanto, embora relegando-a ao domínio da ficção científica ou da superstição, ainda podemos considerar uma condição especial sobre o futuro como um caso interessante, contrário aos fatos, contrastando com a situação causal que acreditamos firmemente estar correta.

A partir da fórmula quântica básica para as probabilidades das histórias, com uma condição inicial conveniente, é possível deduzir todos os aspectos familiares da causalidade, tais como sinais e registros apontando do passado para o futuro. Todas as setas do tempo correspondem às várias características das histórias com granulação grosseira do universo, e a fórmula exhibe a tendência de todas estas setas em apontar para a frente e não para trás por toda parte.

A ENTROPIA E A SEGUNDA LEI

Das setas que marcam a distinção entre tempo progressivo e tempo retrógrado, uma das mais famosas é a tendência que a quantidade chamada entropia tem de aumentar (ou pelo menos não diminuir) em um sistema fechado, conduzindo ao princípio conhecido como a segunda lei da termodinâmica. De acordo com um velho gracejo corrente no mundo da física, a primeira lei diz que você não pode vencer, enquanto a segunda diz que você não pode nem mesmo sair sem perder ou ganhar. Ambas são frustrantes para alguém que queira inventar uma máquina de moto-perpétuo. A primeira lei simplesmente enuncia a conservação de energia: a energia total de um sistema fechado permanece a mesma. A segunda lei, exigindo o aumento (ou a constância) da entropia, é sutil, e ainda assim a entropia é na verdade muito familiar a nós todos em nossas vidas diárias. Ela é uma medida da desordem, e quem negaria que a desordem tende a aumentar em um sistema fechado?

Se você passar toda uma tarde escolhendo moedas de acordo com a data, ou pregos de acordo com o tamanho, e alguma coisa cair sobre a mesa, não é extremamente provável que as moedas ou pregos fiquem todos misturados? Numa casa em que as crianças façam sanduíches de pasta de amendoim e geléia, não há uma tendência de que a pasta de amendoim no pote adquira uma mistura adicional de geléia e de que o pote de geléia adquira alguns bocados de pasta de amendoim? Se uma câmara é dividida em duas partes por meio de uma partição, o lado esquerdo contendo oxigênio e o lado direito uma quantidade igual de nitrogênio, não é quase certo que a remoção da partição leve a uma mistura de oxigênio e nitrogênio em ambas as partes?

A explicação é que há mais maneiras de pregos ou moedas misturarem-se do que de serem separados. Há mais maneiras de a pasta de amendoim e a geléia contaminarem os potes uma da outra do que de permanecerem completamente puras. E há mais maneiras de as moléculas do oxigênio e do nitrogênio gasosos misturarem-se do que permanecerem segregadas. Na medida em que o acaso está funcionando, é provável que um sistema fechado que possua alguma ordem se mova em direção à desordem, a qual oferece muito mais possibilidades.

MICROESTADOS E MACROESTADOS

Como devem ser contadas estas possibilidades? Um sistema fechado completo, descrito de forma exata, pode existir numa variedade de estados, muitas vezes chamados microestados. Na mecânica quântica, estes microestados são interpretados como os possíveis estados quânticos do sistema. Estes microestados são agrupados em categorias, muitas vezes chamadas macroestados, de acordo com as várias propriedades que estão sendo diferenciadas pela granulação grosseira. Os microestados em um determinado macroestado são então tratados como equivalentes, de modo que apenas o seu número importa.

Considere a câmara contendo quantidades iguais de moléculas de oxigênio e de nitrogênio separadas por uma partição, que é então removida. Agora todos os microestados possíveis das moléculas de oxigênio e de nitrogênio podem ser agrupados em macroestados tais como os que se seguem: aquele nos quais a parte esquerda da câmara tem menos de 10% de nitrogênio e a parte direita menos de 10% de oxigênio, aqueles nos quais as contaminações estão entre 10 e 20%, aqueles nos quais elas estão entre 20 e 30%, e assim por diante. Os macroestados nos quais as contaminações estão entre 40 e 50% (ou entre 50 e 60%) são os que contêm mais microestados. Estes são também os macroestados mais desor-

denados, aqueles nos quais os gases estão misturados um com o outro em uma proporção maior.

Na verdade, contar o número de maneiras diferentes pelas quais um sistema fechado pode estar em um macroestado particular é intimamente relacionado com a definição técnica de entropia, medida na unidade mais conveniente, chamada constante de Boltzmann. A entropia de um sistema em um determinado macroestado é, aproximadamente, a quantidade de informação — número de bits — necessária para especificar um dos microestados naquele macroestado, com todos os microestados tratados como se fossem igualmente prováveis.

Lembre-se de que o jogo das vinte perguntas, perfeitamente jogado, é capaz de fazer surgir 20 bits de informação adicionais, seja a incógnita animal, vegetal ou mineral. Vinte bits correspondem à informação necessária para distinguir 1.048.676 alternativas diferentes e igualmente prováveis, onde este número é apenas 2 multiplicado por si mesmo vinte vezes. Da mesma forma 3 bits correspondem a oito possibilidades prováveis porque 8 é 2 multiplicado por si mesmo 3 vezes. Quatro bits correspondem a 16 possibilidades, 5 a 32 possibilidades, e assim por diante. Se o número de possibilidades está *entre* 16 e 32, então o número de bits está *entre* 4 e 5.

Assim, se o número de microestados em um macroestado é 32, então a entropia de um sistema naquele macroestado é 5 unidades. Se o número é 16, a entropia é 4, e assim por diante.

A ENTROPIA COMO IGNORÂNCIA

A entropia e a informação estão intimamente relacionadas. De fato, a entropia pode ser considerada uma medida de ignorância. Quando é sabido apenas que um sistema está em determinado macroestado, a entropia do macroestado mede o grau de ignorância sobre em que microestado o sistema está, ao contar o número de bits da informação adicional necessária para especificá-lo, com todos os microestados considerados igualmente prováveis.

Agora suponha que o sistema não está em um macroestado definido, mas ocupa vários macroestados com diversas probabilidades. É feita então uma média da entropia dos macroestados de acordo com suas probabilidades. Além disso, a entropia inclui uma contribuição adicional do número de bits de informação que seriam necessários para determinar o macroestado. Assim, a entropia pode ser considerada a ignorância média sobre o microestado contido em um macroestado mais a ignorância sobre o próprio macroestado.

A especificação corresponde à ordem e a ignorância à desordem. A segunda lei da termodinâmica nos diz simplesmente que, outros fatores sendo iguais, um sistema fechado de baixa entropia (ordem considerável) tenderá, pelo menos por tempo muito longo, a mover-se em direção à entropia mais alta (mais desordem). Como há mais maneiras para a desordem ocorrer, em vez da ordem, a tendência é se mover em direção a desordem.

A EXPLICAÇÃO FINAL: A ORDEM NO PASSADO

Uma questão mais profunda é por que o mesmo argumento não é aplicável quando o sentido do tempo é revertido. Por que um filme de um sistema revertido não o deveria mostrar em direção à desordem provável em vez de mostrá-lo em direção à ordem? A resposta final a esta questão está na condição inicial simples do universo no começo da sua expansão, há uns 10 bilhões de anos, em contraposição à condição de indiferença que é aplicada ao futuro distante na fórmula da probabilidade da mecânica quântica. Como resultado, não é apenas a seta da causalidade que aponta do passado para o futuro, mas também as outras setas, inclusive a seta da ordem-desordem ou “termodinâmica” do tempo. A condição original do universo conduz, mais tarde, à condensação da matéria e à formação das jovens galáxias. À medida que galáxias de certos tipos envelhecem, estrelas jovens e sistemas planetários se formam em seu interior. Depois as estrelas e os planetas envelhecem. A seta do tempo é transmitida do universo para a galáxia, para a estrela e para o planeta. Ela aponta para a frente no tempo em todos os lugares no universo. Na Terra ela é transmitida à origem da vida terrestre, à sua evolução e ao nascimento e envelhecimento de todas as coisas vivas. A ordem em larga escala no universo surge da ordem no passado e finalmente da condição inicial. Esta é a razão por que a transição da ordem para a estatisticamente muito mais provável desordem tende a acontecer em todos os lugares do passado para o futuro e não ao contrário.

Podemos pensar metafóricamente no universo como um relógio antigo a que se dá corda completa no começo de sua expansão e que, então, gradualmente a vai perdendo ao mesmo tempo em que dá origem a outros relógios menores, aos quais se dá corda apenas parcialmente e que por sua vez vão parando lentamente, e assim por diante. Em cada etapa, à medida que uma nova entidade é formada, ela herda das estruturas existentes a propriedade de estar pelo menos parcialmente com corda. Podemos identificar o envelhecimento de cada entidade aproximadamente isolada com a perda da corda de seu relógio correspondente.

Como se comportam as galáxias, as estrelas e os planetas à medida que ficam mais velhos? Considere o que acontece com certas categorias familiares de objetos estelares. No centro de estrelas como o Sol ocorrem reações termonucleares, a uma temperatura de dezenas de milhões de graus, que convertem hidrogênio em hélio, com liberação de energia que, ao final, emerge da superfície na forma de luz solar ou estelar. Finalmente a estrela esgota seu combustível nuclear e muda seu caráter, muitas vezes de forma dramática. Se ela possui massa suficiente, pode transformar-se subitamente em uma supernova e então, depois de brilhar intensamente por um par de meses, colapsar em um buraco negro. Tal processo é claramente unidirecional no tempo!

Quando nós humanos fixamos um padrão de ordem, digamos, para as moedas, e o deixamos sozinho exceto por um agente externo que pode perturbá-lo, por exemplo, um cachorro, o sistema fechado (as moedas sobre a mesa mais um cachorro desastrado) evoluirá em direção à desordem porque esta é muito mais provável. Esta mudança ocorrerá à frente no tempo porque nós humanos nos comportamos de modo causal, como qualquer outra coisa que atue à frente no tempo, e criamos primeiro o padrão de ordem e depois o deixamos sozinho com o cachorro. Tal situação, que implica um aumento de entropia, não é muito diferente do que acontece nas estrelas e galáxias.

O que é um tanto característico é a fixação do padrão de ordem em primeiro lugar: arranjar as moedas ou rearranjá-las depois de o cachorro as ter desarrumado. Isto é claramente uma diminuição da entropia do conjunto de moedas, embora não viole a segunda lei da termodinâmica, pois o conjunto de moedas não é fechado. De fato, a segunda lei diz que a entropia do meio ambiente e da pessoa que faz o arranjo deve aumentar pelo menos tanto quanto a entropia das moedas diminuiu. Como isto funciona? Quais são os sintomas do aumento da entropia na pessoa que faz o arranjo e das vizinhanças?

O DEMÔNIO DE MAXWELL

Para tentar responder a estas questões, é útil discutir um demônio hipotético que passa seu tempo selecionando, isto é, o demônio de Maxwell, imaginado pelo mesmo James Clerk Maxwell, que descobriu as equações do eletromagnetismo. Ele estava considerando uma aplicação muito comum, talvez a mais antiga, da segunda lei da termodinâmica: um corpo quente e um corpo frio próximos um do outro. Imagine uma câmara dividida em duas partes separadas por uma partição móvel. Em uma das partes está uma amostra de gás quente e na outra uma do

mesmo gás frio. A câmara é um sistema fechado com um certo grau de ordem, pois as moléculas do gás quente em um dos lados da partição que estatisticamente se movem mais rápido estão segregadas das moléculas do gás frio que estatisticamente se movem mais devagar no outro lado.

Suponha primeiro que a partição seja feita de metal, portanto ela conduz o calor. Todo mundo sabe que a amostra de gás quente tenderá então a esfriar e a amostra fria a aquecer até que as duas atinjam a mesma temperatura. Isto é o que claramente a segunda lei exige, já que a segregação ordenada de gás mais quente e gás mais frio desaparece e a entropia assim aumenta.

Agora suponha que a partição não conduz o calor, portanto a segregação entre o gás mais quente e o gás mais frio é mantida. Então a entropia permanecerá constante, o que também é compatível com a segunda lei. Mas, e se houver um demônio trabalhando e selecionando as moléculas mais rápidas e as mais lentas? Poderá ele diminuir a entropia?

O demônio de Maxwell controla uma portinhola na partição, a qual se presume ainda não conduzir o calor. Ele percebe as moléculas que chegam de ambos os lados e avalia suas velocidades. As moléculas do gás quente são apenas *estatisticamente* mais rápidas do que as do gás frio; cada amostra do gás contém moléculas que se movem com velocidades muito diferentes. O perverso demônio manipula a portinhola de modo a permitir apenas a passagem das moléculas muito lentas do gás quente e das moléculas muito rápidas do gás frio. Deste modo o gás frio recebe moléculas extremamente lentas, esfriando-se mais ainda, e o gás quente recebe moléculas extremamente rápidas, tornando-se ainda mais quente. Em aparente desafio à segunda lei da termodinâmica, o demônio provocou um fluxo de calor do gás mais frio para o gás mais quente. O que está acontecendo?

Uma vez que a lei se aplica apenas a sistemas fechados, devemos incluir o demônio em nossos cálculos. Seu aumento de entropia deve ser pelo menos tão grande quanto a diminuição de entropia das metades da câmara preenchidas com gás. O que significa para o demônio aumentar sua entropia?

UMA NOVA CONTRIBUIÇÃO PARA A ENTROPIA

Leo Szilard começou a responder a esta pergunta em 1929 ao introduzir a relação entre entropia e informação. Mais tarde, após a Segunda Guerra Mundial, Claude Shannon estabeleceu claramente a noção mate-

mática de informação, que foi ainda mais clarificada pelo físico teórico francês Léon Brillouin. Nos anos 60, o conceito de complexidade algorítmica ou conteúdo de informação algorítmica foi introduzido por Kolmogorov, Chaitin e Solomonoff. Finalmente, Rolf Landauer e Charlie Bennett da IBM elaboraram com detalhes como a informação e o conteúdo de informação algorítmica estão relacionados com a atividade de uma pessoa, demônio ou dispositivo que diminui a entropia de um sistema físico ao mesmo tempo em que aumenta a sua própria entropia em quantidade igual ou maior.

Bennett considerou um dispositivo que adquire o tipo apropriado de informação sobre um sistema físico e então o registra (digamos, no papel ou fita de computador). A informação se refere a conjuntos alternativos possíveis de dados, com uma probabilidade para cada conjunto. Bennett usou estas probabilidades para estudar o que acontece com a média sobre todos os resultados alternativos diferentes. Ele descobriu que o dispositivo realmente pode utilizar a informação registrada para fazer o calor fluir de um objeto frio para um quente, *enquanto o dispositivo tiver papel em branco ou fita disponível*. A entropia do sistema composto pelo objeto quente e pelo objeto frio é deste modo diminuída, mas ao preço de se gastar o papel ou fita. Anteriormente, Landauer mostrara que apagar os registros, não deixando cópias, produz um aumento de entropia que ao menos compensa o decréscimo. Finalmente o dispositivo deve ficar sem espaço para registrar, e assim a longo prazo, quando os registros forem apagados para dar espaço a outros, a segunda lei da termodinâmica será restaurada.

Acabamos de mencionar que é o ato de apagar a *última* cópia da informação que *deve* produzir um aumento de entropia pelo menos suficiente para restaurar a segunda lei. Na verdade, apagar qualquer cópia provavelmente conduz na prática a um aumento de entropia similar, mas em princípio é apenas a última cópia que *deve* fazê-lo. A razão é que, se existem pelo menos duas cópias, sob certas circunstâncias há métodos disponíveis para utilizar uma delas para “desfazer a cópia” de uma outra de modo reversível, sem aumentar a entropia.

Enquanto isso, é possível manter a segunda lei de alguma forma, mesmo durante o período em que os registros existem e estão sendo utilizados para modificar a definição de entropia do sistema inteiro. Isto é feito adicionando-se um termo igual ao conteúdo de informação algorítmica dos registros relevantes sobreviventes. Como o conteúdo de informação algorítmica (CIA) depende apenas do tamanho do programa *mais curto* que descreve a informação, seu valor não é alterado pela existência de cópias extras dos registros. Tudo o que importa é se há ou não pelo menos um registro de cada bit de informação sobre que alternativa realmente ocorreu.

A conveniência de utilizar esta definição corrigida tem sido apontada por Wojtek Zurek, do Laboratório Nacional de Los Alamos e do Instituto Santa Fé. Podemos pensar na nova definição da seguinte forma: a entropia usual, que é uma medida de ignorância, é modificada adicionando-lhe o CIA dos registros que trazem consigo alguma informação correspondente. Isto significa que há um tipo de troca de ignorância por registros. Quando a informação é obtida e registrada, a ignorância é reduzida, enquanto a informação nos registros aumenta. Quando o apagamento acontece, a informação nos registros diminui mas a ignorância sobre a situação aumenta pelo menos na mesma medida.

APAGAMENTO E RETALHAMENTO

À medida que o demônio realiza sua tarefa de selecionar, ele deve fazer alguma coisa com a informação que está adquirindo sobre as moléculas individuais. Na medida em que armazena informação, finalmente ficará sem espaço de armazenamento. Na medida em que a informação é apagada, o ato de apagar aumenta a entropia do demônio e de suas vizinhanças. O que significa, entretanto, ser o apagamento completo?

Pense em uma anotação a lápis sendo apagada com uma borracha comum. A borracha tritura pedaços diminutos de si mesma, cada pedaço levando uma pequena parte da anotação, e estes são dispersos por toda a escrivantina e mesmo pelo chão. Este tipo de dispersão da ordem é em si mesmo um aumento de entropia. Na realidade, o processo confuso de apagamento produz tipicamente um aumento de entropia muito maior do que a quantidade de informação que está sendo apagada e muito desta produção de entropia tem um caráter bastante convencional (por exemplo, a geração de calor comum). Entretanto, para chegar aonde queríamos, temos ignorado este aumento extra de entropia e nos concentrado no aumento mínimo que deve acompanhar a destruição dos registros portadores de informação.

É importante se a destruição é irreversível ou não. Se o processo pode ser revertido pela reconstrução da anotação a partir dos fragmentos do apagador, então o aumento de entropia especificamente associada com o apagador não aconteceu — mas o apagamento também não aconteceu: uma cópia da informação ainda existe nos fragmentos.

Pode-se objetar que tal reconstrução é sempre possível em princípio, que é apenas uma questão prática que a informação possa ser recuperada a partir de pedacinhos irritantes de borracha ou não. Um exemplo dramático de tal situação foi dado quando os “estudantes” que invadiram e ocuparam a embaixada dos EUA em Teerã, em 1979, reuniram

as tiras de documentos classificados que tinham sido retalhados no último momento pelos empregados da embaixada e pacientemente os reconstituíram, de modo que os documentos puderam ser lidos e seu conteúdo tornado público. Embora as máquinas de retalhar documentos de hoje em dia os despedacem em ambas as dimensões, fazendo tal reconstrução muito mais difícil, ela não é ainda totalmente impossível em princípio. Como podemos então falar de apagamento irreversível ou dispersão de informação, ou mesmo de ruptura de qualquer tipo de ordem? Por que a idéia total de aumento de entropia, de conversão de ordem em desordem, não é uma fraude?

ENTROPIA INÚTIL SEM GRANULAÇÃO GROSSEIRA

Retornemos às moléculas de oxigênio misturando-se com as de nitrogênio. Podemos perguntar em que sentido a mistura dos gases realmente aumenta a desordem, já que toda molécula de oxigênio e de nitrogênio está em *algum lugar* a todo momento, pelo menos na aproximação clássica, e portanto a situação em qualquer instante é tão ordenada quanto em qualquer instante anterior, desde que a posição de cada molécula seja descrita e não apenas a distribuição do oxigênio e do nitrogênio.

A resposta é que a entropia, como a complexidade efetiva, conteúdo de informação algorítmica e outras quantidades que temos discutido, depende da granulação grosseira — o nível de detalhe no qual o sistema está sendo descrito. Na verdade, é matematicamente correto que a entropia de um sistema descrito com perfeito detalhe não aumente; ela permanece constante. Todavia, de fato, um sistema de muitas partes é sempre descrito em termos de apenas algumas de suas variáveis, e a ordem nestas comparativamente poucas variáveis tende a ser dispersada, à medida que o tempo passa, em outras variáveis nas quais ela não é mais contada como ordem. Este é o significado real da segunda lei da termodinâmica.

Uma maneira correlacionada de pensar sobre a granulação grosseira é em termos de macroestados. Um sistema inicialmente descrito como localizado em um ou em uns poucos macroestados usualmente se encontrará mais tarde em uma mistura de muitos, à medida que os macroestados se misturam uns com os outros através da evolução dinâmica do sistema. Além do mais, aqueles macroestados que consistem dos maiores números de microestados tenderão a predominar nas misturas. Por ambas as razões, o valor posterior da entropia tenderá a ser maior do que o valor inicial.

Podemos tentar relacionar a granulação grosseira aqui com a granulação grosseira da mecânica quântica. Lembre-se de que em um

domínio quase clássico máximo, consistindo em histórias com granulação grosseira alternativas do universo, estas histórias são tão finamente granuladas quanto possível, mantendo-se consistentes com a decoerência e aproximadamente clássicas. Foi mencionado anteriormente que um domínio quase clássico na mecânica quântica provê assim uma espécie de granulação grosseira teórica mínima para o universo, correspondendo, na descrição de um objeto individual, a um máximo de individualidade. Para muitos propósitos, este mesmo mínimo se aplica à granulação grosseira utilizada na definição de entropia. Quando ele realmente se aplica, os macroestados mais refinados que podem ser utilizados ao definir entropia são aqueles encontrados no domínio quase clássico.

A ENTROPIA DA COMPLEXIDADE ALGORÍTMICA

A escolha de armazenagem ou apagamento com que o demônio depara é confrontado da mesma forma por qualquer máquina real, pessoa ou outro organismo que está criando a ordem. Se ele armazena as informações que adquire, pode baixar a entropia convencionalmente definida do universo, mas no máximo de uma quantidade igual ao CIA da informação armazenada. Quando a informação é apagada para dar lugar a espaço de armazenamento, o universo recebe de volta pelo menos tanta entropia quanto é perdida. Se a entropia é corrigida de modo a incluir o CIA da informação armazenada, a segunda lei da termodinâmica não é nem mesmo temporariamente violada.

A contribuição do CIA à entropia corrigida pode ser chamada de entropia da complexidade algorítmica. Ela é muitas vezes pequeníssima quando comparada com a entropia usual. Embora dê uma contribuição desprezível ao total, ainda assim ela é importante, pois quantifica a possibilidade de usar a informação para contornar a segunda lei convencional, pelo menos temporariamente, até que os registros sejam apagados.

AS SETAS DO TEMPO E A CONDIÇÃO INICIAL

Dada uma graduação grosseira, podemos traçar de volta a seta termodinâmica do tempo até a condição inicial simples e a condição final de indiferença na fórmula quântica para as probabilidades da história com granulação grosseira decoerentes do universo. O mesmo pode ser dito da seta do tempo associada com a radiação para o meio externo, e igualmente do que eu chamo a verdadeira seta cosmológica do tempo, que envolve o envelhecimento, o esgotamento, do universo e de suas partes componen-

tes. (Stephen Hawking define a sua seta cosmológica do tempo pela expansão do universo, mas esta não é uma seta verdadeira do tempo de acordo com minha definição. Se, depois de um tempo fantasticamente longo, o universo contrair, a contração se dará para a frente no tempo também — o envelhecimento continuará, como o próprio Hawking enfatiza.)

A seta do tempo associada com a formação de registros deriva também em último caso da condição inicial simples do universo. Finalmente, a assim chamada seta psicológica do tempo, em referência à experiência de fluxo progressivo do tempo por parte dos seres humanos e de todos os outros sistemas adaptativos complexos, surge da mesma condição. Memórias são apenas registros, obedecem à causalidade progressiva como todos os outros registros o fazem.

A EMERGÊNCIA DE UMA COMPLEXIDADE MAIOR: ACIDENTES CONGELADOS

A passagem do tempo parece abrir oportunidades para que a complexidade aumente. Ainda assim sabemos que a complexidade pode também declinar em um determinado sistema, tal como uma sociedade forçada a se retrair para padrões sociais mais simples em razão de pressões severas do clima, dos inimigos ou das lutas internas. Tal sociedade pode até mesmo desaparecer completamente. (O colapso da civilização maia clássica certamente implicou uma redução de complexidade, mesmo que muitos indivíduos tenham sobrevivido.) Não obstante, à medida que o tempo passa, complexidades sociais cada vez mais altas continuam aparecendo. A mesma tendência ocorre na evolução biológica. Embora algumas mudanças possam envolver decréscimos na complexidade, a tendência é em direção à complexidade máxima maior. Por quê?

Lembre-se de que a complexidade efetiva é o tamanho de uma descrição concisa das regularidades de um sistema. Algumas destas regularidades podem ser relacionadas com as leis fundamentais que governam o universo. Outras surgem do fato de que muitas características de uma determinada parte do universo em um dado momento estão relacionadas umas com as outras por meio de sua origem comum em algum incidente passado. Estas características têm aspectos em comum: exibem informação mútua. Por exemplo, automóveis de um determinado modelo lembram um ao outro porque eles todos se originaram de um mesmo projeto, que contém muitos aspectos arbitrários que poderiam ter sido escolhidos de forma diferente. Tais “acidentes congelados” podem se fazer sentir de todas as maneiras. Olhando para as moedas do rei Henrique VIII da Inglaterra, podemos refletir sobre todas as referências a ele não apenas nas moedas mas nas cartas régias, nos documentos relativos ao

confisco das abadias e nos livros de história e como estes poderiam ser todos diferentes se, em vez disso, seu irmão mais velho tivesse sobrevivido para ascender ao trono. E como muito da história subsequente pode depender deste acidente congelado.

Podemos agora esclarecer uma classe de questões razoavelmente profundas mencionadas quase no começo deste livro. Se encontrarmos uma moeda com a efígie de Henrique VIII, poderemos empregar as equações dinâmicas fundamentais para deduzir que outras de tais moedas devem surgir? Ao encontrar um fóssil em uma rocha, como podemos deduzir, a partir das leis fundamentais, que provavelmente há mais fósseis do mesmo tipo? A resposta é: somente utilizando a condição inicial do universo assim como as leis dinâmicas fundamentais. Podemos então utilizar a árvore das histórias ramificadas e argumentar, partindo da condição inicial e da causalidade resultante, que a existência da moeda encontrada ou do fóssil significa que um conjunto de eventos que a produziu ocorreu no passado, e que estes eventos provavelmente produziram outras moedas ou fósseis assim. Sem a condição inicial do universo, as leis dinâmicas da física não seriam capazes de nos conduzir a tal conclusão.

Um acidente congelado pode também explicar, como discutimos anteriormente, por que os quatro nucleotídeos abreviados A, C, G e T constituem o ADN de todos os organismos vivos da Terra. Planetas que orbitam estrelas distantes podem abrigar sistemas adaptativos complexos que lembrem bastante a vida terrestre mas utilizem material genético composto de outras moléculas. Alguns teóricos da origem da vida na Terra concluem que pode haver milhares de possíveis alternativas ao conjunto A, C, G e T. (Outros, deve ser lembrado, especulam que o conjunto familiar de nucleotídeos pode ser a única possibilidade.)

Um candidato ainda mais provável a acidente congelado é a ocorrência de certas moléculas dextrogiras que desempenham um papel importante na química da vida terrestre, enquanto as moléculas levogiras correspondentes não são encontradas desempenhando estes papéis e, em alguns casos, podem estar inteiramente ausentes das formas de vida na Terra. Não é difícil entender por que os vários tipos de moléculas dextrogiras seriam compatíveis umas com as outras na bioquímica, e o mesmo é válido para as moléculas levogiras, mas o que determina a escolha de uma ou outra?

Certos físicos teóricos tentaram por longo tempo relacionar esta assimetria entre esquerda e direita com o marcante comportamento das interações fracas, as quais exibem a propriedade de ser levogiras na matéria ordinária (feita de quarks e elétrons) e de ser dextrogiras na antimatéria (feita de antiquarks e pósitrons). Seus esforços parecem não ter dado frutos, e assim é provável que a assimetria bioquímica entre

esquerda e direita seja uma característica congelada do ancestral de todas as formas sobreviventes de vida terrestre, e que o contrário poderia muito bem ter ocorrido.

A assimetria biológica entre esquerda e direita ilustra de modo marcante que muitos acidentes congelados podem ser considerados exemplos de quebra espontânea de simetria. Pode haver um conjunto simétrico de possibilidades (neste caso, moléculas dextrogiras e levogiras), das quais apenas uma realmente ocorre em uma parte particular do universo durante um intervalo de tempo particular. Na física das partículas elementares, exemplos típicos de quebra espontânea de simetria são concebidos como aplicáveis ao universo todo. Pode também haver outros, mesmo na física das partículas elementares, que se aplicam apenas a regiões gigantescas do universo; ainda assim mesmo este assunto teria em alguma medida o caráter de uma ciência do meio ambiente!

A estrutura do tipo árvore das histórias ramificadas implica um jogo de azar em cada ramificação. Qualquer história de granulação grosseira individual consiste em um resultado particular de cada um destes jogos. À medida que cada história prossegue através do tempo, ela registra números crescentes de tais resultados ao acaso. Mas alguns destes acidentes se tornam congelados como regras para o futuro, pelo menos para alguma porção do universo. Dessa forma, o número de regularidades possíveis continua crescendo com o tempo, tornando a complexidade possível.

Este efeito não é em absoluto restrito aos sistemas adaptativos complexos. A evolução de estruturas físicas no universo mostra a mesma tendência em direção à emergência de formas mais complexas por meio da acumulação de acidentes congelados. Flutuações randômicas dão origem a galáxias e aglomerados de galáxias no universo primitivo; a existência de cada um destes objetos, com suas características individuais, tem sido desde o tempo de seu nascimento uma regularidade da maior importância para a sua parte do universo. Da mesma forma, a condensação de estrelas, inclusive estrelas múltiplas e estrelas com sistemas planetários, a partir de nuvens de gás nestas galáxias estabeleceu novas regularidades de grande importância local. À medida que a entropia do universo e a desordem geral aumentam, a auto-organização pode produzir uma ordem local, como nos braços de uma galáxia em forma de espiral ou na multiplicidade das formas simétricas dos flocos de neve.

A complexidade em dado instante de um sistema em evolução, seja ele adaptativo complexo ou não-adaptativo, não provê uma medida dos níveis de complexidade que ele ou seus descendentes (literais ou figurativos) podem atingir no futuro. Para preencher esta necessidade,

introduzimos anteriormente o conceito de complexidade potencial. Para defini-la, consideramos as histórias possíveis futuras do sistema e fazemos a média da complexidade efetiva destas histórias em cada instante futuro, com cada uma ponderada de acordo com sua probabilidade. A unidade natural de tempo para este propósito é o intervalo médio entre as mudanças randômicas no sistema. A complexidade potencial resultante, em função do tempo futuro, nos diz alguma coisa sobre a possibilidade de que o sistema evolua para algo altamente complexo naquele instante, talvez mesmo pela geração de um tipo inteiramente novo de sistema adaptativo complexo. No exemplo que discutimos anteriormente, a complexidade potencial distinguiria humanos emergentes dos grandes macacos, mesmo que suas complexidades efetivas naquele instante não fossem muito diferentes. Da mesma forma, uma superfície planetária com probabilidade significativa de gerar vida seria, em certo tempo, distinguida de outra em que a vida não fosse outra possibilidade séria.

A EMERGÊNCIA DE COMPLEXIDADES CADA VEZ MAIORES CONTINUARÁ PARA SEMPRE?

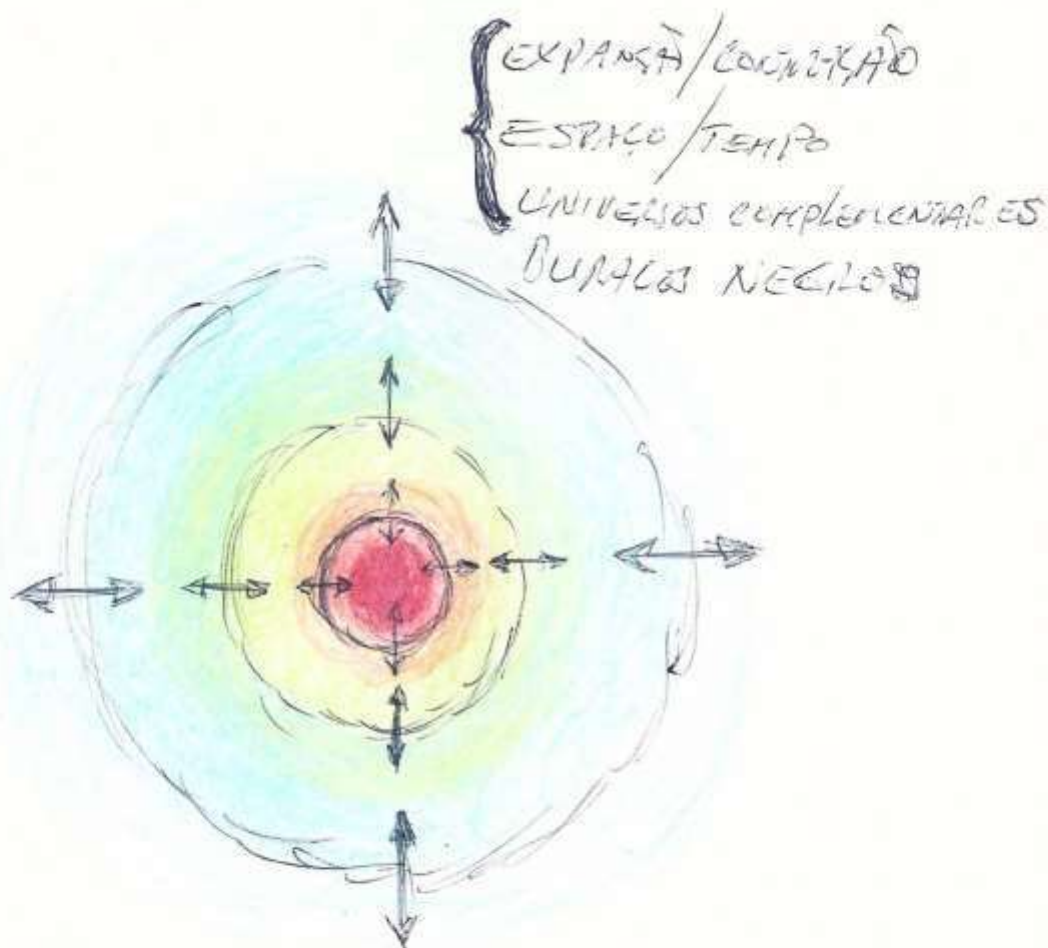
Depois de um tempo demasiadamente longo, mesmo pelos padrões cosmológicos, o universo, na medida em que continua a expandir, se tornará muito diferente. Estrelas morrerão; buracos negros, mais numerosos do que são agora, decairão, e provavelmente mesmo os prótons (e os núcleos mais pesados) decairão também. Todas as estruturas com as quais somos agora familiarizados desaparecerão. Pode ser, portanto, que as regularidades se tornem cada vez mais raras e o universo seja descrito em sua maior parte em termos de randomicidade. A entropia será então muito alta, assim como o conteúdo de informação algorítmica, de modo que a complexidade efetiva será baixa e a profundidade razoavelmente baixa também (ver páginas 75 e 120).

Neste ínterim, se o cenário estiver correto, a emergência de formas cada vez mais complexas cessará gradualmente e a regressão à baixa complexidade se tornará a regra. Além disso, as condições não serão mais conducentes à existência de sistemas adaptativos complexos. Mesmo a individualidade pode declinar, na medida em que objetos individuais bem definidos se tornem progressivamente mais raros.

Esta imagem sombria não é em absoluto inteiramente livre de controvérsias. Mais pesquisa teórica sobre o futuro muito distante é necessária. Embora não tenha diretamente muito valor prático, esta pesquisa esclarecerá o significado da era de complexidade em que nos encontramos. O universo pode também estar caminhando, depois de um tempo

muito longo, para o recolapso, e os teóricos estão investigando também este fenômeno, tentando descrever o que acarretaria para a entropia o crescimento em um universo que está encolhendo e quais as perspectivas da complexidade durante aquela fase da evolução cósmica.

Enquanto isto, aqui na Terra as características do nosso planeta e do nosso Sol forneceram acidentes congelados que afetam profundamente as regras da geologia, meteorologia e de outras ciências do “meio ambiente”. Em particular, elas fornecem o pano de fundo para a biologia terrestre. A evolução da Terra, do clima em sua superfície, das reações químicas prebióticas que conduziram à emergência de vida e da própria vida ilustra a acumulação de acidentes congelados que se tornaram regularidades para regiões restritas de espaço e tempo. A evolução biológica, em particular, deu origem à emergência de complexidades efetivas cada vez mais altas.



PARTE III

SELEÇÃO E APTIDÃO

CAPÍTULO 16

A SELEÇÃO EM FUNCIONAMENTO NA EVOLUÇÃO BIOLÓGICA E EM OUTROS LUGARES

Todos os tipos de sistemas adaptativos complexos, incluindo a evolução biológica, operam de acordo com a segunda lei da termodinâmica. Todavia, é ocasionalmente afirmado pelos antievolucionistas, que se baseiam no fato de que a emergência de mais e mais formas complexas representa um aumento da ordem com a passagem do tempo, que a evolução biológica contradiz a segunda lei. Há muitas razões pelas quais este argumento está errado.

Primeiro, na evolução de sistemas não-adaptativos como as galáxias, as estrelas, os planetas e as rochas, mais e mais formas complexas emergem com o decorrer do tempo, por razões que discutimos anteriormente, sem qualquer contradição com o aumento de entropia. Todas as estruturas envelhecem de acordo com a segunda lei, mas à medida que o tempo passa há também uma distribuição cada vez mais ampla de complexidade, com a complexidade máxima aumentando gradualmente.

Segundo, a segunda lei da termodinâmica é válida apenas para sistemas fechados, isto é, sistemas completamente auto-suficientes. Um erro crucial cometido por aqueles que acreditam haver uma contradição entre esta lei e a evolução biológica está em olhar apenas para o que acontece com certos organismos, não levando em conta o meio ambiente que os cerca.

O modo mais óbvio pelo qual os sistemas vivos mostram que não são fechados é a sua necessidade de luz solar como fonte direta ou indireta de energia. Estritamente falando, não podemos esperar que a segunda lei da termodinâmica seja válida a menos que incluamos a absorção da energia que vem do Sol. Além do mais, a energia flui para fora assim como para dentro; finalmente ela se vai na forma de radiação emitida para o céu (pense na radiação térmica transmitida da sua casa para o

escuro e frio céu noturno). O fluxo de energia através de um sistema pode produzir ordem local.

Além deste efeito, contudo, a influência da informação provida do meio ambiente terrestre deve ser levada em conta. Para vermos o que acontece quando a informação ambiental é incluída, considere um caso ultra-simplificado no qual a influência exercida pelo meio ambiente é constante e a interação entre os diferentes organismos é ignorada. Então a população de um determinado tipo de organismo evolui na presença de um ambiente consistente. À medida que o tempo passa, a população tende a se tornar mais bem adaptada às suas cercanias, já que os diferentes genótipos nela contidos competem entre si e alguns são mais bem-sucedidos do que outros ao gerar fenótipos que sobrevivem e se reproduzem. Conseqüentemente, um tipo de discrepância de informação entre o meio ambiente e o organismo é gradualmente reduzido. Este processo é remanescente do modo pelo qual a temperatura de um corpo quente e a de um corpo frio colocados em contato um com o outro atinge o equilíbrio térmico, em conformidade com a segunda lei. A evolução biológica, longe de contradizer esta lei, pode fornecer-lhe uma metáfora instrutiva. O processo de adaptação é em si mesmo uma espécie de amadurecimento de uma população na presença de seu meio ambiente.

Nas fontes de enxofre aquecido de todo o mundo, e nas profundezas dos oceanos onde “chaminés” quentes marcam os limites das placas tectônicas, organismos primitivos denominados extremófilos (ou *crenarchaeota*) desenvolvem-se em um meio que a maioria dos seres vivos consideraria extremamente hostil. Na vida dos extremófilos no fundo dos oceanos, a luz solar desempenha um papel limitado, restrito principalmente aos processos que suprem produtos químicos oxidantes. Por exemplo, a luz solar ajuda a manter outras formas de vida, próximas à superfície da água, que deixam cair continuamente material orgânico sobre os lugares onde os extremófilos vivem.

Evidências indiretas consistentes apontam para a existência, há mais de 3 bilhões de anos, de organismos similares, pelo menos metabolicamente, aos modernos extremófilos. Ninguém sabe se todos os genótipos subjacentes eram também muito similares, ou se partes do genoma sofreram uma transposição substancial, deixando os resultados práticos das pressões seletivas no mundo real quase inalterados. Em qualquer dos casos, podemos dizer que o problema bastante difícil de viver naquele meio quente, acídico e sulfuroso foi resolvido quando a Terra era jovem. Os extremófilos atingiram uma espécie de estado estacionário, alguma coisa parecida com um equilíbrio evolutivo com seu meio ambiente.

Raramente, entretanto, os meios ambientes são tão estáveis. A

haveria causalidade e nem muita história. Em vez disso, a condição inicial é uma condição simples e especial, até mesmo talvez aquela descrita por Hartle e Hawking, que não requer qualquer informação além da lei dinâmica que governa o sistema de partículas elementares.

Se a condição futura não fosse de completa indiferença, teríamos violações da causalidade e ocorreriam eventos que seriam inexplicáveis (ou pelo menos extremamente improváveis) em termos do passado mas que seriam exigidos (ou quase isso) pela condição especificada para o futuro distante. À medida que a idade do universo aumentasse, mais e mais de tais eventos ocorreriam. Não há evidência de tal situação refletindo predestinação, e evidências consideráveis lhe são contrárias. Portanto, na ausência de qualquer argumento novo e convincente, podemos desconsiderar a possibilidade de que a condição futura seja alguma coisa diferente da condição de indiferença. Entretanto, embora relegando-a ao domínio da ficção científica ou da superstição, ainda podemos considerar uma condição especial sobre o futuro como um caso interessante, contrário aos fatos, contrastando com a situação causal que acreditamos firmemente estar correta.

A partir da fórmula quântica básica para as probabilidades das histórias, com uma condição inicial conveniente, é possível deduzir todos os aspectos familiares da causalidade, tais como sinais e registros apontando do passado para o futuro. Todas as setas do tempo correspondem às várias características das histórias com granulação grosseira do universo, e a fórmula exhibe a tendência de todas estas setas em apontar para a frente e não para trás por toda parte.

A ENTROPIA E A SEGUNDA LEI

Das setas que marcam a distinção entre tempo progressivo e tempo retrógrado, uma das mais famosas é a tendência que a quantidade chamada entropia tem de aumentar (ou pelo menos não diminuir) em um sistema fechado, conduzindo ao princípio conhecido como a segunda lei da termodinâmica. De acordo com um velho gracejo corrente no mundo da física, a primeira lei diz que você não pode vencer, enquanto a segunda diz que você não pode nem mesmo sair sem perder ou ganhar. Ambas são frustrantes para alguém que queira inventar uma máquina de moto-perpétuo. A primeira lei simplesmente enuncia a conservação de energia: a energia total de um sistema fechado permanece a mesma. A segunda lei, exigindo o aumento (ou a constância) da entropia, é sutil, e ainda assim a entropia é na verdade muito familiar a nós todos em nossas vidas diárias. Ela é uma medida da desordem, e quem negaria que a desordem tende a aumentar em um sistema fechado?

maioria das situações naturais são mais dinâmicas, com o meio ambiente sofrendo mudanças significativas à medida que o tempo passa. Por exemplo, a composição da atmosfera da Terra como a conhecemos deve-se em grande parte à presença de vida. A presença hoje de quantidades significativas de oxigênio pode ser atribuída, pelo menos em grande parte, às plantas que proliferaram na superfície do planeta.

ESPÉCIES CO-EVOLUTIVAS

Além do mais, o meio ambiente de qualquer espécie de organismo inclui um vasto número de outras espécies, as quais por sua vez estão evoluindo. O genótipo de cada organismo, ou então o conjunto de genótipos que caracteriza cada espécie, pode ser considerado um esquema que inclui a descrição de muitas outras espécies e de como estas estão predispostas a reagir às diferentes formas de comportamento. Uma comunidade ecológica consiste então de uma grande quantidade de espécies, todas desenvolvendo modelos dos hábitos das outras espécies, e de como lidar com elas.

Em alguns casos é uma idealização útil considerar apenas duas espécies co-evoluindo e tratar dos desenvolvimentos nas capacidades recíprocas. Por exemplo, caminhando através das florestas da América do Sul, muitas vezes encontrei uma espécie de árvore que fornece os nutrientes de uma espécie particularmente detestável de formiga agressiva. Em troca, a formiga repele muitos tipos de animais, inclusive nós humanos, que de outra forma poderiam fazer mal à árvore. Assim como aprendi qual a aparência desta árvore, para evitar dar de cara com ela por engano, também os outros mamíferos aprenderam a evitá-la e mascar suas folhas. Tal situação de simbiose deve ter sido criada durante um período substancial de co-evolução.

Na mesma floresta, podemos encontrar competições ofensivas e defensivas que culminaram com duas espécies adaptando-se uma à outra. Uma árvore pode desenvolver a capacidade de exsudar uma substância tóxica que repele uma espécie destrutiva de inseto. Esta espécie de inseto, por sua vez, pode desenvolver um meio de metabolizar o veneno, que então passa a não representar mais uma ameaça. A evolução posterior da árvore pode resultar numa modificação do veneno de modo que este se torna novamente efetivo, e assim por diante. Estas corridas de armas químicas podem resultar na produção natural de agentes químicos que são muito potentes biologicamente. Alguns deles podem ser de grande utilidade para os seres humanos, na medicina, no controle integrado das pragas e em outros campos.

Na situação real, vista sem simplificações, muitas espécies evoluem juntas numa comunhão ecológica com o meio inanimado que gradualmente (ou mesmo rapidamente) se altera com o tempo. Isto é muito mais complicado do que os exemplos idealizados de simbiose ou competição entre duas espécies, do mesmo modo que estes são muito mais complicados do que o caso mais idealizado ainda de uma única espécie evoluindo num ambiente fixo. Em cada caso, o processo de evolução biológica é compatível com a seta termodinâmica do tempo, na medida em que todo o sistema é levado em conta; mas apenas nas situações mais simples, como a dos extremófilos, a evolução realmente conduz a um tipo de estado estacionário informacional. Em geral, o processo é aquele de mudança dinâmica contínua, exatamente como acontece para um sistema físico-químico complexo como uma galáxia, uma estrela ou um planeta destituídos de vida. Todos estão envelhecendo, esgotando-se à medida que o tempo passa, embora de uma maneira complicada.

Numa comunidade ecológica, o processo de ajustamento mútuo por meio da evolução é um aspecto deste envelhecimento. A evolução biológica é parte do processo de esgotamento pelo qual a lacuna informacional entre o potencial e o real tende a ser preenchida. Uma vez que um sistema adaptativo complexo exista, a descoberta e o aproveitamento de oportunidades não é somente possível mas provável, pois esta é a direção para a qual o sistema é empurrado pelas pressões seletivas que operam sobre ele.

EQUILÍBRIO INTERROMPIDO

Usualmente a evolução biológica não se dá de uma maneira mais ou menos uniforme, como alguns especialistas imaginavam. Em vez disso, ela muitas vezes exhibe o fenômeno do "equilíbrio interrompido", no qual espécies (ou grupos taxonômicos superiores como os gêneros, famílias e assim por diante) permanecem relativamente imutáveis, pelo menos no nível fenotípico, por longos períodos de tempo e então sofrem mudanças comparativamente rápidas durante um breve período. Stephen Jay Gould, que propôs a idéia em publicações técnicas em co-autoria com seu colega Niles Eldredge, também escreveu bastante sobre o equilíbrio interrompido em seus cativantes artigos e livros populares.

O que provoca as mudanças comparativamente rápidas que constituem o equilíbrio interrompido? O mecanismo imaginado como responsável pode ser dividido em várias categorias. Uma compreende alterações, algumas vezes amplamente disseminadas, no meio físico-químico. Ao final do período Cretáceo, há cerca de 65 milhões de anos, pelo

menos um objeto pesado colidiu com a Terra e formou a grande cratera de Chicxulub na orla da península de Yucatán. As mudanças atmosféricas resultantes ajudaram a produzir a extinção cretácea, que acabou com os grandes dinossauros e muitas outras formas de vida. Centenas de milhões de anos antes, durante o período Cambriano, surgiu um grande número de nichos ecológicos que foram preenchidos por novas formas de vida (algo parecido com a maneira pela qual uma tecnologia nova e popular leva a numerosas oportunidades de emprego). As novas formas de vida criaram ainda mais nichos novos, e assim por diante. Alguns teóricos evolucionistas tentaram relacionar esta explosão de diversidade com o aumento no conteúdo de oxigênio da atmosfera, mas esta hipótese não é geralmente aceita hoje em dia.

Um outro tipo de mudança rápida que pode interromper o equilíbrio evolutivo aparente tem em grande parte aspecto biológico. Ela não requer mudanças dramáticas súbitas do meio físico. Ao contrário, resulta da tendência que os genomas têm de mudar gradualmente, à medida que o tempo passa, de maneiras que não afetam profundamente a viabilidade do fenótipo. Como resultado deste processo de “desvio lento de rota”, um conjunto de genótipos que constitui uma espécie pode se mover em direção a uma situação instável na qual mudanças genéticas razoavelmente pequenas podem alterar radicalmente o fenótipo. Pode acontecer de num dado instante muitas espécies de uma comunidade ecológica estarem se aproximando deste tipo de instabilidade, criando uma situação propícia para a ocorrência de mutações que realmente conduzam a mudanças fenotípicas importantes em um ou mais organismos. Estas mudanças podem dar início a uma série de eventos encadeados, em que alguns organismos se tornam mais bem-sucedidos, alguns se extinguem, a comunidade inteira é alterada e novos nichos ecológicos são criados. Tal convulsão pode então provocar mudanças nas comunidades vizinhas à medida que, por exemplo, novos tipos de animais migram para lá e competem com sucesso com as espécies já estabelecidas. Um equilíbrio temporário aparente foi interrompido.

EVENTOS DE RUPTURA

Na ausência de mudanças radicais do meio físico-químico, eventos biológicos particularmente dramáticos são algumas vezes responsáveis pelos exemplos críticos de equilíbrio interrompido. Harold Morowitz, da Universidade George Mason e do Instituto Santa Fé, chama a atenção para a grande importância dos eventos de ruptura ou de entrada que criam novos domínios completos de possibilidades, algumas vezes

envolvendo níveis mais altos de organização ou funções mais elevadas. Harold tem enfatizado particularmente casos em que estas rupturas são únicas ou quase assim, e onde elas dependem de uma evolução bioquímica.

Para começar, ele teoriza sobre possíveis rupturas químicas no decurso da evolução química pré-biótica que conduziu à origem da vida na Terra. Estas rupturas incluem:

1. Uma que conduziu ao metabolismo energético que utiliza a luz solar e deste modo à possibilidade de uma membrana que isole uma porção de matéria como aquela representada mais tarde por uma célula.
2. Uma que forneceu os catalisadores para a transição dos cetoácidos para os aminoácidos e portanto para a produção de proteínas.
3. Reações químicas que resultaram em moléculas chamadas dinitrogênio heterocíclicas e assim conduziram aos nucleotídeos que constituem o ADN, permitindo pois ao genoma, o esquema biológico ou pacote de informações, ter existência.

Em todos estes casos Harold enfatiza a estreiteza da entrada. Tipicamente apenas umas poucas reações químicas especiais tornam possível a passagem para o novo domínio; algumas vezes uma única reação é a responsável. A especificidade de tais reações não significa que elas sejam necessariamente improváveis — mesmo uma reação única pode facilmente acontecer.

Eventos de ruptura análogos ocorreram na evolução biológica, seguindo-se ao desenvolvimento das formas ancestrais de vida de todos os organismos vivos hoje. Um exemplo é o desenvolvimento dos eucariotos, organismos nos quais a célula possui um núcleo verdadeiro (contendo o material genético principal) e também outras “organelas” — as mitocôndrias ou cloroplastos. A transformação de organismos mais primitivos em eucariotos unicelulares é considerada por muitos pesquisadores devida à incorporação de outros organismos, os quais se tornaram endossimbiontes (o que significa que moram dentro e em simbiose com a célula) e então evoluíram em organelas.

Um outro exemplo é a evolução de eucariotos unicelulares semelhantes aos animais (presumivelmente os ancestrais dos animais verdadeiros). Imagina-se que eucariotos semelhantes às plantas vieram primeiro, cada um deles empenhado na fotossíntese e equipado com uma parede celular constituída de celulose, assim como com uma membrana por dentro desta parede. A membrana exigia uma ruptura bioquímica, a

formação de esteróis, relacionada ao colesterol e aos hormônios sexuais humanos. A evolução conduziu então a organismos possuidores de membranas destituídas de paredes e assim capazes de dispensar a fotossíntese e de em seu lugar devorar organismos fotossintetizadores. A emergência desta capacidade foi a chave para o surgimento posterior dos animais verdadeiros.

A evolução dos organismos pluricelulares a partir dos unicelulares, presumivelmente por meio de agregação, tornou-se possível em razão de uma outra inovação bioquímica — uma cola que pode manter as células juntas.

Harold Morowitz e outros acreditam que, pelo menos em muitos casos, uma pequena mudança no genoma, produzida por uma mutação ou por algumas poucas, mas que vem no topo de uma série de mudanças anteriores, pode desencadear um evento de ruptura e começar uma das revoluções que interrompem de modo marcante a estabilidade relativa do equilíbrio evolutivo. Ao entrar no domínio aberto pelo evento de ruptura, um organismo adquire novas regularidades muito significativas, as quais o elevam a um nível mais alto de complexidade.

Assim como as perturbações do tipo terremotos (ou colisões da Terra com outros objetos do sistema solar), estes eventos marcantes podem ser considerados ocorrências individuais de grande significado ou eventos insólitos de grande magnitude que estão na esteira de uma distribuição que abrange eventos na sua maior parte de magnitude muito menor.

A AGREGAÇÃO QUE RESULTA EM NÍVEIS MAIS ALTOS DE ORGANIZAÇÃO

Na evolução de uma comunidade ecológica, uma economia ou uma sociedade, as oportunidades de aumento de complexidade continuam surgindo, como acontece na evolução biológica, e resultam em uma tendência da complexidade máxima em aumentar paulatinamente. Os aumentos mais fascinantes de complexidade são aqueles que envolvem uma transição de um nível de organização para um outro mais alto, tipicamente por meio da formação de uma estrutura composta, como na evolução das plantas e animais multicelulares a partir de organismos unicelulares.

Famílias ou bandos de seres humanos reúnem-se para formar uma tribo. Um grupo de pessoas pode juntar seus esforços para enfrentar a vida constituindo uma firma comercial. No ano de 1291, três cantões, aos quais logo se juntou um quarto, fundaram a Confederação Suíça,

que cresceu e se transformou na Suíça moderna. As treze colônias norte-americanas reuniram-se em uma confederação e então, ratificando a constituição de 1787, se transformaram em uma República federal chamada Estados Unidos da América. A cooperação que conduz à agregação pode ser eficiente.

Embora a competição entre os esquemas seja uma característica dos sistemas adaptativos complexos, os próprios sistemas podem se aproveitar de uma mistura de competição e cooperação em suas interações uns com os outros. É muitas vezes benéfico para os sistemas adaptativos complexos reunirem-se para formar uma entidade coletiva que também funciona como sistema adaptativo complexo, por exemplo, quando os indivíduos e empresas em uma economia operam sob um governo que regula o seu comportamento para promover valores importantes para a comunidade como um todo.

A COOPERAÇÃO DE ESQUEMAS

Mesmo entre os esquemas a competição misturada com cooperação é algumas vezes possível e vantajosa. No domínio das teorias, por exemplo, noções que competem entre si não são sempre mutuamente exclusivas; algumas vezes uma síntese de diversas idéias chega mais perto da verdade do que qualquer uma delas individualmente. Ainda assim os proponentes de um ponto de vista teórico particular podem muitas vezes colher recompensas na vida acadêmica e em outros lugares ao afirmar que sua proposta está absolutamente correta e é inteiramente nova, ao mesmo tempo em que argumentam que os pontos de vista adversários estão errados e devem ser descartados. Em alguns campos e em certos casos, esta abordagem pode ser justificada. Contudo, muitas vezes ela é contraproducente.

Na arqueologia, por exemplo, e em outras partes da antropologia, há muito tempo grassam disputas sobre a difusão de peculiaridades culturais versus invenção independente. A invenção do zero na Índia, de onde foi levado para a Europa pelo trabalho de al-Khwarizmi, parece ter sido com toda a probabilidade independente da sua invenção na Mesoamérica, onde foi empregado, por exemplo, pela civilização maia clássica. Se, em vez disso, contatos de algum tipo tivessem sido os responsáveis, é estranho que a roda fosse quase completamente desconhecida no Novo Mundo nos tempos pré-colombianos (tanto quanto sei, ela foi encontrada somente em uns poucos brinquedos provindos do México) mas conhecida há muito tempo no Velho Mundo. O arco e a flecha parecem ter se difundido da América do Norte para a Mesoamérica,

enquanto outros numerosos progressos, como o cultivo do milho, se disseminaram na direção oposta. Como podem os estudiosos estar ainda xingando um ao outro de difusionistas e antidifusionistas?

Alguns antropólogos culturais gostam de chamar a atenção para as motivações ecológicas e econômicas por trás de costumes tribais que parecem à primeira vista arbitrários ou irracionais. Ao fazê-lo, eles prestam um trabalho inestimável, mas algumas vezes vão mais longe e zombam da própria idéia de que a irracionalidade e a escolha arbitrária desempenhem papéis importantes nos sistemas de crenças e padrões de comportamento social. Certamente isto é ir longe demais; um ponto de vista razoável temperaria o determinismo ecológico e econômico com uma pitada de excentricidade dos esquemas tribais. Por exemplo, uma proibição alimentar particular, digamos contra os ocapis, pode fazer sentido para uma certa tribo dadas as necessidades nutricionais da população e quantidade de trabalho necessário para caçá-los comparado com a produção de outros alimentos no contexto ecológico da floresta circundante. Todavia, as restrições podem também se originar de uma identificação anterior do ocapi com o totem da tribo; ou uma mistura de ambas as causas pode estar em funcionamento. É prudente insistir que um ponto de vista ou outro é sempre o correto?

Uma das virtudes do Instituto Santa Fé é a criação de um clima intelectual em que estudiosos e cientistas se sentem atraídos pelas idéias uns dos outros e buscam, muito mais do que em suas instituições de origem, descobrir modos de harmonizar estas idéias e de criar sínteses úteis a partir delas quando isto parece ser o indicado. Em uma ocasião, um seminário no Instituto foi assistido por professores do mesmo departamento da mesma universidade, que descobriram que podiam de algum modo conversar construtivamente em Santa Fé sobre questões que simplesmente teriam provocado disputas na instituição.

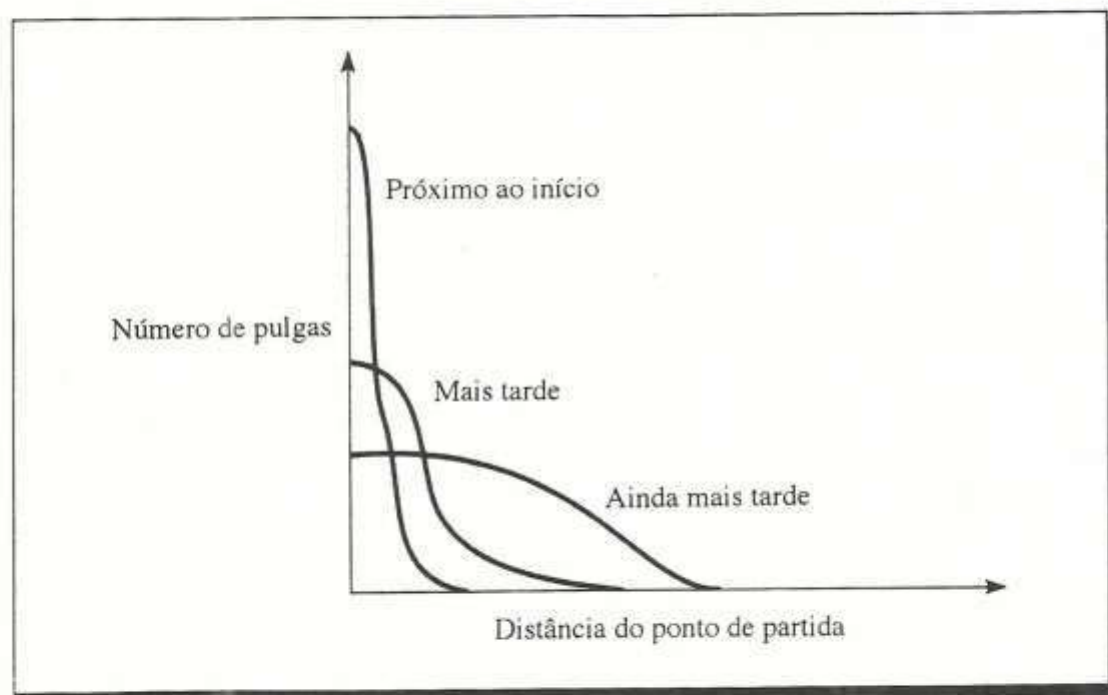
Na evolução biológica, a coisa mais próxima de cooperação entre os esquemas é provavelmente a genética da reprodução sexual, na qual os genótipos dos organismos progenitores ficam misturados em seus descendentes. Em breve voltaremos nossa atenção para a reprodução sexual, mas antes exploremos mais a tendência em direção à complexidade mais alta.

HAVERÁ UMA PROPENSÃO À COMPLEXIDADE MAIS ALTA?

Vimos que a dinâmica da evolução biológica pode ser complicada. Mesmo assim, ela muitas vezes foi representada de modo excessiva-

mente simples. A emergência de formas cada vez mais complexas algumas vezes tem sido confundida com progresso constante em direção a algum tipo de perfeição, que por sua vez pode ser identificada com espécies, e talvez mesmo com a raça ou o sexo, do autor. Felizmente, este tipo de atitude está desaparecendo, e hoje é possível olhar a evolução como um processo em vez de considerá-la teleológica, um meio para um fim.

Não obstante, mesmo agora, e mesmo entre alguns biólogos, persiste a idéia de que até certo ponto uma "propensão" a uma complexibilidade maior é inerente à evolução biológica. Como vimos, o que realmente acontece é um pouco mais sutil. A evolução se dá por etapas, e em cada etapa a complexidade pode aumentar ou diminuir, mas o efeito sobre o conjunto inteiro das espécies existentes é que a maior complexidade representada tem uma tendência de crescer ainda mais com o tempo. Um processo similar acontece numa comunidade que está ficando mais rica de tal modo que qualquer família individual pode ver sua renda crescer, declinar ou permanecer a mesma, mesmo que a faixa de renda esteja ficando mais ampla, de modo que a renda familiar mais alta tende a continuar crescendo.



Distribuições inconstantes de distância em uma caminhada randômica.

Se ignorássemos quaisquer vantagens conferidas às espécies pela complexidade crescente, poderíamos considerar a distribuição inconsistente de complexidade como um tipo de difusão, exemplificada pela “caminhada randômica” sobre uma linha. Um número grande de pulgas parte do mesmo ponto e continua saltando, ao acaso, a mesma distância de cada vez, afastando-se do ponto de partida ou em sua direção (inicialmente, é claro, todas se afastam). Em qualquer momento posterior, uma ou mais pulgas terão saltado a maior distância a partir do ponto de partida. Que pulgas particulares terão percorrido a maior distância depende naturalmente de quais as que por acaso realizaram o maior número de saltos resultantes afastando-se do ponto de partida. A maior distância que qualquer pulga percorre a partir deste ponto tende a continuar crescendo à medida que o tempo passa. A distribuição de distâncias percorridas pelas pulgas a partir do ponto de partida alarga-se à medida que as pulgas sofrem um processo de *difusão* em direção a distâncias cada vez maiores, como é mostrado na página anterior.

O movimento em direção a máximos de complexidade maiores pode se dar de uma maneira que lembre a difusão, especialmente em sistemas não-adaptativos como as galáxias. Entretanto, nos sistemas adaptativos complexos como a evolução biológica, muitas vezes acontece que as pressões seletivas em certas situações favorecem a complexidade mais alta. A distribuição de complexidades em tais casos diferirá na forma, em função do tempo, do resultado de uma caminhada randômica. Embora não haja ainda razão para acreditar em uma propensão constante para maiores organismos mais complexos, as pressões seletivas que favorecem complexidades podem ser muitas vezes fortes. Caracterizar aqueles sistemas e meios ambientes nos quais a complexidade é altamente vantajosa representa um importante desafio intelectual.

Eventos de ruptura no decurso da evolução biológica dão tipicamente origem a grandes aumentos de complexidade e também a vantagens muito significativas. A ocorrência de um evento de ruptura crítico resulta em uma explosão de nichos ecológicos cujo preenchimento pode parecer que foi causado pela propensão a uma complexidade maior.

Como nós humanos somos os organismos mais complexos na história da evolução biológica da Terra, é compreensível que alguns de nós considerem que o processo completo de evolução conduza ao *Homo sapiens*. Embora esta visão seja uma tolice antropocêntrica, há uma sensação de que o papel da evolução biológica realmente acaba em nós, ou está, pelo menos no momento, suspenso. Nosso efeito sobre a biosfera é tão profundo e nossa habilidade em transformar a vida, não apenas por meio de processos lentos e antiquados como a criação de cães, mas por meio de métodos modernos como a engenharia genética, será em breve tão grande

que o futuro da vida na Terra realmente depende em grande parte de escolhas cruciais feitas pela nossa espécie. Deixando de lado alguma renúncia espetacular à tecnologia, muito difícil de se concretizar em vista da enorme população humana com a qual já estamos comprometidos em sustentar, ou a autodestruição da maior parte da raça humana — acompanhada de uma reversão à barbárie do resto —, parece que o papel da evolução biológica natural no futuro imediato será secundário, para melhor ou para pior, em relação ao papel da cultura humana e *sua* evolução.

A DIVERSIDADE DAS COMUNIDADES ECOLÓGICAS

Infelizmente, passará muito tempo antes que o conhecimento humano, a compreensão e a engenhosidade possam se equiparar — se isto um dia ocorrer — à “astúcia” dos diversos bilhões de anos de evolução biológica. Não apenas os organismos individuais desenvolveram seus próprios padrões especiais, intrincados, e modos de vida, mas as interações de grande número de espécies na comunidade ecológica sofreram delicados ajustes mútuos ao longo de grandes períodos de tempo.

As várias comunidades consistem de conjuntos de espécies que diferem entre si dependendo da região do globo e, em cada região, do meio físico. Em terra, o caráter da comunidade varia de acordo com fatores como a altitude, o regime de chuvas e sua distribuição ao longo do ano e a temperatura e seu padrão de variação. As diferenças regionais são relacionadas com as distribuições de espécies que têm sido em muitos casos afetadas pelo movimento dos continentes ao longo de milhões de anos e pelas contingências de migrações antigas e dispersões.

Assim, florestas tendem a diferir bastante umas das outras, mesmo nos trópicos. Nem todas as florestas tropicais são florestas úmidas situadas em baixadas. Algumas situam-se em baixadas mas são secas, outras situam-se nas montanhas rodeadas de nuvens, e assim por diante. Além disso, podemos diferenciar centenas de florestas úmidas distintas, todas possuindo flora e fauna significativamente diferentes. O Brasil, por exemplo, abriga não apenas uma vasta extensão da úmida floresta amazônica, situada em uma baixada, ela mesma variando consideravelmente de composição de lugar para lugar, como também a úmida floresta atlântica, bastante diferente e agora reduzida a apenas uma pequena fração de seu território original. Na sua extremidade sul, a floresta atlântica confunde-se com a floresta do Alto Paraná no Paraguai e com a floresta tropical da província de Misiones na Argentina. A destruição progressiva da floresta amazônica é agora um assunto de interesse geral, embora uma grande parte dela ainda permaneça em pé, algumas vezes, infeliz-

mente, em condições lamentáveis que não são facilmente detectadas do ar, mas a preservação do que ainda resta da floresta atlântica é ainda mais urgente.

Da mesma forma, os desertos diferem um do outro. No deserto de Namib, na Namíbia, a flora e a fauna são, em grande parte, diferentes da flora e da fauna do deserto do Saara no outro extremo da África, e do deserto espinhoso ao sul de Madagascar.

Os desertos de Mojave e do Colorado ao sul da Califórnia são bastante diferentes um do outro e nenhum deles divide muitas espécies com, digamos, o deserto de Negev em Israel. Note, entretanto, que o famoso cacto de Israel, o sabra, é um produto importado do México e da Califórnia. Ao visitar os desertos do Colorado e de Negev, um olhar superficial revelará muitas semelhanças na aparência da flora, mas muita desta similaridade é atribuível não ao parentesco próximo das espécies mas à convergência evolutiva, resultado da ação de pressões seletivas similares. Da mesma forma, muitas euforbiáceas das planícies altas e áridas do leste da África lembram os cactos do Novo Mundo, mas somente porque estes tiveram de se adaptar a climas similares; eles pertencem a famílias diferentes. A evolução produziu muitas soluções distintas porém similares em várias partes do globo para o problema de uma comunidade de organismos que vivem sob um determinado conjunto de condições.

Defrontados com esta variedade ampla de comunidades naturais, terão os humanos a sabedoria coletiva de fazer a escolha de políticas apropriadas? Teremos nós adquirido o poder de efetuar mudanças enormes antes de termos amadurecido o bastante como espécie para utilizá-lo com responsabilidade?

O CONCEITO BIOLÓGICO DE APTIDÃO

As comunidades ecológicas constituídas de muitos indivíduos complexos, pertencentes a um grande número de espécies, todas desenvolvendo esquemas para descrever e prever o comportamento uma da outra, não são sistemas propensos a alcançar ou mesmo chegar muito próximo de um estado final estacionário. Cada espécie evolui na presença de numerosas outras que estão constantemente mudando. A situação é a mais diferente possível da situação dos extremófilos oceânicos, que evoluem em um meio físico-químico razoavelmente constante e interagem com outros organismos principalmente por meio da matéria orgânica que desce até seu nível através da água.

Mesmo a um sistema comparativamente simples e quase independente como os extremófilos não pode ser conferido um atributo numéri-

co rigorosamente definido chamado “aptidão”, e certamente não um que continue a crescer, à medida que a evolução segue seu curso, até que um estado estacionário seja alcançado. Mesmo neste caso simples, é muito mais seguro se concentrar diretamente nas pressões seletivas, os efeitos que favorecem um aspecto fenotípico sobre o outro e deste modo afetam a competição entre os diferentes genótipos. Estas pressões seletivas podem não ser exprimíveis em termos de uma única e bem definida quantidade chamada aptidão. Elas podem exigir uma descrição mais complicada, mesmo no caso idealizado de uma única espécie adaptando-se a um meio constante. É ainda menos provável, então, que uma medida verdadeiramente significativa de aptidão possa ser atribuída a um organismo quando o meio está mudando, e especialmente quando ele pertence a uma comunidade ecológica altamente interativa de organismos que se adaptam às peculiaridades uns dos outros.

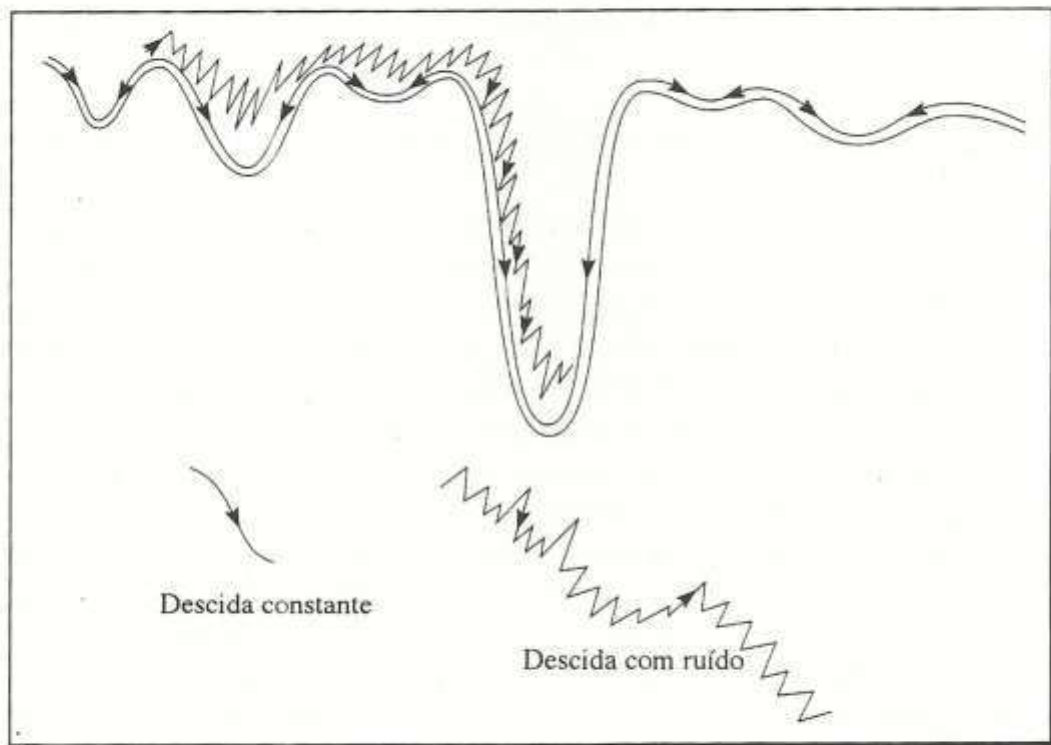
Ainda assim, uma discussão simplificada da evolução biológica em termos de aptidão pode ser muitas vezes instrutiva. A idéia subjacente ao conceito biológico de aptidão é que a propagação de genes de uma geração para a próxima depende da sobrevivência do organismo até que este atinja o estágio de reprodução, seguido pela geração de um número razoável de descendentes que por sua vez sobrevivem para se reproduzir. As taxas diferenciais de sobrevivência e reprodução podem muitas vezes ser aproximadamente descritas em termos de uma variável de aptidão, definida de tal modo que há uma tendência dos organismos com maior aptidão de propagar seus genes de modo mais bem-sucedido do que aqueles com aptidão menor. No caso extremo, organismos com padrões genéticos consistentemente associados com o fracasso na reprodução têm aptidão muito baixa e tendem a desaparecer.

CENÁRIOS DE APTIDÃO

Uma dificuldade geral se torna aparente quando introduzimos a noção aproximada de um “cenário de aptidão”. Imagine genótipos diferentes dispostos sobre uma superfície horizontal bidimensional (substituindo o que é na verdade um espaço matemático multidimensional dos possíveis genótipos). A aptidão ou a inaptidão é representada pela altura; à medida que o genótipo varia, a aptidão define uma superfície bidimensional, com muitas colinas e vales, em três dimensões. Convencionalmente, os biólogos representam a aptidão como crescente quando a altura aumenta, deste modo os máximos de aptidão correspondem aos topos das colinas e os mínimos ao fundo dos poços; entretanto, utilizarei a convenção contrária, que é usual em muitos outros campos, e colocarei a figura

toda de cabeça para baixo. Agora a aptidão aumenta com a profundidade, e os máximos de aptidão são os fundos das depressões, como é mostrado na figura desta página.

O cenário é muito complicado, com numerosos poços (“máximos de aptidão locais”) de profundidade amplamente variável. Se o efeito da evolução fosse sempre o de se mover firmemente colina abaixo — sempre aumentando a aptidão —, então o genótipo provavelmente ficaria preso no fundo de uma depressão rasa e não teria a oportunidade de alcançar os poços profundos que estão próximos e correspondem a uma aptidão maior. No mínimo, o genótipo deve estar se movendo de uma maneira mais complicada do que simplesmente o deslizamento colina abaixo. Se ele estiver também zigzagueando de uma maneira randômica, por exemplo, isto lhe dará uma chance de escapar dos poços rasos e encontrar outros mais profundos por perto. Não deve haver muito zigzague, contudo, ou o processo inteiro deixará de funcionar. Como vimos em uma variedade de relações, um sistema adaptativo complexo funciona melhor numa situação intermediária entre a ordem e a desordem.



Um cenário de aptidão, com a aptidão crescente correspondendo à maior profundidade.

APTIDÃO INCLUSIVA

Uma complicação adicional em utilizar o conceito de aptidão surge nos organismos superiores que se servem da reprodução sexual. Cada um de tais organismos entrega apenas a metade de seus genes a um determinado descendente, enquanto a metade restante vem do outro progenitor. Os descendentes não são clones, mas simplesmente parentes próximos. E o organismo tem outros parentes próximos cuja sobrevivência pode também contribuir para a propagação de genes similares aos seus. Assim os biólogos desenvolveram a noção de “aptidão inclusiva”, que leva em conta até que ponto os parentes de um determinado organismo sobrevivem para se reproduzir, ponderada de acordo com a proximidade do parentesco. É claro que a aptidão inclusiva também leva em conta a sobrevivência do próprio organismo. A evolução deveria ter uma tendência geral em favorecer genótipos que exibam alta aptidão inclusiva, especialmente por meio de padrões genéticos hereditários que promovem a sobrevivência de um organismo e de seus parentes próximos. Esta tendência é chamada “seleção por parentesco”, e se encaixa muito bem na visão da evolução em que os organismos são meramente dispositivos “usados” pelos genes para propagar-se. Este ponto de vista tem sido popularizado sob o nome de “gene egoísta”.

O GENE EGOÍSTA E O “GENE VERDADEIRAMENTE EGOÍSTA”

Uma forma extrema do fenômeno do gene egoísta pode ocorrer no que é chamado “distorção segregacional”. Como descrita pelo sociobiólogo Robert Trivers, a distorção segregacional poderia resultar da operação de um “gene verdadeiramente egoísta”. Ele quer dizer um gene que trabalha diretamente, e não por meio do organismo resultante, para promover seu sucesso na competição com padrões genéticos rivais. Tal gene presente em um animal macho pode fazer com que o espermatozóide que o contém apague ou mesmo envenene outro espermatozóide, e desta maneira vença mais facilmente a competição para fertilizar os óvulos da fêmea. Entretanto, um gene verdadeiramente egoísta não precisa dar qualquer vantagem ao organismo resultante, e pode mesmo ser um pouco danoso.

Além destas possíveis exceções notáveis, as pressões seletivas são exercidas indiretamente, por meio do organismo produzido pelo espermatozóide e pelo óvulo. Isto está mais de acordo com a noção de um sistema adaptativo complexo em que o esquema, neste caso o genoma, é testado no mundo real, neste caso por meio do fenótipo, em vez de indiretamente.

APTIDÃO INDIVIDUAL E INCLUSIVA

Um caso fascinante no qual tanto a aptidão individual comum como a aptidão inclusiva parecem estar envolvidas é o assim chamado comportamento altruístico de certas espécies de pássaros. O gaio mexicano ou peito-cinza vive em habitats áridos no norte do México, sudeste do Arizona e sudoeste do Novo México. Os ornitólogos observaram anos atrás que um determinado ninho desta espécie era muitas vezes atendido por muitos pássaros, e não apenas pelo casal que produzia os ovos. O que estes outros gaios estavam fazendo lá? Estariam eles realmente se comportando de modo altruístico? A pesquisa de Jerram Brown revelou que os ajudantes eram, na maioria dos casos, eles próprios descendentes do casal; eles estavam ajudando a criar seus próprios parentes. Este comportamento parecia fornecer um exemplo marcante da evolução do comportamento social via aptidão inclusiva. A evolução tinha favorecido um padrão de comportamento no qual os gaios jovens, adiando sua própria reprodução, ajudavam a alimentar e a cuidar de seus irmãos mais novos velando assim pela propagação de genes intimamente relacionados com os seus.

Mais recentemente, o quadro se tornou mais complicado em consequência do trabalho de John Fitzpatrick e Glen Woolfenden sobre um tipo relacionado de gaio, o gaio da Flórida, que é encontrado no habitat em extinção de carvalhos secos dos cerrados do sul da Flórida. Até agora este pássaro tinha sido considerado usualmente uma das muitas subespécies do gaio dos cerrados, que é muito comum no sudoeste dos Estados Unidos, mas Fitzpatrick e Woolfenden estão propondo que ele seja tratado como uma espécie separada em razão de sua aparência, vocalizações, comportamento e genética. O comportamento inclui a ajuda no ninho, como no caso do gaio peito-cinza. Aqui também os ajudantes tendem a ser descendentes do casal reprodutor, mas as observações dos pesquisadores da Flórida indicam que os ajudantes estão servindo aos seus interesses próprios assim como os de seus "irmãos". Os ajudantes estão em melhor posição para herdar todo ou parte do território onde estão trabalhando. Pelo menos na Flórida, parece que a aptidão individual comum desempenha um papel muito importante no comportamento "altruístico" do gaio.

Introduzi a história do gaio não para tomar partido em uma controvérsia entre ornitólogos, mas apenas para ilustrar a sutileza de toda a idéia de aptidão, seja ela inclusiva ou não. Mesmo quando a aptidão é um conceito útil, ele é ainda um pouquinho circular. A evolução favorece a sobrevivência do mais apto, e os mais aptos são aqueles que sobrevivem, ou aqueles cujos parentes próximos sobrevivem.

A APTIDÃO DO SEXO

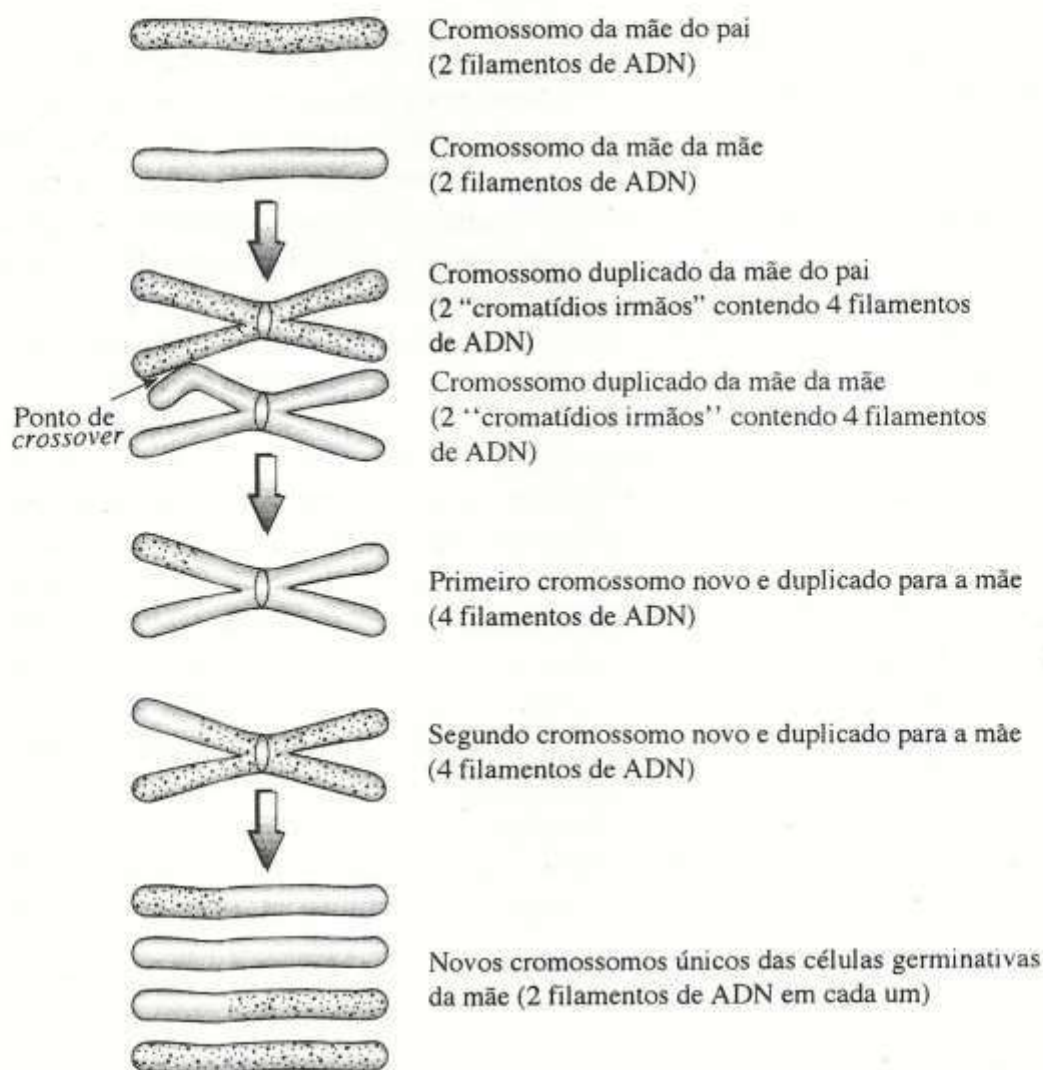
O fenômeno da reprodução sexual coloca alguns desafios especiais às teorias das pressões seletivas e da aptidão. Como numerosos outros organismos, os animais superiores tendem a se reproduzir sexualmente. Ainda assim, em muitos casos estes mesmos animais não são incapazes de partenogênese, na qual as fêmeas dão origem a descendentes com material genético idêntico, exceto por possíveis mutações. Os serviços de um macho não são necessários. Mesmo os ovos de um animal tão complexo como uma rã podem ser estimulados, digamos com uma agulha, a produzir girinos que crescem e se transformam em rãs adultas. Em muito poucos casos, como o do lagarto de rabo em forma de chicote do México e do sudoeste dos Estados Unidos, espécies inteiras de vertebrados parecem sair-se bem unicamente com a partenogênese. Então, por que o sexo? Qual é a enorme vantagem que a reprodução sexual confere? Por que ela é usualmente preferida em vez da partenogênese? Para que servem os machos?

A reprodução sexual introduz a diversidade nos genótipos dos descendentes. Grosseiramente falando, os cromossomos (cada um contendo uma cadeia de genes) existem em pares correspondentes e o indivíduo herda, de cada par, um do pai e um da mãe. Qual deles ele herda de cada progenitor é na sua maior parte uma questão de acaso. (Em gêmeos idênticos, estas escolhas estocásticas são as mesmas para ambos.) Os descendentes de organismos com muitos pares de cromossomos geralmente têm conjuntos de cromossomos diferentes daqueles dos pais.

Além disso, a reprodução sexual introduz um novo mecanismo completo, além da mutação comum, para mudança nos cromossomos. No processo chamado "*crossing-over*", ilustrado na página 265, um par de cromossomos correspondentes da mãe ou do pai pode ser parcialmente trocado com outro na formação de um espermatozóide ou um óvulo, respectivamente. Digamos que o *crossing-over* ocorra no caso do óvulo, fornecido pela mãe. O óvulo adquire um cromossomo misto consistindo em uma parte fornecida pela mãe do pai e o resto pela mãe da mãe, enquanto um outro óvulo pode receber um cromossomo que consiste nas partes restantes dos cromossomos do avô e da avó maternos.

O teórico evolucionista William Hamilton, agora detentor de uma cátedra em Oxford, sugeriu uma explicação simples para o valor da reprodução sexual. Grosseiramente falando, sua idéia é que os inimigos de uma espécie, especialmente os parasitas prejudiciais, acham mais difícil a adaptação aos diversos atributos de uma população gerada pela reprodução sexual do que a comparativa uniformidade de uma população gerada pela partenogênese. A mistura de cromossomos fornecidos

pelo pai e pela mãe, e também o processo de *crossing-over*, permite todos os tipos de combinações novas que podem ocorrer entre os descendentes, forçando os parasitas a lidar com uma ampla variedade de hospedeiros, apresentando químicas do corpo diferentes, habitats diferentes, e assim por diante. Em conseqüência, os inimigos têm problemas e os hospedeiros ficam mais seguros.



O *crossing-over* de cromossomos na reprodução sexual.

A teoria mostra que espécies sem reprodução sexual devem ter outros mecanismos para lidar com os parasitas, especialmente grupos inteiros de animais inferiores que não têm sexo há dezenas de milhões de anos. Os rotíferos bdelóideos formam um grupo deste tipo. Eles são

animálculos em forma de roda que habitam lugares como os leitos de musgo, que são úmidos na maior parte do tempo, mas ficam secos a cada poucas semanas ou meses, dependendo dos caprichos do tempo. Uma aluna de Hamilton, Olivia Judson, está estudando estes rotíferos e tentando determinar como eles lidam com os parasitas. Ela sugeriu que seu hábito de dessecar e se espalhar quando a vizinhança seca pode lhes dar proteção suficiente contra os parasitas que podem distribuir com o sexo.

De qualquer modo, as vantagens da reprodução sexual devem ser consideráveis para superar as desvantagens óbvias de cortar os genótipos bem-sucedidos dos pais e avós que sobreviveram tempo suficiente para se reproduzir. Entretanto, estas vantagens são acrescentadas à população como um todo, enquanto muitos biólogos evolutivos insistem que as pressões seletivas são exercidas apenas sobre os indivíduos. Talvez isto não precise ser uma regra rígida.

Em um encontro recente no Instituto Santa Fé, John Maynard Smith, que ensina na Universidade de Sussex, estava tecendo comentários sobre esta questão quando Brian Arthur, que dirigia a sessão, lembrou a ocasião em que se encontraram pela primeira vez. Ambos tinham um passado na engenharia. Maynard Smith se tornou um projetista de aviões e depois abraçou a biologia evolutiva, para a qual fez algumas contribuições notáveis. Brian, que cresceu em Belfast, foi para a pesquisa operacional e depois economia, tornando-se professor em Stanford e diretor-fundador do programa de economia do Instituto Santa Fé. Eles se encontraram pela primeira vez em uma reunião científica na Suécia, onde Maynard Smith observou durante uma palestra que, embora o sexo tivesse vantagens óbvias para a população, não era claro o que ele fazia pelo indivíduo. Brian gritou da platéia: "Que visão mais inglesa do sexo!" Maynard Smith, sem perder a compostura, respondeu: "Pela sua pronúncia vejo que é irlandês. Bem, pelo menos na Inglaterra *temos* sexo."

MORTE, REPRODUÇÃO E POPULAÇÃO NA BIOLOGIA

Embora o sexo não seja em absoluto universal na biologia, a morte chega muito perto de o ser. A morte dos organismos é uma das mais dramáticas manifestações da segunda lei da termodinâmica. Como tal, ela é em certo sentido, comum a todos os sistemas adaptativos complexos. Contudo, é especialmente significativa na evolução biológica, onde o intercâmbio entre morte e reprodução está na vanguarda do processo adaptativo. A competição entre conjuntos de genótipos se transfere em

grau considerável para a competição pelo tamanho populacional entre as espécies correspondentes de organismos. Na medida em que a aptidão é bem definida na evolução biológica, ela está relacionada com o tamanho da população.

A comparação de vários tipos de sistemas adaptativos complexos revela sistemas nos quais a morte, a reprodução e a população são menos importantes do que na biologia. Por exemplo, considere um indivíduo humano profundamente absorto em seus pensamentos, resolvendo um problema. Os esquemas neste caso são as idéias e não os genótipos. O análogo da morte é o esquecimento. Ninguém pode negar a prevalência ou o significado do esquecimento, mas ele desempenha mal o mesmo papel que a morte na biologia. Se não houvesse necessidade de esquecer, necessidade de "apagar a fita", o caráter do pensamento não mudaria dramaticamente. Gravar uma idéia é útil, e isto contrabalança o efeito do esquecimento, mas o número de memorandos idênticos ou quase idênticos não caracteriza a aptidão de uma idéia na mesma medida em que a população tende a correlacionar com aptidão na biologia.

À medida que as idéias se difundem pela sociedade (mesmo na comunidade científica), o número de pessoas que dividem uma determinada idéia não tem importância. Nas eleições democráticas, na medida em que elas estão preocupadas com as idéias, a opinião da maioria prevalece. Ainda assim, é notório que mesmo um número avassalador de adeptos não torna necessariamente a idéia correta, e não pode garantir a sua sobrevivência a longo prazo.

Para um caso mais parecido com a evolução biológica, podemos voltar nossa atenção para a competição entre as sociedades humanas no passado. A aptidão era em grande parte medida pela população. No sudeste da Ásia, por exemplo, alguns grupos étnicos praticavam a cultura do arroz irrigado enquanto outros plantavam arroz seco, muitas vezes desmatando e queimando a floresta. Os povos que plantavam o arroz irrigado, como os tailandeses, os laosianos ou os vietnamitas, foram capazes de gerar e manter muito mais indivíduos por unidade de área do que seus vizinhos. Populações mais densas os ajudaram a dominar os povos que plantavam o arroz seco, e em muitos casos a expulsá-los para territórios montanhosos remotos. Olhando para o futuro, podemos perguntar também se é desejável que a densidade ou os números totais continuem a determinar vencedores e perdedores da mesma maneira.

O PREENCHIMENTO DOS NICHOS

A evolução biológica, com sua ênfase na morte e na população, é razoavelmente eficiente a longo prazo na tarefa de preencher os nichos ecoló-

gicos à medida que estes surgem. Quando há uma oportunidade de fazer a vida de uma certa maneira, é provável que algum organismo surja para explorá-la, mesmo que este modo de vida possa parecer bastante estranho a um observador humano.

A analogia entre uma comunidade ecológica e uma economia de mercado é relevante a este respeito. À medida que surgem oportunidades de obter lucros nesta economia, os indivíduos ou empresas provavelmente (embora não seja em absoluto certo) apareceram para se beneficiar delas. O análogo da morte neste caso é falir, e é a riqueza e não a população que é uma medida aproximada da aptidão de uma empresa.

Tanto na economia como na ecologia, o advento de um novo negócio ou um novo organismo (ou um novo tipo de comportamento em uma empresa ou organismo já existente) alterará o cenário de aptidão para os outros membros da comunidade. Do ponto de vista de uma empresa ou de uma espécie, este cenário está mudando constantemente, além de não ser, para começar, bem definido.

Ambos os casos ilustram como um sistema adaptativo complexo, uma vez estabelecido, pode preencher nichos, criar novos no processo, preenchê-los, e assim por diante, gerando novos sistemas adaptativos complexos no caminho. (Como indicado no diagrama da página 38, a evolução deu origem aos sistemas imunológicos dos mamíferos, ao aprendizado e ao raciocínio, e, por meio dos seres humanos, a sociedades que aprendem e se adaptam, e recentemente a computadores que operam como sistemas adaptativos complexos.)

Sempre explorando, buscando oportunidades, experimentando novidades, os sistemas adaptativos complexos experimentam aumentos na complexidade e ocasionalmente descobrem eventos de ruptura que abrem a possibilidade de novas estruturas completas, inclusive novos tipos de sistemas adaptativos complexos. Dado um tempo suficiente, a probabilidade de evolução da inteligência parece ser grande.

Os astrônomos e cientistas planetários não conhecem nenhuma razão pela qual os sistemas planetários deveriam ser particularmente raros na nossa galáxia ou em outras similares de outras partes do universo. Também os teóricos da origem da vida não apresentaram qualquer coisa de notável sobre as condições de nosso próprio planeta há alguns 4 bilhões de anos para que a origem da vida (ou algo semelhante à vida) em um planeta pudesse ser um evento particularmente improvável. É possível que sistemas adaptativos complexos abundem no universo e que muitos deles tenham desenvolvido ou venham a desenvolver a inteligência. Como mencionado anteriormente, as principais incógnitas estatísticas no programa de busca de inteligências extraterrestres (SETI) é o número de planetas por unidade de volume do espaço no qual os seres

inteligentes surgiram e da duração típica de seu período de civilização tecnológica, com emissão de sinais eletromagnéticos. Dada a enorme quantidade de coisas que podemos apreender da diversidade das comunidades naturais da Terra, sem falar na diversidade das sociedades humanas, é espantoso imaginar (como alguns escritores de ficção científica algumas vezes o fazem) as lições que os contatos com os extraterrestres poderiam nos dar sobre a variedade de circunstâncias que os sistemas adaptativos complexos poderiam explorar.

O ENGODO ENTRE OS PÁSSAROS

Para exemplos divertidos de exploração de oportunidades por espécies interagindo com outras espécies, podemos voltar nossa atenção para a mentira praticada por outros animais que não os humanos. O engodo por meio da mímica é bem conhecido; por exemplo, a borboleta vice-rei assemelha-se à borboleta monarca e assim aproveita o mau gosto desta última. O cuco (no Velho Mundo) e o pássaro negro americano (no Novo Mundo) praticam um outro tipo de engodo ao depositar seus ovos nos ninhos de outros pássaros; os filhotes intrusos se livram dos ovos e filhotes que pertencem ao ninho e monopolizam a atenção dos pais adotivos. Mas isto é realmente mentir?

Estamos acostumados a ouvir as pessoas mentir, mas de alguma forma isto é mais surpreendente em outros organismos. Quando a marinha argentina localiza um periscópio misterioso no estuário do rio da Prata exatamente antes de o orçamento das forças armadas ser considerado pelo Congresso, suspeitamos de que o engodo esteja sendo praticado para capturar recursos adicionais, e não ficamos particularmente surpreendidos. Mas o comportamento análogo entre os pássaros é mais inesperado.

Um destes casos foi descoberto recentemente por meu amigo Charles Munn, um ornitólogo que estuda bandos mistos à procura de alimento nas terras baixas da floresta tropical do Parque Nacional de Manu, no Peru. Algumas espécies procuram alimentos juntas na parte inferior da cobertura da floresta e outras na cobertura intermediária, onde algumas vezes recebem a companhia do colorido tangará, um pássaro frugívoro da cobertura superior. Entre as espécies encontradas nestes bandos no inverno estão uns poucos migrantes da América do Norte. Mais ao norte nas Américas Central e do Sul há muitos mais. Nós, residentes da América do Norte, os conhecemos como espécies que fazem seus ninhos no verão e ficamos intrigados ao vê-los levando uma vida

muito diferente em uma terra distante. Se eles voltam ano após ano para fazer seus ninhos, seus habitats nos países meridionais devem ser protegidos. Da mesma forma, seu retorno a estes países estará em perigo se as florestas norte-americanas forem cortadas em partes ainda menores do que as que restam hoje em dia. Por um motivo: desbastar a floresta permite mais incursões do parasítico pássaro negro.

Em cada bando misto à procura de alimentos, há uma ou duas espécies sentinelas, que se movem de tal forma que usualmente estão próximas ao centro do bando ou justamente embaixo. As sentinelas avisam os outros com um trinado especial quando aves que podem se mostrar ser de rapina se aproximam. Charlie observou que as sentinelas dos bandos que voam mais baixo dão sinais de alarme mesmo quando não há qualquer perigo aparente. Observando mais de perto, descobriu que os falsos alarmes permitiam que algumas vezes a sentinela se apoderasse de um suculento bocado que de outra forma um outro membro do bando poderia ter comido. A observação cuidadosa mostrou que as sentinelas praticavam o engodo em cerca de 15% do tempo, muitas vezes lucrando com isto. Perguntando-se se o fenômeno poderia ser geral, Charlie examinou o comportamento dos bandos que voavam entre a cobertura intermediária da floresta e descobriu que suas sentinelas faziam a mesma coisa. Para as duas espécies de sentinelas, a porcentagem de alarmes falsos era mais ou menos a mesma. Presumivelmente, se a porcentagem fosse muito maior, os sinais não seriam acatados pelo resto do bando (lembre-se da história *The Boy Who Cried "Wolf"*), e, se fosse mais baixa, a oportunidade de a sentinela obter comida extra mentindo seria parcial ou totalmente desperdiçada. Fiquei intrigado pelo desafio de obter, por meio de algum tipo de raciocínio matemático, o valor de cerca de 15%; em um modelo plausível, poderia este valor ser um dividido por dois pi?

Quando fiz essa pergunta a Charles Bennett, ele se lembrou de algo que seu pai lhe havia dito sobre as unidades da Real Força Aérea Canadense baseadas na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial. Elas acharam útil, ao enviar um caça e um bombardeiro juntos, tentar enganar a Luftwaffe colocando o caça abaixo do bombardeiro e não acima. Depois de muitas tentativas e erros, acabaram seguindo este procedimento ao acaso, *uma vez em sete*.

PEQUENOS PASSOS E GRANDES MUDANÇAS

Na nossa discussão sobre os eventos de ruptura, listamos alguns exemplos de desenvolvimentos na evolução biológica que se assemelham a

saltos enormes, mas também chamamos a atenção para que estes são ocorrências raras situadas em uma das extremidades do espectro completo das mudanças de magnitude variada; as pequenas mudanças próximas do outro extremo do espectro são muito mais frequentes. Seja qual for a magnitude do evento, a evolução biológica tipicamente prossegue trabalhando com o que é disponível. Os órgãos existentes são adaptados para novos usos. Os braços humanos, por exemplo, são patas dianteiras ligeiramente modificadas. As estruturas não são repentinamente descartadas em um rearranjo revolucionário de todo o organismo. Os mecanismos de mutação e seleção natural não favorecem tais descontinuidades. Ainda assim, as revoluções acontecem.

Discutimos como, no fenômeno do “equilíbrio interrompido”, as mudanças comparativamente repentinas podem ter origens diferentes. Uma é a mudança do meio físico-químico que altera as pressões seletivas de modo significativo. Uma outra é o resultado da “mudança lenta de rota”, na qual mutações neutras, aquelas que não perturbam a viabilidade do fenótipo (e algumas vezes não o alteram muito), gradualmente conduzem a um tipo de instabilidade do genótipo. Nesta situação, uma mutação ou algumas poucas podem fazer uma diferença significativa para o organismo e preparar o caminho para uma cascata de mudanças também em várias outras espécies. Algumas vezes pequenas mudanças iniciam eventos de ruptura, muitas vezes de caráter bioquímico, que abrem novos domínios inteiros de formas de vida. Em alguns casos, estas mudanças revolucionárias se originam da agregação de organismos em estruturas compostas. Mas em todos os casos a unidade básica de mudança é uma mutação (ou recombinação, com ou sem *crossing-over*) que opera sobre o que já existe. Nada é inventado a partir de coisas novas.

Quão geral é este princípio para os sistemas adaptativos complexos? No pensamento humano, por exemplo, é necessário prosseguir por pequenos passos? O processo de invenção é destinado apenas a juntar as pequenas mudanças naquilo que já existe? Por que não deveria um ser humano ser capaz de inventar um mecanismo inteiramente novo, totalmente diferente de qualquer coisa conhecida? Na ciência, por que não conceber uma teoria completamente nova, que não tenha qualquer semelhança com as idéias anteriores?

A pesquisa (assim como a experiência diária) parece indicar que de fato o pensamento humano usualmente se dá por associações e em etapas, em cada uma sendo feitas alterações específicas naquilo que já foi pensado. Ainda assim estruturas notáveis, algumas vezes realmente aparecem, nos descobrimentos, na ciência, nas artes e em muitos outros

campos do empreendimento humano. Tais rupturas nos lembram dos eventos de ruptura na evolução biológica. Como eles aparecem? O pensamento criativo humano obedecerá a padrões diferentes nestas diversas áreas de atividade? Ou haverá alguns princípios gerais envolvidos?

CAPÍTULO 17

DO APRENDIZADO AO PENSAMENTO CRIATIVO

Vamos começar com algumas observações sobre a realização criativa na ciência teórica e explorar sua relação com certos tipos de realização em outros campos.

Uma nova e bem-sucedida idéia teórica tipicamente altera e estende o conjunto de conhecimentos teóricos já existente para incluir fatos que não poderiam ser anteriormente compreendidos ou incorporados. Possibilita também novas predições que algum dia possam vir a ser aceitas.

Quase sempre a nova idéia inclui um *insight* negativo, o reconhecimento de que algum princípio previamente aceito está errado e deve ser descartado. Muitas vezes uma idéia anterior correta estava acompanhada, por razões históricas, de uma bagagem intelectual desnecessária que é agora essencial que seja abandonada. De qualquer modo, somente o afastamento da idéia recebida, excessivamente restritiva, pode possibilitar o desenvolvimento.

Algumas vezes uma idéia correta, quando é proposta pela primeira vez e aceita, recebe uma interpretação muito limitada. Em certo sentido, as possíveis implicações não são levadas suficientemente a sério. Então o proponente original ou algum outro teórico deve retornar a ela, considerando-a mais seriamente do que quando originalmente proposta para que seu significado completo possa ser apreciado.

A rejeição de uma idéia errada recebida e o retorno a uma idéia correta que não foi amplamente aplicada são ilustrados pelo primeiro artigo de Einstein sobre a relatividade especial, que ele publicou em 1905, aos 26 anos. Ele tinha de romper com a idéia aceita, mas errônea, de espaço e tempo absolutos. Então pôde considerar seriamente como um princípio geral o conjunto de simetrias das equações de Maxwell do eletromagnetismo — as simetrias que correspondem à relatividade espe-

cial. Até então elas tinham sido vistas de modo restrito como válidas para o eletromagnetismo mas não, por exemplo, para a dinâmica das partículas.

UM EXEMPLO DA MINHA EXPERIÊNCIA PESSOAL

Tem sido para mim um prazer e muita sorte descobrir umas poucas idéias úteis na teoria das partículas elementares, não, é claro, ao nível de Einstein, mas suficientemente interessantes para me fornecer um pouco de experiência pessoal do ato de criação aplicado à ciência teórica.

Um exemplo, bem do começo da minha carreira, será suficiente como ilustração. Em 1952, quando me juntei ao corpo docente da Universidade de Chicago, tentei explicar o comportamento das novas “partículas estranhas”, assim chamadas porque eram produzidas copiosamente como se interagissem fortemente e ainda assim decaíam lentamente como se estivessem interagindo fracamente. Aqui “lentamente” significa uma meia-vida de algo como 10 bilionésimos de segundo; uma taxa de decaimento normal de um estado de partícula que interage fortemente corresponde a uma meia-vida de 1 trilionésimo de trilionésimo de segundo, aproximadamente o tempo que a luz leva para atravessar tal partícula.

Conjetei corretamente que a interação forte, responsável pela copiosa produção de partículas estranhas, era proibida por alguma lei de induzir o decaimento, o qual era então forçado a se dar lentamente por meio da interação fraca. Mas qual era esta lei? Os físicos há muito tempo tinham especulado sobre a conservação pela interação forte de uma quantidade chamada spin isotópico I , que pode ter valores 0, $1/2$, 1, $3/2$, 2, $5/2$, e assim por diante. Evidências experimentais em favor desta idéia estavam sendo reunidas nesta época por um grupo de físicos em outra ala da universidade, liderados por Enrico Fermi, e decidi verificar se a conservação do spin isotópico poderia ser a lei em questão.

O saber convencional dizia que os estados nucleares (que interagem fortemente) de partículas fermiônicas como o nêutron e o próton deveriam ter valores de I iguais a $1/2$, $3/2$ ou $5/2$, e assim por diante, seguindo o exemplo destes, que têm $I = 1/2$. A idéia foi reforçada pelo fato de que os férmions devem ter momento angular intrínseco (spin) igual a $1/2$, $3/2$ ou $5/2$, e assim por diante. Da mesma forma se acreditava que as partículas bosônicas que interagem fortemente, os mésons, deveriam ter $I = 0$, 1 ou 2, e assim por diante, como o méson conhecido, o pión, que tem $I = 1$. Novamente o paralelo com o momento angular

intrínseco (spin), que deve ser um número inteiro para um bóson, reforçava a crença em uma idéia recebida.

Um conjunto de partículas estranhas (agora chamadas partículas sigma e lambda) consiste em férmions interagindo fortemente que decaem lentamente em um pión ($I = 1$) mais um nêutron ou um próton ($I = 1/2$). Pensei em atribuir a estas partículas estranhas um spin isotópico $I = 5/2$, o que manteria a proibição das interações fortes de induzir o decaimento. Mas esta noção não funcionou porque os efeitos eletromagnéticos como a emissão de um fóton poderiam mudar I de uma unidade a cada vez e assim contornar a lei que de outra forma proibiria o decaimento rápido. Fui convidado a falar sobre minha idéia e explicar por que ela não tivera sucesso no Instituto de Estudos Avançados em Princeton. Ao discutir as partículas sigma e lambda, eu iria dizer “suponha que elas tenham $I = 5/2$, de modo que a interação forte não possa induzir seu decaimento” e então mostraria como o eletromagnetismo destrói o argumento ao mudar $I = 5/2$ para $I = 3/2$, um valor que permitiria ao decaimento em questão prosseguir rapidamente por meio da interação forte.

Por um pequeno deslize disse “ $I = 1$ ” em vez de “ $I = 5/2$ ”. Parei imediatamente percebendo que $I = 1$ resolveria o problema. O eletromagnetismo não poderia mudar $I = 1$ para $I = 3/2$ ou $1/2$, e assim o comportamento das partículas estranhas poderia ser agora afinal explicado por meio da conservação de I .

Mas o que fazer com a suposta regra de que estados de partícula fermiônicos interagindo fortemente devem ter valores de I iguais a $1/2$, $3/2$ ou $5/2$? Compreendi instantaneamente que a regra era simplesmente uma superstição; não havia necessidade real dela. Era uma bagagem intelectual desnecessária que viera junto com o útil conceito de spin isotópico I , e chegara a época de se livrar dela. Então o spin isotópico poderia ter aplicações mais amplas do que antes.

A explicação do decaimento de partículas estranhas que surgiu de um pequeno deslize se mostrou correta. Hoje, temos uma compreensão mais profunda da explicação e uma maneira correspondentemente mais simples de enunciá-la: os estados de partículas estranhas diferem dos estados mais familiares, como o nêutron, o próton ou os píons, porque têm pelo menos um quark s ou “estranho” no lugar de um quark u ou de um quark d . Apenas a interação fraca pode converter um sabor de quark em outro, e este processo acontece lentamente.

EXPERIÊNCIAS COMPARTILHADAS DE CONCEBER IDÉIAS CRIATIVAS

Por volta de 1970 eu era membro de um pequeno grupo de físicos, bió-

logos, pintores e poetas reunidos em Aspen, Colorado, para discutir a experiência de ter idéias criativas. Cada um de nós descreveu um incidente em nosso próprio trabalho. Meu exemplo foi o que envolvia o pequeno deslize durante minha palestra em Princeton.

Todos os relatos concordavam de um modo notável. Cada um de nós havia encontrado uma contradição entre o modo estabelecido de fazer as coisas e algo que precisávamos realizar: na arte, a expressão de um sentimento, um pensamento, um *insight*; na ciência teórica, a explicação de alguns fatos experimentais em face de um “paradigma” que não permitia tal explicação.

Primeiro, trabalhamos durante dias, semanas ou meses, enchendo nossas mentes com as dificuldades do problema em questão, tentando superá-las. Segundo, chegou um tempo em que o pensamento consciente adicional era inútil, mesmo que continuássemos a carregá-lo conosco. Terceiro, repentinamente, enquanto andávamos de bicicleta, fazíamos barba ou cozinhávamos (ou cometíamos um pequeno deslize, como no exemplo que descrevi), a idéia crucial surgia. Havíamos nos libertado da rotina à qual estivéramos presos.

Estávamos todos impressionados com a congruência das nossas histórias. Mais tarde aprendi que este *insight* sobre o ato de criação era de fato bastante antigo. Hermann von Helmholtz, o grande fisiologista e físico do final do século XIX, descreveu os três estágios na concepção de uma idéia como impregnação, incubação e iluminação, em perfeita concordância com o que os membros de nosso grupo em Aspen haviam discutido um século mais tarde.

Agora, o que acontece durante o segundo estágio, aquele de incubação? Para os psicanaliticamente orientados, entre outros, uma interpretação que vem imediatamente à mente é que a atividade mental continua durante o período de incubação, mas na “mente pré-consciente”, nas fímbrias da percepção. Minha própria experiência com o surgimento da resposta certa num pequeno deslize dificilmente poderia se ajustar melhor a esta interpretação. Mas alguns psicólogos acadêmicos, desconfiados desta abordagem, oferecem uma sugestão alternativa, a de que nada realmente acontece durante a incubação exceto talvez um enfraquecimento da nossa crença no princípio falso que está obstruindo a busca da solução. O pensamento criativo real, no seu ponto de vista, se dá um pouco antes do momento da iluminação. De qualquer modo, tipicamente, um intervalo de tempo apreciável decorre entre a impregnação e a iluminação, e podemos pensar neste intervalo como o período de incubação, seja considerando-o um pensamento intenso fora dos limites da percepção ou apenas permitindo que algum preconceito gradualmente perca sua capacidade de retardar a descoberta de uma solução.

Em 1908, Henri Poincaré adicionou um quarto estágio, importante embora bastante óbvio — a verificação. Ele descreveu sua própria experiência no desenvolvimento de uma teoria de um certo tipo de função matemática. Poincaré trabalhou no problema sem parar durante duas semanas, sem sucesso. Uma noite, insone, pareceu-lhe que “as idéias surgiam aos borbotões; eu as senti colidir até que interligaram-se aos pares, por assim dizer, constituindo uma combinação estável”. Ainda assim ele não obteve a solução. Mas, alguns dias mais tarde, estava embarcando em um ônibus que deveria levá-lo com alguns colegas para uma viagem de campo geológica. “A idéia me ocorreu, sem que nada em meus pensamentos parecesse ter lhe preparado o caminho, de que as transformações que eu utilizara para definir estas funções eram idênticas às da geometria não-euclidiana. Não verifiquei a idéia e, ao tomar meu lugar, prossegui com a conversação que já havia começado, mas senti uma certeza perfeita. Ao retornar a Caen, para desencargo de consciência, verifiquei o resultado.”

O psicólogo Graham Wallas descreveu formalmente o processo em quatro estágios em 1926, e desde então ele tem sido padrão no ramo pertinente da psicologia, embora acredite que nenhum de nós, no encontro de Aspen, jamais tinha ouvido falar dele. Encontrei-o pela primeira vez em um livro popular intitulado *The Universe Within*, de Morton Hunt, de onde as citações acima foram retiradas.

PODE A INCUBAÇÃO SER APRESSADA OU CONTORNADA?

Agora, é necessário passar por este processo? Poderá o estágio de incubação ser apressado ou contornado de modo que não tenhamos de esperar tanto para que a nova idéia requerida surja? Poderemos encontrar um modo mais rápido para escapar da rotina intelectual à qual estamos presos?

Muitas pessoas que oferecem programas especiais que visam a ensinar habilidades mentais acreditam que uma destas habilidades que elas podem reforçar é o pensamento criativo. Algumas de suas sugestões para ajudar a tirar o processo mental da rotina se ajustam bastante bem a uma discussão deste processo em termos de sistemas adaptativos complexos. Em geral, o aprendizado e o pensamento exemplificam sistemas adaptativos complexos em funcionamento, e talvez a maior expressão sobre a Terra deste tipo de habilidade seja o pensamento criativo humano.

UMA ANÁLISE APROXIMADA EM TERMOS DE UM CENÁRIO DE APTIDÃO

Como em outras análises de sistemas adaptativos complexos, é instrutivo introduzir as noções de aptidão e de cenário de aptidão, embora, mais ainda do que no caso da evolução biológica, estes conceitos sejam idealizações excessivamente simplificadas. É improvável que um conjunto de pressões seletivas que ocorra nos processos mentais possa ser expresso em termos de uma aptidão bem definida.

Isto é especialmente verdadeiro para a busca de idéias criativas por parte de um artista. Na ciência, o conceito provavelmente é quase aproximadamente válido. A aptidão de uma idéia teórica na ciência seria uma medida do quanto ela melhora a teoria já existente, digamos ao explicar novas observações enquanto mantém ou aumenta a coerência e o poder explanatório desta teoria existente. De qualquer modo, imaginemos que temos um cenário de aptidão para as idéias criativas. Continuaremos a associar a altura decrescente com o aumento de aptidão (compare com o diagrama da página 261).

Como vimos no caso da evolução biológica, é demasiado simples supor que um sistema adaptativo complexo simplesmente escorregue colina abaixo no cenário. Ao entrar em uma depressão, o sistema se moveria colina abaixo até alcançar o fundo, o local máximo de aptidão. A região a partir da qual o movimento colina abaixo conduz a este ponto é chamada bacia de atração. Se o sistema não fizesse nada a não ser deslizar, seria altamente provável que ficasse preso no fundo de uma depressão rasa. Em uma escala maior, há muitas bacias, e muitas podem ser mais profundas (e portanto mais aptas, mais "desejáveis") do que aquela que o sistema encontrou, como é mostrado na página 261. Como o sistema faz para explorar estas outras bacias?

Um método de escapar de uma bacia de atração, como foi discutido anteriormente na evolução biológica, envolve o ruído, o que quer dizer: movimento ao acaso superposto à tendência de descer. O ruído fornece ao sistema a chance de escapar de uma depressão rasa e procurar outras mais profundas por perto, e de realizar esta operação várias vezes até que o fundo de uma bacia realmente profunda seja atingido. Entretanto, o ruído deve ser tal que as amplitudes das incursões ao acaso não sejam muito grandes. Caso contrário, haveria muita interferência com o processo de descida, e o sistema não permaneceria em uma bacia profunda mesmo depois de a ter encontrado.

Uma outra possibilidade é termos pausas, durante o processo de descida lenta e constante colina abaixo, que possibilitem uma exploração melhor das vizinhanças. Estas explorações podem permitir a descoberta de depressões mais profundas que estão próximas. Em alguma

medida, tais pausas correspondem ao processo de incubação no pensamento criativo, no qual a busca metódica da idéia necessária é suspensa e a exploração pode continuar fora dos limites da percepção.

ALGUMAS MANEIRAS DE ESCAPAR PARA UMA BACIA MAIS PROFUNDA

Algumas das sugestões para acelerar o processo de conceber uma idéia criativa se ajustam bem à situação em que um nível de ruído controlado é utilizado para evitar que fiquemos presos em uma bacia de atração muito rasa. Podemos tentar escapar da bacia original por meio de uma perturbação randômica — por exemplo, Edward DeBono recomenda que se tente aplicar a um problema, seja qual for, o último substantivo na primeira página do jornal do dia.

Um outro método é semelhante a uma sessão de debate livre de idéias, que tem sido usado durante todo o período de pós-guerra. Aqui diversas pessoas tentam encontrar soluções para um problema reunindo-se para uma discussão em grupo na qual se é encorajado a desenvolver a sugestão de uma outra pessoa mas não a atacá-la, não importa quão bizarra possa ser. Uma proposta maluca ou contraditória pode representar um estado instável de pensamento que conduz a uma solução. DeBono gosta de citar como exemplo uma discussão sobre o controle da poluição nos rios na qual alguém pode dizer: “O que realmente precisamos é nos assegurar de que as fábricas estejam a jusante de si mesmas.” Esta é obviamente uma sugestão impossível, mas alguém pode surgir com uma proposta mais séria e dizer: “Você pode fazer algo parecido com isto se exigir que a entrada de água fique a jusante do efluente.” A idéia maluca pode ser considerada uma elevação no cenário de aptidão que conduz a uma bacia muito mais profunda do que aquela em que a discussão começou.

TRANSFERÊNCIA DE HABILIDADES DE RACIOCÍNIO?

Edward e muitos outros prepararam materiais de ensino para os cursos especiais em habilidade de raciocínio para escolas, assim como para companhias e mesmo grupos de vizinhos. Algumas destas habilidades estão relacionadas com a obtenção de idéias criativas. Muitos destes cursos foram testados em várias partes do mundo. Por exemplo, um presidente recente da Venezuela criou um ministério da inteligência para encorajar o ensino de habilidades de raciocínio nas escolas daquele país.

Sob os auspícios do novo ministério, muitos estudantes têm sido apresentados aos vários cursos sobre raciocínio.

Freqüentemente os materiais destes cursos enfatizam as habilidades de raciocínio em contextos particulares. Por exemplo, muitos dos exercícios de Edward se relacionam com o que eu chamaria análise de políticas ou estudo de políticas. Eles se referem a escolhas entre cursos de ação, no nível do indivíduo, família, organização, aldeia ou cidade, estado ou província, nação ou meio transnacional. Um destes exercícios pode começar, por exemplo, com a hipótese de que uma nova lei particular foi aprovada; as possíveis conseqüências da lei são então discutidas. Os materiais tipicamente se relacionam com a busca e a análise de argumentos a favor e contra as várias opções conhecidas e também com a descoberta de novas opções.

Uma questão que surge naturalmente é: até que ponto as habilidades de raciocínio aprendidas em um contexto são transferíveis para outros? Exercitar nossa mente pensando sobre novas opções de políticas, ou modos de avaliar os méritos relativos das existentes, nos ajuda a descobrir boas idéias novas no campo da ciência ou a criar grandes trabalhos artísticos? Exercitar nossa mente deste modo nos ajuda a aprender na escola sobre ciência, matemática, história ou línguas? Algum dia será possível dar respostas a estas questões. Enquanto isso, apenas informações muito preliminares estão se tornando disponíveis.

TESTANDO SE OS VÁRIOS MÉTODOS PROPOSTOS FUNCIONAM OU NÃO

Quando alguém faz um curso sobre habilidades de raciocínio, é um desafio particularmente difícil determinar se de fato surgiu qualquer melhora na capacidade de pensamento criativo do estudante. Idealmente, um teste deveria ser mais ou menos padronizado para que as partes interessadas, como os pais, a escola, os funcionários do governo e legisladores, ficassem impressionados com os resultados. Mas como poderá um teste padronizado começar a medir o pensamento criativo? Uma resposta parcial é dada pelos problemas de projeto. Por exemplo, fui informado de que na Venezuela, em determinado momento, foi pedido aos estudantes do curso sobre habilidades de raciocínio que projetassem uma mesa para um apartamento pequeno. É concebível que as respostas de tais problemas, se corrigidas cuidadosa e imaginativamente, possam dar alguma indicação sobre se os estudantes estão absorvendo ou não a habilidade de pensamento criativo.

David Perkins, da Escola de Pós-graduação de Harvard, que esteve envolvido na atribuição do problema da mesa, está especialmente inte-

ressado em infundir em todo o currículo escolar o ensino de habilidades de raciocínio em vez de ensiná-las em cursos especiais. Ele enfatiza que a necessidade de novas idéias criativas não surge apenas nos domínios estratosféricos da ciência e da arte, mas também na vida diária. Cita o exemplo do amigo que salva o dia em um piquenique, para o qual ninguém pensara em trazer uma faca, cortando o queijo cuidadosamente com um cartão de crédito.

David chama a atenção para o fato de que a pesquisa identificou algumas características das pessoas que são repetidamente bem-sucedidas, no domínio das idéias, em escapar de uma bacia de atração para uma outra, mais profunda. Estas características incluem a dedicação à tarefa, uma percepção de estar aprisionado em uma bacia que não é conveniente, uma capacidade de se sentir à vontade balançando-se sobre a borda que separa duas bacias, e uma capacidade de formular assim a resolução de problemas. Parece improvável que para possuir estas características devamos ter nascido com elas. Pode muito bem ser possível inculcá-las, mas está longe de ser claro que as escolas de hoje o façam em qualquer grau importante. Por exemplo, como David observa, as escolas são quase os únicos lugares em que tipicamente encontramos os problemas já formulados.

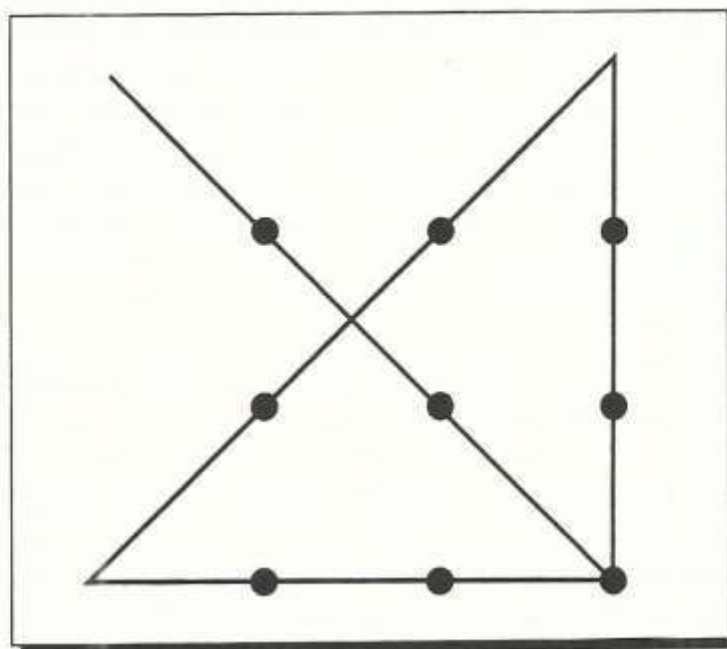
PROBLEMAS JÁ FORMULADOS E OS VERDADEIROS LIMITES DE UM PROBLEMA

A formulação de problemas envolve a descoberta dos limites verdadeiros destes. Para ilustrar o que quero dizer com isto, considerarei alguns casos que meu amigo, antigo vizinho e colega de classe em Yale, Paul MacCready, gosta de usar em suas palestras ao público como exemplos de soluções novas para problemas. (Paul é o inventor do avião-bicicleta, do avião movido a energia solar, do pterodáctilo artificial que bate as asas, e outros dispositivos do que ele modestamente chama de “a fronteira atrasada da aerodinâmica”.) Embora utilize os mesmos exemplos que ele, a lição que deles retiro é de alguma forma diferente.

Considere o famoso problema ilustrado na página seguinte: “Faça a conexão de todos os nove pontos desenhando o menor número possível de linhas retas sem tirar a ponta do lápis do papel.” Muitas pessoas presumem que devem manter as linhas dentro de um quadrado formado pelos pontos exteriores, embora esta condição não faça parte do enunciado do problema. Precisarão então de cinco linhas para resolvê-lo. Se elas se permitem estender as linhas além do quadrado, poderão resolvê-lo com quatro, como ilustrado. Se este fosse um problema no mundo real, um passo crucial ao formulá-lo seria descobrir se há ou não alguma

razão para continuar as linhas dentro do quadrado. Esta é a parte que chamo determinar os limites do problema.

Se o problema permite que as linhas sejam estendidas além do quadrado, talvez permita também outros tipos de liberdades. Que tal amassar o papel de modo que os pontos fiquem todos enfileirados e fazer o lápis passar por eles em uma única estocada? Diversas destas idéias foram consideradas por James L. Adams em seu livro *Conceptual Blockbusters*. A melhor está contida em uma carta que ele recebeu de uma garotinha e que é reproduzida na página 284. O ponto principal está em sua última frase: "Não está dito que você não pode usar uma linha grossa." Uma linha grossa é proibida ou não? Quais são as regras no mundo real?



Conectando nove pontos em um quadrado com quatro linhas retas sem tirar o lápis do papel.

Como sempre, determinar os limites do problema é a questão principal na sua formulação. Este ponto é realçado mais fortemente ainda em "*The Barometer Story*"* (A história do barômetro) escrita pelo professor de física Dr. Alexander Calandra da Universidade de Washington em St. Louis.

Há algum tempo, recebi uma chamada de um colega que me pediu para ser o árbitro na correção de uma questão de exame. Parecia

* Extraído da edição do professor de *Current Science*, vol. 49, nº 14, janeiro de 1964, páginas 6-10. Cortesia de Robert L. Semans.

que ele estava quase atribuindo um zero ao estudante por sua resposta a uma questão de física, enquanto o estudante afirmava que devia receber um dez e assim seria se o sistema não estivesse armado contra ele. O instrutor e o estudante concordaram em submeter esta questão a um árbitro imparcial, e eu fui escolhido...

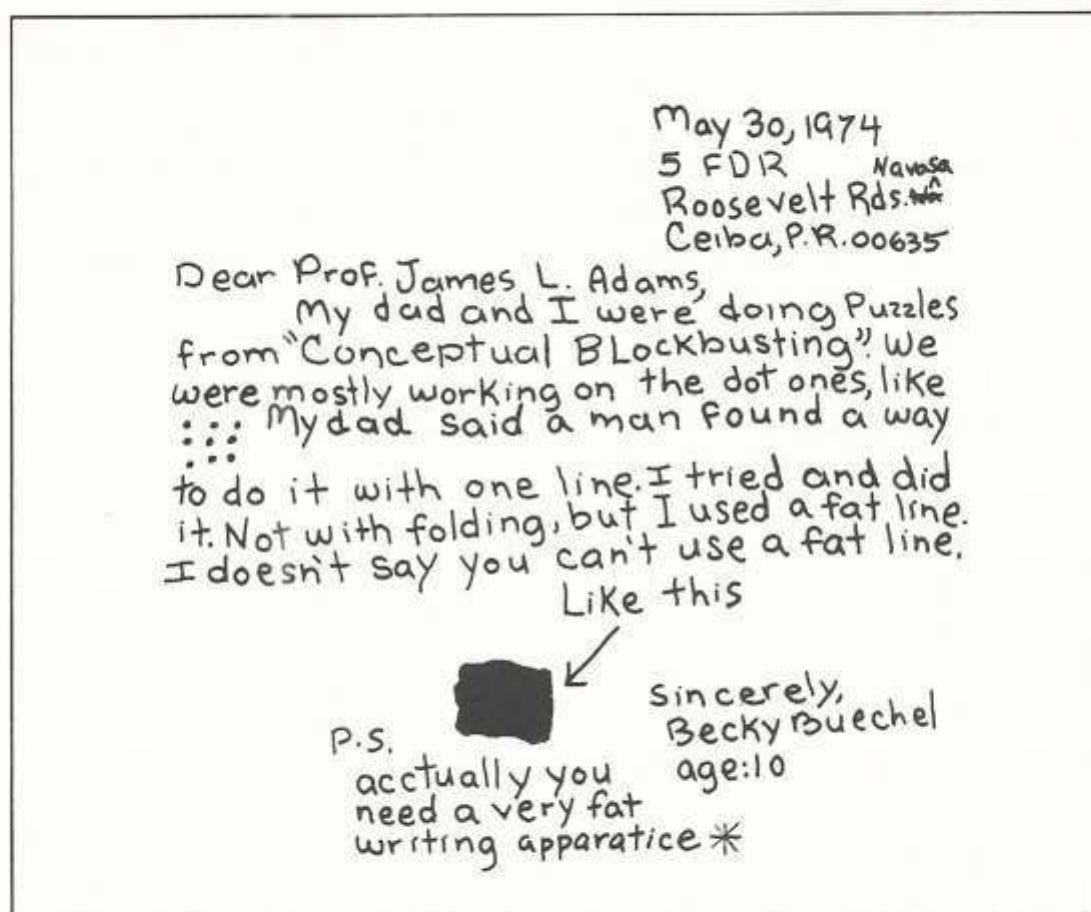
Fui até a sala de meu colega e li a questão do exame, que era: "Mostre como determinar a altura de um edifício alto com a ajuda de um barômetro."

A resposta do estudante era: "Leve o barômetro até o topo do edifício, amarre-o a uma corda comprida e deixe que baixe até a rua, e então traga-o de volta, medindo o comprimento da corda. O comprimento da corda é a altura do edifício."

Agora, esta é uma resposta muito interessante, mas deveria o estudante ganhar os pontos por ela? Chamei a atenção para o fato de que o estudante tinha um forte argumento para receber os pontos integrais, já que respondera à questão completa e corretamente. Por outro lado, se os pontos integrais fossem dados, isto poderia contribuir muito para uma nota muito alta do estudante em seu curso de física. Supõe-se que uma nota muito alta certifica que o estudante conhece um pouco de física, mas a resposta à questão não confirmava isto. Com isto em mente, sugeri que fosse dada ao estudante outra chance de responder à questão. Não fiquei surpreso que meu colega concordasse com isto, mas sim que o estudante o fizesse.

Agindo em comum acordo, dei ao estudante seis minutos para responder à questão, avisando-o de que a resposta deveria mostrar algum conhecimento de física. Ao cabo de cinco minutos, ele não escrevera nada. Perguntei-lhe se queria desistir, já que eu tinha uma aula para dar, mas ele disse não, que não desistiria, tinha muitas respostas para o problema, estava apenas pensando na melhor. Desculpei-me por interromper e solicitei-lhe que continuasse. No minuto seguinte, ele apresentou sua resposta, que era: "Leve o barômetro para o topo do edifício, incline-se sobre o parapeito do telhado. Deixe o barômetro cair, marque o tempo de queda com um cronômetro. Então, utilizando a fórmula $S = (1/2)at^2$ [distância percorrida na queda igual à metade da aceleração da gravidade vezes o tempo decorrido ao quadrado], calcule a altura do edifício."

Neste ponto, perguntei ao meu colega se ele desistiria. Ele cedeu e deu ao estudante quase todos os pontos. Ao deixar a sala de meu colega, lembrei-me de que o estudante tinha dito que tinha outras respostas para o problema, assim perguntei-lhe quais eram. "Ah, sim", disse o estudante. "Há muitas maneiras de calcular a altura



Carta ao professor Adams de uma garota de dez anos. (Extraído de *Conceptual Blockbusting – A Guide to Better Ideas*, terceira edição, de James L. Adams, editora Addison-Wesley, Reading, Mass., página 31. Copyright 1974, 1976, 1979, 1986 by James L. Adams. Utilizado com permissão.)

de um edifício alto com a ajuda de um barômetro. Poderíamos pegar o barômetro em um dia ensolarado e medir sua altura, o comprimento de sua sombra, e o comprimento da sombra do edifício, então utilizando proporções simples, determinar a altura do edifício.”

“Ótimo”, disse eu. “E as outras?”

“Sim”, disse o estudante. “Há uma medida muito básica que o senhor gostará. Neste método, tomamos o barômetro e começamos a subir as escadas. À medida que subimos, medimos o comprimento usando-o como padrão e isto nos dará a altura do edifício em unidades barométricas. Um método muito direto.”

* (Caro Prof. James L. Adams, Meu pai e eu estivemos fazendo quebra-cabeças de *Conceptual Blockbusting*. Estivemos trabalhando mais com os pontos, como Meu pai disse que um homem descobriu uma maneira de fazê-lo com uma linha. Eu tentei e consegui. Não dobrando, mas usei uma linha grossa. Não é dito que você não pode usar uma linha grossa. Como esta, Sinceramente, Becky Buechel. Idade: 10. P.S. Na verdade você precisa de um instrumento de escrever muito grosso. (N. do T.)

“É claro que, se quisermos um método mais sofisticado, podemos amarrar o barômetro à extremidade de uma corda e fazê-lo oscilar como um pêndulo, determinar o valor de g [a aceleração da gravidade] no nível da rua e no topo do edifício. Da diferença entre os dois valores de g , a altura do edifício pode, em princípio, ser calculada.”

Finalmente, concluiu ele: “Se eu não ficar limitado a soluções físicas para este problema, há muitas outras respostas, tais como levar o barômetro até o porão e bater na porta do zelador. Quando o zelador responder, você fala com ele da seguinte forma: ‘Caro zelador, aqui tenho um excelente barômetro. Se você me disser a altura deste edifício, eu lhe darei este barômetro...’”

CAPÍTULO 18

SUPERSTIÇÃO E CETICISMO

Em contraste com as pressões seletivas particulares que caracterizam o empreendimento científico (pelo menos a ciência no que há de melhor), tipos muito diferentes de seleção também afetaram a evolução das idéias teóricas sobre os mesmos assuntos que agora formam a província da ciência. Um exemplo é fornecido pelo apelo à autoridade, independente de comparações com a natureza. Na Idade Média e no começo da Europa moderna, apelos à autoridade (por exemplo a Aristóteles, para não dizer nada da Igreja Católica Romana) eram a regra em campos do conhecimento onde o método científico seria mais tarde amplamente aplicado. Quando a Royal Society de Londres foi fundada em 1661, o mote escolhido foi *Nullius in verba*. Interpreto esta frase como: “Não acredito nas palavras de ninguém” e como uma rejeição ao apelo à autoridade em favor do apelo à natureza que distinguiu a relativamente nova disciplina da “filosofia experimental”, que é agora chamada ciência natural.

Referimo-nos anteriormente a sistemas de crenças, como a magia simpática, que responde predominantemente a pressões seletivas bastante diferentes das da comparação de predições com a observação. Em séculos recentes, o empreendimento científico prosperou e construiu um domínio onde a autoridade e o pensamento mágico cederam lugar a uma parceria entre a observação e a teoria. Mas, fora deste domínio, as velhas maneiras de pensar estão amplamente disseminadas e as crenças supersticiosas prosperam. A prevalência da superstição ao lado da ciência é um fenômeno peculiar aos seres humanos ou devemos esperar que sistemas adaptativos complexos inteligentes em qualquer outro lugar no universo tenham as mesmas tendências?

ENGANOS NA IDENTIFICAÇÃO DE REGULARIDADES

Sistemas adaptativos complexos identificam regularidades no fluxo de informações que recebem e comprimem estas regularidades em esquemas. Como é fácil cometer dois tipos de erro — confundir randomicidade com regularidade e vice-versa —, é razoável supor que sistemas adaptativos complexos tendam a evoluir para uma situação mais ou menos balanceada na qual a identificação correta de algumas regularidades seja acompanhada por ambos os tipos de erro.

Examinando padrões de pensamento humano, podemos, de um modo aproximado, identificar a superstição com um tipo de erro e a recusa com outro. As superstições tipicamente envolvem a visão de ordem onde de fato não há, e a recusa significa rejeitar a evidência de regularidades, algumas vezes mesmo aquelas que estão bem na nossa cara. Por meio da introspecção e também pela observação de outros seres humanos, cada um de nós pode detectar uma associação de ambos os tipos de erro com o medo.

Em um caso, as pessoas estão atemorizadas pela imprevisibilidade e especialmente pela incontrollabilidade de muito do que vemos ao nosso redor. Um pouco desta imprevisibilidade se origina essencialmente das indeterminações fundamentais da mecânica quântica e das limitações adicionais impostas pelo caos. Uma grande parcela de granulação grosseira adicional, com a conseqüente imprevisibilidade, vem do alcance e capacidade restritas de nossos sentidos e instrumentos: podemos apreender apenas uma quantidade minúscula de informação sobre o universo que é, em princípio, disponível. E, por último, somos prejudicados pelo nosso entendimento inadequado e pela nossa limitada habilidade de cálculo.

A insuficiência resultante de lógica nos mete medo e assim impomos ao mundo que nos cerca, mesmo aos fatos randômicos e fenômenos ao acaso, uma ordem artificial com base em falsos princípios de causalidade. Deste modo, nos confortamos com uma ilusão de previsibilidade e mesmo de controle. Fantasiamos que podemos manipular o mundo ao nosso redor apelando para forças que inventamos.

No caso da recusa, somos capazes de detectar padrões genuínos mas eles nos amedrontam tanto que ficamos cegos à sua existência. Evidentemente a regularidade mais ameaçadora em nossas vidas é a certeza da morte. Numerosas crenças, incluindo algumas das mais tenazmente seguidas, servem para aliviar a ansiedade a respeito da morte. Quando crenças específicas deste tipo são amplamente compartilhadas em uma cultura, seu efeito tranquilizador sobre o indivíduo é multiplicado.

Mas tais crenças tipicamente incluem regularidades inventadas, deste modo a recusa é acompanhada pela superstição. Mais ainda, dando uma outra olhada em superstições como a magia simpática, vemos que a crença nelas pode ser mantida apenas pela rejeição dos seus defeitos manifestos, especialmente seu fracasso freqüente em funcionar. A recusa de regularidades reais e a imposição de falsas são assim vistas como os dois lados da mesma moeda. Os seres humanos não são apenas inclinados a ambas, mas as duas tendem a unir-se e a apoiar-se.

Se este tipo de análise é justificado, podemos então concluir que sistemas adaptativos complexos inteligentes dos planetas espalhados por todo o universo tendem a errar para ambos os lados ao identificar regularidades no seu fluxo de entrada de informações. Em termos mais antropomórficos, podemos esperar que sistemas adaptativos complexos inteligentes de todas as partes sejam propensos a uma mistura de superstição e recusa. Se faz ou não sentido, à parte da experiência humana, descrever esta mistura em termos da mitigação do medo, é uma outra questão.

Um modo ligeiramente diferente de olhar para a superstição em um sistema adaptativo complexo sugere que talvez esta possa ser de alguma forma mais predominante do que a recusa. Pode-se considerar que o sistema evoluiu, em grande parte, para descobrir padrões, assim, em certo sentido, um padrão é a sua própria recompensa, mesmo que não lhe confira qualquer vantagem particular no mundo real. Um padrão deste tipo pode ser considerado um "esquema egoísta", de algum modo análogo ao gene egoísta ou mesmo ao gene verdadeiramente egoísta.

Exemplos da experiência humana não são difíceis de encontrar. Há poucos anos fui convidado para um encontro com um grupo de acadêmicos ilustres de fora da cidade que viera discutir uma descoberta nova fascinante. Estavam muito excitados com algumas características de fotografias recentes da NASA da superfície de Marte que tinham uma vaga semelhança com um rosto humano. Não consigo imaginar que vantagem esta incursão no improvável poderia ter conferido a estas pessoas, de outro modo brilhantes, a não ser a pura alegria de encontrar uma regularidade misteriosa.

O MÍTICO NA ARTE E NA SOCIEDADE

Para os seres humanos, especialmente no nível do social, numerosas pressões seletivas no mundo real, além da mitigação do medo, favorecem as distorções no processo de identificação de regularidades. As

crenças supersticiosas podem servir para reforçar o poder de feiticeiros ou sacerdotes. Um sistema de crença organizado, completado com mitos, pode motivar a obediência aos códigos de conduta e cimentar os laços que unem os membros de uma sociedade.

Através dos tempos, sistemas de crenças têm servido para organizar a humanidade em grupos que não são apenas internamente coesos, mas algumas vezes intensamente competitivos em relação aos outros, muitas vezes ao ponto do conflito ou perseguição, algumas vezes acompanhada de violência em massa. Exemplos não são, infelizmente, difíceis de se encontrar no mundo de hoje.

Mas crenças que competem entre si são apenas uma das bases sobre as quais as pessoas se dividem em grupos que não conseguem se respeitar uns aos outros. Qualquer rótulo serve. Um rótulo, citando o desenho em quadrinhos *B.C.*, é “algo que você atribui às pessoas para que as possa odiar sem ter de conhecê-las primeiro”. Muitas atrocidades em grande escala (e crueldades individuais) têm sido perpetradas com base em argumentos étnicos ou outros, muitas vezes sem relação particular com crenças.

Junto com os efeitos devastadores dos sistemas de crenças, suas realizações positivas também se manifestam claramente, especialmente a música gloriosa, a arquitetura, a literatura, a escultura, a pintura e a dança que têm sido inspiradas por mitologias particulares. Apenas o exemplo dos vasos negros decorados da Grécia antiga seriam suficientes para testemunhar as energias criativas liberadas pelo mito.

Em face da esmagadora grandeza da maior parte da arte relacionada com a mitologia, precisamos reexaminar o significado das falsas regularidades. Além de exercer uma poderosa influência sobre as emoções e o intelecto humano e conduzir à criação de uma arte magnífica, as crenças míticas têm claramente um significado adicional que transcende sua falsidade literal e sua relação com a superstição. Elas encapsulam a experiência adquirida através de séculos e milênios de interação com a natureza e com a cultura humana. Contêm não apenas lições mas também, pelo menos por implicação, prescrições de comportamento. São partes vitais dos esquemas culturais de sociedades que atuam como sistemas adaptativos complexos.

A PESQUISA DE PADRÕES NA ARTE

A crença em mitos é apenas uma das muitas fontes de inspiração das artes, assim como é apenas uma das muitas fontes de ódios e atrocida-

des. Não é apenas na relação com o mítico que as artes são alimentadas por padrões de associação e regularidade que não são reconhecidos pela ciência. Todas as artes prosperam com a identificação e exploração de tais padrões. A maioria das alegorias e metáforas são padrões que a ciência pode ignorar, mas onde estaria a literatura, especialmente a poesia, sem a metáfora? Nas artes visuais, um grande trabalho muitas vezes leva o observador a novas maneiras de ver. Os padrões de reconhecimento e criação são atividades essenciais em todos os tipos de arte. Os esquemas resultantes estão sujeitos a pressões seletivas que muitas vezes (embora não sempre) estão muito afastadas daquelas que operam na ciência, com conseqüências maravilhosas.

Podemos olhar o mito e a magia, portanto, de pelo menos três modos diferentes e complementares:

1. Como teorias atrativas mas não-científicas, regularidades confortantes mas falsas impostas à natureza.
2. Como esquemas culturais que ajudam a dar identidade às sociedades, para pior ou para melhor.
3. Como parte de uma grande pesquisa por um padrão, por uma associação criativa, que inclui o trabalho artístico e que enriquece a vida humana.

UM EQUIVALENTE MORAL DE CRENÇA?

A questão surge naturalmente: haverá algum modo de capturar as esplêndidas conseqüências das crenças míticas sem a auto-ilusão associada e sem a intolerância que muitas vezes a acompanham? Há cerca de um século, o conceito de “equivalente moral da guerra” foi amplamente discutido. Como eu o entendo, o ponto em questão era que a guerra inspira a lealdade entre camaradas, auto-sacrifício, coragem e mesmo heroísmo, e fornece uma válvula de escape para o amor à aventura, mas a guerra é também cruel e destrutiva em um grau extraordinário. Portanto, a raça humana está desafiada a encontrar atividades que tenham as características positivas da guerra e não as negativas. Algumas organizações tentam realizar este objetivo introduzindo os desafios da vida ao ar livre aos jovens que de outra forma poderiam não ter a oportunidade de a conhecer. Espera-se que tais atividades possam fornecer um substituto não apenas para a guerra, mas também para a delinqüência e o crime.

Podemos nos perguntar, em relação à superstição e não à guerra e ao crime, se um equivalente moral da crença pode ser encontrado ou

não. Os seres humanos poderão obter satisfação espiritual, conforto, coesão social e as criações artísticas brilhantes que acompanham as crenças míticas de algo que é menos do que a aceitação dos mitos como literalmente verdadeiros?

Parte da resposta pode estar no poder do ritual. A palavra grega *mythos*, da qual a palavra mito é derivada, relaciona-se com as palavras faladas que acompanhavam uma cerimônia nos tempos antigos. Os atos eram o principal, de algum modo, e o que era dito a respeito deles era secundário. De fato, muitas vezes o significado original do ritual tinha sido pelo menos parcialmente esquecido, e o mito sobrevivente representava uma tentativa de explicação ao tentar interpretar os ícones do passado e reunir fragmentos de velhas tradições que se referiam a um estágio da cultura que há muito tempo tinha desaparecido. Os mitos estavam sujeitos a mudanças, então, enquanto a continuidade do ritual era o que ajudava a manter a sociedade unida. Enquanto os rituais persistissem, poderia a crença literal na mitologia fenecer sem provocar muita desruptura?

Outra parte da resposta pode estar relacionada ao modo como a ficção e o drama são percebidos. Na literatura maior, os personagens parecem ter vida própria, e suas experiências, muito parecidas com as dos personagens míticos, são regularmente citadas como fontes de sabedoria e inspiração. Mesmo assim ninguém reivindica que os trabalhos de ficção sejam literalmente verdadeiros. Haverá então alguma chance de que muitos dos benefícios sociais e culturais da crença possam ser preservados enquanto o aspecto de auto-ilusão gradualmente desapareça?

Ainda outra resposta parcial pode ser obtida das experiências místicas. Será possível que alguns dos benefícios espirituais muitas vezes obtidos de crenças supersticiosas podem ser alcançados, pelo menos por algumas pessoas, por meio de técnicas de aprendizado que facilitem tais experiências?

Infelizmente, em muitos lugares do mundo contemporâneo, a crença literal na mitologia, longe de estar desaparecendo, está aumentando, na medida em que os movimentos fundamentalistas ganham poder e ameaçam as sociedades modernas com a imposição de limitações ultrapassadas sobre o comportamento e sobre a liberdade de expressão. (Além do mais, mesmo onde o poder da crença mítica está declinando, nenhuma grande melhoria nas relações entre os diferentes grupos de pessoas ocorre necessariamente em consequência disso, já que pequenas diferenças de quase todo tipo podem ser suficientes para manter a hostilidade entre eles.)

Para uma discussão séria sobre o assunto completo da crença supersticiosa, recomendo *Wings of Illusion*, de John F. Schumaker,

mesmo que ele tenda à desesperança quanto à nossa capacidade de renunciar, como espécie, ao nosso conjunto de ilusões confortantes e muitas vezes inspiradoras.

O MOVIMENTO DOS CÉTICOS

Nas duas últimas décadas, a prevalência de superstições antigas tem sido acompanhada, pelo menos nos países ocidentais, por uma onda de popularidade das assim chamadas crenças da Nova Era, muitas das quais são apenas superstições contemporâneas e pseudocientíficas, ou mesmo algumas vezes velhas superstições com novos nomes, como “canalização” no lugar de “espiritualismo”. Infelizmente isto é muitas vezes apresentado, nos meios noticiosos e em livros populares, como se fosse de fato verdadeiro ou muito provável, e foi criado um movimento para combater tais pretensões, o movimento dos céticos. Grupos locais de céticos têm sido formados em comunidades espalhadas por todo o mundo. Três dos lugares onde passei bastante tempo são aqueles em que posso mostrar uma dose saudável de ceticismo: Aspen, Santa Fé e sul da Califórnia.

As organizações locais de céticos são informalmente ligadas a um comitê baseado nos Estados Unidos mas que inclui membros de outras partes do mundo; é chamado CSICOP, Committee for Scientific Investigation of Claims of the Paranormal (Comitê para a Investigação Científica das Alegações dos Paranormais). O CSICOP, que publica um periódico chamado *Skeptical Inquirer*, não é uma organização aberta ao público por meio de filiações, mas um grêmio para o qual se deve ser escolhido. Apesar de algumas reservas sobre a organização e seu periódico, aceitei a escolha há alguns anos porque gosto muito de seu trabalho.

As alegações dos assim chamados paranormais nos cercam por todos os lados. Algumas das mais ridículas são encontradas nas manchetes dos tablóides vendidos nos balcões dos supermercados: “Gato come papagaio... agora pode falar... Kitty quer um biscoito.” “Centenas que voltaram da morte descrevem o céu e o inferno.” “O incrível homem-peixe pode respirar debaixo da água.” “Gêmeos siameses encontram seu irmão de duas cabeças.” “Um alienígena do espaço me engravidou.” O CSICOP não se preocupa com tais manifestações evidentes de absurdos. Mas seus membros ficam realmente furiosos quando os principais jornais, revistas ou redes de televisão e rádio tratam como rotina e sem questionamentos, como estabelecidas ou muito prováveis, coisas que em absoluto não o são: supostos fenômenos como a

regressão hipnótica a vidas anteriores, a assistência valiosa dada à polí-
cia por sensitivos, ou a psicocinese (na qual se supõe que a mente pro-
voque o movimento de objetos externos). Estas alegações desafiam as
leis aceitas da ciência com base em evidências que uma investigação
cuidadosa revela serem muito pobres ou inteiramente ausentes. Pres-
sionar os meios de comunicação para que não apresentem estas coisas
como reais ou prováveis é uma atividade muito útil do CSICOP.

ALEGAÇÕES DO PARANORMAL? QUE PARANORMAL?

Não obstante, se olharmos cuidadosamente para as implicações do
nome da organização, surgem algumas questões. O que se quer dizer
com alegações dos paranormais? É claro, o que a maioria de nós que
trabalha em ciência (e de fato a maioria das pessoas razoáveis) quer
saber em primeiro lugar sobre qualquer suposto fenômeno é se este real-
mente acontece ou não. Somos curiosos a respeito do grau de veraci-
dade das alegações. Mas, se um fenômeno é genuíno, como pode ser
paranormal? Os cientistas, e muitos não-cientistas também, estão con-
vencidos de que a natureza obedece a leis regulares. Portanto, em certo
sentido, não pode haver alguma coisa paranormal. O que quer que real-
mente aconteça na natureza pode ser descrito dentro da estrutura da
ciência. É claro, nem sempre podemos estar com disposição para um
relato científico de certos fenômenos, preferindo, por exemplo, uma
descrição poética. Algumas vezes o fenômeno pode ser muito complica-
do para que uma descrição científica detalhada seja factível. Entretanto,
em princípio, qualquer fenômeno genuíno deve ser compatível com a
ciência.

Se algo novo é descoberto (e confirmado com segurança) e não se
enquadra nas leis científicas existentes, não jogamos nossos braços para
o alto em sinal de desespero. Ao contrário, estendemos ou se necessário
modificamos as leis da ciência para acomodar o novo fenômeno. Isto
deixa alguém engajado na investigação científica das alegações do para-
normal em uma posição lógica estranha, pois afinal nada que realmente
aconteça pode ser paranormal. Talvez esta situação esteja relacionada a
uma vaga sensação de desapontamento que eu algumas vezes sinto
depois de ler o periódico *Skeptical Inquirer*, que em outros aspectos é
excelente. Sinto uma falta de suspense. Ao ler o título do artigo, usual-
mente o conteúdo se revela, isto é, o que quer que esteja escrito no título
não é verdade. Quase tudo o que é discutido no periódico acaba sendo
desmascarado. Além disso, muitos dos autores parecem sentir o dever
de explicar tudo detalhe por detalhe, mesmo que no mundo real a inves-

tigação de qualquer coisa complexa geralmente deixe alguns pontos em aberto. Fico, é verdade, deliciado ao ver coisas como a cirurgia psíquica e a levitação por meio da meditação expostas como fraudes. Mas penso realmente que uma ligeira redefinição do objetivo ajudaria a organização e o periódico a serem mais vivazes e interessantes, assim como mais solidamente fundamentados. Acredito que a missão real da organização é encorajar o exame cético e científico dos relatos de fenômenos misteriosos, especialmente aqueles que parecem desafiar as leis da ciência, mas sem fazer uso do rótulo “paranormal”, com sua implicação de que a exposição de fraudes é muito provavelmente necessária. Muitos destes fenômenos se revelam uma impostura, ou têm uma explicação muito prosaica, mas uns poucos podem se mostrar basicamente genuínos, assim como interessantes. O conceito de paranormal não me parece útil; e a disposição de espírito de expor fraudes, embora muito apropriada para a maioria dos assuntos examinados, não é sempre uma abordagem perfeitamente satisfatória.

Muitas vezes deparamos com situações em que a fraude consciente está presente, pessoas crédulas são enganadas por dinheiro, pacientes seriamente enfermos são levados a procurar curas fraudulentas e inúteis (como a cirurgia psíquica), afastando-se de tratamentos legítimos que podem funcionar, e assim por diante. Em tais casos, a exposição da fraude é um serviço prestado à humanidade. Mesmo assim, todavia, deveríamos pensar um pouco nas necessidades emocionais das vítimas que são satisfeitas pela charlatanice e como estas poderiam ser satisfeitas sem ilusões.

Recomendaria que os céticos devotassem mais esforços ainda do que devotam hoje em compreender as razões pelas quais muitas pessoas querem ou necessitam acreditar. Se as pessoas fossem menos receptivas, os meios de comunicação não achariam lucrativo enfatizar o assim chamado paranormal. De fato, não é apenas um mal-entendido sobre a quantidade de boas evidências que existem de um fenômeno que está por trás da tendência em acreditar nele. Em minhas discussões com pessoas que acreditam em seis coisas impossíveis todos os dias antes do café da manhã, como a Rainha Branca em *Alice no país dos espelhos*, descobri que sua principal característica é a dissociação entre crença e evidência. Muitas destas pessoas, de fato, confessam abertamente que acreditam no que as faz se sentir bem em acreditar. A evidência não desempenha um papel importante. Elas estão aliviando seu medo da randomicidade ao identificar regularidades que não existem.

ABERRAÇÃO MENTAL E SUGESTIONABILIDADE

Dois assuntos que devem ser incluídos em qualquer discussão de crenças estranhas são a sugestionabilidade e a aberração mental. As pesquisas de opinião revelam agora, por exemplo, que uma porcentagem espantosa de pessoas que respondem a estas pesquisas não apenas acreditam na existência de “alienígenas que chegam em discos voadores”, mas dizem também ter sido raptadas por eles, examinadas de perto, e mesmo sexualmente molestadas. Parece que estamos tratando aqui com pessoas que por alguma razão têm dificuldade em distinguir a realidade da fantasia. É natural perguntarmos se algumas delas estão atacadas ou não por uma doença mental séria.

Podemos também especular que muitas das pessoas que crêem em tais eventos estranhos podem simplesmente ter um grau inusitadamente alto de susceptibilidade ao transe, assim elas entram e saem de estados de sugestionabilidade com a maior facilidade. Quando colocadas em transe por um hipnotizador, tais pessoas, podem ter crenças impostas sobre elas. Uma grande susceptibilidade ao transe pode ser um risco em potencial, ou uma vantagem, pois pode facilitar a hipnose, a auto-hipnose, ou a meditação profunda, permitindo a uma pessoa alcançar formas úteis de autocontrole difíceis (mas não impossíveis) de obter de outras maneiras.

Em muitas sociedades tradicionais, as pessoas dotadas de grande susceptibilidade ao transe podem desempenhar papéis de feiticeiras e profetas. Da mesma forma, outras que sofrem certos tipos e graus de distúrbio mental também podem. Pensa-se que ambas as categorias de pessoas são mais inclinadas do que outras a passar por experiências místicas. Nas sociedades modernas, diz-se que ambas são encontradas entre os artistas mais criativos. (É claro que todas estas correlações supostas precisam ser verificadas cuidadosamente.)

Algumas pesquisas sobre as características mentais de pessoas que acreditam em fenômenos absurdamente improváveis estão sendo feitas, especialmente em indivíduos que afirmam ter tido um envolvimento pessoal com eles. Até agora, surpreendentemente, surgiram poucas evidências de doença mental séria ou de uma grande susceptibilidade ao transe. Ao contrário, parece que em muitos casos uma crença forte serve para influenciar a interpretação de experiências ordinárias com fenômenos físicos ou com estados mentais de sono ou induzidos por drogas. Contudo, o assunto está claramente em seus primórdios. Parece-me desejável intensificar bastante o estudo destas crenças e sistemas de crenças entre os seres humanos e de suas causas subjacentes, já que a longo prazo o assunto tem um papel tão crucial no nosso futuro comum.

CETICISMO E CIÊNCIA

Suponha que concordemos que o movimento dos céticos, exceto o estudo da crença e o envolvimento em atividades como a divulgação de fraudes e a tentativa de isenção da mídia, está engajado no exame cético e científico dos relatos de fenômenos misteriosos que parecem desafiar as leis da ciência. Então o grau de ceticismo empregado deveria ser adequado ao desafio que os supostos fenômenos representam para as leis aceitas. Aqui temos de ser cuidadosos. Por exemplo, em campos complicados como a meteorologia ou a ciência planetária (inclusive a geologia), fenômenos naturais bizarros, que desafiem certos princípios aceitos nestes campos mas que não pareçam violar as leis fundamentais da natureza, como a conservação de energia, podem supostamente ocorrer. As leis empíricas ou fenomenológicas em tais campos são algumas vezes bastante difíceis de relacionar com as leis das ciências mais básicas, e novas descobertas observacionais que exigem uma revisão das leis empíricas estão sendo feitas a todo momento. Um suposto fenômeno que viole estas leis não é tão suspeito quanto um que viole a conservação de energia.

Há apenas trinta anos a maioria dos geólogos, inclusive quase todo o ilustre corpo docente do departamento de geologia do Caltech, ainda rejeitava com desprezo a idéia do movimento dos continentes. Lembrome disso porque na época muitas vezes discuti com eles sobre o assunto. Eles não acreditavam no movimento dos continentes apesar das evidências crescentes em seu favor. Tinham aprendido que isso não fazia sentido principalmente porque a comunidade dos geólogos não havia pensado em um mecanismo plausível para que acontecesse. Mas um fenômeno pode perfeitamente ser genuíno mesmo que nenhuma explicação plausível para ele tenha surgido ainda. Particularmente neste tipo de assunto, é desaconselhável descartar um suposto fenômeno imediatamente só porque os especialistas não podem pensar rapidamente no que o teria originado. Há um par de séculos, os cientistas planetários cometeram o erro notório de desmascarar os meteoritos. "Como é possível que as rochas caiam do céu", diziam eles, "quando não há rochas no céu?"

Hoje há uma forte tendência entre meus amigos do movimento dos céticos, assim como entre meus colegas da física, em descartar um pouco rápido demais queixas de um elevado número de incidência de doenças raras em pessoas que são mais expostas do que outras aos campos eletromagnéticos comparativamente fracos dos dispositivos de corrente alternada de 60 ciclos e às linhas de transmissão de energia. Os céticos podem muito bem estar certos em pensar que estas queixas são

espúrias, mas não é tão óbvio como alguns deles dizem. Embora os campos sejam muito fracos para produzir grandes efeitos, como uma elevação substancial na temperatura, ainda assim podem ser capazes de produzir efeitos muito mais sutis em certas células do corpo altamente especializadas, inusitadamente sensíveis ao magnetismo porque contêm quantidades apreciáveis de magnetita. Joseph Kirschvink do Caltech, que tem um conjunto de interesses fora do comum para um professor de lá, está investigando esta possibilidade experimentalmente e descobriu algumas indicações preliminares de que tal conexão entre o magnetismo e estas doenças raras pode ser mais do que fantasia.

KUGELBLITZ — A BOLA RELAMPEJANTE

Muitos fenômenos supostamente acontecidos na atmosfera permanecem até hoje em uma espécie de limbo. Um deles é o "*Kugelblitz*" — a bola relampejante. Alguns observadores afirmam ter visto, num clima tempestuoso, uma esfera brilhante, sugerindo relâmpagos na forma de uma bola. Ela pode passar entre as tábuas bastante espaçadas de uma cerca; ou entrar em um cômodo através da janela, ziguezaguear entre as paredes e então desaparecer deixando leves marcas de queimadura. São abundantes todos os tipos de relatos anedóticos, mas não há evidência à prova de controvérsia, nem uma teoria realmente satisfatória. Um físico, Luis Alvarez, sugeriu que o *Kugelblitz* era apenas um fenômeno do globo ocular do observador. Esta explicação, entretanto, não está de acordo com as evidências anedóticas, por exemplo, como as recolhidas por um cientista a partir de entrevistas com empregados de um laboratório oficial. Alguns teóricos sérios realizaram pesquisas sobre o fenômeno. Quando o grande físico russo Pyotr L. Kapitsa estava em prisão domiciliar por se recusar a trabalhar em armas termonucleares sob a direção do chefe da polícia secreta de Stálin, Lavrenti P. Beria, ele e um de seus filhos escreveram um trabalho teórico sobre um mecanismo hipotético para a bola relampejante. Outros tentaram reproduzir o fenômeno no laboratório. Mas eu diria que os resultados são ainda inconclusivos. Em suma, ninguém sabe o que fazer com isto.

Por volta de 1951, a menção à bola relampejante acabou com um seminário no Instituto de Estudos Avançados em Princeton no qual Harold W. ("Hal") Lewis, que é agora professor de física na Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, apresentou uma parte do trabalho teórico em que ele e Robert Oppenheimer tinham trabalhado juntos. Acho que era o último esforço em pesquisa de Robert antes de se tornar diretor do Instituto, e ele estava muito ansioso porque queria que as pes-

soas escutassem atentamente o relato do trabalho de Hal, contido no artigo de Oppenheimer, Lewis e Wouthuysen sobre a produção de mésons nas colisões próton-próton. No decorrer da discussão após a palestra, alguém mencionou que Enrico Fermi propusera um modelo em que os dois prótons ficam grudados um no outro durante muito tempo, por razões desconhecidas, e emitem mésons da mesma maneira estatística. Muito de nós acorreram com sugestões sobre o que poderia provocar este tipo de comportamento. O erudito físico teórico suíço Markus Fierz lançou a observação de que nem sempre o porquê das coisas ficarem juntas é claro. “Por exemplo”, disse ele, “considere o *Kugelblitz*, a bola relampejante.” (Oppenheimer começou a ficar vermelho de raiva. Aqui estava sendo apresentado seu último trabalho em física e Fierz estava desviando a discussão para a bola relampejante.) Fierz continuou para dizer que um amigo seu tinha sido empregado pelo governo suíço e ganhado um vagão de trem especial para que pudesse percorrer o país e acompanhar os relatos anedóticos sobre o *Kugelblitz*. Finalmente Robert não agüentou mais e saiu resmungando: “Bolas de fogo, bolas de fogo!” Acho que desde então nosso entendimento sobre o fenômeno não melhorou muito, embora o próprio Hal Lewis tenha escrito um artigo muito interessante sobre ele.

CHUVAS DE PEIXES

Um dos meus exemplos favoritos de fenômenos misteriosos tem a ver com peixes e rãs caindo do céu. Muitos dos relatos são bastante circunstanciados e dados por observadores confiáveis. Aqui está um, por A. B. Bajkov, descrevendo uma chuva de peixes em Marksville, Louisiana, em 23 de outubro de 1947:

Eu estava realizando investigações biológicas para o departamento de caça e pesca. Na manhã deste dia entre 7:00 e 8:00 horas, peixes variando entre 4,4 e 19,8 centímetros de comprimento caíram nas ruas e nos quintais, bestificando os cidadãos desta cidade do sul. Estava em um restaurante com minha mulher tomando o café da manhã quando a garçonete nos informou que estavam caindo peixes do céu. Saímos imediatamente para apanhar alguns dos peixes. As pessoas da cidade estavam excitadas. O diretor do Banco Marksville, J. M. Barham, disse que ao levantar da cama descobrira que centenas de peixes haviam caído em seu quintal e no quintal vizinho pertencente à Sra. J. W. Joffrion. O caixa do mesmo banco, J. E. Gremillion, e dois comerciantes, E. A. Blanchard e J. M. Brouillette, foram atingidos pelos peixes que caíam ao caminharem em direção às suas lojas de comércio cerca de 7:45 da manhã...” (Extraído por William R. Corliss da *Science*, 109, 402, de 22 de abril de 1949.)

Todos os meteorologistas que consultei me asseguraram que sua ciência não oferece qualquer objeção conclusiva à possibilidade de tais criaturas terem sido jogadas para o alto, transportadas por distâncias consideráveis e então largadas em consequência de perturbações meteorológicas. Embora se possa especular sobre mecanismos específicos, como trombas d'água, é perfeitamente possível que o fenômeno realmente ocorra. É concebível que os peixes tenham sido levados por pássaros, o que seria outra explicação.

Além disso, se os peixes ou pelo menos sua prole chegam ao solo vivos, isto poderia fazer uma séria diferença para a geografia animal, o estudo da distribuição das espécies. Ernst Mayr, o grande ornitólogo e zoogeógrafo, realmente mencionou em um dos seus trabalhos sobre zoogeografia que há muitos quebra-cabeças sobre a distribuição dos peixes de água doce que poderiam ser resolvidos se estas criaturas pudessem ser transportadas por meios não-convencionais, como a chuva de peixes caindo do céu.

A discussão precedente deixa claro que, se os peixes realmente despencam do céu, o processo não necessita fazer qualquer estrago nas leis aceitas da ciência; de fato, ele provavelmente as ajuda. Da mesma forma, se uma dessas criaturas "criptozoológicas", como as supostas preguiças gigantes terrestres da floresta amazônica, se revelarem reais, isto não poderá também fazer mal às leis da ciência, não mais do que o celacanto que foi descoberto nas águas do sul da África há cinquenta anos, embora se pensasse que há muito tempo estivesse extinto. Mas e os supostos fenômenos que parecem desafiar as leis fundamentais da ciência como as conhecemos?

SUPPOSTOS FENÔMENOS QUE DESAFIAM AS LEIS CONHECIDAS DA CIÊNCIA

Embora tais fenômenos não sejam *ipso facto* inexistentes, um padrão muito alto de ceticismo deve ser aplicado a eles. Não obstante, se qualquer deles se revelar verdadeiro, as leis científicas devem ser modificadas para acomodá-lo.

Considere o suposto fenômeno, em que por acaso eu não acredito, da telepatia entre duas pessoas que estão pessoalmente muito próximas e intimamente relacionadas, digamos mãe e filho ou gêmeos idênticos. Quase todo mundo já ouviu histórias sobre tais pares de pessoas, e, de acordo com estas, em momentos de extrema tensão de um deles o outro fica alarmado, mesmo que estejam muito distantes. A maioria destes relatos é ocasionada por uma combinação de coincidência, memória seletiva (por exemplo, esquecendo os alarmes falsos), lembranças dis-

torcidas das circunstâncias (incluindo uma exageração da simultaneidade), e assim por diante. Além disso, é muito difícil investigar tais fenômenos cientificamente, embora em princípio não seja impossível. Por exemplo, podemos imaginar uma experiência, cruel e portanto proibida por considerações éticas, mas de outro modo possível de ser realizada, na qual contrataríamos muitos pares de gêmeos idênticos, os separaríamos por grandes distâncias, e então submetteríamos um deles de cada par a uma pressão severa para verificar se o outro gêmeo reagiria. (Há algumas pessoas crédulas, inclusive muitos de meus conhecidos da Nova Era em Aspen, que acreditam que tal experiência foi realmente feita com animais enquanto o submarino *Nautilus* estava sob o gelo polar. Eles acham que uma mãe coelha foi monitorada no submarino e mostrou sinais de angústia quando alguns de seus coelhos foram torturados na Holanda!)

De qualquer modo, suponha por um instante que, contrariamente à minha expectativa, tal fenômeno telepático se mostrasse genuíno, digamos para gêmeos humanos idênticos. A teoria científica fundamental teria de ser profundamente alterada, mas finalmente, sem dúvida, uma explicação seria encontrada. Por exemplo, os teóricos poderiam acabar postulando algum tipo de ligação, de uma natureza que no momento não é entendida, provavelmente envolvendo modificações importantes nas leis da física do modo como elas são formuladas no presente. A ligação entre os gêmeos transportaria um sinal entre eles quando um estivesse em sério perigo. Deste modo, o efeito poderia ser bastante independente da distância, como muitas das histórias sugerem. Deixem-me enfatizar novamente que estou citando este exemplo não porque acredito em telepatia, mas apenas para ilustrar como a teoria científica pode ser modificada para acomodar mesmo os fenômenos mais bizarros no evento improvável de se revelar verdadeiros.

UMA HABILIDADE GENUÍNA — LENDO OS SULCOS DE DISCOS

Ocasionalmente o CSICOP descobre que uma afirmação aparentemente maluca é na verdade justificada. Tais casos são devidamente relatados no *Skeptical Inquirer* e discutidos nos encontros, mas em minha opinião eles deveriam receber mais atenção do que têm recebido. Então seria muito mais claro que o objetivo é tentar distinguir reivindicações genuínas das falsas e não simplesmente se dedicar a expor fraudes.

Os cientistas têm, em seu conjunto, um registro muito pobre de sucessos na investigação de impostores suspeitos. Com muita frequên-

cia, mesmo sábios bem conhecidos foram ludibriados, algumas vezes tornando-se promotores de charlatães que deveriam ter desmascarado. O CSICOP depende em primeiro lugar de um mágico, James Randi, para descobrir testes para pessoas que alegam ter poderes extraordinários. Randi sabe como enganar uma audiência, e é igualmente bom em perceber como alguém está tentando enganá-lo. Ele se diverte expondo impostores e mostrando como estes obtiveram seus efeitos.

Quando chegou aos ouvidos da revista *Discover* que um homem alegava ser capaz de obter informação a partir dos sulcos dos discos fonográficos, a ação óbvia foi despachar Randi para investigar. O homem em questão, Dr. Arthur Lintgen da Pensilvânia, disse que podia olhar um disco de música clássica pós-mozartiana completamente orquestrada e identificar o compositor, muitas vezes a peça, e muitas vezes o intérprete. Randi o submeteu aos seus testes rigorosos usuais e descobriu que ele estava dizendo exatamente a verdade. O médico identificou corretamente duas gravações diferentes da *Sagração da primavera* de Stravinsky, assim como o *Bolero* de Ravel, *Os planetas* de Holst e a *Sexta sinfonia* de Beethoven. Naturalmente, Randi mostrou-lhe alguns outros discos como forma de controle. Um, rotulado como “baboseira”, pelo Dr. Lintgen, era de Alice Cooper. Ao ver um outro disco de controle, ele disse: “Isto não é de modo algum música instrumental. Eu diria que é algum tipo de solo vocal.” De fato, era uma gravação de um homem falando, intitulada *Então, você quer ser um mágico?*

Esta alegação peculiar, que se mostrou verdadeira, não violou qualquer princípio importante. A informação necessária estava presente nos sulcos; a questão era se alguém havia sido realmente capaz ou não de abstrair esta informação por inspeção. Randi confirmou que realmente alguém o fizera.

CAPÍTULO 19

ESQUEMAS ADAPTATIVOS E MAL-ADAPTATIVOS

Uma história que a investigação cética desmascarou com sucesso é aquela do “centésimo macaco”. A primeira parte do relato é verdadeira. Certo membro de uma colônia de macacos em uma ilha no Japão aprendeu a lavar a areia de sua comida em um riacho que desembocava no mar, e depois no próprio mar. Eles transmitiram esta habilidade para outros membros da colônia. Até aqui, tudo bem. Uma lenda da Nova Era, contudo, se apodera destes fatos e alega mais adiante que quando uma centena de macacos adquiriu a habilidade, subitamente então, por meios misteriosos, os membros da espécie em todas as partes souberam e começaram a praticá-lo. Disto não há qualquer evidência verossímil.

A parte verdadeira da história é bastante interessante em si mesma como um exemplo de transmissão cultural de comportamento aprendido em animais outros que não os humanos. Outro exemplo é fornecido pelo comportamento de alguns grandes serezinos (pássaros relacionados com o chapim da América do Norte) em certas cidades inglesas há algumas décadas. Aqueles pequenos pássaros aprenderam a abrir garrafas de leite. Mais e mais grandes serezinos adquiriram o comportamento, e alguns membros de outras espécies de serezinos também. A atividade física exigida já estava no repertório dos pássaros; tudo o que eles precisavam era o conhecimento de que a garrafa de leite continha uma recompensa adequada. Há muitos outros casos de comportamento animal novo transmitido desta forma.

ADN CULTURAL

A transmissão cultural humana pode, é claro, ser consideravelmente mais sofisticada. Presumivelmente a explicação está não apenas na inte-

ligência superior, mas também no caráter das linguagens humanas — todas permitem expressões vocais arbitrariamente complexas. Usando estas linguagens, as sociedades humanas exibem aprendizado em grupo (ou adaptação grupal, ou evolução cultural) em grau muito mais elevado do que bandos de outros primatas, matilhas de cachorros selvagens ou bandos de pássaros. Tal comportamento coletivo pode ser analisado, em uma certa medida, reduzindo-o ao nível dos indivíduos que atuam como sistemas adaptativos complexos. Entretanto, como sempre, esta redução sacrifica *insights* valiosos que podem ser obtidos ao se estudar um fenômeno em seu próprio nível. Em particular, uma redução simplória à psicologia pode não realçar suficientemente o fato de que, além das características gerais dos seres humanos, informações adicionais estão presentes no sistema, inclusive tradições específicas, costumes, leis e os mitos do grupo. Citando a frase pitoresca de Hazel Henderson, isto tudo pode ser considerado “ADN cultural”. Elas encapsulam a experiência repartida de muitas gerações e abrangem os esquemas para as sociedades, que por sua vez funciona ela mesma como um sistema adaptativo complexo. De fato, o biólogo inglês Richard Dawkins cunhou o termo “*meme*” para indicar uma unidade de informação transmitida culturalmente, análoga ao gene na evolução biológica.

Na verdade a adaptação se dá em pelo menos três níveis diferentes, e isto algumas vezes provoca confusão no uso dos termos. Antes de tudo, alguma adaptação direta (como em um termostato ou dispositivo cibernético) acontece como resultado da operação de um esquema que é dominante em determinada época. Quando o clima se torna mais quente e mais seco, uma sociedade pode ter o costume de se mover para novas aldeias no alto das montanhas. Alternativamente, ela pode recorrer a cerimônias religiosas para trazer a chuva, sob a supervisão de uma casta sacerdotal. Quando seu território é invadido pelos inimigos, a sociedade pode reagir automaticamente retirando-se para uma cidade bem fortificada, previamente abastecida com víveres, e sustentar um cerco. Quando o povo está amedrontado por um eclipse, pode haver feiticeiros prontos com alguma magia apropriada. Nenhum destes comportamentos exige qualquer mudança no esquema predominante.

O próximo nível envolve mudanças no esquema, competição entre vários esquemas, e promoção ou remoção dependendo da ação das pressões seletivas no mundo real. Se a dança da chuva não consegue aliviar a seca, a casta sacerdotal referente pode cair em desgraça e uma nova religião pode assumir o controle. Nos lugares onde a resposta às mudanças de clima tem sido o deslocamento para elevações mais altas, resultados pobres em razão deste esquema podem conduzir à adoção de outras práticas, como novos métodos de irrigação ou a plantação de novas

colheitas. Se a estratégia de retirada para uma fortaleza fracassa no trato adequado de uma série de ataques inimigos, a próxima invasão pode provocar o envio de uma força expedicionária ao âmago do território do inimigo.

O terceiro nível de adaptação é a sobrevivência darwiniana do mais apto. Uma sociedade pode simplesmente deixar de existir em consequência do fracasso de seus esquemas em lidar com os eventos. Não é necessário que todas as pessoas morram, e os indivíduos sobreviventes podem juntar-se a outras sociedades, mas a sociedade em si mesma desaparece, levando seus esquemas à extinção com ela. Uma forma de seleção natural aconteceu no nível social.

Exemplos de esquemas conduzindo à extinção não são difíceis de se achar. Supõe-se que algumas comunidades, como os essênios na antiga Palestina e os *shakers** nos Estados Unidos do século XIX, tenham praticado a abstinência sexual. Todos os membros da comunidade, não apenas uns poucos monges e freiras, supostamente se abstinham de atividade sexual. Dado um esquema como esse, a sobrevivência da comunidade exigiria que as conversões superassem as mortes. Isto parece não ter acontecido. Os essênios desapareceram e os *shakers* são hoje muito poucos. De qualquer modo, a proibição da relação sexual foi um traço cultural que contribuiu de maneira óbvia para a extinção, ou quase, da comunidade.

O colapso da civilização maia clássica nas florestas tropicais da Mesoamérica durante o século X é um exemplo marcante de extinção de uma cultura avançada. Como foi mencionado no começo deste livro, as causas do colapso são assunto de discussão até hoje; os arqueólogos não têm certeza sobre quais os esquemas que falharam — aqueles relacionados com a estrutura de classes da sociedade, a agricultura na selva, as guerras entre cidades ou outras facetas da civilização. De qualquer modo, imagina-se que muitos indivíduos sobreviveram ao colapso e que algumas das pessoas na área que falam línguas maias sejam seus descendentes. Mas a construção das edificações em pedra nas cidades da floresta chegou a um fim, assim como a construção de estelas para comemorar a passagem de datas-chave do calendário maia. As sociedades subsequentes eram muito menos complexas do que aquelas do período clássico.

Os três níveis da adaptação se dão, falando de modo geral, em diferentes escalas de tempo. Um esquema dominante existente pode ser transformado em ação prontamente, em dias ou meses. Uma revolução

* Os *shakers* são membros da Igreja do Milênio, fundada na Inglaterra em meados do século XVIII, e levada para os Estados Unidos em 1774. Os membros da seita defendem o celibato, a posse em comum da propriedade e uma vida simples e restrita. (N. do T.)

na hierarquia dos esquemas é geralmente associada com uma escala de tempo maior, embora os eventos culminantes possam acontecer rapidamente. As extinções de sociedades usualmente acontecem em intervalos de tempo ainda mais longos.

Nas discussões teóricas nas ciências sociais, por exemplo na literatura arqueológica, as distinções entre os diferentes níveis de adaptação nem sempre são claramente mantidas, o que resulta, com frequência, numa boa dose de confusão.

A EVOLUÇÃO DAS LÍNGUAS HUMANAS

No caso das línguas, assim como no das sociedades, a evolução, o aprendizado ou a adaptação se dá de vários modos em diferentes escalas de tempo. Como discutimos anteriormente, a aquisição de uma língua por uma criança representa um sistema adaptativo complexo em operação. Em uma escala de tempo muito maior, a evolução das línguas humanas ao longo dos séculos e milênios pode ser considerada um outro sistema adaptativo complexo. Em uma escala de tempo de centenas de milhares ou de milhões de anos, a evolução biológica produziu nos seres humanos (*Homo sapiens sapiens*) a faculdade de comunicar-se por meio de línguas do tipo moderno. (Todas estas línguas têm certas propriedades comuns, como frases de comprimento arbitrário, estrutura gramatical elaborada e outras características gramaticais universais, como pronomes, construções genitivas de vários tipos, e assim por diante.)

Ao considerar a evolução da gramática, é importante levar em conta os vários níveis de adaptação. Desde o trabalho pioneiro de Joe Greenberg, uma quantidade considerável de informação sobre os aspectos gramaticais comuns a todas as línguas humanas conhecidas (“aspectos gramaticais universais”) e aqueles que são quase comuns (“aspectos gramaticais quase universais”) tem sido acumulada. Ao justificar estes aspectos gerais, devemos obviamente dar atenção aos vínculos neurologicamente pré-programados, graças à evolução biológica, enfatizados por Chomsky e seus seguidores. Entretanto, devemos considerar também os resultados da evolução lingüística no decorrer dos séculos e milênios, os quais devem refletir em alguma medida as pressões seletivas, favorecendo aspectos gramaticais adaptáveis à comunicação. Finalmente, pode haver acidentes congelados, “efeitos fundadores”, originando-se de escolhas arbitrárias de aspectos gramaticais nas línguas (ou mesmo em uma única língua) ancestrais das línguas modernas, escolhas que persistem em todas as partes até os dias de hoje. (Lembre-

se de que, na biologia, a assimetria entre moléculas dextrogiras e levogiras pode ser um acidente congelado deste tipo.) Nas discussões sobre línguística no Instituto Santa Fé, dá-se ênfase à necessidade de incluir todas estas contribuições ao mesmo tempo ao tentar explicar os aspectos gramaticais universais e quase-universais.

Ao estudar a evolução de qualquer sistema adaptativo complexo, é essencial tentar separar estes três elementos: as regras básicas, os acidentes congelados e a seleção do que é adaptativo. E é claro que as próprias regras básicas podem parecer com acidentes congelados quando vistas em uma escala cósmica de espaço e tempo.

ADAPTAÇÃO VERSUS O QUE É OU PARECE SER ADAPTATIVO

A distinção de diferentes níveis e escalas de tempo de adaptação ainda deixa sem solução o conjunto de quebra-cabeças associado à razão pela qual sistemas adaptativos complexos como as sociedades parecem muitas vezes estar entalados com esquemas mal-adaptativos. Por que eles não desenvolveram apenas esquemas cada vez melhores e progrediram em direção a aptidões cada vez maiores? Algumas das razões já foram encontradas nos capítulos anteriores.

As sociedades, como outros sistemas adaptativos complexos, são muitas vezes sujeitas a pressões seletivas que não são descritas com precisão por qualquer função de aptidão. E aptidão, como vimos, não é algo que simplesmente cresce com o tempo mesmo quando é bem definida. Ademais, não há uma correspondência simples entre os aspectos adaptativos e os que surgiram por meio das várias formas de adaptação. Nenhuma destas questões é restrita às sociedades. Elas são amplamente disseminadas na biologia e algumas vezes particularmente acentuadas na experiência dos seres humanos individuais. Quais são alguns dos mecanismos que permitem que sistemas mal-adaptativos sobrevivam?

ESQUEMAS MAL-ADAPTATIVOS — PRESSÕES SELETIVAS EXTERNAS

Um mecanismo muito geral da persistência de comportamento aparentemente mal-adaptativo já foi discutido com certa minúcia, especialmente em relação com a superstição versus a ciência. As pressões seletivas que afetam a promoção ou o rebaixamento de teorias científicas se relacionam principalmente com o sucesso destas teorias em explicar coerentemente e predizer de modo correto os resultados da observação, pelo

menos quando o empreendimento científico está funcionando com propriedade. Quando ele não está trabalhando bem, é porque outras pressões seletivas, muitas delas originárias das fraquezas humanas dos cientistas, são fortes.

No caso da teorização supersticiosa, tipos de pressões seletivas não-científicas desempenham os papéis dominantes. Recapitulemos as pressões que mencionamos. Elas incluem o reforço da autoridade de indivíduos poderosos e também a manutenção da coesão social, o que confere uma vantagem na evolução social. Além disso, a imposição de uma estrutura de ordem e regularidades falsas sobre eventos em sua maior parte randômicos ou sobre fatos desconexos pode fornecer um grau de conforto; a ilusão de entendimento e especialmente de domínio alivia os medos do incontável. Relacionado com estas pressões seletivas está o tipo muito geral que associamos com a frase de efeito “o esquema egoísta”: qualquer sistema adaptativo complexo evolui para a descoberta de padrões e assim, em certo sentido, um padrão é sua recompensa.

O elemento comum em todas estas pressões seletivas é que elas são em grande parte externas ao que é considerado adaptativo em ciência, ou seja: sucesso ao descrever a natureza. Da mesma forma, elas são em grande parte externas ao que é considerado adaptativo em engenharia, a saber, controlar a natureza para algum propósito humano. Não obstante, tais pressões seletivas desempenham papéis críticos na evolução do ADN cultural.

Há claramente uma lição geral a ser aprendida aqui. O sistema que está sendo discutido é muitas vezes definido de tal modo que ele passa a ser aberto. Pressões seletivas da maior importância são exercidas de fora. Um exemplo simples é dado por um dos processos que acontecem na evolução das línguas humanas. Suponha que certas tribos ou nações que falem línguas diferentes entrem em contato e que, depois de algumas gerações, algumas das línguas sobrevivam, com certas modificações, enquanto outras se extinguem. Seja lá quais forem as que morrem, isso depende menos dos méritos relativos das várias línguas como meio de comunicação do que de considerações bastante diferentes, como a força militar relativa ou realizações culturais das diferentes tribos ou nações. Estas são pressões seletivas exercidas de fora do domínio linguístico.

No domínio da evolução biológica, onde a seleção normalmente se dá no nível fenotípico, pode haver, como discutimos antes, casos excepcionais onde ela atua diretamente sobre as células germinativas: um “gene verdadeiramente egoísta” promovendo para o espermatozóide que o transporta a fertilização bem-sucedida de um óvulo, ainda que este gene não seja útil, podendo até ser danoso ao organismo resultante.

O que todos estes exemplos sugerem é que, dadas todas as pres-

sões seletivas que estão operando, a persistência aparente de esquemas mal-adaptativos nos sistemas adaptativos complexos pode muitas vezes surgir de uma escolha de critérios muito restrita para o que é considerado adaptativo.

PRESSÕES EXERCIDAS POR INDIVÍDUOS INFLUENTES

Ao estudar a evolução das organizações humanas, não é sempre vantajoso considerar os membros individuais da organização apenas como agentes genéricos simplificados. Muitas vezes decisões particulares tomadas por seres humanos individuais específicos fazem uma grande diferença para a história futura. Embora possa acontecer que a longo prazo muitos destes efeitos provem ser aberrações temporárias que são "curadas" por meio da operação de tendências de longo prazo, ainda assim é impossível ignorar o fato de que os indivíduos são importantes. Deste modo, o elemento de intenção entra no quadro. A Constituição de um estado ou federação é escrita por indivíduos. Mesmo que muitos dos conflitos surgidos durante a sua feitura representem a competição de interesses em grande escala, ainda assim os acordos específicos obtidos são forjados por estadistas individuais. Da mesma forma, uma empresa comercial é dirigida por indivíduos, e o caráter e as idéias do chefe ou dos chefes (e algumas vezes também de outros indivíduos) são cruciais para o sucesso ou fracasso do empreendimento.

Ao mesmo tempo, uma organização realmente se comporta, em muitos aspectos, como sistema adaptativo complexo, com esquemas e pressões seletivas. Uma empresa comercial opera de acordo com certo conjunto de práticas e regras de procedimento, determina objetivos para os seus vários departamentos ou divisões, faz planos para o futuro e gera modelos mentais para o funcionamento de todo o empreendimento. Os modelos, junto com os objetivos, planos, práticas e regras de procedimento, constituem esquemas sujeitos às pressões diretas exercidas pelos gerentes nos vários níveis, do chefe ao capataz ou chefes de escritório. As pressões seletivas reais sobre uma firma no mundo real, contudo, têm a ver com lucros, com a sobrevivência no mercado. É importante que os clientes sejam atraídos e, nesse caso, satisfeitos. Em geral, quando as organizações são consideradas sistemas adaptativos complexos e teatros para o exercício das habilidades de gerenciamento dos indivíduos, surge a questão quanto à relação entre as pressões seletivas fundamentais que governam a sobrevivência da organização e as pressões seletivas internas exercidas pelos administradores individuais.

W. Edwards Deming, o estatístico americano (com doutorado em

física) que aconselhou os japoneses na reconstrução de suas indústrias após a Segunda Guerra Mundial, se tornou uma espécie de herói no Japão em consequência de suas sábias recomendações. Durante uma década ou mais antes de seu falecimento recente aos 93 anos, ele finalmente foi exaltado em seu país de origem, onde suas idéias agora são amplamente disseminadas e aceitas por muitas firmas industriais. Talvez mais bem conhecida seja a sua ênfase na “gestão da qualidade total” ou TQM (Total Quality Management). Das muitas facetas do TQM, talvez seja mais útil citar aqui suas observações críticas sobre as pressões internas exercidas pelos administradores, inclusive os administradores de nível médio. Estas são as pessoas que administram as recompensas e as sanções. Ao criar incentivos para que os empregados ajam de modo particular, eles afetam diretamente alguns dos principais esquemas da organização. Mas serão estes efeitos diretos consoantes com as pressões seletivas exercidas no mundo real? Estarão os empregados sendo recompensados por atividades que conduzem a um cliente satisfeito? Ou será apenas ao capricho de algum administrador o que eles estão satisfazendo? Estarão os administradores inclinados a comportar-se como genes verdadeiramente egoístas, agindo diretamente sobre a sobrevivência do esquema de um modo que pode não promover a sobrevivência do organismo?

SISTEMAS ADAPTATIVOS COM HUMANOS NO CIRCUITO

O caso dos administradores de uma empresa comercial exemplifica a situação mais geral de sistemas adaptativos com um ou mais humanos no circuito — sistemas sujeitos ao que algumas vezes é chamado evolução direcionada, na qual as pressões seletivas são exercidas pelos seres humanos individuais.

As situações mais simples envolvem a adaptação direta, sem esquemas variantes. Considere o exame de olhos feito por um optometrista. Você olha com um olho só para um cartaz coberto de fileiras de letras assim como por linhas verticais e horizontais. O optometrista apresenta a você uma seqüência de escolhas binárias. Para cada par de imagens, você deve dizer se é a da esquerda ou é a da direita a mais clara. Dentro em breve você chega à receita certa para cuidar da combinação de astigmatismo, miopia e presbiopia que o olho em questão apresenta, seja qual for. O esquema cartaz-olho ajustou-se ao seu olho.

Um exemplo menos convencional de um humano no circuito é dado pelo trabalho de Karl Sims, agora na Thinking Machines (Máquinas Pensantes), uma companhia que projeta e manufatura com-

putadores para processamento paralelo. Sims utiliza uma tela de computador que consiste de 256 por 256 *pixels** em cada um dos quais a cor pode variar sobre todo o espectro. Os padrões são resultados da especificação da cor de cada *pixel*. Usando o programa de Sims, o computador começa com um padrão particular e então gera um conjunto de padrões alternativos, usando um algoritmo particular. A pessoa "no circuito" escolhe o padrão que lhe parece melhor. O computador então oferece um outro conjunto de escolhas, e assim por diante. Depois de um tempo não muito longo, o sistema convergiu para um quadro que atrai o ser humano envolvido. Foi-me dito que os resultados são muitas vezes bastante notáveis e também que a participação no processo é aditiva.

Podemos imaginar elaborações deste método nas quais o acaso teria um papel a desempenhar no algoritmo que computa as escolhas oferecidas em cada estágio. Ou, o que significa quase a mesma coisa, o computador poderia empregar um processo quase randômico como parte do algoritmo.

No Simpósio do Conselho de Ciências do Instituto Santa Fé, Chris Langton deu uma breve descrição do trabalho de Sims. Bob Adams, o arqueólogo que é o secretário do Instituto Smithsonian, levantou a questão de que o algoritmo que governa o modo pelo qual o computador fica oferecendo conjuntos de escolhas poderia ser ele mesmo sujeito a variações. Se assim é, ele se tornaria um tipo de esquema, do qual cada variante poderia ser considerada um processo de busca diferente para selecionar da enorme lista de padrões possíveis. O processo particular de busca adotado (que pode ou não incluir um elemento de acaso), junto com os resultados das escolhas feitas pelo ser humano, determinariam o padrão na tela do computador.

O padrão poderia então ser transferido para um meio permanente e sujeito a pressões seletivas, por exemplo vendas no mercado ou comentários dos críticos. Os programas de computador que conduzem mais freqüentemente (por meio de seres humanos) a quadros que obtêm preços relativamente altos ou comentários relativamente favoráveis poderiam ser promovidos, e os outros deixados de lado. Da mesma forma, os gostos (conscientes ou inconscientes) dos seres humanos poderiam mudar sob a influência dos preços ou dos comentários. O programa, o computador, o humano e o mercado ou crítico constituiriam então um sistema adaptativo complexo, com humanos no circuito. De fato, tal sistema poderia servir como uma espécie de caricatura grosseira de como o processo criativo de artistas reais algumas vezes funciona.

* Um *pixel* é um ponto na tela de um monitor de vídeo ao qual um programa de computação gráfica atribui uma propriedade, por exemplo, uma cor. (N. do T.)

Estamos todos familiarizados com um outro sistema adaptativo complexo que opera desta forma, a saber: a criação de animais ou o cultivo de plantas para o uso humano. A criação de animais e o cultivo de plantas desempenharam um papel importante na história da biologia moderna. Darwin repetidamente se referiu a eles na sua *Origem das espécies* sob a rubrica de “seleção artificial”, com a qual a seleção natural foi comparada e contrastada. As leis mendelianas da genética foram descobertas pelo monge Gregor Mendel no decurso de seu cultivo de ervilhas. Além disso, na virada do século, na época em que o trabalho de Mendel foi redescoberto e difundido em todo o mundo, o holandês De Vries descobriu as mutações ao cultivar tulipas.

O criador exerce pressões seletivas ao escolher para reprodução posterior apenas alguns dos organismos produzidos. É claro, a seleção natural também está trabalhando, e muitos dos animais e plantas não sobrevivem ou se reproduzem por razões que nada têm a ver com a decisão do criador. O genoma é um esquema, como é usual na evolução biológica, mas aqui a evolução é em parte direcionada e os princípios do criador também formam um esquema, embora de um tipo diferente.

Quando um criador de cavalos coloca um cavalo à venda ou o cavalo entra em uma corrida (ou ambos), seus métodos, análogos ao programa de computador de Karl Sims acrescido das escolhas feitas por um humano, estão sendo expostos às pressões seletivas do mercado e da pista de corridas. Deste modo, um sistema adaptativo complexo com uma componente de evolução direcionada pode tornar-se parte de um sistema adaptativo complexo de ordem mais alta, no qual o próprio caráter da direcionalidade imprimida pelos humanos pode ele evoluir.

Contudo, suponha que um rico criador amador não se importe como seus cavalos se saem na pista de corridas ou se alguém os quer comprar ou não. Neste caso, no contexto dos sistemas adaptativos de ordem mais alta, os resultados dos métodos de criação de cavalos provavelmente parecerão mal-adaptativos. Como administradores que oferecem incentivo para comportamentos que muito dificilmente atrairão ou manterão os clientes, este criador de cavalos diletante pode estar agradando a si mesmo mas não está agindo como um homem de negócios. De um ponto de vista puramente comercial, sua criação é um fracasso, mesmo assim ela pode continuar.

A PERSISTÊNCIA DE ESQUEMAS MAL-ADAPTATIVOS: JANELAS DE AMADURECIMENTO

Esquemas mal-adaptativos algumas vezes persistem porque o tipo pertinente de adaptação chegou a um fim ou quase isto. As crianças estabele-

cem relações com pessoas muito importantes em suas vidas: pais, pais adotivos, irmãos, babás, mães e assim por diante. De acordo com o Dr. Mardi Horowitz, as atitudes e o comportamento de uma criança em tais relações são governados por um “esquema para cada pessoa” que se relaciona com a percepção da criança do indivíduo em questão. No começo este esquema é sujeito a alterações, mas mais tarde na infância ele se torna bastante resistente a mudanças. À medida que a criança cresce, estes esquemas para cada pessoa podem afetar profundamente o modo pelo qual ele ou ela se relacionam com outras pessoas. Estamos todos familiarizados, por exemplo, com adultos que ficam sempre revivendo vários substitutivos de relações de infância com um dos pais. Muitas vezes os esquemas para cada pessoa parecem bastante inaptos, e viver de acordo com eles implica aquilo que muitas vezes é chamado de comportamento neurótico, notoriamente difícil de curar.

Uma maneira útil de olhar para tais situações é em termos de “janelas de amadurecimento” versus “plasticidade”. Um exemplo extremo de janela de amadurecimento é o fenômeno da gravação de uma impressão, que se tornou famoso com Konrad Lorenz no seu livro *King Solomon's Ring* (O anel do rei Salomão). Um ganso selvagem recém-nascido considera o primeiro animal conveniente que vê como sua mãe e o segue por todos os lugares. Se este animal for Lorenz ou outro ser humano, então o ganso chega a se considerar de certo modo um humano e sua habilidade de viver como um ganso normal fica permanentemente comprometida. A janela de amadurecimento é o período muito curto depois do nascimento durante o qual o gansinho identifica sua “mãe” e depois do que a identificação fica estabelecida para sempre. O gansinho típico vê sua mãe real imediatamente, e o programa genético de gravação de impressões é então fenotipicamente bem-sucedido. Para os raros gansinhos que adotam um etnólogo como Lorenz como mãe, o programa é evidentemente um fracasso. Nestes casos o esquema de aprendizagem fornecido pela gravação de impressões não se adapta ao indivíduo particular envolvido. Entretanto, como o esquema de aprendizado funciona bem para a maioria dos indivíduos, os esquemas genéticos que conduzem à gravação de impressões não foram eliminados na evolução biológica. Ainda assim, esquemas genéticos que fornecem estas janelas de amadurecimento devem também conferir alguma vantagem geral para que tenham sobrevivido. Presumivelmente esta vantagem vem da possibilidade, quando a janela fecha, de desligar o mecanismo para adquirir certas informações novas.

Janelas de amadurecimento são conhecidas também dos seres humanos. Por exemplo, alguns bebês nascem com problemas visuais que devem ser corrigidos cedo para que a recuperação seja possível

(pelo menos sem alguma forma nova, até agora não descoberta, de intervenção). Em outros casos, as janelas, por assim dizer, não são absolutas. As conseqüências das várias formas de negligência durante períodos cruciais da primeira e da segunda infância podem ser sérias se nada for feito para reverter o prejuízo, mas sob condições apropriadas pode haver possibilidades significativas de recuperação. Estas possibilidades são discutidas sob a rubrica de plasticidade, a capacidade do sistema nervoso de reorganizar-se para que padrões que de outra forma poderiam persistir indefinidamente possam de fato ser mudados.

A principal questão das políticas públicas, particularmente nos Estados Unidos, envolve o grau em que as deficiências na habilidade de aprender adquiridas antes da idade de dois anos e meio podem ser remediadas com programas como o Head Start (Vantagem Inicial), que dão às crianças ajuda especial nos dois anos e meio seguintes ou mais. Alguns pesquisadores afirmam que uma janela de amadurecimento inicial desempenha aqui um papel crucial e que programas terapêuticos para idades maiores não são tão eficientes a longo prazo quanto o aprimoramento do ambiente de aprendizado dos bebês. Outros afirmam ter demonstrado que há plasticidade suficiente neste caso para permitir uma reversão substancial e duradoura das deficiências de aprendizagem, por meio de intervenções como o Head Start, desde que elas sejam realizadas (e muitas vezes não o são) com intensidade e duração suficientes.

Sejam quais forem os méritos dos argumentos sobre deficiências gerais de aprendizagem nas crianças, é sabido que na aquisição de uma primeira língua os anos iniciais de vida são cruciais. Os poucos casos conhecidos de crianças que cresceram com poucos ou nenhum contato lingüístico humano indicam que o mecanismo inato de domínio da gramática de uma língua deixa de ser efetivo. Aparentemente, uma janela de amadurecimento verdadeira está envolvida.

A PERSISTÊNCIA DE ESQUEMAS MAL-ADAPTATIVOS: ESCALAS DE TEMPO

Uma das razões mais comuns, e talvez a mais simples, para a existência de esquemas mal-adaptativos é que uma vez eles foram adaptativos mas sob condições que não prevalecem mais. O ambiente do sistema adaptativo complexo mudou a uma taxa mais rápida do que os processos evolutivos podem acompanhar. (As janelas de amadurecimento são um exemplo extremo de tal desencontro de escalas de tempo.)

No domínio do pensamento humano, muitas vezes acontece de sermos confrontados com uma situação que está mudando rapidamente e

sobrepassa nossa habilidade de alterar nossos padrões de pensamento. Gerald Durrell, o fundador do zoológico da ilha de Jersey, e que escreveu tantos livros atraentes sobre suas expedições para trazer animais raros, dá detalhes do que aconteceu uma vez quando estava segurando uma certa cobra do oeste da África em suas mãos. Ele não estava tomando qualquer precaução especial porque "sabia" que ela pertencia a uma espécie cega inofensiva (como a cobra-de-vidro européia). Subitamente a serpente abriu seus olhos, mas Durrell não reagiu com suficiente presteza à informação de que a cobra pertencia a uma espécie desconhecida e possivelmente perigosa. De fato ela era venenosa, e Durrell foi mordido e quase morreu.

Em vez de mudar nossa maneira de pensar, tendemos a nos apegar tenazmente aos nossos esquemas e mesmo distorcer a informação nova para que esta se adapte a eles. Há muitos anos, dois físicos associados com o Centro Aspen de Física estavam escalando no Maroon Bells Wilderness. Na descida, eles perderam o rumo e foram pelo lado sul das montanhas, ao invés do lado norte perto de Aspen. Eles olharam para baixo e viram o que identificaram como o lago da Cratera, que eles teriam localizado a partir da trilha que conduzia para casa. Um deles observou, entretanto, que havia um desembarcadouro no lago que o Cratera não tem. O outro físico respondeu: "Eles devem tê-lo construído depois que partimos esta manhã." Desnecessário dizer que a defesa desesperada de um esquema fracassado se mostrou incorreta. Os físicos estavam olhando para o lago da Avalanche no lado errado das montanhas, e precisaram de um par de dias para chegar em casa.

A percepção de que a cobra, já que não era na verdade cega, poderia ser venenosa se ajusta à descrição que demos de ter uma idéia criativa na vida diária, escapar de uma bacia de atração para outra. Do mesmo modo, a reflexão de que o lago, com seu desembarcadouro, provavelmente não era o lago da Cratera e que era portanto algum outro lugar das montanhas. A presente discussão enfatiza que o processo de obter tais idéias pode, em muitos casos, não se manter no ritmo da necessidade destas.

É notório que as firmas comerciais muitas vezes têm problemas em ajustar suas práticas com rapidez suficiente frente às condições em mudança do mercado. Neste momento, nos Estados Unidos, as reduções de verbas com os gastos militares significam que indústrias até agora devotadas principalmente à defesa devem encontrar clientes civis rapidamente. Muitas destas empresas formaram suas idéias de comercialização no decorrer de décadas de negociações com as forças armadas e agências governamentais pertinentes. O esquema predominante de venda de um produto pode ser jantar com um almirante, não necessaria-

mente uma ação que pode dar a vitória na competição por negócios civis. Além disso, os mecanismos para mudar tais esquemas e responder às pressões seletivas muitas vezes levam anos para entrar em funcionamento, enquanto a demanda por sistemas relacionados com a defesa pode ser drasticamente reduzida em um ano ou dois. Se os administradores (ou os novos administradores que os substituírem) não introduzirem mecanismos com tempos de resposta mais rápidos, as perspectivas de suas companhias não são brilhantes.

O desafio de circunstâncias que se movem mais rápido do que um determinado processo evolutivo pode acompanhar é um daqueles que afetam profundamente as perspectivas da biosfera e da raça humana como um todo. A evolução cultural do homem, especialmente por meio de avanços na esfera tecnológica, tornou possível em um breve período de tempo uma expansão extraordinária da população humana e da capacidade que cada pessoa tem de prejudicar outras pessoas e o meio ambiente. A evolução biológica, nos seres humanos e em outros organismos, não tem chance de acompanhá-los. Nossos próprios esquemas genéticos refletem em grande parte o mundo de 50 mil anos atrás e não podem, por meio dos mecanismos normais de evolução biológica, sofrer mudanças importantes em apenas uns poucos séculos. Da mesma forma, outros organismos e comunidades ecológicas inteiras não podem evoluir com rapidez suficiente para lidar com as mudanças produzidas pela cultura humana.

Isto implica que a mudança cultural por si só é a única esperança de lidar com as conseqüências de uma população humana gigantesca, armada com tecnologias poderosas. Tanto a cooperação (além de uma competição saudável) como a visão do futuro são exigidas em um grau sem precedente se as capacidades humanas forem administradas com sabedoria. A necessidade de cooperação e visão do futuro será ainda maior se a confiança para tratar com algumas das preocupações mais urgentes for depositada em transformações artificiais dos seres humanos e outros organismos, utilizando futuros desenvolvimentos da engenharia genética e outras engenharias.

Dada a imensa complexidade das numerosas questões interligadas com que depara a humanidade, uma visão do futuro exige a habilidade de identificar e coletar grandes quantidades de informação pertinente; a habilidade de vislumbrar lampejos, usando esta informação, das escolhas oferecidas pelas histórias alternativas ramificadas do futuro, e a sabedoria de selecionar simplificações e aproximações que não sacrifiquem a representação de questões qualitativas cruciais, especialmente questões de valores. Computadores poderosos são essenciais para ajudar

a olhar para o futuro, mas não devemos permitir o seu uso como um direcionamento à formulação de problemas em direção ao que é quantificável e analisável à custa do que é importante.

Neste ponto é conveniente dar uma breve olhada nos tipos de modelos simplificados de problemas complexos que os computadores podem fornecer. Computadores que atuam como sistemas adaptativos complexos podem nos ser úteis tanto aprendendo como se adaptando e modelando ou simulando sistemas que no mundo real podem aprender, se adaptar ou evoluir.

CAPÍTULO 20

MÁQUINAS QUE APRENDEM OU SIMULAM A APRENDIZAGEM

Os computadores podem funcionar como sistemas adaptativos complexos. Ou o hardware pode ser projetado para isto, ou então computadores com hardware comum podem ser projetados para fazê-lo. Até agora, a maioria destes projetos ou programas dependeu da imitação de um modelo simplificado de como um determinado sistema adaptativo complexo vivo funciona.

COMPUTAÇÃO POR MEIO DE REDES NEURAIS

Um tipo bem conhecido de sistema adaptativo complexo computacional é a rede neural, que pode ser implementada com software ou com hardware. Aqui a analogia é com um modelo aproximado de como o cérebro de um mamífero (especialmente um ser humano) pode funcionar. Começa-se com um conjunto de muitos nodos ou unidades (muitas vezes chamados neurônios, embora esteja muito longe de ser claro em que medida eles realmente correspondem aos neurônios individuais no cérebro). Em qualquer instante de tempo cada unidade é caracterizada por um bit (0 ou 1) que se supõe indicar se o “neurônio” está emitindo um sinal ou não. Cada unidade está ligada a algumas ou a todas as outras unidades, e a intensidade da influência de qualquer unidade sobre qualquer outra é algum número positivo ou negativo que depende das duas unidades. Este número é positivo se a primeira unidade excita a segunda e negativo se a inibe. Como no processo de aprendizagem, estas intensidades estão sempre mudando.

A computação por meio de redes neurais pode ser levada a cabo com computadores convencionais; neste caso o software é o responsável pelas unidades e seus efeitos excitativos ou inibitórios de umas sobre as

outras. As unidades existem então apenas como elementos da computação. É também possível empregar hardware especial para tornar concreta a rede, que é então composta por unidades computacionais separadas dispostas no formato de processamento paralelo.

Dos muitos problemas aos quais a computação por meio de redes neurais tem sido aplicada, um exemplo é aprender a ler um texto em inglês em voz alta com a pronúncia correta. Como a grafia inglesa é notoriamente distante da fonética, isto não é um exercício trivial. O computador tem de descobrir um grande número de regras gerais junto com as suas exceções, as quais podem ser consideradas regras especiais adicionais. Dado um texto suficientemente longo, não apenas as regras gerais mas também as especiais surgirão um número suficiente de vezes para funcionar como regularidades. Para que um computador de redes neurais possa aprender a falar inglês em voz alta, ele tem de funcionar como um sistema adaptativo complexo. Ele deve testar várias identificações experimentais de conjuntos de regularidades de uma parte do texto, comprimir a informação sobre elas em esquemas, e aplicar estes esquemas ao resto do texto, deixando-os competir uns contra os outros para chegar o mais perto possível da pronúncia correta, que é dada por um "professor". Este tipo de aprendizagem é chamado aprendizagem supervisionada, em contraste com o tipo de aprendizagem em que, por exemplo, os esquemas para a pronúncia seriam testados com pessoas que falam inglês para ver se elas compreenderam, mas no qual nenhum professor estaria disponível para fornecer as respostas certas. A supervisão permite que a aptidão seja definida em termos da quantidade de diferenças entre a pronúncia correta de um texto e a pronúncia resultante de um esquema.

No NETalk, originalmente desenvolvido por Terry Sejnowski e C. R. Rosenberg em 1987, os dados de entrada consistiam em sete caracteres consecutivos (cada um dos quais poderia ser uma das 26 letras do alfabeto ou então um espaço, uma vírgula ou um ponto) de algum texto escrito em inglês, apresentado em uma janela móvel que gradualmente varria toda a passagem. A saída era um código de pronúncia para o caractere do meio entre os sete; este código era transferido para um gerador de falas.

Os dados de entrada eram identificados com os bits atribuídos a um conjunto de 7 vezes 29 (= 203) unidades, e os dados de saída com bits associados com outras 26 unidades. Havia 80 unidades adicionais para ajudar a aprendizagem. Os esquemas eram representados por conjuntos de intensidades de interação, onde as interações eram restritas aos efeitos das unidades de entrada sobre as unidades de auxílio e aos efeitos destas sobre as unidades de saída. Todas as outras intensidades

de interação eram fixadas em zero só para manter o processo controlável.

A rede foi treinada utilizando-se os caracteres que constituíam um texto de 1.024 palavras, acompanhado por um “professor” que era a seqüência de códigos de pronúncia de todos aqueles caracteres, dando a pronúncia correta em inglês do texto.

Na primeira passagem de treinamento através do texto, as intensidades começariam com alguns valores arbitrários e então mudariam (por uma espécie de aprendizado) à medida que o centro da janela de sete letras movesse letra por letra através do texto. Em cada passo, os dados de entrada e as intensidades eram transformados em uma fórmula simples que dava os valores dos dados de saída candidatos, indicando as tentativas de pronúncias corretas. A discrepância entre os dados de saída candidatos e a pronúncia correta era então reduzida pela modificação das intensidades, utilizando uma fórmula simples pertinente. As intensidades ao final da primeira passagem de treinamento eram utilizadas como as intensidades iniciais de uma segunda passagem sobre o mesmo texto de 1.024 palavras. E assim por diante.

O sucesso significava que as intensidades, em vez de flutuar incontrolavelmente de passagem para passagem, tenderiam, com apenas pequenos desvios, para valores que davam uma aproximação razoável para a pronúncia correta. Como de fato aconteceu, dez passagens de treinamento sobre as 1.024 palavras foram suficientes para dar uma fala inteligível, e depois de cinquenta passagens a precisão da pronúncia foi estimada em 95%. Depois do treinamento, as intensidades resultantes foram utilizadas para dar a pronúncia de uma outra porção de texto em inglês, sem aprendizado adicional. Foi obtida uma fala inteligível com um nível de precisão de 78%.

Há muitas outras versões de redes neurais e uma abundância de problemas aos quais elas têm sido aplicadas, muitas vezes com sucesso considerável. O esquema é sempre representado por um conjunto de intensidades de interação, cada uma representando o efeito de uma unidade sobre uma outra. Meu colega do Caltech, John Hopfield, em 1982 chamou a atenção para uma condição que, se imposta artificialmente sobre estas intensidades, permitiria que a aptidão não apenas fosse bem definida mas que também pudesse crescer constantemente durante o processo de aprendizagem. Exige-se que a intensidade do efeito de qualquer unidade A sobre uma outra unidade B seja o mesmo que o de B sobre A. Esta condição é quase certamente irreal para os cérebros reais e também é violada por muitas redes neurais bem-sucedidas, inclusive a NETalk. Contudo, é instrutivo que haja

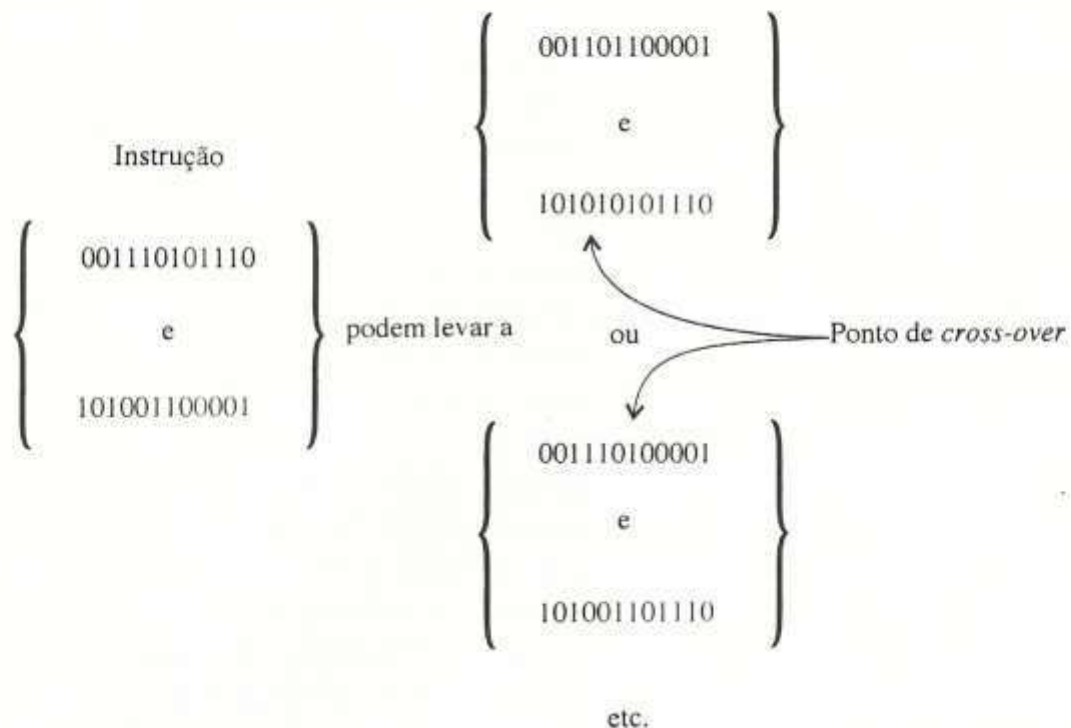
situações nas quais a aptidão seja igualmente bem definida e em crescimento constante, e outras em que não o seja.

Como sempre, quando a aptidão é bem definida, o processo de aprendizagem consiste em explorar vales em um cenário de aptidão. Se a aptidão está crescendo constantemente, de modo que a altura está decrescendo, então o problema de ficar preso em uma depressão rasa, quando existem outras mais profundas perto, pode ser suavizado introduzindo-se o ruído. Isto poderia ser feito, por exemplo, alterando levemente as intensidades, de modo randômico, de tempos em tempos. Estas mudanças randômicas no esquema lembram aquelas propostas para tirar a mente de uma rotina quando estamos procurando por uma idéia criativa. Como sempre, há um nível otimizado de ruído.

ALGORITMOS GENÉTICOS COMO UM SISTEMA ADAPTATIVO COMPLEXO

Como as redes neurais se baseiam em uma analogia grosseira com o processo de aprendizagem nos animais superiores, podemos nos perguntar se também há sistemas adaptativos complexos que se baseiam nos computadores sugeridos em analogia com a evolução biológica. De fato há. Eles foram desenvolvidos primeiramente por John Holland da Universidade de Michigan, um dos esteios do Instituto Santa Fé, e utilizam o software chamado "algoritmo genético", um "sistema de classificação" especial, e hardware de computador convencional. Até agora, estes sistemas têm sido usados principalmente em problemas para os quais a aptidão é bem definida, como o estabelecimento de estratégias para vencer no jogo de damas ou métodos de instalação de sistemas de fiação elétrica que minimizem os custos. Entretanto, não há razão para que os sistemas não possam ser aplicados a outros tipos de problemas também.

Uma descrição altamente simplificada do software do algoritmo genético seria algo assim: cada esquema é um programa de computador para uma estratégia ou método candidatos. Cada programa é composto por um certo número de instruções para o computador. A variação nos esquemas é realizada pela mudança destas instruções, fazendo por exemplo duas delas sofrerem um processo de *crossing-over* (como é mostrado na página 321) como aquele (ilustrado na página 265) que ocorre na reprodução sexual dos organismos vivos. As duas instruções são divididas em um começo e um fim. O *crossing-over* faz com que surjam duas novas instruções. Uma delas é composta pelo início da primeira instrução antiga e o fim da segunda. A outra instrução nova consiste do começo da segunda antiga e do fim da primeira.



O *crossing-over* para instruções de computador.

Modificar um programa de computador substituindo uma ou mais instruções por novas geradas desta maneira algumas vezes melhora a aptidão do programa e outras vezes a reduz. Somente tentando os diferentes programas no problema a ser resolvido o computador pode julgar o valor de cada modificação. Fazer este tipo de julgamento difícil é conhecido como “atribuição de crédito”. O sistema de classificação de John Holland cria uma espécie de mercado no qual as instruções que competem entre si são compradas e vendidas. Aquelas que têm um registro de aperfeiçoamento da performance dos programas obtêm preços mais altos do que as que não levam a qualquer aperfeiçoamento ou pioram a performance. Desta maneira se estabelece uma lista ordenada de instruções. Novas instruções entram continuamente, e aquelas do final da lista são apagadas para dar espaço a estas. As instruções no topo da lista são aquelas utilizadas nos programas modificados que constituem os esquemas que sofreram mutação.

Isto é apenas um esboço grosseiro de um procedimento bastante sofisticado. Mesmo assim, deveria ser claro que como resultado os programas evoluem, e que a aptidão tende a aumentar no decurso da

evolução. Entretanto, a retroalimentação a partir da performance de um programa até a promoção e remoção das instruções que o constituem não é uma regra rígida, mas uma tendência geral afetada pelas condições de mercado. Portanto, há ruído suficiente no sistema para permitir o escape de bacias de aptidão menores e que as profundezas das cercanias sejam exploradas. Tipicamente, o sistema está explorando um vasto espaço de métodos ou estratégias possíveis e não atingindo um estado estacionário — um otimizado absolutamente. A estratégia otimizada de jogar xadrez, por exemplo, ainda não foi encontrada. Todavia, se o jogo em questão fosse o jogo-da-velha, a máquina encontraria em pouco tempo a melhor maneira de jogá-lo e a busca estaria terminada.

Embora o método do algoritmo genético tenha sido aplicado principalmente a problemas de busca e otimização nos quais a aptidão (ou o “resultado”) é bem definida, ele pode ser também utilizado em outros casos, da mesma forma que as redes neurais podem ser empregadas em ambos os tipos de situação. Tanto as redes neurais como os algoritmos genéticos conduzem a sistemas adaptativos complexos com base em computadores que podem desenvolver estratégias que nenhum ser humano jamais imaginou. É natural que nos perguntemos se há qualquer coisa de especial nestas duas classes de técnicas, sugeridas por vagas analogias com o funcionamento do cérebro e da evolução biológica respectivamente. Poderá uma outra classe com base em uma analogia com o sistema imunológico dos mamíferos ser inventada? Haverá de fato um vasto mas bem definido conjunto de sistemas adaptativos complexos com base em computadores que inclua os conhecidos, ou os hipotéticos, e muitos outros? Poderá uma categoria ultra-abrangente ser descrita em termos práticos de modo que o usuário em potencial possa pesquisar os diferentes sistemas com base em computador para achar um apropriado ao seu problema?

Tais questões estão entre aquelas que os estudiosos dos sistemas adaptativos complexos com base em computadores estão tentando arduamente responder.

A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS

A utilização de computadores em conexão com sistemas adaptativos complexos não é em absoluto restrita ao desenvolvimento de hardware ou software para sistemas adaptativos complexos com base em computadores usados para resolver problemas. Uma outra grande área

para a aplicação de computadores é a simulação do comportamento de sistemas adaptativos complexos.

A característica mais marcante destas simulações é a emergência de comportamento complexo a partir de regras simples. Estas regras implicam regularidades gerais, mas a resolução de um caso individual mostra regularidades especiais adicionais. Esta situação é similar àquela de todo o universo, governado por leis simples que permitem uma infinidade de cenários, cada um exibindo suas próprias regularidades, especialmente em uma determinada região do espaço e época, de modo que mais e mais formas complexas possam emergir à medida que o tempo passa.

O truque ao projetar uma simulação controlável é podar as regras de modo a torná-las mais simples ainda, mas de tal maneira que a maioria dos tipos de comportamento emergentes permaneçam. O projetista de uma simulação deve então saber bastante sobre os efeitos das mudanças nas regras sobre o comportamento em muitos cenários diferentes. Alguns projetistas, como Robert Axelrod, um cientista político da Universidade de Michigan, desenvolveram uma intuição aguda que os ajuda a adivinhar como simplificar sem jogar fora o bebê junto com a água da bacia. Naturalmente, esta intuição baseia-se parcialmente em um raciocínio *a priori* e em parte na experiência em mexer com as regras e depois observar o que acontece sob as regras modificadas com rodadas de computador particulares. Ainda assim, o projeto de simulações simples, ricas em conseqüências interessantes, permanece mais uma arte do que uma ciência.

Poderá o estudo de conjuntos de regras e suas conseqüências ser feito de modo mais científico? É necessária experiência adicional, junto com a formulação de sugestões empíricas inspiradas nos tipos de regras que conduzem a determinados tipos de comportamento. Então teoremas rigorosos podem ser conjecturados, e finalmente alguns destes provados, presumivelmente pelos matemáticos.

Desta maneira, pode emergir um tipo de ciência das regras e das conseqüências, com rodadas de computador atuando como experimentos e os teoremas conjecturados e provados constituindo a teoria. De fato, com o advento de computadores rápidos e poderosos, mais e mais simulações simples estão sendo rodadas, e de mais assuntos. A matéria-prima da futura ciência já está se acumulando.

Ao final, entretanto, o que realmente importa é a relevância das simulações para as situações do mundo real que elas imitam. Fornecerão as simulações intuição válida para situações reais? Revelarão elas comportamentos possíveis que não foram pensados antes? Indicarão novas explicações possíveis para fenômenos conhecidos?

Na maioria dos campos de atividade as simulações são ainda muito primitivas para que estas questões possam ser respondidas afirmativamente. Não obstante, é espantoso como, em certos casos, um conjunto muito simples de regras pode dar um *insight* da operação de um sistema adaptativo complexo no mundo real.

A SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO BIOLÓGICA

Um esplêndido e agora célebre exemplo é o programa TIERRA, escrito por Thomas Ray da Universidade de Delaware e do Instituto Santa Fé. Thomas era um ecólogo trabalhando nas baixadas da floresta tropical da Costa Rica em uma estação de pesquisa biológica chamada La Selva. A pesquisa biológica o atraía porque ele queria estudar a evolução. Infelizmente, não acontece muita evolução biológica durante o tempo de vida de um homem e assim ele começou a achar o seu campo frustrante. Decidiu portanto simular a evolução em um computador.

Planejava desenvolver um programa conveniente por etapas, começando com uma altamente simplificada e então aos poucos introduzir mais aspectos, como o equilíbrio interrompido ou a existência de parasitismo. Aprendeu sozinho, penosamente, a escrever programas em “linguagem de máquina” e conseguiu obter um único muito simples escrito e livre de erros. O programa inicial era o TIERRA, e se revelou extraordinariamente rico. Fazê-lo rodar muitas vezes e compreender as lições de todas as diferentes rodadas têm ocupado Thomas desde então. Além do mais, muitos aspectos que ele estava planejando introduzir mais tarde, inclusive o equilíbrio interrompido e a prevalência do parasitismo, emergiram do próprio TIERRA. O programa gerou até algo muito semelhante ao sexo.

O TIERRA usa “organismos digitais”, que são seqüências de instruções de máquina que competem pelo espaço na memória do computador e pelo tempo na unidade central de processamento, que eles utilizam para a auto-reprodução. A comunidade de sistemas adaptativos complexos fornecida pelo TIERRA é em certo sentido degenerada, pois o genótipo e o fenótipo de cada organismo são representados pelo mesmo objeto, isto é, a seqüência de instruções. Esta seqüência é o que sofre mutações, e é também o que sofre as pressões seletivas no mundo real. Ainda assim, é uma boa idéia (como foi enfatizado por Walter Fontana) manter as duas funções separadas ao pensar sobre o sistema, mesmo que ambas sejam realizadas pela mesma entidade. (De acordo com algumas teorias sobre a origem da vida na Terra, um estágio inicial

deste processo tinha o mesmo caráter degenerado, com o ARN desempenhando os papéis de genótipo e de fenótipo.)

As mutações são introduzidas de duas maneiras. Primeiro, de tempos em tempos os bits são invertidos (de 0 para 1 e vice-versa) ao acaso em qualquer lugar no conjunto inteiro de organismos (mais ou menos como os organismos reais são afetados pelos raios cósmicos). A taxa utilizada é em torno de 1 bit invertido a cada 10 mil instruções executadas. Segundo, no decurso da reprodução dos organismos digitais, os bits são invertidos ao acaso nas cópias. Aqui a taxa é um pouco mais alta, cerca de 1 bit invertido a cada duas mil instruções copiadas. Estas taxas são médias; os erros são irregularmente programados para evitar efeitos periódicos.

A importância da morte na biologia não foi negligenciada no projeto do TIERRA. O espaço de memória é severamente limitado, e a ausência de morte de criaturas auto-reprodutoras o preencheria rapidamente, não deixando lugar para reproduções adicionais. Conseqüentemente, há a “ceifadora”, que mata os organismos de modo regular de acordo com uma regra que depende da idade do organismo e dos erros que este cometeu ao executar certas instruções.

Tom Ray projetou uma seqüência auto-reprodutora de oitenta instruções, que é sempre usada como o ancestral — o organismo digital inicial — em qualquer rodada do TIERRA. Quando rodou o sistema pela primeira vez, Tom esperava passar por um longo período de problemas e eliminação destes problemas. Em vez disso, resultados interessantes começaram a surgir logo, muitos sugerindo fenômenos biológicos reais, e esta situação tem prevalecido desde então.

Um desenvolvimento intrigante foi o surgimento, depois de um longo período de evolução, de uma versão refinada do ancestral. Ela tem apenas 36 instruções em vez de oitenta e ainda assim consegue com elas um algoritmo mais complexo. Quando Tom mostrou este truque de compressão a um cientista da computação, este lhe disse que isto era um exemplo de uma conhecida técnica chamada “desenrolar o carretel”. No TIERRA, a evolução tinha percebido como desenrolar o carretel. Tom escreve: “A técnica de otimização é uma técnica muito inteligente inventada pelos humanos. Ainda assim ela é implementada em um estilo confuso mas funcional que nenhum humano usaria (a menos que, talvez, muito drogado).”

Como surgem estes organismos com menos de oitenta instruções? As mutações não os podem produzir diretamente. No início, o sistema contém apenas o ancestral e seus descendentes de oitenta instruções. Eles se multiplicam até que a memória esteja quase cheia; é aí que a ceifadora começa seu trabalho. A população sempre em mudança de or-

ganismos continua então a ocupar a maior parte da memória. Finalmente, aparecem mutações que alteram o genótipo de um organismo de oitenta instruções de uma maneira especial. Quando o organismo examina a si mesmo para determinar seu tamanho, para que possa transmiti-lo aos seus descendentes, a resposta se revela errada e um novo tamanho é transmitido no seu lugar. Desta maneira, a população passa a conter organismos de muitos tamanhos diferentes.

Se tantos *insights* emergiram da primeira tentativa de modelar a evolução biológica desta maneira, deve haver um vasto território ainda esperando para ser explorado. Novas maneiras de simular como a evolução, operando durante períodos enormes de tempo, gerou a informação agora armazenada nos organismos e comunidades naturais por todo o mundo podem ajudar não apenas a melhorar nossa compreensão da diversidade existente, mas também criar um clima de idéias no qual esta diversidade possa ser melhor protegida.

UMA FERRAMENTA PARA ENSINAR A EVOLUÇÃO

Junto com simulações por computador da evolução biológica relacionadas a serem desenvolvidas no futuro, o TIERRA será especialmente valioso para dar aos não-cientistas uma percepção de como a evolução funciona. A maioria das pessoas acha fácil apreciar, mesmo sem simulações de computador, de que forma variações comparativamente pequenas combinadas com umas poucas gerações de seleção podem produzir mudanças em uma população. A experiência pessoal com a criação de cachorros, periquitos australianos, cavalos ou rosas pode facilmente convencer quase qualquer um da realidade da evolução em escala pequena. Mas a evolução em uma escala de tempo maior, com a emergência de novas espécies, gêneros, famílias e grupos taxonômicos superiores, é um assunto diferente. Mesmo a relação comparativamente próxima do elefante com o hiracóide* das rochas é difícil para a maioria das pessoas de entender. É ainda mais difícil visualizar as inter-relações de todas as formas de vida, incluindo as imensas mudanças que podem ser produzidas em bilhões de anos.

Especialmente difícil de aceitar para muitas pessoas é que *o acaso mais as pressões seletivas* podem levar, a partir de uma condição inicial simples, a formas altamente complexas e a comunidades ecológicas complexas abrangendo estas formas. Elas de fato não se convencem de que esta evolução possa se dar sem algum tipo de mão condutora, algum

* Mamífero ungulado da África e do Oriente Médio. (N. do T.)

ganismos continua então a ocupar a maior parte da memória. Finalmente, aparecem mutações que alteram o genótipo de um organismo de oitenta instruções de uma maneira especial. Quando o organismo examina a si mesmo para determinar seu tamanho, para que possa transmiti-lo aos seus descendentes, a resposta se revela errada e um novo tamanho é transmitido no seu lugar. Desta maneira, a população passa a conter organismos de muitos tamanhos diferentes.

Se tantos *insights* emergiram da primeira tentativa de modelar a evolução biológica desta maneira, deve haver um vasto território ainda esperando para ser explorado. Novas maneiras de simular como a evolução, operando durante períodos enormes de tempo, gerou a informação agora armazenada nos organismos e comunidades naturais por todo o mundo podem ajudar não apenas a melhorar nossa compreensão da diversidade existente, mas também criar um clima de idéias no qual esta diversidade possa ser melhor protegida.

UMA FERRAMENTA PARA ENSINAR A EVOLUÇÃO

Junto com simulações por computador da evolução biológica relacionadas a serem desenvolvidas no futuro, o TIERRA será especialmente valioso para dar aos não-cientistas uma percepção de como a evolução funciona. A maioria das pessoas acha fácil apreciar, mesmo sem simulações de computador, de que forma variações comparativamente pequenas combinadas com umas poucas gerações de seleção podem produzir mudanças em uma população. A experiência pessoal com a criação de cachorros, periquitos australianos, cavalos ou rosas pode facilmente convencer quase qualquer um da realidade da evolução em escala pequena. Mas a evolução em uma escala de tempo maior, com a emergência de novas espécies, gêneros, famílias e grupos taxonômicos superiores, é um assunto diferente. Mesmo a relação comparativamente próxima do elefante com o hiracóide* das rochas é difícil para a maioria das pessoas de entender. É ainda mais difícil visualizar as inter-relações de todas as formas de vida, incluindo as imensas mudanças que podem ser produzidas em bilhões de anos.

Especialmente difícil de aceitar para muitas pessoas é que *o acaso mais as pressões seletivas* podem levar, a partir de uma condição inicial simples, a formas altamente complexas e a comunidades ecológicas complexas abrangendo estas formas. Elas de fato não se convencem de que esta evolução possa se dar sem algum tipo de mão condutora, algum

* Mamífero ungulado da África e do Oriente Médio. (N. do T.)

tipo de desígnio. Outras recusam especialmente a evolução da consciência, da autopercepção de que nós humanos somos tão orgulhosos; sentem que de alguma forma a consciência não pode surgir sem uma consciência antecedente. Sem jamais ter cogitado destas dúvidas, posso apenas visualizá-las de fora. Mas me parece claro que uma maneira de as aliviar é deixar as pessoas experimentarem as notáveis transformações efetuadas por milhões de gerações de processos em sua maior parte randômicos combinados com a seleção natural. Isto pode ser feito apenas pela simulação, como no programa TIERRA, que pode atravessar um grande número de gerações em um período de tempo controlável, e em simulações mais sofisticadas e realistas que estarão disponíveis no futuro.

Ao descrever a evolução biológica em termos de acaso e seleção, estamos tratando por simplicidade os vários processos de mutação como se fossem puramente estocásticos. Alguns cientistas, porém, alegam ter encontrado desvios do comportamento ao acaso. Eles interpretaram certas observações como indicativas de que algumas vezes as mutações ocorrem de maneiras não-aleatórias, e mesmo de maneiras que parecem favoráveis a uma aptidão crescente em resposta às pressões seletivas variáveis. Em pelo menos um caso, a evidência acumulada foi satisfatoriamente explicada sem esta interpretação. Talvez os supostos casos possam ser explicados de forma similar. Mas, mesmo que certos organismos mostrem que fizeram evoluir mecanismos que permitem exceções ocasionais ao comportamento aleatório das mutações, nossa descrição do comportamento biológico permaneceria, tanto quanto sabemos, em sua maior parte inalterada.

Antes que Tom Ray tivesse desenvolvido o TIERRA, reuni um pequeno grupo de pessoas ponderadas no Instituto Santa Fé para discutir a possibilidade de inventar um jogo de computador que pudesse se tornar popular e convencer os jogadores do imenso poder do processo evolutivo quando estendido a muitas gerações. Um excelente resultado do encontro foi que, quando John Holland voltou para casa, inventou o ECHO, uma simulação por computador fértil de uma ecologia de organismos simples. Entretanto, o jogo que era para ser um auxílio ao ensino ainda estava para chegar. Então, pouco tempo depois e de modo independente, chegou o TIERRA de Tom Ray, que, embora não fosse exatamente um jogo, poderia em última instância produzir o mesmo efeito.

Alguns participantes do encontro chamaram a atenção para o fato de que um encarte na capa da primeira edição de bolso do livro de Dawkins

*The Blind Watchmaker** trazia um software de um jogo de computador ilustrando a evolução. Este tipo de jogo não é, contudo, exatamente o que eu tinha em mente. O problema é que na evolução biológica real não há um projetista no circuito. Mas Dawkins, cujo livro é devotado a chamar a atenção para este mesmo ponto de uma maneira superior, inventou um jogo em que o competidor fornece as pressões seletivas à medida que a evolução prossegue, como o usuário do software de produção de quadros de Karl Sim. (O jogo vem com uma opção de “afastar-se lentamente da rota”, na qual o competidor pode deixar os organismos por sua própria conta, mas ainda assim eles não estão sujeitos às pressões seletivas da comunidade ecológica à qual pertencem.) Usando a linguagem (apenas parcialmente justificada) da aptidão, podemos dizer que no jogo de Dawkins a aptidão é *exógena*, fornecida de fora, enquanto na natureza (como o seu livro explica) as aptidões são *endógenas*, em última instância determinadas, sem interferência externa, pelo caráter da Terra, do Sol e dos eventos ao acaso, incluindo a evolução de grande número de espécies particulares. Um jogo em que os competidores, como Tom Ray o faz com o TIERRA, dão apenas uma situação inicial e um conjunto de regras para a evolução biológica enquanto o acaso e a seleção natural fazem o resto poderá ser projetado?

SIMULAÇÃO DE COLETIVIDADES DE AGENTES ADAPTATIVOS

Qualquer simulação séria da evolução deve incluir a interação de populações que pertencem a numerosas espécies; o meio ambiente de cada uma destas espécies abrange todos os outros organismos, assim como o meio físico-químico. Mas, e se estivermos tentando entender o que acontece com tal comunidade ecológica por um período de tempo comparativamente curto, durante o qual não acontece muita evolução biológica? Neste caso estamos tentando fazer uma simulação dos processos ecológicos.

Muitos teóricos associados com o Instituto Santa Fé utilizaram modelos feitos no computador para aprender sobre as propriedades destes sistemas adaptativos complexos que são coletividades de agentes adaptativos que se moldam uns aos outros, que constroem esquemas para descrever e prever o comportamento uns dos outros. Estes pesquisadores obtiveram um conjunto de conhecimentos práticos sobre tais sistemas que consiste de conjecturas plausíveis junto com resultados demonstrados para modelos particulares. O quadro que emerge é um no qual a região de conteúdo de informação algorítmica intermediário,

* *O relojoeiro cego*, editora Gradiva, Lisboa. (N. do T.)

entre a ordem e a desordem, pode conter um regime que lembra o da criticalidade auto-organizada, exemplificada pelas pilhas de areia. Neste regime, quantidades-chave podem estar distribuídas de acordo com leis do expoente. E, o mais importante de tudo, pode haver uma tendência para que o sistema como um todo evolua na direção em que estas leis do expoente se apliquem.

Stuart Kauffman realizou uma boa parcela de pesquisa teórica sobre estas idéias, assim como Per Bak. Stuart está entre aqueles que as descrevem usando o termo “adaptação em direção ao (ou sobre o) limiar do caos”, onde “limiar do caos” é utilizado de modo um pouco metafórico para indicar uma condição crítica entre a ordem e a desordem. A expressão toda, que está agora amplamente disseminada na literatura popular, foi empregada pela primeira vez por Norman Packard (com a locução prepositiva *em direção ao*) como título de um trabalho sobre a abordagem a esta condição crítica por um sistema muito simples de aprendizagem com base em computadores. Pesquisa similar foi realizada independentemente quase na mesma época por Chris Langton.

Nos domínios ecológico e econômico onde estão algumas das aplicações óbvias, estas leis do expoente são bem conhecidas a partir de observações, particularmente aquelas que governam a distribuição de recursos. A famosa lei empírica de distribuição de salários em uma economia de mercado, descoberta no século XIX pelo economista italiano Vilfredo Pareto, aproxima-se, para rendas altas, de uma lei do expoente. Pareto também descobriu uma lei do expoente aproximada para a riqueza individual, novamente aplicável à parte superior do espectro.

Os ecólogos muitas vezes estudam a parcela dos recursos utilizados por todos os indivíduos de uma determinada espécie considerados em conjunto, como função das várias espécies de uma comunidade natural. Eles também descobrem leis do expoente empíricas. Por exemplo, ao longo da parte rochosa do litoral do mar de Cortés, perto da extremidade norte quase no sul da fronteira americana, a zona de marés contém muitos organismos diferentes, como cracas e mexilhões, que ocupam proporções variadas da área superficial das rochas. As áreas totais ocupadas pelas diferentes espécies obedecem a uma lei do expoente com uma aproximação razoavelmente boa. Predando estes habitantes das rochas estão outras criaturas, em posições mais altas na pirâmide alimentícia. Entre elas, no topo ou quase no topo da pirâmide, está uma estrela-do-mar de 22 pontas, *Heliaster kubiniji*. O que aconteceria se a estrela-do-mar fosse removida do cenário? Isto realmente aconteceu, em razão de alguma catástrofe, em uma parte da linha da costa, e os ecólogos foram capazes de observar as conseqüências. O resultado foi que o sistema constituído pelos organismos restantes reajustou a si mesmo, com novos valores para as áreas totais de rochas

cobertas pelas várias espécies que se agarravam a elas. Entretanto, a lei do expoente aproximada mais uma vez foi mantida. Assim pode haver algum apoio empírico para a idéia de que sistemas de agentes que se adaptam uns aos outros são atraídos a um tipo de regime de transição caracterizado por leis do expoente para a distribuição dos recursos.

MATEMÁTICA COM BASE EM REGRAS E AGENTES

Em muitas das pesquisas de hoje sobre sistemas adaptativos complexos, a matemática desempenha um papel muito significativo, mas na maioria dos casos não é o tipo de matemática que tradicionalmente predominou na teoria científica. Suponha que o problema seja que o sistema está evoluindo no tempo, de modo que a cada momento seu estado muda de acordo com alguma regra. Muitos dos sucessos marcantes da teoria científica foram obtidos com a ajuda da matemática do contínuo, na qual a variável tempo é contínua e assim são as variáveis que descrevem o estado do sistema. Este estado muda de momento a momento de acordo com uma regra expressa em termos das variáveis contínuas que caracterizam o sistema. Em linguagem técnica, diz-se que o desenvolvimento temporal do sistema é descrito por uma equação diferencial ou um conjunto delas. Grande parte do progresso na física fundamental nos últimos séculos aconteceu com a ajuda de tais leis, incluindo as equações de Maxwell para o eletromagnetismo, as equações de Einstein para a gravitação relativística geral e a equação de Schrödinger para a mecânica quântica.

Quando tais equações são resolvidas com a ajuda de um computador digital, é costumeiro aproximar a variável temporal contínua por uma assim chamada variável discreta, que assume valores separados por intervalos finitos em vez de todos os valores possíveis entre os instantes inicial e final que limitam o período de tempo em consideração. Além disso, as variáveis contínuas que caracterizam o estado do sistema são também aproximadas por variáveis discretas. A equação diferencial é substituída por uma equação de diferenças finitas. À medida que os intervalos entre valores próximos das variáveis discretas, inclusive a temporal, se tornam cada vez menores, a equação de diferenças finitas se parece cada vez mais com a equação diferencial que está substituindo, e o computador digital chega cada vez mais perto da resolução do problema original.

O tipo de matemática muitas vezes utilizada na simulação de sistemas adaptativos complexos lembra a matemática discreta usada com um computador digital para aproximar equações diferenciais contínuas, mas agora a matemática discreta é usada em seu próprio

benefício e não apenas como uma aproximação. Além disso, as variáveis que descrevem o estado de um sistema podem assumir apenas uns poucos valores, com os diferentes valores representando eventos alternativos. Por exemplo, um organismo pode ou não comer um outro organismo; ou dois organismos podem ou não se envolver em combate, e, se o fizerem, um ou outro vencerá; ou um investidor pode comprar, segurar ou vender as ações do seu fundo de ações.

Mesmo a variável temporal pode assumir apenas uns poucos milhares dos valores possíveis, representando, por exemplo, gerações de uma espécie ou então transações financeiras, dependendo do tipo de problema. Além disso, as mudanças no sistema em cada um destes instantes discretos são, para muitos problemas, determinados por uma regra que depende não apenas do estado do sistema naquele instante, mas também do resultado de um processo ao acaso.

A matemática discreta do tipo que estamos discutindo é muitas vezes dita com base em regras. É um tipo de matemática natural para um computador digital, e é seguidamente aplicada à simulação de sistemas adaptativos complexos compostos por muitos agentes individuais adaptativos, cada um deles, em si, um sistema adaptativo complexo. Tipicamente, os agentes — como organismos em uma comunidade ecológica ou indivíduos e negócios em uma economia — são esquemas que evoluem e que descrevem o comportamento de outros agentes e como reagir frente a estes. Em tais casos, a matemática com base nas regras se torna a matemática com base nos agentes, como a utilizada, por exemplo, no programa TIERRA.

TORNANDO A ECONOMIA MENOS DESANIMADORA

Exercícios que utilizam a matemática com base nos agentes estão entre as ferramentas que têm sido empregadas recentemente para levar a economia a uma abordagem mais evolutiva do seu tema de estudo. Uma preocupação com um tipo de equilíbrio ideal, com base em mercados perfeitos, informação perfeita e racionalidade perfeita dos agentes, caracterizou uma boa parte da teoria econômica durante as últimas décadas. Isto é verdade a despeito dos esforços de alguns economistas em incorporar imperfeições dos três tipos na síntese neoclássica do pós-guerra.

Numa história que há muito tempo circula entre os economistas, um teórico neoclássico e sua bem-comportada netinha estão caminhando por uma rua de uma grande cidade americana. A garota percebe uma nota de vinte dólares na calçada e, sendo muito educada,

pergunta ao seu avô se está correto que ela a apanhe. “Não, querida”, responde ele, “se fosse de verdade alguém já a teria apanhado.”

Por diversos anos, muitos estudiosos, inclusive os membros de uma rede interdisciplinar montada pelo Instituto Santa Fé, conduziram seus esforços em direção ao estudo de economias como sistemas adaptativos complexos em evolução compostos por agentes econômicos adaptativos dotados de racionalidade limitada, informação imperfeita, e atuando com base no acaso assim como no auto-interesse econômico percebido. As previsões razoavelmente bem-sucedidas da teoria do equilíbrio aparecem então como aproximações, enquanto a nova abordagem admite desvios daquelas previsões, e especialmente flutuações em torno delas, em melhor concordância com a realidade.

Em um modelo extraordinariamente simples, desenvolvido por Brian Arthur, John Holland e Richard Palmer (um físico da Universidade Duke e do Instituto Santa Fé), os investidores de uma única aplicação, digamos um fundo de ações, são representados por agentes adaptativos tratando um com o outro por meio de uma carteira de compensação. Uma ação do fundo paga dividendos anuais, que podem variar com o tempo de algum modo arbitrário. A taxa anual de juros existente é constante, e a razão entre o dividendo e esta taxa de juros determina, mais ou menos, o valor nominal da ação. O preço real da ação, entretanto, pode desviar-se bastante do seu valor nominal. Cada agente fica elaborando esquemas elementares, com base na história do preço do fundo, que lhe dizem quando vender, segurar ou comprar. Em qualquer instante, os agentes podem estar usando esquemas diferentes. Além disso, um determinado agente pode ter uma lista de diversos esquemas e, dependendo da performance, passar de um para outro. Deste modo são geradas as flutuações de preço, muitas vezes flutuações incontroláveis que envolvem um boom especulativo e quebras, com a lenta mudança do valor nominal fornecendo uma espécie aproximada de limite inferior de uma curva em ziguezague de preço versus tempo. Tais flutuações, reminiscentes do que acontece nos mercados reais, aparecem aqui em um modelo evolutivo, com agentes que estão longe de serem perfeitos mas que tentam aprender.

Muitos dos participantes do movimento de reforma da ciência econômica mostraram que a racionalidade perfeita não é somente uma contradição óbvia com os fatos gerados pelos negócios humanos, mas é na verdade inconsistente com qualquer situação para a qual ocorram flutuações. Pessoalmente, tenho ficado sempre espantado com a tendência de tantos psicólogos acadêmicos, economistas e mesmo antropólogos em tratar os seres humanos como inteiramente racionais ou quase isso. Minha própria experiência, ou mergulhando na

para a aplicação de computadores é a simulação do comportamento de sistemas adaptativos complexos.

A característica mais marcante destas simulações é a emergência de comportamento complexo a partir de regras simples. Estas regras implicam regularidades gerais, mas a resolução de um caso individual mostra regularidades especiais adicionais. Esta situação é similar àquela de todo o universo, governado por leis simples que permitem uma infinidade de cenários, cada um exibindo suas próprias regularidades, especialmente em uma determinada região do espaço e época, de modo que mais e mais formas complexas possam emergir à medida que o tempo passa.

O truque ao projetar uma simulação controlável é podar as regras de modo a torná-las mais simples ainda, mas de tal maneira que a maioria dos tipos de comportamento emergentes permaneçam. O projetista de uma simulação deve então saber bastante sobre os efeitos das mudanças nas regras sobre o comportamento em muitos cenários diferentes. Alguns projetistas, como Robert Axelrod, um cientista político da Universidade de Michigan, desenvolveram uma intuição aguda que os ajuda a adivinhar como simplificar sem jogar fora o bebê junto com a água da bacia. Naturalmente, esta intuição baseia-se parcialmente em um raciocínio *a priori* e em parte na experiência em mexer com as regras e depois observar o que acontece sob as regras modificadas com rodadas de computador particulares. Ainda assim, o projeto de simulações simples, ricas em conseqüências interessantes, permanece mais uma arte do que uma ciência.

Poderá o estudo de conjuntos de regras e suas conseqüências ser feito de modo mais científico? É necessária experiência adicional, junto com a formulação de sugestões empíricas inspiradas nos tipos de regras que conduzem a determinados tipos de comportamento. Então teoremas rigorosos podem ser conjecturados, e finalmente alguns destes provados, presumivelmente pelos matemáticos.

Desta maneira, pode emergir um tipo de ciência das regras e das conseqüências, com rodadas de computador atuando como experimentos e os teoremas conjecturados e provados constituindo a teoria. De fato, com o advento de computadores rápidos e poderosos, mais e mais simulações simples estão sendo rodadas, e de mais assuntos. A matéria-prima da futura ciência já está se acumulando.

Ao final, entretanto, o que realmente importa é a relevância das simulações para as situações do mundo real que elas imitam. Fornecerão as simulações intuição válida para situações reais? Revelarão elas comportamentos possíveis que não foram pensados antes? Indicarão novas explicações possíveis para fenômenos conhecidos?

do trabalho do Instituto, e a modelagem econômica é provavelmente um dos esforços que resultarão em predições confirmadas.

Entretanto, há outras reformas que são muito necessárias na teoria econômica. Tentativas de lidar com algumas delas foram contempladas em partes do plano original do Instituto para o programa de economia que não foi ainda implementado. Um problema vital é levar em conta de modo apropriado valores difíceis de quantificar.

Os economistas algumas vezes têm sido caricaturados como pessoas que medem o valor do amor pelo preço da prostituição. O valor de algumas coisas é fácil de ser estimado em termos de dinheiro, e é forte a tentação de levar em conta apenas estas coisas nos cálculos de custo/benefício e ignorar o resto. Se a construção de uma represa é proposta, a análise do tipo antigo de custo/benefício leva em conta benefícios como a energia elétrica e o controle das cheias. Além disso, o reservatório formado pode ter um valor recreativo medido pelo custo das marinas e embarcadouros que serão construídos para as lanchas. O custo das edificações no vale que desaparecerão pelo preenchimento do reservatório pode ser comparado com o custo da represa, mas não o valor das plantas e dos animais do mesmo vale, nem as lembranças históricas que o mesmo vale pode ter tido, nem os laços comunitários que serão destruídos. É difícil atribuir um valor monetário a estas coisas.

A prática aparentemente teimosa de ignorar valores difíceis de quantificar é muitas vezes propagandeada como livre de valores. Ao contrário, ela representa a imposição sobre qualquer análise de um sistema rígido de valores, favorecendo aqueles que são facilmente quantificáveis em detrimento de outros mais frágeis e que podem ser mais importantes. Todas as nossas vidas são empobrecidas por decisões tomadas com base neste tipo de raciocínio.

Muitos economistas e cientistas políticos têm recomendado que se deixem os valores frágeis para o processo político. Mas, se isto é feito, todos os estudos quantitativos, com seus cálculos cuidadosos do que acontece aos valores facilmente quantificáveis, devem ser pesados por aqueles que tomam decisões contra os argumentos qualitativos que não são impulsionados da mesma maneira por números impressionantes. Hoje em dia, a idéia de sondar a opinião das pessoas para ver que tipo de valor elas atribuiriam a coisas como uma determinada melhora da qualidade do ar ou a preservação de um parque ou vizinhança está ganhando terreno. Na teoria econômica, as preferências das pessoas são muitas vezes consideradas, assim como definidas, determinadas e satisfeitas. Este é um ponto de vista afinado com os ideais democráticos. Mas o destino do planeta será apenas uma questão de opinião não direcionada? Terá a ciência alguns *insights* a oferecer?

A ciência natural pareceria particularmente pertinente quando fossem contempladas mudanças irreversíveis ou quase isso. Dará a economia, como é presentemente formulada, atenção suficiente à irreversibilidade? Na física, a primeira lei da termodinâmica é a conservação da energia total, e seguir os passos da energia lembra de alguma forma seguir os passos do dinheiro na economia. Mas onde está, na economia, o análogo da segunda lei da termodinâmica, a tendência da entropia de aumentar (ou permanecer constante) em um sistema fechado? A entropia ajuda a definir a irreversibilidade em física, e muitos pensadores tentaram definir uma noção correspondente para a economia, até agora sem sucesso visível. Contudo, talvez a busca não seja sem esperanças. E talvez valha a pena continuar buscando, já que ela pode conduzir a uma melhora da noção amplamente difundida de que qualquer coisa quase esgotada pode ser recomposta por algum substituto, tal como árvores de plástico.

Enquanto isso, pensadores econômicos proeminentes desenvolveram conceitos com vistas a algumas das preocupações a respeito de acompanhar somente coisas que podem ser facilmente monetarizadas. A noção de “pagamento psíquico” leva em conta o fato de que as pessoas obtêm satisfação de, e podem ser pagas com, moeda intangível, tal como o orgulho em ajudar os outros. O “custo da informação” relaciona-se com o fato de que as pessoas podem não saber como tomar decisões razoáveis em um mercado livre (por exemplo, sobre o que comprar) se elas não têm os fatos necessários ou os *insights*. Supõe-se que a “taxa social de desconto” trate das dívidas entre gerações — o quão profundamente uma determinada geração retira do futuro está relacionado com a quantidade que planeja deixar para as futuras gerações.

Entretanto, os economistas que trabalham nos negócios, no governo e nas agências internacionais podem não achar fácil incluir estes conceitos avançados em seus relatórios e recomendações. E, além do mais, pode ser muito difícil quantificar alguns destes conceitos mesmo que tenham sido introduzidos na teoria.

Tanto na teoria como na prática, então, parece haver espaço para aperfeiçoar o modo pelo qual a economia trata as questões de valores frágeis, especialmente nos casos onde estes valores correm o risco de desaparecer irreversivelmente. Quaisquer aperfeiçoamentos porventura feitos podem ser particularmente valiosos com relação à preservação da diversidade biológica e cultural.

PARTE IV

DIVERSIDADE
E SUSTENTABILIDADE

CAPÍTULO 21

DIVERSIDADES SOB AMEAÇA

Examinamos como regras simples, incluindo uma condição inicial disciplinada, junto com a ação do acaso, produziram as maravilhosas complexidades do universo. Vimos como, quando os sistemas adaptativos complexos se estabelecem, operam por meio do ciclo dos esquemas variáveis, circunstâncias acidentais, conseqüências fenotípicas e realimentação por parte das pressões seletivas da competição entre os esquemas. Eles tendem a explorar um vasto espaço de possibilidades, com aberturas para níveis mais altos de complexidade e para a geração de novos tipos de sistemas adaptativos complexos. Durante grandes períodos de tempo, eles extraem de sua experiência quantidades notáveis de informação, caracterizadas por profundidade e complexidade.

Em qualquer instante de tempo, a informação armazenada em tais sistemas inclui contribuições de toda a sua história. Isto é verdadeiro para a evolução biológica, que acontece há 4 bilhões de anos, e também para a evolução cultural do *Homo sapiens sapiens*, que abarca um intervalo de tempo da ordem de uma centena de milhares de anos. Neste capítulo consideraremos alguns dos problemas e dilemas encontrados ao tentarmos preservar, pelo menos na sua maior parte, a diversidade que estes dois tipos de evolução produziram.

Ao contrário dos capítulos anteriores, a ênfase aqui será mais sobre as ações e políticas do que sobre o conhecimento e a compreensão em si mesmos. Da mesma forma, a voz será tanto do defensor quanto do estudioso. No próximo capítulo, nos moveremos para o amplo contexto no qual um futuro sustentável e desejável poderia ser procurado, e como este contexto poderia ser estudado.

Embora grande parte da nossa discussão seja centralizada na ciência, na cultura e no papel dos especialistas, devemos ter em mente

que a longo prazo tentativas de impor às sociedades humanas soluções de cima para baixo têm muitas vezes conseqüências destrutivas. Uma mudança duradoura e satisfatória somente será realizada por meio da educação, participação, uma pitada de consenso e o amplo discernimento, por parte dos indivíduos.

A CONSERVAÇÃO DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA

Mencionamos a importância de dar a todos (por exemplo, por meio de simulações com computadores) uma percepção de como um único ancestral poderia dar origem, pela transmissão de erros e recombinação genética acompanhadas pela seleção natural, à complexidade efetiva, representada pela espantosa diversidade nas formas de vida existentes hoje em dia. Estas formas de vida contêm uma quantidade extraordinária de informação, acumulada desde eras geológicas, sobre maneiras de viver no planeta Terra e maneiras pelas quais as diferentes formas de vida podem relacionar-se uma com a outra. Quão pouca informação deste tipo tem sido reunida até agora pelos seres humanos!

Mesmo assim, por meio da procriação, combinada com um alto impacto ambiental por pessoa (especialmente por pessoa rica), começou-se a produzir um episódio de extinção que pode finalmente comparar-se em destrutividade a algumas das grandes extinções do passado. Faz algum sentido destruir, no decurso de umas poucas décadas, uma fração significativa da complexidade que a evolução construiu em um período de tempo tão longo?

Nós, humanos, nos comportaremos como alguns outros animais, preenchendo todos os cantos e frestas em resposta a um imperativo biológico, até que nossa população seja limitada pela fome, doença e conflitos? Ou faremos uso da inteligência que, como gostamos de apregoar, distingue nossa espécie das outras?

A conservação da diversidade biológica é uma das tarefas mais importantes com que depara a humanidade à medida que o século XX chega ao seu fim. O empreendimento envolve pessoas nas muitas atividades da vida e em várias partes do mundo, usando métodos diversos para decidir o que deve ser feito e especialmente o que deve ser feito em primeiro lugar. Embora a escolha de como atribuir prioridades varie de lugar para lugar, há alguns princípios e práticas que podem ser amplamente aplicáveis.

A IMPORTÂNCIA DOS TRÓPICOS

Parece que a necessidade maior de esforços conservacionistas (especialmente para o solo) está nos trópicos, onde há a maior diversidade de espécies e também a maior pressão para a utilização dos recursos naturais para fazer frente às necessidades de uma população humana pobre e em crescimento rápido. Esta conjunção — mais coisas a perder e maior perigo de perda — faz com que a conservação biológica nos trópicos seja especialmente urgente.

Os trópicos são diferentes da zona temperada não apenas no número de espécies agora ameaçadas, mas também na quantidade de informações conhecidas sobre elas. Nas latitudes temperadas é em geral possível definir as necessidades conservacionistas examinando uma espécie individual (pelo menos no caso dos animais e plantas “superiores”) e determinar quais as que estão em dificuldades nos níveis local, nacional ou mundial. Quando os biomas (comunidades ecológicas) são considerados como deveriam, eles podem ser definidos como associações de espécies conhecidas.

Nos trópicos, numerosas espécies ainda são desconhecidas para a ciência e alguns biomas inteiros permanecem subexplorados. Sob estas condições, é impraticável, como regra geral, definir os objetivos da conservação em termos de espécies. Em vez disso, temos de usualmente nos concentrar na salvação de sistemas que representem as espécies, e a definição destes sistemas não é sempre fácil.

O PAPEL DA CIÊNCIA

A ciência desempenha um papel crucial na conservação dos trópicos. Isto é especialmente claro quando nos lembramos de que o objetivo da ciência não é apenas acumular fatos, mas promover a compreensão para descobrir estrutura (isto é, regularidades) na informação e também, onde possível, mecanismos (explicações dinâmicas) para os fenômenos.

Um espectro completo de abordagens está disponível para coletar, organizar e interpretar as informações sobre o status das comunidades naturais em todo o trópico. Biólogos especialistas em sistemática (aqueles que estudam a classificação e a distribuição de plantas e animais) tendem a dar preferência à pesquisa de longo prazo, que pode tomar muitas décadas e produzir um conhecimento que será importante por muito tempo. Na outra extremidade da escala estão as técnicas como as imagens via satélite e a fotografia aérea, que dão imediatamente algumas indicações aproximadas das diferenças de vegetação. Para

compreender o que estas diferenças significam devemos estabelecer “a verdade no solo”, que pode ser mais ou menos detalhada, mas tipicamente envolve expedições e uma boa parcela de trabalho taxonômico. Tais esforços estão situados no meio do espectro, entre estudos de longo prazo no solo e levantamentos rápidos do ar ou do espaço.

Não há mais qualquer discordância séria de que um episódio de extinção provocado pelo homem começou nos trópicos. Para alguns, é por si evidente que não deveríamos destruir selvagememente o produto de bilhões de anos de evolução. Outros necessitam de razões adicionais para proteger o que está em perigo de ser perdido. Estas razões incluem a utilidade potencial para os seres humanos das espécies que estamos examinando antes mesmo de saber que existem, para não dizer nada do valor para as gerações futuras da compreensão do funcionamento de ecossistemas complexos em uma condição comparativamente não-degradada. Uma das tarefas mais importantes dos cientistas é explicar estes argumentos com detalhes. A ciência pode dar não apenas orientação para estabelecer as prioridades na conservação, mas também uma motivação racional para elas.

Em outras palavras, a preservação da diversidade biológica exige mais conhecimento científico para que os conservacionistas tenham uma boa idéia de como proceder e também para que possam demonstrar que aquilo que estão fazendo tem sentido. A informação precisa e bem utilizada é uma arma poderosa que pode ajudar a mobilizar uma vontade social mais ampla necessária para proteger exemplos viáveis das várias comunidades ecológicas. Neste esforço, aventuro-me a dizer, é importante utilizar e desenvolver a disciplina da biogeografia.

A biogeografia é o estudo da distribuição das plantas e animais e de como estas distribuições evoluíram, levando em conta a influência da geologia e da topografia. Ela se preocupa com os processos de variação, disseminação, sobrevivência e extinção, incluindo os desenvolvimentos de tempos passados assim como os processos em andamento que determinam hoje os limites das distribuições dos vários organismos. A biogeografia, em associação íntima com a sistemática e a ecologia, pode fornecer uma teoria que ajude a organizar as informações sobre a ocorrência de espécies de animais e plantas. Ela pode auxiliar a montar uma classificação dos biomas e pode ser de grande utilidade no planejamento da configuração de um sistema viável de áreas protegidas e na identificação de brechas nos sistemas existentes.

AValiação RÁPIDA

Do ponto de vista da ciência, é essencial a manutenção da pesquisa de longo prazo, que não pode fornecer resultados rapidamente mas que pode fornecer resultados duradouros. Obviamente, contudo, a ação conservacionista não pode sempre esperar por estes resultados. Na época em que os biólogos de campo tiverem completado um estudo cuidadoso e detalhado da flora e da fauna de uma área particular dos trópicos, pode ser muito tarde para recomendar a preservação de comunidades naturais em toda ou em parte desta área, porque estas podem não mais existir.

O prosseguimento de todo o espectro de atividades essenciais à conservação exige que se tome uma vantagem criativa de todos os recursos em potencial. Em particular, uns poucos biólogos de campo individuais (botânicos, ornitólogos e herpetologistas,* por exemplo) aprenderam, a partir de seu treinamento pessoal, experiência de campo e conhecimento científico, como fazer um censo rápido, aproximado, das espécies em seus campos de estudo que estão presentes numa área de uma determinada região tropical. Eles adquiriram uma idéia da composição dos vários biomas e também desenvolveram métodos rápidos de determinar o grau de degradação de um meio ambiente. Seu conhecimento e sabedoria podem e devem ser utilizados no trabalho de conservação. Estimando a diversidade biológica de uma área particular, assim como o estado de preservação de suas comunidades naturais, e ajudando a determinar quais biomas estão restritos a pequenas regiões e quais estão gravemente ameaçados, eles podem dar orientação de grande valia àqueles que fixam as prioridades de proteção. Os mesmos biólogos de campo podem também contribuir tremendamente para o sucesso de expedições de curto prazo que forneçam a "verdade no solo" para a fotografia aérea e de satélites, assim como para o sucesso de estudos de longo prazo de biologia sistemática e biogeografia. É particularmente importante treinar mais cientistas como eles, especialmente cientistas cidadãos dos países tropicais.

Por meio da Fundação John D. e Catherine T. MacArthur, da qual sou um dos diretores, ajudei a estabelecer o Programa de Avaliação Rápida sob os auspícios da Conservation International. Um grupo central foi montado, consistindo de um ornitólogo, um mamiferologista e dois botânicos. Em associação com outros biólogos de campo, eles formaram equipes para explorar lugares particulares (até agora principalmente nas Américas). As equipes até agora examinaram áreas

* A herpetologia é o ramo da zoologia que estuda os répteis e os anfíbios. (N. do T.)

de muitos tipos diferentes, inclusive as florestas secas, as florestas montanhosas cobertas por nuvens e as baixadas das florestas tropicais, inicialmente identificadas por um levantamento aéreo, para descobrir se possuíam diversidade biológica suficiente e estavam suficientemente incólumes para justificar a proteção.

Em 1989 participei de um desses levantamentos aéreos junto com Spencer Beebe, então funcionário da Conservation International, e Ted Parker, o ornitólogo do programa. Descobrimos uma área notavelmente grande e bem preservada de floresta na Bolívia, o Alto Madidi, e a identificamos como alvo inicial do programa. O terreno se estende desde as baixadas da floresta tropical amazônica (drenadas pelos tributários do Amazonas, embora centenas de quilômetros distante do grande rio) até as altas florestas montanhosas de diversos tipos. Mais tarde, a equipe visitou a região e a estudou no solo, descobrindo-a ainda mais impressionante em diversidade e qualidade do que tínhamos suposto olhando do ar. Agora a Academia Boliviana de Ciências e o governo boliviano estão considerando a possibilidade de estender a proteção até o Alto Madidi.

Caminhando através das florestas sul-americanas com Ted Parker, vi-me concordando com as opiniões superlativas que eu tinha ouvido a seu respeito. De todos os ornitólogos de campo altamente habilidosos que acompanhei, ele era o mais impressionante. Sabia de cor e podia reconhecer os cantos e dizer as notas de mais de três mil espécies de pássaros do Novo Mundo. Dia após dia, era capaz de identificar todos os ruídos da floresta feitos por sapos, insetos ou espécies particulares de pássaros. Quando gravamos os pássaros e chamamos por eles tocando de volta seus cantos, suas identificações sempre se mostraram corretas. Em um dia qualquer, ele poderia exclamar, ao ouvir um fraco "psst" vindo dos arbustos: "Eu não sei o que é isso!" Com toda a certeza, seria um novo pássaro da área ou país, ou mesmo, muito ocasionalmente, uma espécie nova para a ciência.

Ouvindo o alvorecer, ele podia estimar, a partir dos pios e cantos que ouvia, tanto a diversidade ornitológica como a qualidade do hábitat. Seus colegas de mamiferologia (Louise Emmons) e botânica (Alwyn Gentry e Robin Foster) podiam realizar feitos comparáveis em suas especialidades.

Recentemente, a tragédia atingiu esta equipe notável. Ted e Alwyn morreram, junto com seu colega equatoriano, Eduardo Aspiazú, quando seu avião caiu durante um levantamento aéreo. O piloto morreu também. Os biólogos, como sempre, estavam pedindo ao piloto que voasse mais baixo para que pudessem inspecionar a floresta cuidadosamente do ar. Eles estavam procurando uma pequena extensão

de floresta seca restante perto de Guaiaquil que poderia ser protegida antes que desaparecesse totalmente. De repente o avião entrou em uma nuvem, a visibilidade foi perdida, e eles colidiram com uma montanha próxima.

Enquanto lamentamos a perda de nossos amigos, que pareciam quase indispensáveis, aqueles de nós envolvidos na conservação tropical esperam que o trabalho do Programa de Avaliação Rápida de alguma forma continue. Esperamos que seus lugares sejam preenchidos por outros biólogos de campo especializados, tão hábeis quanto eles, e que novos sejam treinados, especialmente cidadãos dos países tropicais.

Em geral, o futuro da preservação da diversidade ecológica nos trópicos depende em grande medida das atividades de um corpo crescente de cientistas e conservacionistas dos próprios países tropicais. De modo geral, decisões conservacionistas importantes serão feitas em nível nacional, e um número crescente de organizações de cidadãos em vários países está assumindo a liderança na proteção da diversidade biológica. Cientistas internacionalmente conhecidos dos países temperados podem algumas vezes exercer uma influência útil, mas a conservação não se dará sem apoio local e nacional.

A PARTICIPAÇÃO DO PESSOAL LOCAL

De fato, a conservação precisa do apoio tanto de indivíduos influentes, muitos deles nas grandes cidades, para fazer os projetos começarem, como das populações rurais locais para manter as reservas naturais ao longo do tempo. Grandes áreas de proteção de longo prazo não podem dar certo a menos que contem com o apoio das pessoas do lugar. Isto significa ênfase nas contribuições da conservação às características do desenvolvimento rural. Por exemplo, a agricultura muitas vezes depende da proteção das vertentes, e a disponibilidade de longo prazo de produtos florestais para uso e venda muitas vezes exige a manutenção de florestas próximas protegidas. As pessoas do local devem ter um interesse econômico na conservação, e necessitam entender este interesse. Muitas vezes podem estar diretamente envolvidas com as áreas protegidas, por exemplo, por meio do turismo ecológico ou oportunidades de servir como guias ou guardas florestais nos parques nacionais.

É particularmente importante envolver as populações locais indígenas, como os índios americanos do neotrópico. Em muitos casos, a sua continuidade cultural e mesmo a sua existência física estão mais ameaçadas do que as plantas e os animais das áreas onde vivem. O

conhecimento sobre seu meio ambiente, acumulado durante muitos séculos, pode ajudar a identificar usos humanos para os organismos nativos, assim como métodos de ganhar a vida sem destruição do ambiente das comunidades ecológicas. Em alguns casos, as populações indígenas assumiram a liderança dos esforços conservacionistas, por exemplo, os kunas do Panamá, que fizeram um parque a partir de uma grande porção de seu território no continente. (Muitos kunas vivem nas ilhas de San Blas, onde são bem conhecidos como fabricantes das multicoloridas *molas* muitas vezes utilizadas para enfeitar vestidos e bolsas.)

A luta pela sobrevivência dos organismos nas florestas tropicais conduz a corridas de armas químicas e outros processos que geram substâncias químicas com efeitos biológicos potentes, muitos deles úteis aos seres humanos, especialmente na medicina. Estes produtos químicos estão sendo procurados de duas maneiras diferentes. Um método, a etnobotânica, explora o conhecimento dos povos indígenas obtido por tentativa e erro durante centenas ou milhares de anos, e assim utiliza tanto a evolução cultural como a evolução biológica que primeiramente produziu as substâncias químicas. O outro método é a prospecção química direta, no qual espécimes de planta e animais (por exemplo, insetos) são trazidos da floresta para o laboratório, onde novos produtos químicos são isolados utilizando-se métodos modernos de extração. Aqui, os resultados da evolução biológica são explorados sem a intervenção das culturas indígenas. Ambos os métodos têm como objetivo descobrir pelo menos uns poucos produtos químicos que serão no final utilizados, digamos, pelos fabricantes de produtos farmacêuticos, muitas vezes nos países desenvolvidos. Mesmo quando estes produtos químicos são usados nas formas sintética ou modificada, devem-se encontrar maneiras pelas quais uma fração significativa dos lucros seja enviada para os povos da floresta ou para as áreas que os cercam. Somente então poderá o processo de exploração e utilização proporcionar às populações locais um interesse adicional na preservação da floresta. O mesmo é verdade para muitos esquemas de comercialização de outros produtos florestais que não a madeira, como as nozes e as suculentas frutas tropicais. Como sempre, os incentivos criam pressões seletivas sobre os esquemas de comportamento humano.

UM ESPECTRO DE PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS

Com exceção da madeira, a exploração de certos produtos florestais, como aqueles que exigem a caça, pode ser realizada como a própria produção de madeira, apenas em áreas que são na melhor das hipóteses

apenas parcialmente protegidas. Um esquema amplamente adotado e endossado pelas Nações Unidas é a criação de reservas de biosfera. Uma reserva de biosfera típica tem uma área central, muitas vezes uma nascente, totalmente protegida e uma região em torno da qual algumas práticas de agricultura são permitidas mas com atenção cuidadosa à conservação. Mais afastado, mas ainda dentro da reserva, pode haver áreas onde a agricultura e outras formas de atividades econômicas normais sejam permitidas, mas com algumas restrições.

É claro que o estabelecimento de um sistema de áreas naturais totalmente protegidas, incluindo algumas reservas de biosfera, é apenas parte do que precisa ser feito. Fora destas áreas, é necessária uma ampla variedade de práticas conservacionistas. Estas práticas incluem o reflorestamento (com espécies nativas sempre que possível); a implementação de políticas sábias de energia e água; o enfrentamento dos efeitos ambientais da agricultura, da mineração e das manufaturas; e a atenção à questão de suma importância do crescimento populacional. Além do mais, é altamente desejável o desenvolvimento de estratégias conservacionistas regionais e nacionais integradas.

Muitos aspectos da conservação no sentido amplo exigem gastos financeiros com que os países tropicais mais pobres não podem arcar sozinhos. Para as nações desenvolvidas da zona temperada, interessa assumir parte da responsabilidade a longo prazo. Todos nós, na superfície deste planeta, ficaremos muito piores se as riquezas biológicas dos trópicos continuarem a ser desperdiçadas. Sempre que são transferidos recursos dos países desenvolvidos, por meio de doações, empréstimos ou perdão parcial da dívida, uma fração considerável deveria ser reservada para a conservação no sentido amplo. Um acordo para aplicar a conservação em troca de ajuda é parte do que algumas vezes tem sido chamado "a barganha planetária". Em anos recentes, muitas "trocas de dívidas" foram realizadas, nas quais as dívidas de um país tropical, profundamente desvalorizadas no mercado financeiro mundial, são compradas por organizações conservacionistas e então reconhecidas nominalmente pelo governo do país em questão para utilização de compra de terras para áreas protegidas. (O mesmo princípio pode ser aplicado a outros objetivos desejáveis, como desenvolvimento econômico de um país menos desenvolvido ou educação superior no exterior para alguns de seus cidadãos.)

Se parássemos um pouco e estimássemos as perspectivas de um programa abrangente e bem-sucedido de conservação da diversidade biológica nos trópicos, os resultados poderiam não ser encorajadores. Entretanto, a história mostra claramente que a humanidade anda para a frente não por causa das pessoas que param a todo momento enquanto

tentam avaliar o sucesso ou o fracasso final de seus esforços, mas por aqueles que pensam profundamente no que é certo e então põem toda a sua energia nisto.

A PRESERVAÇÃO DA DIVERSIDADE CULTURAL

Assim como é uma loucura desperdiçar em poucas décadas grande parte da rica diversidade biológica que evoluiu durante bilhões de anos, é igualmente insano permitir o desaparecimento de grande parte da diversidade cultural humana, que evoluiu de uma maneira mais ou menos análoga durante muitas dezenas de milhares de anos. Ainda assim, a unidade humana (assim como a solidariedade a outras formas de vida com as quais repartimos a biosfera) é agora um objetivo mais importante do que nunca. Como podem estas preocupações ser reconciliadas?

Tornei-me consciente da tensão entre a unidade e a diversidade desde cedo. Quando era criança, levantei com meu pai a velha questão sobre se a humanidade poderia promover a paz universal usando apenas uma única língua mundial. Em resposta ele descreveu para mim como há duas centenas de anos, na era do iluminismo e da Revolução Francesa, o pensador alemão Herder, um pioneiro do movimento romântico e figura do iluminismo, escreveu sobre a necessidade de preservar a diversidade lingüística salvando as línguas lética e lituana — tão arcaicas, tão próximas do indo-europeu ancestral — que corriam perigo. Com a ajuda de escritores nativos daquela época, como o poeta lituano Donelaitis, o trabalho de conservação destes pedaços de ADN cultural foi realizado. Agora a Letônia e a Lituânia são mais uma vez países independentes, e estas línguas, salvas da extinção, há dois séculos são suas línguas nacionais.

Os problemas mais desafiadores da conservação cultural envolvem os povos indígenas, especialmente aqueles que são algumas vezes chamados primitivos, principalmente em razão do estado de sua tecnologia. Em muitos casos, estes povos indígenas estão sendo ou fisicamente eliminados pela doença e violência ou dispersos e culturalmente aniquilados. Há um século, em algumas partes do oeste dos Estados Unidos, algumas pessoas ainda estavam caçando “índios selvagens” nos fins de semana. Foi assim que Ishi, o último yahi, perdeu sua família e seus amigos, conforme contado por Alfred e Theodora Kroeber. Hoje, os norte-americanos deploram atrocidades similares que são cometidas em outros países. Esperemos que a presente situação desesperadora possa ser melhorada para que estes povos tenham

melhores oportunidades de sobreviver e optar por serem deixados mais ou menos sozinhos por enquanto ou passarem por uma espécie orgânica de modernização, com um grau de continuidade cultural e memória do passado.

A rica tradição, assim como as instituições e modos de vida, dos povos indígenas em todo o mundo constitui um tesouro de informações sobre as possibilidades de organizações humanas e maneiras de pensar. Muitos deles também possuem um conhecimento precioso sobre como viver fazendo parte de uma comunidade ecológica tropical. (Outros, deve ser lembrado, têm sido destrutivos com a natureza, particularmente povos que viveram em ilhas previamente desabitadas, grandes ou pequenas, por menos de um milênio ou dois. Em alguns casos, a noção de povos indígenas vivendo em harmonia com a natureza se revela uma fantasia.)

Imagine, contudo, o conhecimento das propriedades das plantas nas mentes de certos feiticeiros tribais. Muitos destes feiticeiros estão agora morrendo sem serem substituídos. O grande etnobotânico de Harvard, Richard Schultes, que passou muitos anos estudando plantas medicinais na bacia amazônica, diz que, toda vez que um feiticeiro morre, é como se uma biblioteca tivesse sido queimada. Schultes treinou muitos etnobotânicos jovens, que estão engajados em recuperar o maior número possível de segredos destas bibliotecas antes que elas desapareçam completamente. Um deles, Mark Plotkin, recentemente publicou um relato delicioso de suas aventuras com o título *Tales of a Shaman's Apprentice* (Contos de um aprendiz de feiticeiro).

Os seres humanos destilaram, durante centenas ou milhares de anos de aprendizagem por tentativa e erro, uma quantidade notável de informação sobre os usos de organismos na alimentação, medicina e vestuário. Algumas vezes o processo de aprendizagem deve ter sido bastante dramático, como no caso da mandioca amarga da floresta tropical amazônica. Não são muitas as plantas que crescem no chão da floresta porque grande parte da luz solar é capturada pelas árvores de copas muito altas, intermediárias ou baixas. Sob estas condições, a mandioca amarga (o tubérculo de que é feita a tapioca) é um recurso valioso, comestível e nutritivo. Entretanto, o tubérculo cru possui uma boa quantidade de ácido prússico (hidrociânico) e é portanto altamente venenoso. Somente quando o calor é utilizado para quebrar e extrair o ácido é que o tubérculo se torna comestível. Muitas pessoas devem ter perdido suas vidas à medida que os membros famintos das várias tribos e bandos amazônicos aprendiam como utilizar a mandioca amarga.

Não é apenas nestas regiões menos desenvolvidas que a descoberta por tentativa e erro revelou as propriedades úteis das plantas e das poções à base de plantas. A medicina popular tem feito uma grande

diferença na vida das pessoas em todo o planeta. Naturalmente, nem todas as afirmações da medicina popular são justificáveis, mas a ciência moderna confirmou algumas delas. Uma experiência de meu próprio pai fornece um exemplo. Quando ele era garoto, filho de um guarda-florestal, vivendo nas florestas de faias no que era então o leste da Áustria, perto da fronteira russa, acidentalmente cortou a ponta de um dos dedos com um machado. Pegou a ponta cortada, lavou-a e colocou-a sobre o dedo, que ele então envolveu com um emplastro feito de pão. Ficou com uma cicatriz circular para o resto de sua vida, mas o dedo permaneceu no lugar. Passaram-se muitos anos antes que a ciência moderna reconhecesse as propriedades bacteriostáticas do mofo de pão *Penicillium notatum*, mas indubitavelmente essas mesmas propriedades salvaram o dedo de meu pai.

No processo adaptativo pelo qual grupos de pessoas fazem tais descobertas úteis, as pressões seletivas devem ter envolvido algumas questões bastante similares àquelas levantadas pela ciência. Será que o processo realmente funciona? Poderão as pessoas comer este alimento de forma segura? As feridas cicatrizam quando envoltas desta maneira? Esta erva ajudará uma mulher a iniciar o trabalho de parto quando sua criança já deveria ter nascido?

Os remédios populares que se originam da magia simpatética apresentam um quadro diferente. Entre as pretensas curas baseadas na similaridade está uma para a icterícia (na verdade um sintoma de doença no fígado) que envolve a fixação do olhar no olho dourado de um maçarico-das-rochas. Se meu pai tivesse tentado, seria de pouca utilidade exceto talvez por um pequeno efeito psicossomático. No desenvolvimento da magia simpatética, tão difundida entre os povos da Terra, as pressões seletivas, como enfatizamos anteriormente, eram na sua maior parte muito diferentes daquelas relacionadas com o sucesso objetivo.

Ainda assim estes povos não faziam necessariamente qualquer distinção marcante entre a magia de um lado e a descoberta dos usos reais de produtos de animais ou plantas do outro. Curandeiros eram ainda curandeiros, mesmo se ensinassem os povos modernos a usar produtos como a casca da cinchona, que fornece o quinino para uso contra a malária. As tradições culturais não são sempre fáceis de separar em partes que se ajustem facilmente às idéias modernas e àquelas que estão em conflito com ela.

A TENSÃO ENTRE O ILUMINISMO E A DIVERSIDADE CULTURAL

Hoje em dia, a tensão entre a nossa necessidade de universalidade visualizada pelo iluminismo e a nossa necessidade de preservação da

diversidade cultural continua existindo. Ao discutir o futuro do planeta, usando os resultados da investigação científica e tentando empregar modos racionais de pensar sobre as implicações destes resultados, somos tolhidos pelo predomínio da superstição. A persistência de crenças errôneas exacerba o fracasso anacrônico amplamente difundido no reconhecimento dos problemas urgentes com que depara a humanidade neste planeta. Somos, é claro, seriamente ameaçados pela desunião filosófica e especialmente pelo particularismo destrutivo em suas muitas formas. Tais particularismos ainda se manifestam em muitos lugares sob a forma antiga do tribalismo, mas hoje podem estar relacionados com diferenças de nacionalidade, língua ou religião, ou outras diferenças, algumas vezes tão pequenas que um estranho mal pode detectá-las, mas ainda assim, em condições apropriadas, suficientes para dar origem a ódios e rivalidades mortais, especialmente quando exploradas por pessoas inescrupulosas.

No entanto, ao mesmo tempo, a diversidade cultural é em si mesma uma herança valiosa que deveria ser preservada: a Torre de Babel das línguas, a colcha de retalhos de sistemas éticos e religiosos, o panorama dos mitos, o pot-pourri de tradições políticas e sociais, acompanhadas como são pelas muitas formas de irracionalidade e particularismo. Um dos principais desafios à raça humana é reconciliar os fatores universalizadores como a ciência, a tecnologia, a racionalidade e a liberdade de pensamento com os fatores particularizantes tais como as tradições locais e as crenças, assim como as diferenças simples em temperamento, ocupação e geografia.

A CULTURA POPULAR UNIVERSAL

A erosão dos padrões culturais locais em todo o mundo não é, contudo, inteiramente ou mesmo principalmente resultado do contato com o efeito universalizador do iluminismo científico. A cultura popular é na maioria dos casos muito mais eficiente para acabar com as distinções entre um lugar ou sociedade e outro. Blue jeans, refeições rápidas, a música do rock e os seriados da televisão americana têm varrido o mundo por anos. Além disso, as influências universalizadoras não podem ser catalogadas simplesmente como pertencentes à cultura científica ou à cultura popular. Ao contrário, formam um espectro completo, contínuo, de impactos culturais diferentes.

Ocupando uma posição intermediária entre as culturas superior e a popular estão instituições como a Cable News Network. Em alguns lugares e ocasiões, as transmissões da CNN são uma fonte valiosa e

pertinente de imagens memoráveis e informações razoavelmente precisas que de outra forma não estariam disponíveis. Em outras situações, parecem representar uma forma de entretenimento, parte de cultura popular universalizadora. De qualquer modo, transmissões de notícias recebidas de todo o mundo e artigos noticiosos que aparecem em publicações diárias e semanais em muitos países são considerados parte da “explosão de informações” mundial, junto com uma espantosa proliferação de outros periódicos de não-ficção e de livros, sem falar da rede rapidamente crescente de correios eletrônicos e a explosão vindoura das comunicações de multimídia interativa.

A EXPLOSÃO DE INFORMAÇÃO (OU DESINFORMAÇÃO?)

Infelizmente, esta explosão de informação é em grande parte uma explosão de desinformação. Todos nós estamos expostos a grandes quantidades de material, que consistem em informações, idéias e conclusões — boa parte errada, ou mal compreendida ou simplesmente confusa. Há uma necessidade gritante de mais comentários e resenhas inteligentes.

Devemos atribuir um prestígio maior a este ato muito criativo, o ato de escrever artigos de revisão sérios e livros que façam a distinção entre o confiável e o não-confiável, e que sistematizem e encapsulem, na forma de teorias razoavelmente bem-sucedidas e outros esquemas, o que parece confiável. Se um acadêmico publica o resultado de uma nova pesquisa na fronteira do conhecimento científico ou cultural, ele ou ela podem obter uma recompensa na forma de uma cadeira na universidade ou uma promoção, mesmo se mais tarde o resultado se mostrar inteiramente errado. Entretanto, a clarificação do significado do que já foi feito (ou a separação do que vale ou não a pena aprender) muito menos provavelmente fará uma carreira acadêmica progredir. A humanidade estará muito melhor quando a estrutura de recompensas for alterada de modo que as pressões seletivas nas carreiras favoreçam tanto o exame da informação como a sua aquisição.

TOLERANDO O INTOLERANTE — SERÁ POSSÍVEL?

Mas como reconciliar o exame crítico de idéias, incluindo a identificação e a classificação do erro com tolerância — e mesmo a celebração e a preservação —, da diversidade cultural? Discutimos como cada tradição cultural específica tem idéias e crenças embutidas

nela como motivos artísticos, definindo e unificando forças sociais, e fontes de conforto pessoal face à tragédia. Como enfatizamos, muitas destas idéias e crenças são aquelas que a ciência rotularia como errôneas (ou pelo menos injustificadas pela evidência), enquanto outras representam descobertas preciosas sobre o mundo natural e sobre possíveis formas de individualidade humana e desenvolvimento social (incluindo, talvez, a exploração de novos domínios da experiência mística e a formulação de sistemas de valores que subordinam o apetite por bens materiais a apetites mais espirituais). Entretanto, a preservação da diversidade cultural deve de alguma forma transcender esta distinção. Os padrões ou esquemas que são elementos do ADN cultural não podem ser prontamente divididos entre aqueles que valem a pena ser preservados e os que não.

Ainda assim, a dificuldade vai mais longe. Muitos dos padrões locais de pensamento e comportamento estão associados não apenas com o erro prejudicial e o particularismo destrutivo mas especificamente com a molestação e a perseguição daqueles que esposam a cultura científica e secular universalizadora, com sua ênfase na racionalidade e nos direitos da pessoa humana. Mesmo assim, é dentro desta própria cultura que muitas vezes encontramos pessoas preocupadas, como questão de princípio, com a preservação da diversidade cultural.

De alguma forma a raça humana deve encontrar maneiras de respeitar e utilizar a grande variedade de tradições culturais e ainda assim resistir às ameaças de desunião, opressão e obscurantismo que algumas tradições de tempos em tempos apresentam.

CAPÍTULO 22

TRANSIÇÕES PARA UM MUNDO MAIS SUSTENTÁVEL

A preocupação com a preservação da diversidade biológica é inseparável da preocupação com o futuro da biosfera como um todo, mas o destino da biosfera está por sua vez virtualmente ligado a todos os aspectos do futuro do homem. Pretendo descrever aqui um tipo de agenda de pesquisas sobre o futuro da raça humana e do resto da biosfera. Entretanto, esta agenda não requer uma previsão ilimitada. Ao contrário, ela conclama pessoas de muitas instituições e de uma ampla variedade de disciplinas a pensar juntas sobre se pode haver cenários evolutivos que conduzam da situação presente para um mundo quase sustentável no século XXI. Esta abordagem é mais direcionada do que a simples especulação sobre o que pode acontecer no futuro.

Por que deveria alguém tentar pensar em escala tão grande? Não deveríamos planejar um projeto mais controlável que se concentre sobre um aspecto particular da situação mundial?

Vivemos em uma era de especialização crescente, e por bons motivos. A humanidade continua a aprender mais sobre cada campo de estudos e, à medida que cada especialização cresce, ela tende a dividir-se em subespecializações. Este processo acontece repetidas vezes e é necessário e desejável. Entretanto, há uma necessidade crescente de que a especialização seja suplementada pela integração. A razão é que nenhum sistema complexo, não-linear, pode ser adequadamente descrito se dividindo em subsistemas ou em vários aspectos de antemão. Se estes subsistemas ou estes aspectos, todos interagindo fortemente uns com os outros, são estudados separadamente, com muito cuidado, os resultados, quando reunidos, não dão um quadro útil do conjunto. Neste sentido, há uma verdade profunda no velho adágio: "O todo é maior do que a soma de suas partes."

Portanto, as pessoas devem afastar-se da idéia de que um trabalho

sério limita-se a esgotar o máximo possível um problema bem definido em uma disciplina especializada, enquanto o raciocínio amplo, integrativo, deve ser deixado para as reuniões sociais. Na vida acadêmica, nas burocracias e em outros lugares, a tarefa de integração não é suficientemente respeitada. No entanto, qualquer um no topo de uma organização, um presidente, um primeiro-ministro ou um diretor-presidente, tem de tomar decisões *como se* todos os aspectos de uma situação, junto com a interação entre estes aspectos, estivessem sendo levados em conta. É razoável que o líder, ao pedir ajuda aos escalões inferiores da organização, encontre apenas especialistas e que o pensamento integrador só aconteça quando ele ou ela fazem o julgamento intuitivo final?

No Instituto Santa Fé, onde cientistas, estudiosos e outros pensadores do mundo todo, representando virtualmente todas as disciplinas, encontram-se para pesquisar sistemas complexos e como a complexidade surge a partir de leis simples subjacentes, estão pessoas que têm a coragem de dar uma *olhada por alto no todo* além de estudar o comportamento das partes de um sistema da maneira tradicional. Talvez o Instituto possa ajudar a dar início a pesquisas conjuntas entre as instituições de todo o mundo que se dedicam a estudar aspectos particulares da situação mundial, caminhos potenciais em direção a um mundo quase sustentável. Os aspectos em questão terão de incluir problemas políticos, militares, diplomáticos, econômicos, sociais, demográficos e do meio ambiente. Um esforço comparativamente modesto, sob o nome de Projeto 2050, já começou, sob a liderança do World Resources Institute (Instituto para os Recursos Mundiais), a Instituição Brookings e o Instituto Santa Fé, com a participação de instituições de muitas partes do mundo.

Agora, o que significa aqui sustentável? Em *Through the Looking Glass* (*Alice no país dos espelhos*), Humpty Dumpty explica para Alice como ele usa as palavras para significar qualquer coisa que quiser, pagando-as por este privilégio todos os sábados à noite (final da semana de trabalho no século XIX). Hoje em dia muitas pessoas devem estar pagando direitos pelo uso da palavra "sustentável". Por exemplo, se o Banco Mundial financia um grande projeto de desenvolvimento ultrapassado e destrutivo para o meio ambiente, este projeto pode muito bem ser rotulado como "desenvolvimento sustentável" na esperança de torná-lo mais aceitável.

Esta prática me faz lembrar de um número do grupo Monty Python no qual um homem entra em um escritório para obter uma licença para seu peixe, Eric. Avisado de que não existe licença para peixes, ele chama a atenção de que recebeu a mesma resposta quando indagou a

respeito de licenças para gatos, mas que de qualquer modo havia obtido uma. Ao apresentá-la, lhe é dito: "Isto não é uma licença para gatos. Isto é uma licença para cães com a palavra 'cão' riscada e a palavra 'gato' escrita a lápis."

Hoje em dia muitas pessoas estão ocupadas escrevendo a palavra "sustentável" a lápis. A definição não é sempre clara. Assim, não é absurdo tentar *lhe atribuir* um significado aqui. O significado literal da palavra evidentemente não é adequado. A ausência completa de vida na Terra pode ser sustentável por milhões de anos, mas não é isto o que se quer dizer. A tirania universal pode ser sustentável durante gerações, mas não é isto o que queremos dizer também. Imagine um mundo muito apinhado e altamente regulado, talvez extremamente violento, com apenas algumas espécies de plantas e animais sobreviventes (estes últimos intimamente relacionados com a sociedade humana). Mesmo que estas condições possam de algum modo ser mantidas, elas não correspondem ao que se quer dizer aqui com mundo sustentável. O que estamos procurando claramente abarca um tantinho de desejabilidade junto com a sustentabilidade. Surpreendentemente, há uma certa medida de acordo teórico hoje em dia sobre o que é desejável, sobre as aspirações da raça humana corporificadas, por exemplo, em declarações das Nações Unidas.

Que tipo de futuro, então, estamos visualizando para o nosso planeta e nossa espécie quando falamos de sustentabilidade, misturando aos nossos desejos uma dose de realismo? Certamente não queremos dizer estagnação, sem esperanças de melhoria das vidas de seres humanos famintos ou oprimidos. Mas não queremos dizer também abuso contínuo e crescente do meio ambiente enquanto a população cresce, os pobres tentam elevar o seu nível de vida e os ricos exercem um enorme impacto per capita sobre o meio ambiente. Além do mais, a sustentabilidade não se refere somente às preocupações econômicas e ambientais.

Em termos negativos, a raça humana precisa evitar guerras catastróficas, tiranias amplamente disseminadas, o predomínio contínuo da pobreza extrema, assim como a degradação desastrosa da biosfera e a destruição da diversidade biológica e ecológica. O conceito-chave é a obtenção de qualidade de vida para o homem e para a biosfera que não seja conseguida principalmente à custa do futuro. Ele abarca a sobrevivência de certo grau de diversidade cultural humana e também de muitos dos organismos com os quais dividimos o planeta, assim como das comunidades que eles formam.

Algumas pessoas podem ser tecnologicamente otimistas, acreditando que nós humanos não precisamos mudar muito o curso para

evitar um futuro desastroso, que podemos alcançar uma sustentabilidade aproximada sem esforço especial, simplesmente por meio de uma série sem fim de remédios tecnológicos. Alguns podem não acreditar em absoluto no objetivo da sustentabilidade. Não obstante, podemos todos pensar sobre ela. Mesmo aqueles de nós que não aceitam a sustentabilidade como objetivo podem ainda perguntar se não há maneiras de abordá-la nos próximos cinquenta ou cem anos, e, se é assim, que maneiras poderiam ser estas e como o mundo se pareceria como resultado delas. A discussão das questões não exige que se compartilhem os valores dos que as apresentaram.

Os historiadores tendem a ser impacientes com pessoas que dizem: “Este é um período único na história”, pois esta afirmação foi proferida em muitas épocas. Mesmo assim, nossa época é especial de dois modos bem definidos e intimamente relacionados.

Primeiro, a raça humana atingiu a capacidade técnica de alterar a biosfera por meio de efeitos de primeira ordem. A guerra é antiga, mas a escala na qual ela pode agora ser feita é inteiramente nova. É notório que uma guerra termonuclear em escala total poderia varrer uma fração significativa da vida no nosso planeta, para não mencionar os problemas que poderiam ser causados pela guerra química ou biológica. Além disso, por meio do crescimento populacional e certas atividades econômicas, os humanos estão alterando o clima global e exterminando um número significativo de espécies de animais e plantas. Na verdade, os seres humanos causaram mais destruição no passado do que costumeiramente se admite. O desmatamento com o machado, e pelos carneiros e ovelhas, seguido de erosão e dessecação, tem milhares de anos e foi notado, por exemplo, por Plínio, o Velho. Mesmo o pequeno número de pessoas que viviam na América do Norte há 10 mil anos pode ter contribuído para a extinção da megafauna norte-americana da Idade do Gelo, como os mamutes e as preguiças gigantes, os lobos, os tigres-dentes-de-sabre, e espécies de camelos e cavalos. (Uma teoria põe a culpa de algumas destas extinções pelo menos parcialmente no hábito de conduzir manadas inteiras de animais a precipícios para aproveitar a carne e a pele somente de uns poucos.) De qualquer modo, hoje o potencial de destruição da biosfera inteira é maior do que nunca. A atividade humana já criou uma multiplicidade de problemas ambientais, inclusive mudanças de clima, poluição dos oceanos, diminuição da qualidade da água potável, desmatamento, erosão do solo, e assim por diante, com muitas interações fortes entre estes problemas. Como o conflito, muitos dos males ambientais são antigos, mas sua escala não tem precedentes.

Segundo, as curvas ascendentes de população mundial e o

esgotamento dos recursos naturais não podem continuar crescendo velozmente para sempre, elas devem em breve passar por pontos de inflexão (quando a taxa de crescimento começa a decair). O século XXI é uma época crucial (no sentido original de cruzamento) para a raça humana e o planeta. Por muitos séculos, a população humana total como função do tempo seguiu de perto uma curva simples hiperbólica que atinge o infinito por volta do ano 2025. A nossa é obviamente a geração em que a população mundial deve começar a afastar-se desta hipérbole, e isto já começou. Mas a curva populacional se nivelará como resultado da previdência humana e progresso em direção a um mundo sustentável, ou ficará de cabeça para baixo e flutuará como consequência dos tradicionais flagelos da guerra, fome e pestilência? Se as curvas da população e do esgotamento dos recursos realmente se nivelarem, elas o farão em níveis que permitam uma qualidade de vida humana razoável, incluindo certo grau de liberdade, e a persistência de uma grande parte da diversidade biológica, ou em níveis que correspondam a um mundo cinza de escassez, poluição e regulamentação, com plantas e animais restritos às espécies que coexistem facilmente com a humanidade?

Uma questão similar pode ser colocada a respeito do desenvolvimento progressivo dos meios e escala da competição militarista. Permitirão as pessoas que guerras completamente destrutivas em grande escala aconteçam, ou usarão de inteligência e visão do futuro para limitar e redirecionar a competição, para abafar o conflito e equilibrar a competição com a cooperação? Aprenderemos, ou talvez já tenhamos aprendido, a administrar nossas diferenças sem recorrer às guerras catastróficas? E os pequenos conflitos surgidos da desintegração política?

Gus Speth, o primeiro presidente do World Resources Institute (de que tenho orgulho de ter participado da fundação), sugeriu que o desafio para a raça humana durante as próximas décadas é realizar um conjunto de transições interligadas. Proponho amplificar um pouco sua concepção destas transições para que possamos incorporar considerações políticas, militares e diplomáticas além das sociais, econômicas e ambientais que ele enfatiza. Com estas modificações, o resto deste capítulo é organizado em torno desta noção aproximada mas útil de conjunto de transições.

A TRANSIÇÃO DEMOGRÁFICA

Vimos que as próximas décadas devem testemunhar uma mudança histórica na curva da população mundial como função do tempo. A

maioria das autoridades estima que a população mundial se estabilizará durante o próximo século, mas em um número duas vezes maior do que o atual, de 5,5 bilhões. Hoje, as altas taxas de crescimento populacional (particularmente associadas com os avanços da medicina e da saúde pública sem um declínio correspondente na fertilidade) ainda prevalecem em muitas partes do mundo. Isto é especialmente verdadeiro para as regiões tropicais, menos desenvolvidas, incluindo países como o Quênia, que não têm recursos ecológicos ou econômicos. Enquanto isso, os países desenvolvidos em geral atingiram uma população bastante estável, exceto pelos efeitos da migração, que certamente será uma questão importante nas décadas vindouras.

Os estudiosos se envolvem em muitas discussões sobre os fatores que se acredita sejam os responsáveis pelo decréscimo da fertilidade líquida que aconteceu na maioria dos países desenvolvidos. Eles agora sugerem medidas que podem ajudar a produzir declínios similares nas várias partes do mundo tropical. Estas medidas incluem providências para melhorar a saúde das mulheres, alfabetização, mais educação e oportunidades de participar da força de trabalho, assim como outros avanços na posição das mulheres; a redução da mortalidade infantil (que inicialmente tem o efeito oposto, é claro, mas que mais tarde pode impedir que casais tenham mais filhos para compensar as mortes esperadas, gerando mais filhos do que realmente desejam); e segurança social para os idosos, um objetivo ainda distante em muitos países desenvolvidos.

Naturalmente a disponibilidade de contraceptivos seguros e eficientes é crucial, como também a erosão dos incentivos tradicionais para ter famílias grandes. Em algumas partes do mundo o casal médio (especialmente o homem médio) ainda quer ter muitos filhos. Que tipos de recompensas podem ser oferecidos às famílias com uma ou duas crianças? Como podem as pessoas ser persuadidas, de maneiras culturalmente apropriadas, de que no mundo moderno tais famílias são de interesse comum, acarretando níveis mais altos de saúde, educação, prosperidade e qualidade de vida do que seria possível com famílias com muitas crianças? Com os modismos dispendendo de tanta importância nos assuntos humanos, o que pode ser feito para ajudar a tornar popular a idéia de famílias pequenas? Estas questões são ainda tristemente negligenciadas em muitos lugares, mesmo por organizações que afirmam estar ajudando a resolver o problema da população mundial.

Se a população humana vai realmente passar por um ponto de inflexão e se estabilizar, globalmente e na maioria dos lugares, dentro de umas poucas décadas, não somente este processo histórico é do maior significado, mas sua sincronização e os números resultantes dele serão

também provavelmente de importância crucial. O caráter exato e a magnitude do efeito do crescimento populacional sobre a qualidade do meio ambiente dependem de muitas variáveis, como padrões de cultivo de terras, e vale a pena um estudo cuidadoso em várias áreas diferentes. De qualquer modo, parece já ser esmagadoramente provável que, no conjunto, o crescimento populacional estimule a degradação ambiental, ou por meio das altas taxas de consumo dos ricos ou dos esforços desesperados dos pobres em sobreviver a qualquer custo, sem se importar com o futuro.

As conseqüências ambientais serão provavelmente muito mais sérias se o mundo simplesmente esperar por condições econômicas melhores das populações empobrecidas para realizar reduções na fertilidade líquida, em vez de tentar encorajar estas reduções paralelamente ao desenvolvimento econômico. O impacto ambiental total por pessoa tem mais probabilidade de ser consideravelmente maior após a melhoria econômica do que antes, e, quanto menor os números quando a prosperidade relativa for finalmente atingida, melhor para as pessoas e para o resto da biosfera.

A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA

Décadas atrás, alguns de nós (particularmente Paul Ehrlich e John Holdren) chamaram a atenção para o fato bastante óbvio de que o impacto ambiental, digamos em uma determinada área geográfica, pode ser fatorado de modo útil em três números multiplicados entre si: a população, a prosperidade por pessoas medida convencionalmente e o impacto ambiental por pessoa por unidade de prosperidade convencional. O último fator é aquele que depende particularmente da tecnologia. Foi a mudança tecnológica que permitiu que a gigantesca população de hoje existisse, e, enquanto bilhões de pessoas são desesperadamente pobres, um número bem menor de outras conseguem viver com conforto razoável em conseqüência dos avanços na ciência e na tecnologia, incluindo a medicina. Os custos ambientais têm sido grandes, mas não tanto quanto podem ser no futuro se a raça humana não mostrar um pouco de previsão.

A tecnologia, se devidamente controlada, pode trabalhar para tornar o terceiro fator tão pequeno quanto possível na prática, dadas as leis da natureza. Depende em grande parte do quanto é desperdiçado com o primeiro fator, simplesmente o número de pessoas, o tanto que o fator propriedade pode ser melhorado, especialmente para os muito pobres.

Evidências do início da transição tecnológica estão começando a aparecer em muitos lugares, embora a maior parte ainda esteja por ocorrer. Mesmo soluções tecnológicas aparentemente simples, contudo, podem acabar por colocar problemas extremamente complexos.

Considere o exemplo da erradicação da malária nas populações humanas. Há não muito tempo, a drenagem dos pântanos era ainda o método principal de controle. Mas agora se compreendeu que a destruição de terras pantanosas deve ser evitada sempre que possível. Enquanto isso, a ciência identificou o plasmódio responsável pela malária e os mosquitos transmissores que os carregam. Espalhar pesticidas químicos como o DDT para eliminar os mosquitos parecia ser um passo à frente, mas revelou ter sérias conseqüências ambientais. Por exemplo, os pássaros no topo da pirâmide alimentar aquática passaram a absorver doses muito concentradas do produto metabólico DDE, que provocava em muitas espécies uma diminuição na espessura das cascas dos ovos e o fracasso na reprodução, inclusive do pássaro americano símbolo, a águia careca. Há vinte anos, o DDT foi retirado de circulação no mundo desenvolvido, e as populações de pássaros ameaçados começaram a se recuperar. Ele ainda é utilizado em outras partes, embora cepas resistentes de mosquitos transmissores tenham começado a aparecer.

Então aconteceu de alguns dos substitutos imediatamente disponíveis do DDT se mostrarem bastante perigosos para os humanos. Hoje em dia, contudo, métodos muito mais sofisticados para reduzir a população dos transmissores estão disponíveis, inclusive o uso de produtos químicos voltados especificamente para eles, assim como o uso de parceiros estéreis para o acasalamento e outros “controles bioambientais”. Tais medidas podem ser condensadas no que é chamado “controle integrado de pragas”. Até agora, elas são ainda bastante caras, se empregadas em grande escala. No futuro, técnicas mais baratas, igualmente não-agressivas, podem ser desenvolvidas. Repelentes de insetos também são disponíveis, é claro, mas eles são também muito caros e causam problemas por sua própria conta.

Enquanto isso, um procedimento simples, comportamental, eficiente em muitos lugares, é usar redes para mosquitos e ficar debaixo delas meia hora ao alvorecer e meia hora ao entardecer, quando os mosquitos transmissores picam. Infelizmente, em muitos países tropicais as populações rurais pobres estão muito ocupadas nestas horas e não podem ficar debaixo das redes.

Algum dia provavelmente serão desenvolvidas vacinas contra a malária, que poderão varrer as várias formas da doença inteiramente, mas então surgirá uma outra dificuldade: áreas selvagens importantes que tenham sido protegidas dos perigos da malária estarão expostas a um desenvolvimento imprevidente.

Sem dúvida gastei muito tempo com este exemplo aparentemente simples para expor algumas de suas complexidades. Podemos esperar que complexidades análogas apareçam em qualquer lugar na transição tecnológica para um impacto ambiental menor, seja na produção industrial, na extração de minérios, na produção de alimentos ou na geração de energia.

Como na conversão das indústrias da defesa para a produção civil, a transição tecnológica exige assistência financeira e reeducação dos trabalhadores à medida que as oportunidades de emprego se fecham em um tipo de atividade e se abrem em outro. Os idealizadores de políticas podem muito bem ser aconselhados a considerar estes diferentes tipos de conversão como desafios que estão relacionados entre si. Assim, parar de fabricar agentes para guerras químicas deveria ser considerado similar ao fim da extração de madeira das antigas florestas do noroeste do Pacífico nos Estados Unidos. Além disso, estas questões de políticas aparecem novamente quando a sociedade tenta reduzir o consumo de produtos perniciosos à saúde humana, sejam eles legais como o tabaco, ou ilegais como a cocaína sob a forma de *crack*.

Entretanto, do lado da demanda, os três tipos de conversão apresentam problemas um pouco diferentes. No caso das armas químicas, o desafio principal era convencer os governos a não as encomendar mais e a expor e destruir os estoques existentes. No caso das drogas, as questões são objeto de desacordo feroz. No caso da transição tecnológica para impactos ambientais mais baixos, a questão é estimular o desenvolvimento de tecnologias menos agressivas e utilizá-las. Isto nos leva para a transição econômica.

A TRANSIÇÃO ECONÔMICA

Se o ar e a água forem tratados como bens gratuitos nas transações econômicas, poluí-los, degradar a sua qualidade, então, não custa nada; a atividade econômica concomitante é realizada roubando-se o meio ambiente e o futuro. As autoridades têm tentado por séculos tratar destes problemas por meio de proibições e multas, mas estas são muitas vezes ineficientes. Atualmente está sendo tentada em alguns lugares uma regulamentação maciça em grande escala, e alguns sucessos têm sido obtidos. Entretanto, parece que o modo mais eficiente que os governos têm de tratar destas questões é cobrar, mais ou menos, os custos da restauração da qualidade. Isto é o que os economistas chamam internalizar as externalidades. A regulamentação, com suas multas e

outras punições, é uma forma de cobrança em si. Os dispositivos reguladores, contudo, usualmente exigem ações específicas por parte dos poluidores, enquanto a internalização dos custos encoraja a restauração da qualidade, ou evita a sua degradação, da maneira mais barata. Os engenheiros e contadores da indústria interessada são os que prescrevem as medidas a ser tomadas. O microgerenciamento pelos burocratas é desnecessário.

A cobrança dos custos reais é um dos principais elementos da transição econômica necessária para que se deixe de viver em grande parte do capital da natureza para se viver principalmente da renda do capital da natureza. Embora a cobrança seja usualmente melhor do que a regulamentação, ela é certamente melhor do que a simples exortação. Antes de tudo, reduz as ambigüidades.

Suponha que você esteja engajado na distribuição de medalhas “verdes” para produtos com baixo impacto ambiental. Em breve deparará com um problema. Um detergente particular pode ter um conteúdo mais baixo de fosfatos do que um outro e assim produzir menos eutroficação (crescimento de algas) nos lagos, mas pode exigir um gasto maior de energia, pois necessita água quente para a lavagem. À medida que você prossegue, encontrará mais compromissos deste tipo. Como equilibra estas considerações umas com as outras? Se pelo menos uma tentativa canhestra for feita para cobrar dos produtores pela eutroficação provocada por seus detergentes e se o custo da energia necessária para a lavagem for impresso de forma clara na embalagem, um consumidor tem apenas de fazer a conta do gasto total e o mercado determinará os preços. A medalha verde pode tornar-se desnecessária.

A grande dificuldade em cobrar os custos reais é, naturalmente, sua estimativa. Discutimos anteriormente como a economia nunca na verdade teve sucesso em controlar os problemas sutis da qualidade e da irreversibilidade, questões análogas às que surgem com relação à segunda lei da termodinâmica na ciência natural. Tais problemas podem, é claro, ser remetidos à arena política e tratados apenas como questões de interesse público, mas certamente a longo prazo a ciência terá alguma coisa a dizer sobre eles também. Enquanto isso, a abordagem mais simples é estimar o custo da recuperação do que quer que seja perdido. No caso do insubstituível, alguma forma de proibição estrita pode ser necessária, mas, a não ser por isto, a sustentabilidade da qualidade está intimamente relacionada com a idéia de pagar para recuperá-la, e a definição de qualidade será tratada pela ciência e pela opinião pública em interação uma com a outra.

Um ponto crítico de qualquer programa de cobrança de custos reais é a eliminação de subsídios para a atividade econômica destrutiva,

grande parte da qual não seria em absoluto econômica sem estes subsídios. No trabalho da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Comissão Brundtland, composta por estadistas eminentes de muitas partes do mundo, o brilhante secretário-geral Jim MacNeill, do Canadá, precisou chamar a atenção de que, para se observar o que acontece no meio ambiente, não se deve olhar tanto para o ministério do meio ambiente e sim para o da economia e para o orçamento. É lá que os subsídios destrutivos podem ser caçados e algumas vezes, embora com grandes dificuldades políticas, eliminados.

A discussão de orçamentos conduz diretamente à questão da inclusão nos procedimentos contabilísticos nacionais da desvalorização do capital da natureza. Usualmente eles não o fazem. Se o presidente de um país tropical contrata uma empresa de exploração de madeira, cedendo-lhe uma vasta área florestal da nação para corte por um preço baixo e um suborno, a contabilidade nacional mostra o preço como parte da renda nacional, e talvez mesmo o suborno se for gasto no país e não enviado para um banco na Suíça, mas o desaparecimento da floresta, com todos os seus benefícios e potencial, não aparece como perdas correspondentes. Não são apenas os países tropicais que vendem suas florestas demasiadamente barato, como é atestado pelo destino das florestas úmidas da zona temperada da costa noroeste do Pacífico, Colúmbia Britânica e Alasca. Evidentemente a reforma dos sistemas nacionais de contabilidade é uma necessidade vital em todos os países. Felizmente, os esforços para realizar estas reformas já estão sendo empregados em alguns lugares. Nosso exemplo também deixa claro que a luta contra a corrupção grossa é um elemento-chave na obtenção da transição econômica.

Um outro indicador do nível de preocupação com relação a viver do capital da natureza é a taxa de desconto. Tanto quanto sei, o Banco Mundial, ao financiar projetos de grande impacto ambiental, ainda aplica uma taxa de desconto de 10% para cada ano do futuro. Se isto é verdade, significa que a perda de um recurso natural nos próximos trinta anos é descontada por um fator 20. A herança natural da próxima geração vale 5% menos do que seu valor atribuído hoje, isto se for realmente contabilizada.

A taxa de desconto, usada desta maneira, é uma medida do que é chamado equidade entre gerações, que é crucial para a noção de qualidade sustentável. Dar descontos muito grandes sobre o futuro equivale a roubá-lo. Se a noção de taxa de desconto for de alguma forma generalizada, ela pode ser usada para abarcar muito do que se quer dizer com sustentabilidade.

A TRANSIÇÃO SOCIAL

Alguns economistas valorizam muito os possíveis compromissos entre equidade intergeracional e equidade intrageracional, isto é, entre a preocupação com o futuro e a preocupação com os pobres de hoje, que necessitam explorar alguns recursos para sobreviver. Embora uma pequena parte da degradação da biosfera hoje seja causada pelos muito pobres que lutam pela sobrevivência, grande parte dela pode ser atribuída aos ricos que desperdiçam recursos com supérfluos. Entretanto, uma boa parte dela é relacionada a grandes projetos que supostamente ajudam, por exemplo, a população rural pobre de um país em desenvolvimento, mas muitas vezes o fazem, se é que o fazem, de um modo bastante ineficiente e destrutivo. Em contraste, as mesmas pessoas podem muitas vezes ser ajudadas de modo efetivo por meio de um grande número de pequenos esforços, aplicados localmente, como por exemplo na prática conhecida como microfinanciamento.

No microfinanciamento, estabelece-se uma instituição financeira para prover pequenos empréstimos aos empreendedores locais, muitos deles mulheres, para começar pequenos empreendimentos que fornecem localmente um modo de vida para muitas pessoas. Frequentemente tais negócios dão empregos comparativamente não-destrutivos e contribuem para a equidade intergeracional e intrageracional. Felizmente, microfinanciamentos para apoiar atividades econômicas sustentáveis estão se tornando mais difundidos.

É difícil ver como a qualidade de vida pode ser sustentável a longo prazo se ela é repartida de modo muito desigual, se há um grande número de pessoas passando fome, sem teto ou morrendo jovens em razão de doenças, embora possam ver uma existência mais confortável alcançada por bilhões de outras pessoas. Evidentemente, movimentos de grande escala na direção da equidade intrageracional são necessários à sustentabilidade. Como no caso do microfinanciamento para o desenvolvimento sustentável, há muitas vezes mais sinergia do que conflito entre a equidade intergeracional e a intrageracional. Políticas que realmente ajudem os pobres das áreas rurais dos países em desenvolvimento são muito mais compatíveis com aquelas que preservam a natureza do que muitas vezes é admitido. Políticas que verdadeiramente beneficiem os pobres urbanos certamente incluem dispositivos para evitar catástrofes ambientais urbanas. Tais políticas também incluem medidas para resolver problemas das regiões que estão produzindo migrações de grande escala para as cidades, muitas delas de tal maneira inchadas que são quase inadministráveis. De fato, a transição social deve incluir a mitigação de alguns dos piores problemas das megacidades.

Hoje, mais do que no passado, nenhuma nação pode lidar com problemas que afetem atividades econômicas urbanas ou rurais sem levar em conta questões internacionais. A emergência da economia global é um aspecto dominante da cena contemporânea, e o desejo de participar mais ativamente desta economia é uma força maior que afeta as políticas dos governos e dos negócios em todo o mundo. Junto com o transporte rápido, as comunicações globais e os efeitos ambientais globais, a proeminência das questões econômicas globais significa que um grau maior de cooperação mundial é essencial para tratar com as questões sérias e interligadas com que depara toda a raça humana. Isto nos leva à transição institucional ou governamental.

A TRANSIÇÃO INSTITUCIONAL

A necessidade de uma cooperação regional e global dificilmente se restringe às questões ambientais, ou mesmo ambientais e econômicas. A manutenção da paz, a assim chamada segurança internacional, é pelo menos tão importante quanto estas questões.

Recentemente, com a dissolução da União Soviética e do "bloco soviético" de nações, e com um maior grau de cooperação por parte da China, se tornou possível às instituições mundiais, inclusive órgãos das Nações Unidas, funcionar de maneira mais efetiva do que no passado. Para as Nações Unidas, organizar o acompanhamento de eleições ou patrocinar as negociações que visam ao fim de uma guerra civil é agora uma questão de rotina. Atividades de "manutenção da paz" estão em andamento em várias partes do mundo. Os resultados não são em absoluto sempre satisfatórios, mas pelo menos os processos estão se tornando comuns.

Enquanto isto, a cooperação transnacional está se dando de muitas outras maneiras, e na verdade o papel do Estado nacional é necessariamente enfraquecido em um mundo onde tantos fenômenos importantes transcendem de forma crescente as fronteiras nacionais. Em muitas esferas da atividade humana, instituições transnacionais e mesmo universais (ou quase universais), formais ou informais, vêm funcionando há muito tempo. Agora há muitas mais. Tipicamente, elas canalizam a competição para padrões sustentáveis e a temperam com cooperação. Algumas são mais importantes ou mais efetivas do que outras, mas todas têm algum significado. Uns poucos exemplos diversos são os sistemas de viagens aéreas; a União Postal Internacional; a Convenção para as Frequências de Rádio; a Interpol; os tratados que envolvem os pássaros migratórios; a Convenção sobre o Comércio

Internacional de Espécies Ameaçadas (CITES); a Convenção sobre Armas Químicas; a União Internacional de Física Pura e Aplicada, o Conselho Internacional das Uniões Científicas etc.; os Congressos Mundiais de Matemática, Astronomia, Antropologia, Psiquiatria etc.; o PEN, a organização internacional dos escritores; instituições financeiras como o Banco Mundial e o Fundo Monetário Internacional; corporações multinacionais, inclusive o McDonald's, assim como a IBM; agências das Nações Unidas como a WHO, UNEP, UNDP, UNFPA, UNICEF, e a Unesco; a Cruz Vermelha, o Crescente Vermelho, o Escudo Vermelho de David e o Sol Vermelho e Leão. Além do mais, a crescente importância do inglês como língua internacional não deve ser ignorada.

Pouco a pouco, a raça humana está começando a enfrentar, sobre uma base global ou altamente transnacional, alguns problemas de controle da biosfera e das atividades humanas contidas nela. Aqui o efeito da nova situação na antiga União Soviética e no Leste Europeu é extremamente encorajadora. Ela resulta na probabilidade de quase universalidade para numerosas atividades para as quais havia pouca esperança de qualquer coisa parecida com universalidade antes.

Além disso, as negociações sobre questões de interesse global — aquelas questões do meio ambiente reconhecidas como não pertencentes a ninguém e que portanto pertencem a todos, em que a exploração egoísta sem cooperação pode conduzir apenas a resultados ruins para todas as partes — estão progredindo. Exemplos óbvios são os oceanos, o espaço e a Antártica.

Acordos entre países mais e menos desenvolvidos podem seguir o padrão da barganha planetária, que encontramos anteriormente com relação à conservação da natureza. Aqui isto assume um significado mais geral: transferências de recursos de países mais ricos para países mais pobres trazem consigo uma obrigação de que os pobres tomem medidas que façam avançar a sustentabilidade no sentido amplo, de modo que evitar a proliferação nuclear se junta a atividades como a proteção de áreas selvagens. Uma outra manifestação da barganha planetária são as empresas públicas de fornecimento de energia elétrica dos países da zona temperada que compensam suas emissões de dióxido de carbono pagando pela preservação das florestas dos países tropicais.

Entretanto, o problema do particularismo destrutivo — a competição aguda e muitas vezes violenta entre os povos de língua, religião, raça ou nação diferentes — tem chamado a atenção mais do que normalmente acontecia nos últimos anos, em especial com a supressão de alguns controles exercidos sobre estas competições pelos

regimes autoritários. Dúzias de violentos conflitos étnicos ou religiosos estão acontecendo em diferentes partes do globo. Muitos tipos diferentes de fundamentalismo estão em marcha. O mundo está sofrendo tendências simultâneas em direção à unidade e à fragmentação dentro desta unidade.

Mencionamos que aparentemente nenhuma diferença é tão pequena que não possa ser usada para dividir as pessoas em grupos severamente antagônicos. Olhe, por exemplo, para o amargo conflito que acontece na Somália. Diferenças de línguas? Não, todos falam somali. Diferenças religiosas? Todos são virtualmente muçulmanos. Seitas diferentes dentro do Islã? Não. Diferenças de clã? Sim, mas eles não estão causando tantos problemas. São principalmente os subclãs, sob o comando de senhores da guerra rivais, que estão em guerra entre si, já que a ordem legal entrou em colapso.

A TRANSIÇÃO IDEOLÓGICA

O que acontecerá com estas tendências? Se nossas inclinações, há muito tempo ultrapassadas, em direção à destrutividade forem excessivamente satisfeitas, teremos competições militares, competições entre as raças, e competições pelos recursos em níveis que tornarão a sustentabilidade da qualidade difícil ou impossível de ser obtida. Aparentemente uma transição ideológica dramática, abrangendo a transformação de nosso modo de pensar, nossos esquemas, nossos paradigmas, é necessária, se nós humanos quisermos alcançar a sustentabilidade em nossas relações uns com os outros, para nada dizer das nossas interações com o resto da biosfera.

A pesquisa científica ainda não deixou claro até que ponto as atitudes humanas em relação a pessoas percebidas como diferentes (e em relação a outros organismos) são governadas por tendências hereditárias, resistentes, desenvolvidas há muito tempo durante a evolução biológica. Pode ser que até certo ponto nossas propensões para formar grupos que não se entendem uns com os outros e provocam uma destruição desnecessária no meio ambiente tenham estas origens. Podem ser tendências que evoluíram biologicamente e que foram uma vez adaptativas mas, em um mundo de interdependência, armas destrutivas e uma capacidade muito grande de degradar a biosfera, não o são mais. A evolução biológica é muito lenta para acompanhar estas mudanças. Mesmo assim, sabemos que a evolução cultural, que é muito mais rápida, pode modificar propensões biológicas.

Os sociobiólogos enfatizam que nós humanos, como outros animais, herdamos uma tendência em proteger-nos e aos nossos parentes próximos para que nós e eles possamos sobreviver para procriar e passar adiante uma parte de nosso padrão genético. Mas nos seres humanos este instinto de promover a aptidão inclusiva é profundamente transformado pela cultura. Um sociobiólogo, invocando a imagem de alguém saltando em um rio para salvar outra pessoa de um crocodilo, argumentaria que este comportamento “altruístico” é mais provável se a outra pessoa for um parente próximo. Um antropólogo cultural poderia chamar a atenção para o fato de que, em muitas tribos, certos parentes, inclusive parentes muito distantes, são “classificados” como parentes, aparentados ou prole, e são sob muitos aspectos tratados como se realmente fossem estes parentes próximos. Talvez os membros destas tribos estejam tão dispostos a arriscar suas vidas para salvar os classificados como seus irmãos e irmãs quanto estão em salvar os verdadeiros. De qualquer modo, os sociobiólogos agora concordam que os padrões de comportamento altruístico nos humanos são muito afetados pela cultura. Uma certa boa vontade em arriscar nossas vidas pela de um outro ser humano pode ser facilmente estendida a todos os membros de nossa tribo.

Tal comportamento ocorre também em níveis mais altos de organização. No nível de Estado-nação, é conhecido como patriotismo. À medida que as pessoas se reuniram em sociedades cada vez maiores, o conceito de “nós” tendeu a aumentar em abrangência. Infelizmente, as tensões podem revelar linhas de ruptura no tecido social que fazem com que ele se rompa novamente em pedaços menores. Isto é o que aconteceu, por exemplo, nas vizinhanças de Sarajevo, onde um morador teria dito: “Vivemos ao lado da porta destas pessoas por quarenta anos, casamo-nos com elas, mas agora nos damos conta de que elas não são inteiramente humanas.” Apesar destes retrocessos, a tendência inegável é em direção a um sentido de solidariedade inclusiva cada vez maior.

A grande questão ideológica é se, em uma escala de tempo curta, este senso de solidariedade pode vir a abranger a humanidade toda e também, e numa certa medida, outros organismos da biosfera e os sistemas ecológicos aos quais pertencemos. Poderão as preocupações provincianas e de curto prazo ser acompanhadas de modo crescente por preocupações globais e de longo prazo? Poderá a consciência de família sofrer uma evolução cultural suficientemente rápida para se transformar em consciência planetária?

Quando a unidade política era obtida no passado, era-o muitas vezes por meio da conquista, algumas vezes seguida de tentativas de

suprimir a diversidade cultural, pois diversidade cultural e competição étnica são os dois lados da mesma moeda. Entretanto, para satisfazer a exigência de qualidade sustentável, a evolução em direção a uma consciência planetária deve acomodar a diversidade cultural. A raça humana necessita de unidade na diversidade, com diversas tradições evoluindo de modo a permitir a cooperação e a realização das muitas transições para a sustentabilidade interligadas. A comunidade é essencial para a atividade humana, mas apenas comunidades motivadas ao trabalho conjunto provavelmente serão adaptativas no mundo do futuro.

Enquanto isso, a diversidade cultural humana tem dado origem a uma multiplicidade de ideologias ou paradigmas, esquemas que caracterizam maneiras de pensar em todo o mundo. Algumas destas maneiras de olhar o mundo, inclusive visões particulares do que é uma boa vida, podem ser especialmente favoráveis à qualidade sustentável. É desejável que tais atitudes se tornem mais difundidas, mesmo que a diversidade cultural sofra pelo declínio de outras atitudes com conseqüências mais destrutivas. Como sempre, a preservação da diversidade cultural pode gerar não apenas paradoxos mas também conflitos com outros objetivos.

Há poucos anos assisti a uma conferência notável dada na UCLA por Václav Havel, então presidente da República Federada Tcheca e Eslovaca, que em breve se separaria, e agora presidente da República Tcheca. Seu tema era o estrago ambiental em seu país durante a última década, com conseqüências sérias para a saúde humana. Ele culpou o antropocentrismo pelo estrago, especialmente a noção de que nós humanos somos donos do planeta e temos sabedoria suficiente para saber o que fazer com ele. Queixou-se de que nem os capitalistas ambiciosos nem os comunistas dogmáticos têm respeito suficiente pelo sistema maior do qual somos apenas uma parte. Havel, é claro, é um escritor e um defensor dos direitos humanos, assim como um político. A maioria dos políticos comuns abstém-se de atacar o antropocentrismo, já que os eleitores são todos humanos. Mas pode ser deveras saudável para a nossa espécie atribuir um valor intrínseco à natureza e não apenas perceber sua utilidade para um tipo particular de primata que chama a si mesmo de *sapiens*.

A TRANSIÇÃO INFORMACIONAL

Enfrentar nos níveis local, nacional e transnacional as questões ambientais e demográficas, os problemas sociais e econômicos, as

questões de segurança internacional, assim como as fortes interações entre eles, exige uma transição no conhecimento e compreensão, e sua divulgação. A isto chamamos transição informacional. Aqui as ciências da natureza, a tecnologia, a ciência do comportamento e as profissões como o direito, a medicina, o ensino e a diplomacia devem todas contribuir, assim como, é claro, devem fazê-lo também as empresas e os governos. Somente com um maior grau de compreensão das questões complexas com que a humanidade depara, das pessoas comuns e dos grupos de elite, haverá alguma esperança de se alcançar a qualidade sustentável.

Não é necessário que o conhecimento e a compreensão sejam especializados. É claro, a especialização hoje é necessária. Mas também o é a integração da compreensão especializada para formar um todo coerente, como discutimos antes. É essencial, portanto, que a sociedade atribua um valor maior do que até agora tem feito aos estudos integrativos, necessariamente aproximados, que tentam abranger ao mesmo tempo todos os aspectos de uma situação inteligível, junto com suas interações, por meio de um tipo de modelagem ou simulação aproximados. Alguns exemplos prematuros de tais tentativas de dar uma olhada por alto no todo foram desacreditados, em parte porque os resultados foram publicados muito cedo e em parte porque lhes foi dada uma importância demasiada. Isto não deveria impedir as pessoas de tentar novamente, mas com afirmações adequadamente modestas sobre o que serão necessariamente resultados muito experimentais e aproximados.

Um dos defeitos adicionais destes estudos iniciais, como *Limits to Growth*, o primeiro relatório do Clube de Roma, era que muitas das suposições críticas e quantidades que determinavam os resultados não eram parametricamente variadas de modo tal que o leitor pudesse ver as conseqüências das suposições e números alterados. Hoje em dia, com a pronta disponibilidade de poderosos computadores, as conseqüências de uma variação dos parâmetros podem ser exploradas mais facilmente. A sensibilidade dos resultados às diferentes suposições pode ser verificada, e a estrutura do estudo pode ser mais transparente. Além disso, parte do estudo pode assumir a forma de jogos como *SimCity* ou *SimEarth*, que são produtos comerciais desenvolvidos pela Maxis Corporation sob a liderança de Will Wright. Os jogos permitem a um crítico renovar suas suposições para adequá-las ao seu próprio gosto e ver no que isto resulta.

Peter Schwartz, em seu livro *The Art of the Long View*, relata como a equipe de planejamento da Royal Dutch Shell Corporation concluiu há

alguns anos que o preço do petróleo em breve cairia muito rápido e recomendou à companhia que agisse de acordo. Os diretores mostraram-se céticos, e alguns deles disseram que não estavam impressionados com as suposições dos planejadores. Schwartz diz que então a análise foi apresentada em forma de jogo e que os diretores estavam no controle, por assim dizer, o que lhes permitia alterar, dentro dos limites do razoável, as informações iniciais que lhes pareciam mal orientadas. De acordo com seu relato, o resultado essencial continuava aparecendo inalterado, em consequência do que os diretores desistiram e começaram a planejar para uma era de preços mais baixos do petróleo. Alguns participantes têm lembranças diferentes do que aconteceu na Royal Dutch Shell, mas de qualquer maneira a história ilustra belamente a importância da transparência na construção de modelos. À medida que os modelos incorporam cada vez mais aspectos do mundo real e correspondentemente se tornam mais complexos, a tarefa de fazê-los mais transparentes, de exibir as suposições e mostrar como estas podem ser alteradas, se torna imediatamente mais desafiadora e mais crítica.

Aqueles de nós que participam de um estudo como o Projeto 2050, dirigido a traçar os caminhos que podem conduzir a um mundo mais sustentável na metade do próximo século, deparam com questões difíceis. Como poderão estas transições em direção a uma qualidade mais sustentável ser realizadas, se isto for possível, durante os próximos cinquenta ou cem anos? Poderemos esperar compreender, mesmo grosseiramente, as complexas interações entre as transições e especialmente as questões que surgem em razão de sua delicada sincronização relativa e absoluta? Haverá qualquer esperança de levar suficientemente em conta a ampla variedade de condições em todo o mundo? Haverá outras transições, ou outros modos de olhar para conjuntos inteiros de questões, que são mais importantes? Estas questões dizem respeito ao período, por volta da metade do século XXI, quando as várias transições poderão ter sido parcialmente efetuadas ou pelo menos estarão em andamento. Pensar sobre esta época de maneira útil é difícil, mas não necessariamente impossível. Como Eilert Lövborg disse em *Hedda Gabler*, de Ibsen, quando é demonstrada surpresa por seu livro de história ter uma continuação que descreve o futuro: “Há uma ou duas coisas a ser ditas sobre ele, apesar de tudo.”

Quanto ao futuro mais distante, que tipo de condições globais poderiam prevalecer, depois da metade do próximo século, que realmente aproximariam a sustentabilidade da qualidade? Quais serão nossas visões de tal situação? O que sentiríamos, veríamos e ouviríamos se estivéssemos lá? Na realidade, deveríamos tentar visualizá-las, espe-

cialmente um mundo em que o aumento de qualidade predomine sobre o aumento em quantidade. Deveríamos imaginar um mundo, por mais utópico que seja, no qual o *State of the World Report* (Relatório do estado do mundo) e o *World Resources Report* (Relatório dos recursos mundiais) não pareçam piores a cada ano, com a população estabilizando-se na maioria dos lugares, a extrema pobreza desaparecendo, a prosperidade mais equitativamente dividida, com várias tentativas de cobrar custos reais, onde instituições globais e outras transnacionais (assim como nacionais e locais) comecem a enfrentar as complexas questões interligadas da sociedade humana e do resto da biosfera, e ideologias que favoreçam a consciência planetária e a sustentabilidade ganhem adeptos, enquanto os ódios étnicos e os fundamentalismos de todos os tipos desapareçam como forças divisórias ao mesmo tempo que uma grande parte da diversidade cultural permaneça. Dificilmente atingiremos qualquer coisa que se aproxime desse mundo se não pudermos sequer imaginar o que seria ou estimar em bases quantitativas como poderia funcionar.

Dos três tipos de prazos, é naturalmente mais difícil fazer com que as pessoas pensem sobre a visão de longo prazo de um mundo mais sustentável, mas é vital que superemos nossa relutância em fazer imagens concretas deste mundo. Somente então a nossa imaginação poderá escapar do confinamento das práticas e atitudes que agora provocam ou ameaçam provocar tantos problemas, e inventar meios melhores de administrar nossas relações uns com os outros e com o resto da biosfera.

À medida que tentamos visualizar um futuro sustentável, devemos também perguntar que tipo de surpresas, tecnológicas, psicológicas ou sociais, poderia fazer com que este futuro distante fosse totalmente diferente do que poderíamos antecipar hoje. Exige-se uma equipe especial de desafiantes imaginativos para continuar colocando esta questão.

A mesma equipe poderia ponderar também sobre a questão dos novos problemas sérios que talvez surgissem em um mundo no qual muitos dos piores medos de hoje teriam de alguma forma sido afastados. Há apenas uns poucos anos, a maioria dos especialistas não estava predizendo que a guerra fria em breve entraria em uma nova era com problemas diferentes, mas, mesmo os poucos que estavam não especulavam seriamente sobre quais preocupações substituiriam as preocupações familiares que não seriam mais dominantes.

O que dizer do curto prazo, as próximas décadas? Que tipos de políticas e atividades no futuro imediato podem contribuir para a

possibilidade de aproximação da qualidade sustentável mais tarde? Não é em absoluto difícil promover discussões sobre o futuro próximo, e alguns dos problemas que enfrentamos a curto prazo estão se tornando claros para muitos observadores. Talvez a principal lição a ser aprendida da experiência contemporânea seja aquela com que deparamos quando mencionamos o microfinanciamento. É a importância das iniciativas que vêm de baixo para cima, ao contrário das que vêm de cima para baixo. Se as pessoas locais estão profundamente envolvidas no processo, se elas ajudam a organizá-lo, e se elas têm um interesse claro, especialmente econômico, no resultado, então o processo muitas vezes tem uma chance melhor de sucesso do que um processo imposto por uma burocracia distante ou um empresário poderoso. Ao ajudar as áreas tropicais a alcançar objetivos na preservação da natureza junto com um desenvolvimento econômico pelo menos parcialmente sustentável, os conservacionistas descobriram que o que vale mais a pena são os investimentos nos grupos e lideranças locais, particularmente o treinamento de líderes locais.

Embora seja razoavelmente fácil persuadir as pessoas a discutir os prazos de tempo médios — a época em que as transições interligadas devem estar em grande parte realizadas se quisermos alcançar algo parecido com a sustentabilidade —, a extraordinária complexidade do desafio é atemorizadora. Todas estas transições devem ser consideradas, cada uma com caráter e época a ser determinados, talvez diferentes em diferentes partes do mundo, e todas fortemente acopladas umas com as outras. Ainda assim, esta mesma complexidade pode conduzir a um tipo de simplicidade. Certamente é verdadeiro na ciência física (que, para ser honesto, é muito menos difícil de analisar mas pode ainda ter algumas lições para dar) que nas vizinhanças de uma transição, digamos de gás para líquido, próximo de uma singularidade matemática, há apenas uns poucos parâmetros cruciais dos quais a natureza da transição depende. Estes parâmetros não podem ser sempre caracterizados de antemão; contudo, devem emergir de um estudo cuidadoso de todo o problema. É verdade que em geral o comportamento de um sistema complexo altamente não-linear pode exibir simplicidade, mas uma simplicidade tipicamente emergente e não óbvia no começo.

Uma política de estudos integrados dos caminhos possíveis em direção a um mundo mais aproximadamente sustentável pode ser extremamente valiosa. Mas devemos ser cuidadosos e tratar todos estes estudos como “próteses da imaginação”, e não lhes atribuir maior validade do que na verdade provavelmente possuem. Tentar adaptar o comportamento humano, especialmente os problemas da sociedade ao

leito de Procusto* de alguma estrutura matemática necessariamente limitada já trouxe muito pesar ao mundo. Por exemplo, a ciência da economia tem sido utilizada muitas vezes desta maneira com conseqüências infelizes. Além disso, ideologias destrutivas para a liberdade humana ou seu bem-estar têm muitas vezes sido justificadas com argumentos vagamente científicos, e especialmente analogias entre as ciências. O darwinismo social pregado por alguns filósofos políticos do século XIX é um dos muitos exemplos, e não é em absoluto o pior.

Não obstante, considerada com espírito adequado, uma multiplicidade de estudos de políticas integrativas, envolvendo não apenas projeções lineares mas evolução, simulação altamente não-linear e jogos de computador, pode fornecer uma ajuda modesta na geração de uma visão do futuro coletiva para a raça humana. Um documento inicial do Projeto 2050 coloca isto assim: estamos todos em uma situação que lembra a condução de um veículo rápido à noite em terreno desconhecido, pedregoso, cheio de sulcos, com precipícios não muito longe. Algum tipo de iluminação, mesmo fraca e bruxuleante, pode ajudar a evitar alguns dos piores desastres.

Se a humanidade realmente se dotar, de certa forma, de um pouco de previdência coletiva — algum grau de compreensão das histórias ramificadas do futuro —, uma mudança altamente adaptativa terá de acontecer, mas não ainda um evento de ruptura. A realização das transições interligadas em direção a uma maior sustentabilidade, contudo, seria este evento. Em particular, a transição ideológica implica um grande passo para a humanidade em direção a uma consciência planetária, talvez com a ajuda de avanços tecnológicos sabiamente administrados no momento ainda indistintamente previsíveis. Depois das transições, a humanidade como um todo — junto com outros organismos que habitam o planeta — funcionaria, muito mais do que agora, como um sistema adaptativo complexo composto, ricamente diversificado.

* Na mitologia clássica, Procusto era um salteador da Ática que torturava os viajantes, amputando-lhes os membros ou esticando-os para que coubessem em seu leito. Procusto foi morto por Teseu. (N. do T.)

CAPÍTULO 23

POSFÁCIO

Neste curto capítulo, tentarei satisfazer a necessidade de uma espécie de resumo breve, não de todos os tópicos do livro inteiro, mas dos temas centrais, simplicidade, complexidade e sistemas adaptativos complexos — os temas que se relacionam com o quark, o jaguar e a humanidade.

O quark e o jaguar não é um tratado. É comparativamente não-técnico, e abrange um grande número de áreas que não pode explorar completamente ou em profundidade. Além disso, grande parte do trabalho descrito no livro com algum detalhe está ainda em andamento, o que significa que, mesmo que fosse tratado completamente, com equações e mais jargão científico do que o já empregado, ainda assim deixaria muitas questões importantes sem resposta. Evidentemente, a principal função do livro é estimular o pensamento e a discussão.

Permeando todo o texto está a idéia do intercâmbio entre as leis fundamentais da natureza e a ação do acaso. As leis que governam as partículas elementares (inclusive os quarks) estão começando a revelar sua simplicidade. A teoria de campo unificada de todas as partículas e interações pode estar bem ao nosso alcance, na forma da teoria das supercordas. Esta teoria excelente tem base numa forma do princípio do cordão dos sapatos, que exige que as partículas elementares sejam descritas como constituídas uma a partir da outra de um modo auto-consistente. A outra lei fundamental da natureza é a condição simples do universo na época em que sua expansão começou. Se a proposta de Hartle e Hawking estiver correta, então esta condição pode ser expressa em termos da teoria unificada das partículas, e as duas leis básicas se tornam uma.

O acaso entra necessariamente no quadro porque as leis fundamentais são quânticas, e a mecânica quântica fornece somente probabilidades para as histórias alternativas com granulação grosseira

do universo. A granulação grosseira deve permitir que as probabilidades sejam bem definidas. Deve permitir também uma descrição aproximadamente clássica, determinística, da natureza, com pequenos desvios freqüentes da classicalidade e grandes desvios ocasionais. Os desvios, especialmente os grandes, resultam na ramificação das histórias, com probabilidades para os diferentes ramos. De fato, todas as histórias alternativas com granulação grosseira formam uma árvore ramificada, ou “jardim dos caminhos que se bifurcam”, chamado um “domínio quase clássico”. A indeterminação da mecânica quântica deste modo vai bem além do famoso princípio de incerteza de Heisenberg. Além disso, esta indeterminação pode ser amplificada nos sistemas não-lineares pelo fenômeno do caos, o que significa que o resultado de um processo é arbitrariamente sensível às condições iniciais, como muitas vezes acontece, por exemplo, na meteorologia. O mundo que nós humanos vemos ao nosso redor corresponde ao domínio quase clássico, mas estamos restritos a uma versão com granulação muito mais grosseira deste domínio em razão das capacidades limitadas de nossos sentidos e instrumentos. Já que tanto é escondido de nós, o elemento de acaso fica ainda mais reforçado.

Em certos ramos da história e em certas épocas e lugares no universo, as condições são propícias à evolução de sistemas adaptativos complexos. Estes são sistemas (como é ilustrado na figura da página 42) que absorvem informação — na forma de um fluxo de dados — e descobrem regularidades neste fluxo que são registradas, tratando o resto do material como randômico. Estas regularidades são comprimidas em um esquema, utilizado para descrever o mundo, prever seu futuro em alguma medida e prescrever um comportamento para o próprio sistema adaptativo complexo. O esquema pode sofrer alterações que produzem muitas variantes, as quais competem entre si. Como elas se saem nesta competição depende das pressões seletivas, que representam a retroalimentação do mundo real. Estas pressões podem refletir a precisão das descrições e previsões, ou a medida pela qual as prescrições levam à sobrevivência do sistema. Tais relações entre as pressões seletivas e os resultados “bem-sucedidos”, contudo, não são correlações rígidas mas apenas tendências. Além disso, as respostas às pressões podem ser imperfeitas. O processo de adaptação dos esquemas conduz apenas de modo aproximado aos resultados “adaptativos” dos sistemas. Esquemas “mal-adaptativos” podem também ocorrer.

Algumas vezes a inadaptação é apenas aparente, surgindo apenas porque importantes pressões seletivas foram negligenciadas ao definir o que é adaptativo. Em outros casos, situações genuinamente mal-adaptativas ocorrem porque a adaptação é muito lenta para acompanhar a mudança das pressões seletivas.

Sistemas adaptativos complexos funcionam melhor em um regime intermediário entre a ordem e a desordem. Eles exploram as regularidades fornecidas pelo determinismo aproximado do domínio quase clássico, e ao mesmo tempo se aproveitam das indeterminações (passíveis de descrição, como ruído, flutuações, calor, incerteza e assim por diante), que na verdade podem ser úteis na busca de esquemas “melhores”. A noção de aptidão, que poderia dar um significado à palavra “melhor”, é muitas vezes difícil de definir, e neste caso pode ser mais útil concentrar-se nas pressões seletivas que estão operando. Muitas vezes uma variável chamada aptidão é bem definida por ser “exógena”, imposta de fora, como no caso de um computador programado para descobrir estratégias vencedoras em um jogo como o de damas ou xadrez. Quando a aptidão é “endógena”, emergindo dos caprichos de um processo evolutivo a que faltam quaisquer critérios externos de sucesso, ela é em muitos casos mal definida. Ainda assim, a idéia de um cenário de aptidão é útil, mesmo que apenas como metáfora. A variável aptidão corresponde à altura (que considero arbitrariamente menor quando a aptidão é maior), e todas as variáveis que especificam o esquema são imaginadas dispostas, digamos sobre um plano ou em uma linha horizontal. A procura de esquemas mais aptos então corresponde a explorar uma linha sinuosa ou uma superfície bidimensional, buscando lugares de baixa altura. Como ilustrado na figura da página 261, esta busca muito provavelmente conduziria a uma situação na qual o sistema ficaria preso em uma depressão comparativamente rasa não fosse por quantidades apropriadas de ruídos (ou calor, obedecendo ao que Seth Lloyd chama o princípio de Goldilocks — não muito quente, não muito frio, mas a medida certa). Este ruído ou calor pode tirar o sistema de um poço raso e lhe permitir descobrir um muito mais profundo nas cercanias.

A variedade dos sistemas adaptativos complexos aqui na Terra é ilustrada no diagrama da página 38, que mostra como um sistema destes tem uma tendência a dar origem a outros. Assim, os sistemas terráqueos, todos com alguma relação com a vida, vão das reações químicas pré-bióticas que primeiramente produziram as coisas vivas, passando pela evolução biológica e pela evolução cultural da humanidade, até os computadores equipados com hardware ou software apropriados e possíveis desenvolvimentos futuros tratados na ficção científica, como compostos de seres humanos formados pela interligação dos cérebros das pessoas.

Quando um sistema adaptativo complexo descreve um outro sistema (ou a si mesmo), ele constrói um esquema abstraído de todos os dados as regularidades percebidas e expressando-as de forma

concisa. O tamanho da descrição concisa destas regularidades do sistema, por exemplo por um observador humano, é o que eu chamo a complexidade efetiva do sistema. Ela corresponde ao que usualmente queremos dizer por complexidade, seja para uso científico ou no discurso do dia-a-dia. A complexidade efetiva não é intrínseca mas depende da granulação grosseira e da linguagem ou codificação empregada pelo sistema observador.

A complexidade efetiva, seja ela interna ou não, é insuficiente em si mesma para descrever as *potencialidades* de um sistema complexo, adaptativo ou não-adaptativo. Um sistema pode ser comparativamente simples, mas capaz de evoluir com grande probabilidade, em um determinado intervalo de tempo, para algo muito mais complexo. Isto foi verdade, por exemplo, para os seres humanos modernos quando apareceram pela primeira vez. Eles não eram muito mais complexos do que seus parentes próximos, os grandes macacos, mas, porque eram inclinados a desenvolver culturas de complexidades enormes, possuíam uma grande parcela do que eu chamo complexidade potencial. Da mesma forma, quando, no começo da história do universo, certos tipos de flutuações da matéria que conduziram à formação de galáxias ocorreram, a complexidade potencial destas flutuações era considerável.

A complexidade efetiva de um sistema ou fluxo de informações deve ser comparada com o conteúdo de informação algorítmica (CIA), que está relacionado com o tamanho de uma descrição concisa de todo o sistema ou fluxo, não apenas suas regularidades mas também seus aspectos randômicos. Quando o CIA é muito pequeno ou quase próximo ao seu máximo, a complexidade efetiva é quase zero. A complexidade efetiva pode ser grande apenas na região do CIA intermediário. Novamente, o regime de interesse é aquele intermediário entre a ordem e a desordem.

Um sistema adaptativo complexo descobre regularidades no fluxo de dados de entrada ao notar que partes deste fluxo têm características comuns. As similaridades são medidas pelo que é chamado informação mútua entre as partes. As regularidades no mundo surgem de uma combinação das leis simples fundamentais com a ação do acaso, que pode produzir acidentes congelados. Estes são eventos ao acaso que aconteceram de um modo particular, embora pudessem ter acontecido de modo diferente, e produziram uma multiplicidade de conseqüências. A origem comum de todas estas conseqüências num evento ao acaso antecedente pode fazer com que surja uma grande quantidade de informação mútua no fluxo de informações. Usei o exemplo da ascensão de Henrique VIII ao trono inglês — depois da morte de seu irmão mais velho —, que resultou na existência de um grande número

de referências ao rei Henrique nas moedas e em documentos e livros. Todas estas regularidades se originam de um acidente congelado.

A maioria dos acidentes, por exemplo, as muitas flutuações no nível molecular, acontecem sem ser amplificados de modo a ter repercussões significativas e não deixam muita regularidade atrás de si. Estes acidentes podem contribuir para a parte randômica do fluxo de informações que chega a um sistema adaptativo complexo.

À medida que o tempo passa, mais e mais acidentes congelados, operando em combinação com as leis fundamentais, produzem regularidades. Como conseqüência, sistemas de complexidades cada vez maiores tendem a emergir com a passagem do tempo por meio da auto-organização, mesmo no caso dos sistemas não-adaptativos como as galáxias, as estrelas e os planetas. No entanto, nem tudo continua crescendo em complexidade. Preferivelmente, a complexidade mais alta encontrada tem tendência a aumentar. No caso dos sistemas adaptativos complexos, esta tendência pode ser significativamente reforçada pelas pressões seletivas que favorecem a complexidade.

A segunda lei da termodinâmica nos diz que a entropia (que mede a desordem) de um sistema fechado tem uma tendência a crescer ou permanecer a mesma. Por exemplo, se um corpo quente e um corpo frio forem postos em contato (e não interagir muito com o resto do universo), o calor tende a fluir do corpo quente para o frio, reduzindo assim a segregação ordenada de temperatura no sistema combinado.

A entropia é um conceito útil apenas quando uma granulação grosseira é aplicada à natureza, de modo que certos tipos de informação sobre o sistema fechado são considerados importantes e o resto da informação é tratada como desimportante e então ignorada. A quantidade total de informação permanece a mesma e, se estiver inicialmente concentrada em informação importante, um pouco dela tenderá a se transformar em informação desimportante que não é contada. Quando isto acontece, a entropia, que faz o papel de ignorância sobre a informação importante, tende a crescer.

Um tipo de granulação grosseira fundamental é dado pelas histórias que constituem um domínio quase clássico. Para o universo observado por um sistema adaptativo complexo, a granulação grosseira efetiva pode ser considerada muito mais grosseira, pois o sistema pode absorver apenas uma quantidade comparativamente pequena de informação sobre o universo.

À medida que o tempo passa, o universo, como um relógio, vai perdendo a corda, e partes do universo vão perdendo também. Em todos os pontos, as várias setas do tempo apontam para a frente, não apenas a seta que corresponde ao aumento de entropia, mas também aquelas que

correspondem à seqüência de causa e efeito, ao fluxo de radiação para o meio externo e à formação de registros (incluindo memórias) do passado e não do futuro.

Algumas vezes as pessoas que por alguma razão dogmática rejeitam a evolução biológica tentam argumentar que a emergência de mais e mais formas complexas de vida de alguma forma viola a segunda lei da termodinâmica. É claro que não, pelo menos não mais do que a emergência de estruturas mais complexas em uma escala galáctica. A auto-organização pode sempre produzir ordem local. Além disso, na evolução biológica podemos ver uma espécie de aumento de entropia "informacional" à medida que os seres vivos chegam a um ajuste melhor com suas vizinhanças, reduzindo assim uma discrepância informacional remanescente da discrepância de temperatura entre um objeto quente e um frio. De fato, todos os sistemas adaptativos complexos exibem este fenômeno — o mundo real exerce pressões seletivas sobre os sistemas e os esquemas tendem a responder ajustando a informação que contêm de acordo com estas pressões. Evolução, adaptação e aprendizagem em sistemas adaptativos complexos são, todos, aspectos do desgaste do universo.

Podemos perguntar se o sistema que evolui e as vizinhanças atingem um equilíbrio, como um corpo quente e um corpo frio que alcançam a mesma temperatura. Ocasionalmente isto acontece. Se um computador é programado para fazer evoluir estratégias aplicáveis a um jogo, este poderá encontrar a estratégia otimizada e a busca estará terminada. Este certamente seria o caso se o jogo fosse o jogo-da-velha. Se o jogo for o xadrez, o computador poderá descobrir algum dia a estratégia otimizada, mas até agora ela permanece desconhecida, e o computador continua sua busca no vasto espaço abstrato das estratégias, procurando por melhores. Esta situação é muito comum.

Podemos ver uns poucos casos onde, no decurso da evolução biológica, o problema da adaptação parece ter sido resolvido de uma vez por todas no começo da história da vida, pelo menos no nível fenotípico. Os extremófilos que vivem em um ambiente quente, ácido e sulfuroso bem no fundo do oceano nos limites entre as placas tectônicas são provavelmente bastante similares, pelo menos metabolicamente, aos organismos que viveram neste ambiente há mais de 3,5 bilhões de anos. Mas a maioria dos problemas de evolução biológica não são nem remotamente parecidos com o jogo-da-velha, na verdade nem com o jogo de xadrez, que será sem dúvida algum dia um problema resolvido. Por um detalhe, as pressões seletivas não são de modo algum constantes. Na maior parte da biosfera, o meio físico-químico está sempre mudando. Além disso, nas comunidades naturais

as várias espécies se constituem em partes do meio ambiente de outras espécies. Os organismos evoluem conjuntamente, e pode não haver equilíbrio algum a ser atingido.

Em várias épocas e lugares, equilíbrios aproximados e temporários parecem ter sido atingidos, mesmo em comunidades inteiras, mas depois de um tempo eles são "interrompidos", algumas vezes por mudanças físico-químicas e outras por um pequeno número de mutações que se seguem a um longo período de "mudança lenta de rota", que significa seqüências de mudanças genéticas que afetam os fenótipos apenas ligeiramente e de maneiras que não interessam muito para a sobrevivência. A mudança lenta de rota pode ter o efeito de preparar o caminho para alterações muito pequenas no genótipo que, por sua vez, provocam mudanças fenotípicas importantes.

De tempos em tempos, tais mudanças comparativamente modestas nos genótipos podem conduzir a eventos de ruptura, nos quais espécies inteiras de novos organismos podem surgir. Um exemplo é o surgimento dos eucariotos unicelulares, assim chamados porque a célula possui um núcleo verdadeiro e também outras organelas — cloroplastos ou mitocôndrias — que se acredita serem descendentes de organismos originalmente independentes incorporados à célula. Um outro exemplo é a origem dos animais e plantas multicelulares a partir de organismos unicelulares, presumivelmente pela agregação, com a ajuda de um avanço bioquímico espetacular, de um novo tipo de produto químico semelhante à cola que mantém as células juntas.

Quando um sistema adaptativo complexo dá origem a um novo tipo de sistema adaptativo complexo, pela agregação ou de outra forma, isto pode ser considerado um evento de ruptura. Um exemplo familiar é a evolução do sistema imunológico dos mamíferos, cujo funcionamento lembra de alguma forma a própria evolução biológica, mas numa escala de tempo muito mais rápida, de modo que os invasores do corpo podem ser identificados e atacados em questão de horas ou dias, em comparação às centenas de milhares de anos necessários para fazer evoluir novas espécies.

Muitos dos mesmos aspectos tão evidentes na evolução biológica são encontrados, de forma bastante similar, em outros sistemas adaptativos complexos, como o pensamento humano, a evolução social e a computação adaptativa. Todos estes sistemas mantêm-se explorando possibilidades, abrindo novos caminhos, descobrindo passagens, e ocasionalmente gerando novos tipos de sistemas adaptativos complexos. Assim como novos nichos ecológicos continuam aparecendo na evolução biológica, novas maneiras de viver continuam a ser descobertas nas economias, novos tipos de teorias são inventadas no empreendimento científico, e assim por diante.

A agregação de sistemas adaptativos complexos em sistemas adaptativos complexos compostos é um modo efetivo de alcançar um novo nível de organização. O sistema composto então consiste de agentes adaptativos que constroem esquemas para levar em conta e lidar com o comportamento mútuo. Uma economia é um excelente exemplo, assim como uma comunidade ecológica.

Uma boa quantidade de pesquisa está sendo realizada sobre tais sistemas compostos. Teorias são desenvolvidas e comparadas com a experiência em vários campos. Grande parte desta pesquisa indica que tais sistemas tendem a se acomodar em uma zona de transição bem definida entre a ordem e a desordem, onde eles são caracterizados pela adaptação eficiente e por uma lei do expoente para a distribuição de recursos. Algumas vezes esta zona é chamada, de modo bastante metafórico, o "limiar do caos".

Não há indicação de que haja qualquer coisa terrivelmente especial sobre a formação de um sistema planetário como o sistema solar, ou sobre o fato de este incluir um planeta como a Terra. Também não há qualquer evidência de que as reações químicas que iniciaram a vida neste planeta fossem de algum modo improváveis. É provável, portanto, que sistemas adaptativos complexos existam em numerosos planetas espalhados por todo o universo e que pelo menos alguns tenham muitos aspectos em comum com a evolução biológica terrestre e as formas resultantes de vida. É, contudo, ainda assunto de discussão se a bioquímica da vida é única ou quase única ou apenas uma de muitas possibilidades diferentes. Em outras palavras, não está ainda certo se ela é determinada principalmente pela física ou deve seu caráter em grande parte à história.

Os quase 4 bilhões de anos de evolução biológica na Terra destilaram, por tentativa e erro, uma gigantesca quantidade de informação sobre os diferentes modos pelos quais os organismos vivem, na presença um do outro, na biosfera. Da mesma forma, os humanos modernos desenvolveram, durante mais de 50 mil anos, uma quantidade extraordinária de informação sobre as maneiras como os seres humanos vivem, em interação um com o outro e com o resto da natureza. Tanto a diversidade biológica como a cultural estão agora severamente ameaçadas e trabalhar por sua preservação é uma tarefa crucial.

A preservação da diversidade cultural apresenta muitos paradoxos e conflitos com outros objetivos. Um desafio é aquele difícilimo de reconciliar a diversidade com a necessidade premente de unidade entre povos que no momento deparam com uma variedade de problemas comuns em uma escala global. Um outro desafio é apresentado pela hostilidade que muitas culturas provincianas mostram em relação à

cultura universalizadora, científica e secular, que fornece muitos dos mais ardentes defensores da preservação da diversidade cultural.

A conservação da natureza, protegendo o máximo possível de diversidade biológica, é necessária com urgência, mas este tipo de objetivo parece impossível de ser atingido a longo prazo, a menos que seja visto no contexto mais amplo dos problemas ambientais em geral, e estes por sua vez devem ser considerados junto com os problemas demográfico, tecnológico, econômico, social, político, militar, diplomático, institucional, informacional e ideológico com que depara a humanidade. Em particular, o desafio em todos estes campos pode ser visto como a necessidade de realizar um conjunto de transições interligadas para uma situação mais sustentável durante o próximo século. Uma sustentabilidade maior, se puder ser alcançada, significaria uma estabilização de população, globalmente e na maioria das regiões; práticas econômicas que encorajem a cobrança dos custos reais, crescimento em qualidade em vez de quantidade e a vida a partir dos dividendos da natureza e não do seu capital; tecnologia que tenha comparativamente um baixo impacto ambiental; riqueza de alguma forma mais equitativamente distribuída, especialmente para que a extrema pobreza não seja mais comum; instituições globais e transnacionais mais fortes para tratar com os problemas globais urgentes; um público muito mais bem informado sobre os desafios múltiplos e interligados do futuro; e, talvez mais importante e mais difícil de tudo, o predomínio de atitudes que favoreçam a unidade na diversidade — cooperação e competição não-violenta entre tradições culturais diferentes e nações-Estados — assim como coexistência sustentável com os organismos com os quais nós humanos dividimos a biosfera. Esta situação parece utópica e talvez impossível de atingir, mas vale a pena tentar construir modelos do futuro — não como projetos mas como auxílio à imaginação — e verificar se é possível traçar caminhos que possam nos conduzir a este mundo sustentável e desejável no final do próximo século, um mundo no qual a humanidade como um todo e o resto da natureza funcionem como um sistema adaptativo complexo em um grau muito maior do que o fazem hoje.

ÍNDICE

- Abordagem quântica, a, 139
- Ação
- ação efetiva, 222
 - \hbar como unidade de ação, 220
 - na física newtoniana, 220
 - na teoria das supercordas, 220-221
- Ação a distância, 102, 187
- Acidentes congelados, 149, 239-241, 305
- Acidentes quânticos, 149
- Adams, James L., *Conceptual Blockbusters*, 282
- Adams, Robert McC., 310
- Adaptação direta, 86-90
- ADN, 82, 85
- ADN cultural, 303-305, 307, 348, 353
- Algoritmo, definição, 52, 61
- Alvarez, Luis, 297
- Amazônia, 21
- Anderson, Carl, 193, 204
- Anderson, Philip, 207
- Aniquilação, 140
- Antifamília, 204
- Antipartícula, 192-193
- Antiquarks, 197, 198
- Apolíneos, 12
- Aprendizagem, 273-285. *Ver também* Máquinas que aprendem e Pensamento criativo.
- com os genes ou o cérebro, 37, 76-77
 - hierárquica, 73
 - supervisionada, 318
- Aptidão,
- e algoritmos genéticos, 322, 327
 - na rede de computação neural, 318-320
- Aptidão inclusiva, 262-263
- Aptidão individual, 263
- Aptidão do sexo, 263-266
- Aprendizagem hierárquica, 73
- Aquisição da língua, 305-306, 313
- e a gramática como esquema parcial, 68-69
 - por parte da criança, 67-77
- Árvore das histórias ramificadas, 165-166, 222, 241
- Árvore de decisões, 88-89
- Asimov, Isaac, 37
- Aspiazu, Eduardo, 344
- Astronomia de neutrinos, 228
- Astronomia de ondas gravitacionais, 228
- Arthur, W. Brian, 266, 332
- Autoconsistência, princípio de, 145, 221
- Auto percepção, 172-174, 327
- Axelrod, Robert, 323
- Bactéria. *Ver* resistência às drogas nas bactérias.
- Bajkov, A. B., 298
- Bak, Per, 113
- Bacia de atração, 278-279
- Barganha planetária (troca de débitos), 347-348, 367
- Bateria (pilha voltaica), invenção da, 97
- Beebe, Spencer, 344
- Belize, 22, 28
- Bell, John, 186-187
- Bennett, Charles, 117-118, 188, 190, 235
- Big-bang, 164, 227
- Biologia,
- biologia terrestre, 129-131
 - do cérebro, 133
 - papel dos eventos ao acaso, 131, 150, 326-327
 - redução da, 129-130, 131
- Biologia das populações, teoria matemática na, 93
- Bioquímica,
- complexidade efetiva versus profundidade, 130-131
 - em outros planetas, 131-132

- Biogeografia, 342-343
 Bit, definição, 51
 cadeia de bits, 51-55, 63, 66, 73-75
 Blackett, Patrick, 193
 Bohm, David
 e Einstein, 185
 e o experimento EPRB, 186
 Bohr, Niels, 181, 183
 Borges, Jorge Luis, 165
 Bósons, 139, 191
 higgson (bóson de Higgs), 206, 208
 Brassard, Gilles, 188
 Brillouin, Léon, 235
 Brout, Robert, 207
 Brown, Jerram, 263
 Brown, Robert, 168
 Brueckner, Keith, 60
 Brun, Todd, 44
 Buracos negros, 233, 242
 Calandra, Alexander, "A história do barômetro", 282-283
 Caltech, 132-135. *Ver* Instituto de Tecnologia da Califórnia.
 Campos, 140, 143
 Cadeia randômica, 63
 Cadeia randômica de bits, 51-54, 63, 65, 73-76
 Caminhada randômica, 63, 257
 Caos, 159, 180, 287
 clássico, 42-43
 determinístico, 62-63
 e fractais nos mercados financeiros, 112
 e indeterminação de leis do expoente, 41-43
 Características randômicas, no fluxo de informações, 122
 Carga de cor, 197
 CDQ. *Ver* Cromodinâmica quântica.
 Cenários de aptidão, 260-262
 na aprendizagem por computador, 320
 e bacias profundas, 278-322
 bacia de atração, 278-279
 para idéias criativas, 278-279
 Cérebro e mente, 132-134
 estudo do cérebro, 133-134
 esquerdo e direito, 133-134
 e livre-arbítrio, 173
 redes neurais como modelo, 317-320
 CERN, aceleradores, 141, 202, 207, 217
 Chaitin, Gregory, 52-53, 55-57, 118-235
 Chan Chick, 4
 Chao, Tang, 113
 Chomsky, Noam, 69, 305
 Chuva de peixes, 298-299
 CIA. *Ver* conteúdo de informação algorítmica.
 Cibernética, 88-89
 Centro Aspen de Física, 314
 Classes de equivalência, 161-162
 Comissão Brundtland, 364
 Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, 364
 Complexidade algorítmica, 52, 66, 235
 Complexidade efetiva, 66, 116-118, 178, 239
 bioquímica e, 130-131
 CIA intermediário e, 74-76
 interna, 72
 complexidade potencial e, 86
 definição de, 72
 sistemas adaptativos complexos e, 70-72, 75
 regularidades e, 70-72, 178
 do universo, 149
 Complexidade efetiva interna, 72
 Complexidade grosseira, 100
 concisão e, 50
 definição de, 51, 52
 informação e, 41-57
 Complexidade potencial, 86
 Comportamento altruístico, 263, 369
 Computadores quânticos, 117
 Comunidades ecológicas, 249-250, 267, 315
 diversidade da, 258-259, 342
 simulação por computador de, 327-328
 Condição inicial do universo, 153, 156, 219, 222, 239
 candidato a, 148
 e causalidade, 228-229
 papel da, 225
 e a(s) seta(s) do tempo, 145-148, 208, 227, 232, 239
 Conferência Solvay (Bruxelas), 183
 Conjetura de Ampère, 98
 Conjetura de Goldbach, 57, 118
 Constante de Planck, 214-215, 220
 Constantes universais da natureza, 214
 Conteúdo de informação algorítmica, 64-65, 117-118, 121, 131
 profundidade e, 120-122
 para cadeias randômicas, 55, 57
 e complexidade efetiva grande, 74-76
 entropia e, 235, 236
 informação versus, 54
 intermediário, entre a ordem e a desordem, 74-76, 328
 introdução do, 51-53
 como medida de randomicidade, 57
 não-computabilidade do, 55-57
 do universo, 149
 Continentes, movimento dos, 296
 Controle integrado de pestes, 361
 Comitê para a Investigação Científica das Alegações dos Paranormais, 292-293, 300
 Competição 315
 de esquemas, 41, 103, 339
 pelo tamanho de população, 266-267
 Completicidade, desafio à mecânica quântica, 183-184, 186

- Complexidade. *Ver também* complexidade grosseira; complexidade efetiva.
 algorítmica, 52, 65, 235
 aumento de, 239-241, 252-253, 256-258
 computacional, 45, 116-117
 cultural, 86
 diferentes tipos de, 44-46
 do padrão de conexões, 47-49
 potencial, 86, 242
 problema de definição, 44-45, 49
 e tamanho de uma descrição, 47-49
- Complexidade computacional
 definição de, 45, 116
 e profundidade e cripticidade, 116-117
- Compressibilidade de cordas, 55
- Computadores. *Ver também* conteúdo de informação algorítmica, máquinas que aprendem.
 árvore de decisão para, 88-89
 modelo interno, 88-89
 processamento paralelo, 49, 53, 318
 quântico, 117
- Comte, Auguste, 124
- Conduitt, 101-102
- Consciência, 171, 172-173, 327
- Conservation International, 344-345
- Constante gravitacional, 214-215
- Cordas incompressíveis 55, 59, 122
- Cores dos quarks, 195
- Cosmologia quântica, 153-155, 223, 225
- Cooperação
 de esquemas, 254, 256
 necessidade de, 315
- Corliss, William R., 298
- Corporação RAND, 57, 58-60
- CPT, 209
- Crick, Francis, 82
- Cripticidade
 definição de, 117, 121
 e o teorizar, 121-122
- Criptografia quântica, 188-190
- Criticalidade auto-organizada
 aplicação às pilhas de areia, 113-115, 328
 leis do expoente e , 112-116, 328
- Cromodinâmica quântica, 197-199, 204, 206
 versus a eletrodinâmica quântica, 197-199
 simplicidade revelada pela, 197, 199
 spin dos quanta na, 209
- Crutchfield, James, 73
- CSICOP. *Ver* Comitê para a Investigação Científica das Alegações dos Paranormais.
- Darwin, Charles, 134, 304
A origem das espécies, 311
- Darwinismo social, 375
- Dawkins, Richard, 303
O relojoeiro cego, 327
- DeBono, Edward, 279, 280
- Decaimento exponencial, 148
- Decaimento radioativo, 148, 152, 168-170
- Decoerência, 162
 entrelaçamento em mecanismo de, 162
 de um objeto em órbita, 164
- Delbrück, Max, 134
- Deming, W. Edwards, 308
- Demônio de Maxwell, o, 233-235
- Dependência do contexto, 45, 50
- Desenrolando o carretel, 325
- Diagramas de Feynman, 202
- De Vries, 311
- Dinâmica quântica dos sabores, 203, 204, 206, 208
 spin dos quanta na, 209
- Dionisianos, 12
- Dirac, Paul Adrien Maurice, 125, 154, 193
- Distorção segregacional, 262
- Diversidade biológica, conservação da, 341-353
- Diversidade cultural, 350-351
- Diversidades sob ameaça
 avaliação rápida, 343, 345
 conservação da diversidade biológica, 341-348
 ciência e conservação tropical, 341-343, 374
 cultura popular universal, 351
 espectro de práticas conservacionistas, 346-348
 extinções provocadas pelo homem, 342-343, 357
 iluminismo versus diversidade cultural, 350
 importância dos trópicos, 341-342
 informação (desinformação?), 352-353
 população local e conservação, 347, 376
 preservação da diversidade cultural, 348-351, 370-371
 reconciliação, 352
 universalização versus particularização, 351
- Doença do bronze, 79-80
- Domínio quase clássico, 151-155, 164-166, 168
- da experiência familiar, 174, 176
 e o gato de Schrödinger, 168-169
 granulação grosseira para a inércia e a, 169-170
 máximo, 175, 178-181
 e medidas, 170-171
 objetos individuais na, 176-178
 possibilidade de domínios inequivalentes, 179
- Domínio quase clássico máximo, 175, 177-180
- Donelaitis, 348
- Durrell, Gerald, 314

- E. coli*. Ver *Escherichia coli*.
- ECHO, 327
- Ecossistemas, simples e complexos, 45-46
- EDQ. Ver Eletrodinâmica quântica.
- Ehrlich, Paul, 360
- Einstein, Albert. Ver também teoria da relatividade geral na gravitação.
explicação do movimento browniano, 168
rejeição da mecânica quântica, 143, 183-184
relação massa-energia, 206
relatividade restrita (ou especial), 274
sonho de uma teoria de campos unificada, 142-143
- Ekert, Artur, 188
- Eldredge, Niles, 251
- Eletrodinâmica quântica, 125-128, 191-193
aproximações para os processos químicos, 197-198
versus a cromodinâmica quântica, 197-199
- Elétron, 191-193
física fundamental do, 124-126
e o neutrino associado, 199-203
sabor do, 200
- Emmons, Louise, 344
- Empreendimento científico, o, 91-103
competição de esquemas, 103
falsibilidade e suspense, 94-96
formulação de uma teoria, 93
gravitação universal, teorias da, 101, 104
papel da teoria na ciência, 91-92
pressões seletivas sobre, 95-97
simplicidade das teorias, 100-101, 104
teorias que unificam e sintetizam, 97-100
teoria e observação, 91-94
teoria testada em relação às observações, 93-94, 307
- Englert, François, 207
- Entrelaçamento, 162
- Entropia, 117
aumento da, 233-234, 235
da complexidade algorítmica, 238-239
diminuição da, 233
e granulação grosseira, 237
como ignorância, 231-232
e informação, 231, 234-236
como medida de desordem, 230
nova contribuição para a, 234-236
e a segunda lei, 229, 232, 234, 335
- Equações de Maxwell, 97-98, 142-143, 330
confirmação das, 100
conseqüências das, 99-100
e a velocidade da luz conhecida, 99
simetrias das, 274
soluções ondulatórias das, 99-100
termo da corrente de deslocamento nas, 99
- Equação de Schrödinger, 330
com forças coulombianas, 126
- Equador, leste do, 22
- Eqüidade intergeracional, 365-366
- Equilíbrio pontuado, 250-252
- Equivalente moral da crença, 290-292
- Erwin, Terry, 46
- Escherichia coli*, 82-84
- Especialização versus integração, 32-33, 354-355
- Esquema (esquemas). Ver também Esquemas adaptativos.
esquemas mal-adaptativos
nos processos adaptativos, 34-35
competição de esquemas, 41, 103, 339
cooperação de esquemas, 254-256
representação pela intensidade de interação, 319
teorias como esquemas, 91
- Esquemas adaptativos, 302-315
ADN cultural, 303-305, 307
com humanos no circuito, 309-312
evolução da linguagem, 305-306, 307
níveis, 303-304
papel do indivíduo influente, 308-309
transmissão do comportamento animal, 302
- Esquemas mal-adaptativos, 302-316, 357
que conduzem à extinção, 304
e escalas temporais, 313-315
e janelas de maturação, 312-313
persistência dos, 311-315
e pressões seletivas externas, 306-308
- Esquema egoísta, 288-307
- Esquemas pessoais, 312
- Estados de energia, 126
- Estados nucleares de partículas, 199
- Estado quântico puro, 155
- Estados quânticos, 139-230
do universo, 155-156
- Estados quânticos mistos, 155
- Estruturas emergentes, 156
- Etnobotânica, 346
- Eventos de ruptura, 251-253, 270-271
- Everett, Hugh, 153-154, 166
- Evolução biológica, 35-36, 131, 232, 239, 243. Ver também seleção na evolução biológica.
abrangência temporal, 339
evolução cultural versus, 315
informação contida no genoma, 80, 85
a questão do impulso em direção à complexidade, 256-258
simulação de, 324-326
como sistema adaptativo complexo, 86, 247, 257
- Evolução da língua, 31-32, 166, 305-306, 307
- Evolução cultural, 303, 315, 339
- Evolução direcionada, 309-311
- Expansão do universo primordial, 156, 165, 169, 208, 219, 232

- Experimento EPBR, 186
 e a alternativa das variáveis
 escondidas, 186, 187
 aplicações potenciais do, 188-189
 Exponencial crescente, 148
 Extinção do Cretáceo, 115, 251, 340
 Extremófilos, 248-250, 260

 Famílias de férmions, 204-206
 Faraday, Michael, 97-99
 Farmer Dayne, 63
 Fenótipo, 84, 85, 251, 262
 Fermi, Enrico, 164, 217, 274
 Férmions, 191
 definição de, 140
 famílias de, 204
 Feynman, Richard, 154, 192, 202, 220
 Fierz, Markus, 298
 Fisher, Sir Ronald, 93
 Física da matéria condensada, 129
 Física das partículas elementares, 24, 26, 128
 e a explicação da multiplicidade da
 partículas, 144, 209, 211
 leis da, 27
 Fitzpatrick, John, 263
 Flutuações, 167
 Fontana, Walter, 325
 Fotino, 218
 Fótons, troca virtual de, 192-193, 196, 213
 Força de cor, 197-198
 Força de sabor, 203
 Força eletromagnética, 196, 203
 Força fraca, 274
 neutra, 202
 reações resultantes da, 201-208
 Força nuclear, 199
 Formação de espécies, 30
 definição de espécie, 31
 diversidade das espécies, 35, 341
 espécies que co-evoluem, 249, 250
 Foster, Robin, 344
 Fowler, William, 201
 Franklin, Benjamin, 191
 Franklin, Rosalind, 82
 Friedman, Jerome, 198
 Frost, Robert, "The Road Not Taken", 165,
 173

 Gell-Mann, Arthur (pai), 33-34, 104, 350
 Gell-Mann, Ben (irmão, atualmente Ben
 Gelman), 30, 32-33
 Gell-Mann, Margaret (primeira esposa), 25,
 94
 Gene egoísta, 262
 "Gene verdadeiramente egoísta", 262
 Genoma, 80, 85-85, 251-253, 262, 311
 Genótipo, 80, 83-85, 251, 264
 Gentry, Alwyn, 344
 GeV (giga-elétron-volt), 206
 Gilbert, William, 97

 Glashow, Sheldon, 203, 206
 Glúinos, 218
 Glúons coloridos, 196-197, 198
 Gödel, Kurt, 55
 Goldberger, Marvin "Murph", 39, 204
 Gould, Stephen Jay, 250
 Granulação grosseira, 46-47, 51, 169
 e entropia, 236, 238
 Gravitino, 217
 Gráviton, 140, 144, 217
 Green, Michael, 144
 Greenberg, Joseph, 305
 Griffiths, Robert, 154, 156
 Grossman, Marcel, 221
 Guatemala, 224
 Guralnik, Gerald, 207
 Gutenberg, Beno, 115

 h cortado (a constante de Planck dividida por
 dois pi), 214-215, 220
 Hagen, C.R., 207
 Haldane, J.B., 93
 Hamilton, William, 264
 Hartle, James, 153-154, 171, 179
 Havel, Václav, 370
 Hawking, Stephen, 169, 227, 238
 e o estado inicial do universo, 148, 155,
 219, 221, 228
 "A função de onda do universo," 153
 Heisenberg, Werner, 214
 Henderson, Hazel, 303
 Herder, 348
 Hierarquia das ciências, 132-136,
 biologia, informação para redução da,
 129-130
 bioquímica, 130-131
 critério para ser fundamental, 124-125
 eletrodinâmica quântica "reducionismo",
 134-135
 matemática, caráter especial da, 124-125
 mente e cérebro, 132-134, 172-173
 psicologia e neurobiologia, 132
 pontes ou escadas e redução da, 127-129
 a química considerada em seu próprio
 nível, 127
 química e a física fundamental do elétron,
 125-127
 a vida entre a ordem e a desordem, 131-
 132
 Higgs, Peter, 207
 Higgson (bóson de Higgs), 207-208, 210, 218
 Hinshelwood, Sir Cyril, 86, 87
 Histórias
 alternativas na mecânica quântica, 158-
 159, 161
 alternativas na pista de corridas, 157-158
 alternativas do universo, 153, 156-157,
 175, 222
 combinadas, 156-157
 finamente granuladas, 159-160, 161

- a mecânica quântica em termos de, 153
quase clássicas, 170
- Histórias com granulação grosseira, 160-161
decoerência de, 162-163, 164, 168
refinadas ao máximo, 175-176, 178
e termos de interferência, 161-162
do universo, 176, 178, 224
- Histórias com granulação grosseira decoerentes, 160-166
no domínio quase clássico, 166
estrutura tipo árvore da, 165
- Histórias do universo finamente granuladas, 159-160, 161
- Holdren, John, 360
- Holland, John, 320-321, 327, 332
- Hopfield, John, 319
- Horowitz, Mardi, 312
- Hufstedler, Shirley, 39
- Hunt, Morton, *The Universe Within*, 277
- Inca, império, 21
- Incomputabilidade, 55-57, 72
- Indecibilidade, 56-57
- Indeterminação, 155, 287
- Independência de escala, das leis do expoente, 113-114
- Indiferença, condição de, 232, 239
- Individualidade, noção de, 24-26, 242
- Infância, 30
- Informação. *Ver também* conteúdo de
informação algorítmica.
custo da, 335
definição, 54-55
na diversidade, 340
e entropia, 231-232, 234-236
e complexidade grosseira, 40-57
sistemas de coleta e utilização de, 171, 180, 225
teoria da, 50-53
e transição para um mundo sustentável, 371-372
- Informação mútua, 74
- Instituição Brookings, 355
- Instituto de Recursos Mundiais, 355, 358
- Instituto Santa Fe, 63, 255, 306, 320
fundação do, 27, 135
pesquisa sobre simplicidade e complexidade, 34, 115-116
programa de economia, 330-334
Projeto 2050, 335
como rebelião contra o reducionismo, 135
Science Board Symposium, 310
- Instituto de Tecnologia da Califórnia
estudos do cérebro e da mente no, 35
como instituição reducionista, 34-37
- Intensidade das interações, 318
- Interação forte, 319-320
- Interação quark-glúon, 196-197, 199
- Irreversibilidade, 237, 335, 363
- Ishi (o último yahi), 348
- Jaguarundi, encontro com o, 24-27
- Johst, Hanns, *Schlageter*, 169
- Joos, Erich, 154, 165
- Joyce, James, *Finnegans Wake*, 194
- Judson, Olivia, 266
- Kapitsa, Pyotr L., 297
- Kauffman, Stuart, 329
- Kendall, Henry, 198
- Khwarizmi, Muhammad ibn Musa, al, 52, 254
- Kibble, Thomas, 207
- Kirschvink, Joseph, 297
- Kolmogorov, Andrei N., 52-53, 235
- Kroeber, Alfred, 348
- Kroeber, Theodora, 348
- Kugelblitz (esfera de luz), 297
- Kuhn, Thomas, *A estrutura das revoluções científicas*, 102-103, 151
- Landauer, Rolf, 235
- Langton, Christopher, 310
- Laser, 140
- Lederberg, Joshua, 82
- Lee, T.D., 202
- Lei de Ampère, 99
- Lei de Coulomb, 99
- Lei de Zipf, 108-112, 113
- Leis de conservação, 99, 174
definição de conservação, 174
na mecânica quântica, 192
do spin isotópico, 274-275
- Leis de escala, 110-112, 114. *Ver também*
Leis do expoente.
- Leis do expoente, 110-113
aplicações às pilhas de areia, 113-115, 329
e a criticalidade auto-organizada, 113-116, 329
para a distribuição dos recursos, 329-330
na economia, 329
para eventos da natureza, 115-116
relação com os fractais, 112-113
e o tamanho e a intensidade dos terremotos, 115-116
- Leis universais da física, 26-27, 29
lei da gravitação. *Ver* Gravitação.
leis do eletromagnetismo, 100
- Lewis, Harold, 297-298
- Limits to Growth* (Clube de Roma), 371
- Lintgen, Arthur, 301
- Lloyd, Seth, 378
- Lorenz, Edward N., 43
- Lorenz, Konrad, *King Solomon's Ring*, 312, 313
- MacCready, Paul, 281-282
- MacNeill, Jim, 364
- Macroestados, 230-231
- Mágica simpática, 286

- Magnetismo, estudo do, 97-98
 Maia, língua, 22
 Maloney, Russell, *Inflexible Logic*, 64
 Mandelbrot, Benoît
 The Fractal Geometry of Nature, 112
 trabalho sobre as leis do expoente, 110-112
 Máquinas que aprendem, 317-335
 e a abordagem evolutiva à economia, 330-335
 e algoritmos genéticos, 320-322
 e a leitura do inglês em voz alta, 318-319
 e redes neurais de computação, 317-320
 e a simulação da evolução biológica, 324-328
 simulação de conjuntos de agentes adaptativos, 328-330
 e a simulação de sistemas adaptativos complexos, 322-324
 Marcum, Jess, 60
 Marte, posições de, 165-167
 Massa de Planck, 212, 213, 215, 216, 218
 Matemática,
 com base no binômio regra-agente 330-331
 caráter especial da, 124-125
 e o contínuo, 330
 discreta, 330
 pura versus aplicada, 124
 Maxwell, James Clerk, 97, 100, 234
 Mayr, Ernst, 30-31, 298
 Mecânica quântica
 e a aproximação clássica, 42, 151, 180
 caráter protiano da, 178-179
 e o colapso da função de onda, 172
 descoberta da, 139
 como estrutura para a teoria física, 24
 versus a física clássica, 24, 151
 histórias alternativas na, 157-159
 indeterminação originária da, 40-43
 interpretação moderna da, 24, 152-155, 180
 a mecânica quântica aproximada dos sistemas mensuráveis, 152-153
 natureza probabilística da, 41, 148-149, 151, 156, 159
 sucessos da, 24, 184-185
 visão contemporânea da, 151-181
 para tratar individualidades, 24, 26, 27
 Mecanismo de Anderson-Higgs, 207-208, 209, 216
 Meme, 303
 Mendel, Gregor 311
 Mercados financeiros, caos determinístico no, 62-63,
 Método de Monte Carlo,
 para efetuar somas, 61
 números randômicos e o 60-61
 Microfinanciamento, 365, 374
 Microestados, 230-231
 MIT (Massachusetts Institute of Technology), 91
 Modelo padrão, 191-211
 e a aproximação de massa nula, 206, 207
 defeitos do, 141-142
 como generalização da EDQ, 194
 e massas não-nulas (energias), 206-207, 208
 mecanismo de Anderson-Higgs, 207-208
 e a multiplicidade das partículas, 210-211
 renormalizabilidade do, 213, 218
 e violação espontânea de simetria, 207-208, 209
 e violação da simetria temporal, 208
 Modelo superpadrão, 218-219
 Momento angular de spin (spin), 92, 186, 209
 Morgan, T.H., 134
 Morowitz, Harold, 225, 251, 253
 Movimento browniano, 168
 Movimento dos célicos, 292-293
 fenômenos que supostamente desafiam a ciência, 299-300
 e alegações dos paranormais, 292-294
 e a ciência, 295-299
 "Muitos mundos", 153-154, 165-166
 Mundo sustentável, 354-375
 e destruição originada pela atividade humana, 357-358
 equidade intergeracional, 364-366
 especialização e integração necessárias em um, 354-355
 população e recursos naturais, 358
 qualidade sustentável, 364-366, 368-370
 significado de "sustentável", 356-357
 transição demográfica para um, 358-360
 transição econômica para um, 362-364
 transição ideológica para um, 368-371
 transição informacional para um, 370-375
 transição institucional para um, 366-368
 transição social para um, 365-366
 transição tecnológica para um, 360-362
 "Mundos Goblin", 181
 Munn, Charles A., 269-270
 Múon, 204
 Mutação do gene, 83-85, 270-271, 311
 Napo, rio, 21
 Neddermeyer, Seth, 204
 NETalk, 318-319
 Neurofisiologia, 132-134
 Neutrino, 199-206
 Neutrino associado ao elétron, 199-203
 Neutrino associado ao múon, 204
 Neutrino associado ao táuon, 204
 Nêutron, 195-198
 descoberta do, 194
 Neveu, André, 144
 Newton, Isaac

- constante gravitacional de, 213-215
 equações de movimento de, 166
 lei da gravitação de, 101-104, 152
 e a lenda da queda da maçã, 101-102
- Nietzsche, 12
- Nobel, Alfred, 123
- Números randômicos, 60, 64
 definição, 61
 gerados por computador, 61
 e o método de Monte Carlo, 60-61
- Observação de pássaros, 23, 25-26, 31
- Odisseianos, 12
- Ommès, Roland, 154-156
- Oppenheimer, Robert, 297
- Otimização, 322, 325
- Origem da vida na Terra, 34, 37, 131, 150, 225, 232, 252, 324
- Organismos digitais, 324-325
- Oersted, Hans Christian, 97
- Packard, Norman, 63, 329
- Padrão de reconhecimento, 105, 288, 307
 nas artes, 289
- Palmer, Richard, 332
- PãnaCocha, 22
- Parâmetro, definição de, 111
- Pareto, Vilfredo, 329
- Parker, Theodore A., 344-345
- Partículas estranhas, 274-275
- Partenogênese, 263-264
- Pensamento criativo, 273-285
 aceleração no processo de, 277-278, 280
 cenários de aptidão para o, 278-279
 na ciência teórica, 273-276
 experiências compartilhadas no, 275-277
 limites verdadeiros de um problema, 282-285
 medida do, 281-282
 período de incubação, 276-279
 problema da formulação, 281, 285
 sessão de discussão, 279
 transferência das habilidades de raciocínio, 279
- Pensamento mágico, 286
- Perkins, David, 280
- Peterson, Ivars, *Newton's Clock*, 42
- Piranhas, 22
- Planck, Max, 183, 214
- Plasticidade, 312-313
- Plínio, o Velho, 357
- Plotkin, Mark J., *Tales of a Shaman's Apprentice*, 349
- Pobres, esforços dos, 360-361, 366
- Poder da teoria, o, 105-122
 independência de escala, 113-116
 profundidade e cripticidade, 116-122
 teoria empírica — Lei de Zipf 108-112
 tecendo teorias sobre os nomes de lugares, 107-108
- "teórico": as duas utilizações da palavra, 106-197
- Podolsky, B., 183, 185
- Poincaré, Henri, 277
Science and Method, 42-43
- Popper, Karl, 94
- Pósitron, 140
 descoberta do, 193
- Prêmios Nobel, 124, 193, 198, 203, 207
- Pressões seletivas, 40, 306, 315, 350
 no empreendimento científico, 95-97
 exercidas pelos seres humanos, 309-312
 que favorecem bactérias resistentes às drogas, 84
 nas organizações, 308
 tipos não-científicos de, 307-308
- Primeira lei da termodinâmica, 229-230
- "Princípios Antrópicos", 224-225
- Princípio da ação mínima, 221-222
- Princípio da autoconsistência, 145, 221
- Princípio de antiexclusão, 139, 191
- Princípio de equivalência, 103
- Princípio de exclusão de Pauli, 139, 191
- Princípio de incerteza, 155, 159, 178, 192
- Probabilidades, 156-157. *Ver também* Histórias alternativas.
 na mecânica quântica, 41, 148-149, 151, 156, 159
 probabilidades exatas e chances cotadas, 163-164
- Probabilidades verdadeiras, 161-162
- Processo randômico (aleatório), 64
- Processos ao acaso. *Ver* Randomicidade.
- Processos estocásticos, 60, 62, 63. *Ver também* Randomicidade.
 flutuações de preço como, 62-63
- Profundidade 116-121
 e bioquímica, 130-131
 e conteúdo de informação algorítmica, 119-121
 definição de, 117-119
 exemplo hipotético, 117-118
 uma olhada mais profunda na, 118-120
 e simplicidade, 117-118
- Programa de avaliação rápida, 342-345
- Projeto 2050, 355
- Prótons, 194-197, 198
- Pseudo-randomicidade, 61-62, 63, 89
- Psicanálise, como teoria do comportamento humano, 94-96
- Psicologia,
 como estudo da mente, 133
 natureza físico-química da, 132
- Prospecção química, 346
- Quantum (Quanta)
 definição, 140
 positiva e negativamente carregado, 202
- Z⁰, neutro, 203-204
- Quark

- atribuição do nome, 29, 194
- confinados no nêutron e próton, 195-196, 199
- cores dos, 195
- matemáticos versus reais, 196
- fazendo um nêutron ou um próton com, 195
- forças entre, 196
- predição de, 29
- prova experimental dos, 198
- sabores de, 197
- tipo *b*, 294
- tipo charmoso ou *c*, 204
- tipo estranho ou *s*, 204
- tipo top ou *t*, 204
- "Quarteto de cordas de Princeton", o, 144
- Quebra espontânea de simetria, 207-211, 241
- Quéchua, 21
- Química
 - cálculos com EDQ dos processos químicos, 126-127
 - derivável da física das partículas elementares, 128
 - e a física fundamental do elétron, 125-127 no seu próprio nível, 127
- Ramond, Pierre, 144
- Randi, James, 300
- Randomicidade, 58-65, 241
 - CIA como medida da, 57
 - e complexidade efetiva, 65
 - e o método de Monte Carlo, 59-60, 63
 - no universo quântico, 139-149
 - e processos estocásticos, 59-64
 - pseudo-randomicidade, 61-62, 64
 - separada da regularidade, 72
 - Shakespeare e os macacos proverbiais, 64-65
 - significados de "randômico", 59-60, 63
- Randomicidade algorítmica, 52, 57, 65
- Ray, Thomas, 324-327
- Reações term nucleares, 129
- Redução, 128-132, 135. *Ver também* Hierarquia das ciências.
- "Reduccionismo", 132, 134-135
- Regularidades
 - classes identificadoras de, 73-74
 - e complexidade efetiva, 71-72, 178
 - nos fluxos de informação, 40, 71, 72, 74, 122, 287
 - invenção da, superstição, 287-289, 294
 - originárias dos acidentes congelados, 149
 - separada da randomicidade, 72
- Relatividade especial (restrita), 273
- Renormalizabilidade, 213, 218
- Reprodução sexual, 262, 264-266
- Resistência às drogas nas bactérias, 79-90
 - evolução da, 81-85
 - mutante resistente, 83-84
 - teoria errônea da, 86-87
- Richardson, L.F., 80
- Richter, Charles, 115
- Robôs, 88-90
- Rosen, Harold, 144
- Rosen, N., 185
- Rosenberg, C.R., 318
- Rubbia, Carlo, 202
- Sakharov, Andrei, 209
- Sakiestewa, Ramona, 29
- Salam, Abdus, 123, 203
- SCUI (sistemas de coleta e utilização de informação), 171, 180, 225
- Scherk, Joël, 144
- Schultes, Richard, 349
- Schumaker, John F., *Wings of Illusion*, 291
- Schuwartz, Peter, *The Art of the Long View*, 372
- Schwarz, John, 144
- Segunda lei da termodinâmica
 - entropia e, 229, 231, 233-234, 235
 - aplicação da, 233-234
 - evolução biológica e a, 247-248
 - irreversibilidade e, 335, 363
- Sejnowski, Terrence, 318
- Seleção artificial, 311
- Seleção natural, 79
- Seleção na evolução biológica, 247-271
 - aptidão e, 259-266
 - e aumento da complexidade, 253-254, 257
 - cooperação de esquemas e, 254-256
 - engodo entre pássaros e, 269-270
 - e equilíbrio pontuado, 250-251, 271, 324
 - espécies co-evolutivas e, 249-250
 - gene egoísta e, 262
 - morte, reprodução e população, 266-267, 325
 - pequenos passos e grandes mudanças, 270-271
 - preenchimento de nichos ecológicos e, 267-269
- Selétrons, 218
- Seminários do Instituto Aspen, 112, 275, 314
- Seta do tempo cosmológica, 238
- Seta psicológica do tempo, a, 238-239
- Setas do tempo, 227-243
 - definição, 147
 - e as condições iniciais do universo, 145, 147
 - entropia e segunda lei, 229-230, 231, 237-238
 - e maior complexidade, 238-241
 - e a evolução biológica, 250
 - e a ordem no passado, 232-234
 - passado e futuro, 227-228
 - radiação e registros, 227

- termodinâmica, 232
- SETI (Busca de inteligência extraterrestre), 225, 268
- Shannon, Claude, 53, 234
- Simetria matéria-antimatéria, violação da, 208-209
- Simetria partícula-antipartícula, 193
- Simon, Herbert, 77
- Simplicidade
definição de, 44-45
profundidade e, 117-118
revelada pela cromodinâmica quântica, 198-199
das teorias unificadoras, 100-101, 104
no universo quântico, 139-150
- Sims, Karl, 309-311, 328
- Skeptical Inquirer*, 292-293, 300
- Sistema imunológico, 37-39
- Sistemas adaptativos complexos, 29, 34-39
algoritmos genéticos como, 320-322
e aquisição de uma linguagem, 305-306
aspectos de processamento em comum de, 35
computadores como, 89, 317-318
definindo "complexo", 44-45, 48
economias como, 331
efeito da evolução direcionada, 311
o empreendimento científico como, 91-92
e esquemas mal-adaptativos, 306, 308
e evolução biológica, 34, 37, 78, 247, 257
e mitologia, 289
evolução não-adaptativa versus, 27, 247, 257
como observador, 74-76, 171-172
humanos como, 35
ilustrações, 35-37
operação de um, 41
entre ordem e desordem, 261
organização como, 308
simulação de, 322-324
- Sistemas especialistas, 88
- Sistema fechado, 229-233, 247-248
- Smith, John Maynard, 266
- Sociobiologia, 369-370
- Software de algoritmo genético,
aplicações do, 322
descrição do, 320-321
e sistema classificador, 320-321
- Solomonoff, Ray, 52-53, 235
- Southwick, Marcia (esposa), 101
- Sperry, Roger, 133
- Speth, J. Gustave, 358
- Spin isotópico, 92, 186, 209
- Squarks, 218
- SSC. *Ver* Superconducting Supercollider.
- Starobinsky, A.A., 191-211
- Superconducting Supercollider, 141-217
- Superlacuna, 217
- Supernova, 233
- Superparceiros e os novos aceleradores, 217-218
- Superstição, 275
aberração mental e sugestibilidade, 295
e ceticismo, 286-292
mito na arte moderna e sociedade e, 288-291, 353
originária do medo, 287-288, 294, 307
originária de regularidades inventadas, 287-289, 294
- Swift, Jonathan, 80
- Sze, Arthur, 30
- Szilard, Leo, 39, 234
- Táuon, 204
- Taylor, Richard E., 198
- Teoria. *Ver* Poder da teoria; empreendimento científico.
- Teoria da informação, 51, 53-54
- Teoria das supercordas, 143-145, 212-225
multiplicidade aparente das soluções, 219-220, 223
abordagem à massa de Planck na, 218
unidades básicas de energia, 214-215
e a árvore ramificada de soluções, 223
comparação com as observações, 213-214
forma heterótica da, 143-144, 208, 212, 216
setor de pequenas massas da, 212-213
significado de "supercorda", 216-217
massas de partículas e unidade básica, 215-216
predições da, 218-219
- Teorias de calibre, 206
- Teoria de Tudo (TOE), 145
- Teoria do eletromagnetismo, 97-100. *Ver também* equações de Maxwell.
quântica relativística do, 125
- Teoria empírica — Leis de Zipf, 108-113
- Teoria fenomenológica, 108
- Teoria da relatividade geral para a gravitação, 34, 101-104, 142-143, 221, 330
confirmação pelas observações, 102, 168
equações para o campo gravitacional, 103, 221
e o princípio de equivalência, 103
e a geometria do espaço-tempo, 103
teoria de Newton versus a, 102-103
e a propagação de influências gravitacionais, 103
simplicidade da, 104
- Teoria heterótica das supercordas, 143-145, 208, 212, 215
- Teoria quântica de campos
hipóteses da, 191
simetria partícula-antipartícula na, 193-194
EDQ como exemplo de, 191-194

- dos quarks e glúons, 197
- Teoria quântica relativística do elétron e do eletromagnetismo, 125. *Ver também* Eletrodinâmica quântica.
- Teoria unificada de campos, 143-145, 212. *Ver também* teoria das supercordas, incorporação da gravitação einsteiniana, 213-214
- Termos de interferência, 158-165
- Thurber, James, 50
- TIERRA, 324-328, 331
- Tikal, 22
- TOE (Teorias de Tudo), 145
- Transições, 354
- Trivers, Robert, 262
- Troca virtual de fótons, 192-193, 196
- Ulam, Stanislaw, 214
- Universo quântico, 41
estado quântico do universo, 154-156
simplicidade e randomicidade no, 139-149
- Universos-bebês, virtualmente criados e destruídos, 223
- Universos múltiplos, 223-224
- Updike, John, "Cosmic Gall", 200-201
- Van der Meer, Simon, 203
- Velocidade da luz, 99, 214-215, 228
- Versão homeopática da magia simpática, 105-106
- Viagens à América Central e do Sul, 21-26, 249, 344
- Vida,
características diferenciadoras da, 80
em outros planetas, 130-131, 268, 288
entre a ordem e a desordem, 131-132
- Viscaíno, Sebastián, 107
- Volta, Alessandro, 97
- Wallas, Graham, 277
- Watson, James, 82
- Weinberg, Steven, 203
- Weisskopf, Victor, 88
- Wells, H.G., 32
- Wheeler, John A., 153
- Wiener, Norbert, 88
- Wiesenfeld, Kurt, 113
- Wilkins, Maurice, 82
- "Winos", 217
- Woolfenden, Glen, 263
- Wright, Sewall, 93
- Wright, Will, 372
- Yang, C.N., 202
- Yang-Mills, teorias de, 206
- Zeh, Dieter, 154, 165
- Zel'dovich, Ya.B., 209
- Zipf, George Kingsley, 110-111
- Żurek, Wojciech ("Wojtek"), 154, 165
- Zwiobach, Barton, 220

Rua Luanda = 332904

Este livro foi composto pela
Art Line Produções Gráficas Ltda.
Rua Visconde de Inhaúma, 64 - Centro - RJ
e impresso na Editora JPA Ltda.
Av. Brasil, 10.600 - Rio de Janeiro - RJ
em outubro de 1996
para a Editora Rocco Ltda.

O QUARK E O JAGUAR

Autor: MURRAY GELL-MANN

EDITORA DIGITAL

"ÁGUA PRECIOSA"

Telefone: 923 407 949

Projecto gráfico

MUKERENG MPÔIO CALUNGA CARDOSO



Todos os direitos desta obra reservados a

MURRAY GELL-MANN

Este E-book está protegido por

Leis de direitos autorais na "CPLP" "SADC" e "PALOP"

=====

"CPLP" COMUNIDADE DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA

"SADC" COMUNIDADE DOS PAÍSES DA ÁFRICA AUSTRAL

**"PALOP" PAÍSES AFRICANOS DE LÍNGUA OFICIAL
PORTUGUESA"**

Esta obra está sob uma *Licença Commons*.

Você pode copiar, distribuir, exibir, desde que

Seja dado crédito aos autores originais -

Não é permitido modificar esta obra.

Não pode fazer uso comercial desta obra.

Não pode criar obras derivadas.

A responsabilidade

Pelos textos, músicas e imagens

É exclusivamente do Autor.

rias, ou um artista executando uma idéia criativa.

O quark e o jaguar é a própria história da descoberta de Gell-Mann das conexões entre as leis básicas da física e a complexidade e diversidade do mundo natural.

O AUTOR

Murray Gell-Mann é professor emérito de física teórica do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) e recebeu o prêmio Nobel de física de 1969. Em 1984 ajudou a estabelecer o Instituto Santa Fé, onde agora trabalha. Os cientistas e estudiosos deste instituto dedicam-se a trabalhos teóricos sobre tópicos que vão desde a mecânica quântica até o sistema imunológico dos mamíferos, a evolução das línguas humanas e a economia global como sistemas complexos em evolução. Por seu trabalho em prol do meio ambiente mundial, foi nomeado um dos quinhentos Globais pelo Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas. Em 1993 recebeu o prêmio Lindberg por seus esforços em promover o equilíbrio entre o avanço tecnológico e a preservação do meio ambiente.

O QUARK E O JAGUAR

O quark e o jaguar transmitem perfeitamente os dois aspectos da natureza: o simples e o complexo. Assim como o quark é o símbolo das leis físicas que, uma vez descobertas, surgem completas ante a mente analítica, o jaguar é uma metáfora possível para o ardiloso sistema adaptativo complexo.

Ao explorar as conexões entre as leis básicas da física e a complexidade e diversidade do mundo natural, Murray Gell-Mann, um dos maiores cientistas de nosso século, realiza um estimulante corte através do conhecimento humano.

Recco

ISBN 85-325-0567-8



9 788532 505675