

JAMES GLEICK
CAOS

A CRIAÇÃO DE UMA NOVA CIÊNCIA

Tradução
Waltensir Dutra

Revisor Técnico
Hélio Fernando Verona de Resende
*Doutorando em Física pelo
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

Editora Campus

Do original:
Chaos — Making a New Science
Copyright © 1987 by James Gleick.

© 1990, Editora Campus Ltda.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei 5988 de 14/12/73.
Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da
editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os
meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação
ou quaisquer outros.

Capa
Otavio Studart

Copy-desk
Paula Rosas

Composição
JP Composição e Artes Gráficas Ltda.

Revisão
Maria do Rosário
Kátia Regina

Projeto Gráfico
Editora Campus Ltda.

Qualidade internacional a serviço do autor e do leitor nacional.

Rua Barão de Itapagipe, 55 Rio Comprido
Telefone: (021) 293 6443 Telex: (021) 32606 EDCP BR
FAX (021) 293 5683
20261 Rio de Janeiro RJ Brasil
Endereço Telegráfico: CAMPUSRIO

ISBN 85-7001-594-1

(Edição original: ISBN 0-670-81178-5, Viking Peguim Inc., Canadá.)

Ficha Catalográfica
CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte.

Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

Gleick, James.

G468c Caos: a criação de uma nova ciência / James Gleick; Tradução de Waltensir Dutra
4ª ed. — 4ª ed. — Rio de Janeiro: Campus, 1991.

Tradução de: Chaos — Making a new science.

Bibliografia.

Índice.

ISBN 85-7001-594-1

1. Comportamento caótico nos sistemas. 2. Ciência. I. Título.

89-0433

CDD — 500
CDU — 51

93 94 95 9 8 7 6 5

Impressão e acabamento
(com filmes fornecidos):
EDITORA SANTUÁRIO
Fone (0125) 36-2140
APARECIDA - SP

C • A • O • S

O Efeito Borboleta

*Os físicos acham que tudo o que temos de fazer é dizer:
estas são as condições, o que acontece em seguida?*

— RICHARD P. FEYNMAN

O sol castigava, percorrendo um céu que nunca tinha visto nuvens. Os ventos varriam uma terra tão lisa quanto o vidro. A noite não caía nunca, e o outono nunca dava lugar ao inverno. Nunca chovia. As condições atmosféricas simuladas¹ no novo computador eletrônico de Edward Lorenz variavam de maneira lenta mas segura, atravessando um constante meio de estação seca, como se o mundo se tivesse transformado em Camelot, ou numa versão particularmente amena do sul da Califórnia.

Pela janela, Lorenz via o tempo que realmente fazia do lado de fora, a cerração de princípio de manhã arrastando-se pelo *campus* do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, ou as nuvens baixas deslizando sobre os telhados, vindas do Atlântico. Cerração e nuvens nunca surgiam no modelo do seu computador. A máquina, um Royal McBee, era uma floresta de fios e válvulas eletrônicas que ocupava uma parte desajeitadamente grande do escritório de Lorenz, fazia um barulho surpreendente e irritante, e enguiçava quase todas as semanas. Não tinha a velocidade nem a memória necessárias a uma simulação realista da atmosfera e dos oceanos terrestres. Não obstante, Lorenz criou um tempo atmosférico de brinquedo em 1960 que conseguiu fascinar seus colegas. A cada minuto a máquina marcava a passagem de um dia, imprimindo uma série de números numa página. Quem soubesse lê-los, veria um vento predominantemente oeste passar ora para norte, ora para sul, e outra vez para norte. Ciclones digitados giravam lentamente em volta de um globo idea-

lizado. Quando a notícia se espalhou pelo departamento, os outros meteorologistas passaram a se reunir em volta da máquina com alunos de pós-graduação, fazendo apostas sobre como se apresentaria, em seguida, o tempo atmosférico de Lorenz, onde, de alguma forma, nada se repetia.

Lorenz gostava do tempo — o que não é condição necessária a um pesquisador meteorológico. Gostava da sua instabilidade. Apreciava as configurações que se formam e desaparecem na atmosfera, famílias de redemoinhos e ciclones, obedecendo sempre a regras matemáticas, porém nunca se repetindo. Quando olhava para as nuvens, acreditava ver nelas certa estrutura. Outrora, ele tinha receado que estudar a ciência das condições meteorológicas fosse como mexer numa caixa de surpresas com uma chave de parafusos. Agora, ficava imaginando se a ciência seria realmente capaz de desvendar a mágica. O tempo tinha um sabor que não se podia expressar falando de médias. A temperatura máxima do dia em Cambridge, Massachusetts, é em média 25 ° C em junho. O número de dias chuvosos em Riad, na Arábia Saudita, é em média de 10 por ano. Isso eram estatísticas. A essência estava na maneira pela qual as configurações atmosféricas se modificavam com o passar do tempo, e era isso o que Lorenz conseguia captar com o Royal McBee.

Ele era o deus desse universo de máquina, livre para escolher as leis da natureza que quisesse. Depois de certo número de tentativas e erros que nada tinham de divino, ele escolheu 12. Eram regras numéricas² — equações que expressavam as relações entre temperatura e pressão, entre pressão e velocidade do vento. Lorenz compreendeu que estava colocando em prática as leis de Newton, ferramentas adequadas para um deus mecânico que podia criar um mundo e colocá-lo em funcionamento para a eternidade. Graças ao determinismo da lei física, não seriam necessárias novas intervenções. Os que faziam tais modelos tinham como certo que, do presente para o futuro, as leis do movimento proporcionavam uma ponte de certeza matemática. Compreendendo as leis, compreendia-se o universo. Era essa a filosofia por trás da criação de um modelo de tempo atmosférico num computador.

Realmente, se os filósofos do século XVIII imaginassem o seu criador como um não-intervencionista benigno, satisfeito em ficar nos bastidores, poderiam ter imaginado alguém como Lorenz. Ele era um meteorologista estranho. Tinha o rosto marcado de um fazendeiro ianque, com olhos surpreendentes, brilhantes, que lhe davam a aparência de estar rindo mesmo quando não estava. Raramente falava de si, ou do seu trabalho, mas ouvia. Perdia-se, com frequência, num reino de cálculos ou sonhos que era inacessível aos cole-

gas. Seus amigos mais próximos achavam que Lorenz passava boa parte do tempo num remoto espaço sideral.

Quando menino, fora um apaixonado do tempo, a ponto de manter tabelas bastante exatas das temperaturas máxima e mínima durante o dia, acusadas pelo termômetro do lado de fora da casa dos pais, em West Hartford, Connecticut. Passava, porém, mais tempo dentro de casa, brincando com livros de problemas matemáticos do que olhando o termômetro. Por vezes, resolvia os problemas junto com o pai. Certa vez os dois depararam com um problema particularmente difícil que se revelou insolúvel. Isso era aceitável, disse-lhe o pai: sempre se pode resolver um problema provando que não há solução. Lorenz gostou disso, como sempre gostava da pureza da matemática,⁵ e quando se formou no Dartmouth College, em 1938, achava que a matemática era a sua vocação. As circunstâncias interferiram, porém, sob a forma da Segunda Guerra Mundial, que o levou a trabalhar como meteorologista para a Força Aérea. Depois da guerra, Lorenz resolveu continuar na meteorologia, investigando-lhe a teoria, dando um pouco mais de destaque à matemática. Adquiriu renome publicando trabalhos sobre problemas ortodoxos, como a circulação geral da atmosfera. Enquanto isso, continuava a pensar na previsão do tempo.

Para a maioria dos meteorologistas sérios, a previsão não chegava a ser uma ciência. Era uma coisa mais instintiva ou prática, feita por técnicos que precisavam de certa capacidade intuitiva para ler o tempo do dia seguinte nos instrumentos e nas nuvens. Era uma adivinhação. Em centros como o M. I. T., a meteorologia preferia os problemas que tinham soluções. Lorenz compreendeu melhor do que ninguém a confusão que havia na previsão do tempo, da qual tinha experiência direta, trabalhando para pilotos militares. Continuava, porém, interessado no problema — um interesse matemático.

Não só os meteorologistas desprezavam a previsão, como também, na década de 60, praticamente todos os cientistas sérios desconfiavam dos computadores. Aquelas calculadoras incrementadas não pareciam instrumentos para a ciência teórica. Por isso, os modelos meteorológicos numéricos eram uma espécie de problema bastardo. Seu momento, porém, tinha chegado. A previsão do tempo esperava há dois séculos por uma máquina que pudesse repetir milhares de cálculos, muitas vezes pela força bruta. Só um computador poderia explorar a promessa newtoniana de que o mundo se desdobrava de maneira determinista, tão governado por leis quanto os planetas, tão previsível quanto os eclipses e as marés. Teoricamente, o computador permitia aos meteorologistas fazer aquilo que os astrônomos vinham fazendo com lápis e régua de cálculo: prever o futuro do universo a partir de suas condições iniciais, e as

leis físicas que guiam a sua evolução. As equações que descreviam o movimento do ar e da água eram tão bem conhecidas quanto as que descreviam o movimento dos planetas. Os astrônomos não alcançaram a perfeição, e nunca a alcançarão, não num sistema solar às voltas com as gravidades de nove planetas, dezenas de luas e milhares de asteróides, mas os cálculos dos movimentos planetários eram tão precisos que as pessoas se esqueciam de que eram previsões. Quando um astrônomo dizia: "O cometa Halley voltará por aqui dentro de 76 anos", isso parecia um fato, e não uma profecia. A previsão numérica determinista calculava rotas precisas para naves espaciais e mísseis. Por que não para os ventos e as nuvens?

O tempo era muitíssimo mais complicado, mas era governado pelas mesmas leis. Talvez um computador suficientemente potente pudesse constituir-se na inteligência suprema imaginada por Laplace, o filósofo matemático do século XVIII que, mais do que ninguém, foi atacado pela febre newtoniana: "Essa inteligência", escreveu ele, "abarcaria⁴ na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e os do menor átomo; para ela, nada seria incerto, e o futuro, como o passado, estaria presente aos seus olhos." Nestes dias da relatividade de Einstein e da indeterminação de Heisenberg, Laplace chega quase a parecer ridículo em seu otimismo, mas grande parte da ciência moderna vem perseguindo o seu sonho. Implicitamente, a missão de muitos cientistas do século XX — biólogos, neurologistas, economistas — tem sido decompor o universo em seus átomos mais simples, que obedeçam a regras científicas. Em todas essas ciências, uma espécie de determinismo newtoniano tem influído. Os pais da computação moderna tiveram sempre Laplace em mente, e a história do computador e a história da previsão do tempo estiveram ligadas desde que John von Neumann inventou suas primeiras máquinas no Instituto de Estudos Avançados, em Princeton, Nova Jersey, na década de 50. Von Neumann reconhecia que a criação de um modelo de previsão do tempo podia ser a tarefa ideal do computador.

Havia sempre uma pequena ressalva, tão pequena que os cientistas práticos em geral se esqueciam da sua presença ali, num canto de suas filosofias, como uma conta a ser paga. As mensurações nunca podiam ser perfeitas. Os cientistas que marchavam sob a bandeira de Newton na realidade agitavam também uma outra bandeira, que dizia algo mais ou menos assim: Dado um conhecimento *aproximado* das condições iniciais de um sistema e um entendimento da lei natural, pode-se calcular o comportamento *aproximado* desse sistema. Tal suposição estava no coração filosófico da ciência. Como um teórico gostava de dizer aos seus alunos: "A idéia básica da ciência ocidental é que não temos de levar em conta a que-

da de uma folha em algum planeta de outra galáxia quando estamos tentando explicar o movimento de uma bola de bilhar numa mesa de bilhar, na terra. Influências muito pequenas podem ser postas de lado. Há uma convergência na maneira pela qual as coisas funcionam, e influências arbitrariamente pequenas não crescem a ponto de ter efeitos arbitrariamente grandes.”⁵ Classicamente, a crença na aproximação e na convergência estava bem justificada. Funcionava. Um pequeno erro na fixação da posição do cometa Halley em 1910 provocaria apenas um pequeno erro na previsão de sua chegada em 1986, e o erro continuaria sendo pequeno por milhões de anos futuros. Os computadores baseiam-se na mesma suposição, ao guiarem naves espaciais: um insumo aproximadamente exato dá um resultado aproximadamente exato. As previsões econômicas baseiam-se nessa suposição, embora seu sucesso seja menos evidente. E o mesmo fizeram os pioneiros na previsão global do tempo.

Com o seu computador primitivo, Lorenz tinha reduzido o tempo atmosférico aos elementos essenciais. Não obstante, linha por linha, os ventos e as temperaturas dos resultados impressos pelo seu computador pareciam comportar-se de uma maneira terrena reconhecível. Eles correspondiam à sua querida intuição sobre o tempo, sua sensação de que ele se repetia, revelando padrões conhecidos, a pressão aumentando e caindo, as correntes de ar oscilando entre norte e sul. Descobriu que quando uma linha passava do alto para baixo sem um salto, ocorreria em seguida um salto duplo, e disse: “É esse o tipo de regra que um meteorologista pode usar.”⁶ Mas as repetições nunca eram perfeitamente iguais. Havia um padrão, com alterações. Uma desordem ordenada.

Para tornar evidentes os padrões, Lorenz criou um tipo de gráfico primitivo. Em lugar de imprimir as séries habituais de dígitos, fazia a máquina imprimir certo número de espaços em branco, seguidos da letra *a*. Tomava uma variável — talvez a direção da corrente de ar. Gradualmente, os “as” deslizavam pelo rolo de papel, oscilando de um lado para outro numa linha ondulada, formando uma longa série de morros e vales que representavam a maneira pela qual o vento oeste oscilaria para norte e sul, através do continente. A ordem que havia nisso, os ciclos identificáveis repetindo-se sem nunca ser precisamente iguais duas vezes, tinham um fascínio hipnótico. O sistema parecia estar revelando, lentamente, os seus segredos aos olhos do meteorologista.

Certo dia, no inverno de 1961, querendo examinar mais detalhadamente uma seqüência, Lorenz tomou um atalho. Em lugar de refazer toda a seqüência, começou pelo meio. Para dar à máquina suas condições iniciais, digitou os números diretamente da impressão anterior. Depois deu uma volta pelo corredor, para fugir do ba-

ruído e tomar um café. Ao voltar, uma hora depois, viu algo inesperado, algo que plantou a semente de uma nova ciência.

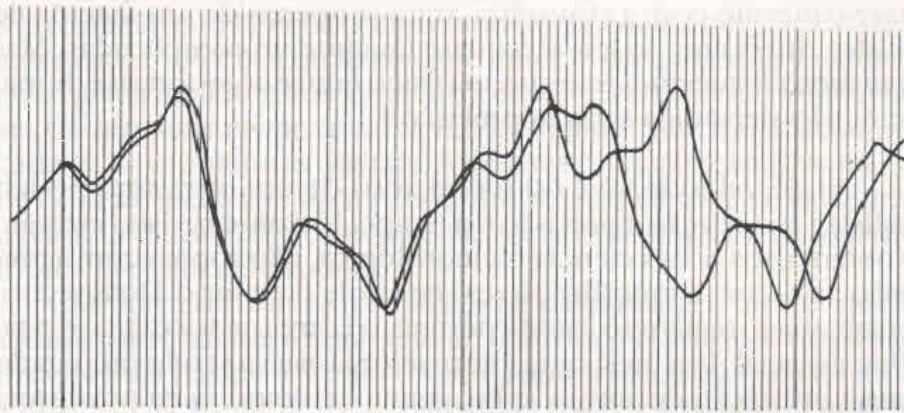
Essa nova seqüência deveria ter sido uma repetição exata da anterior. Lorenz tinha copiado os números na máquina, pessoalmente. O programa não fora modificado. Não obstante, ao olhar para a nova impressão, Lorenz viu seu tempo divergindo tão rapidamente do padrão da última seqüência que, em poucos meses, toda a semelhança desaparecera. Olhou para uma série de números, depois novamente para a outra. Bem poderia ter escolhido, aleatoriamente, tirando de um chapéu, duas condições meteorológicas. Seu primeiro pensamento foi que uma válvula eletrônica tivesse queimado.

De repente, percebeu a verdade.⁷ Não havia enguicho. O problema estava nos números que tinha digitado. Na memória do computador, seis casas decimais estavam armazenadas: 0,506127. Na impressão, para poupar espaço, apenas três apareciam: 0,506. Lorenz tinha colocado na máquina números mais curtos, arredondados, supondo que a diferença — um para mil — não tinha importância.

Era uma suposição sensata. Se um satélite atmosférico pudesse ler a temperatura dos mares com uma variação de um para mil, seus operadores podiam considerar-se felizes. O Royal McBee de Lorenz estava implementando o programa clássico. Usou um sistema de equações puramente determinista. Dado um determinado ponto de partida, as condições meteorológicas se desenvolveriam exatamente da mesma maneira, a cada vez. Dado um ponto de partida ligeiramente diferente, o tempo se desdobraria de uma maneira ligeiramente diferente. Um pequeno erro numérico era como uma pequena brisa passageira — sem dúvida as pequenas brisas desapareciam ou se neutralizavam mutuamente antes que pudessem alterar aspectos importantes, em grande escala, do tempo. Mas, no sistema específico de equações de Lorenz, os pequenos erros mostravam-se catastróficos.⁸

Resolveu examinar mais atentamente a maneira pela qual duas seqüências de tempo quase idênticas se distinguiam. Copiou uma das linhas onduladas numa transparência e a colocou sobre a outra, para ver como divergiam. Primeiro, duas curvas ascendentes equivaliam-se, detalhe por detalhe. Depois, uma linha começava a ficar ligeiramente para trás. Quando as duas seqüências chegavam à curva ascendente seguinte, elas estavam claramente defasadas. Na terceira ou quarta curva ascendente, toda semelhança tinha desaparecido.

Era apenas uma falha de um computador desajeitado. Lorenz poderia ter suposto que havia alguma coisa errada com aquela máquina, ou com aquele modelo — provavelmente *devia* ter suposto.



COMO DOIS PADRÕES DE TEMPO DIVERGEM — Partindo quase do mesmo ponto, Edward Lorenz viu seu computador de previsão do tempo produzir padrões que se distanciavam cada vez mais, até que toda semelhança desaparecesse. (Das saídas impressas de Lorenz, de 1961).

Não era como se ele tivesse misturado sódio com cloro e conseguido ouro. Mas, com sua intuição matemática que os colegas só começariam a compreender mais tarde, Lorenz teve um sobressalto: alguma coisa estava errada, do ponto de vista filosófico. As conseqüências práticas disso podiam ser tremendas. Embora suas equações fossem paródias grosseiras das condições meteorológicas na terra, tinha a convicção de que encerravam a essência da atmosfera real. Naquele primeiro dia,⁹ ele achou que a previsão do tempo a longo prazo estava condenada.

“Certamente, de qualquer modo não vínhamos tendo muito sucesso nisso, e agora tínhamos a desculpa”, disse ele.¹⁰ “Creio que uma das razões pelas quais as pessoas achavam ser possível prever o tempo com tanta antecedência é a existência de fenômenos físicos reais para os quais se podem fazer excelentes previsões, como os eclipses (nos quais as dinâmicas do sol, da lua e da terra são bastante complicadas) e como as marés oceânicas. Nunca pensei nas tábuas de marés como previsões — para mim, eram fatos consumados —, mas é claro que são previsões. As marés são na realidade tão complicadas quanto a atmosfera. Ambas têm componentes periódicos — pode-se prever que o próximo verão será mais quente do que este inverno. Com o tempo, porém, tomamos a atitude de que já sabemos *disso*. Com as marés, o que nos interessa é a parte previsível, e a parte imprevisível é pequena, a menos que haja uma tempestade.

“As pessoas comuns, vendo que podemos prever as marés com alguns meses de antecedência, perguntam por que não podemos fazer o mesmo com a atmosfera, trata-se apenas de um sistema de fluidos diferentes, as leis são quase igualmente complicadas. Mas compreendi que *qualquer* sistema físico que se comportasse de maneira não-periódica seria imprevisível.”

As décadas de 50 e 60 foram anos de um otimismo pouco realista¹¹ em relação à previsão do tempo. Jornais e revistas estavam esperançosos com a ciência meteorológica, não apenas com a previsão, mas com a modificação e o controle do tempo. Duas tecnologias amadureciam ao mesmo tempo, o computador digital e o satélite espacial. Um programa internacional estava sendo preparado para a utilização de ambas, o Programa de Pesquisa da Atmosfera Global. Tinha-se a idéia de que a sociedade humana iria libertar-se da desordem meteorológica e dominá-la, em lugar de ser sua vítima. Cúpulas geodésicas cobririam os milharais. Aviões pulverizariam as nuvens. Os cientistas aprenderiam a fazer chover e a parar a chuva.

O pai dessa idéia popular foi Von Neumann, que construiu seu primeiro computador com a intenção precisa de, entre outras coisas, controlar o tempo. Cercou-se de meteorologistas e fez, para a comunidade dos físicos, em geral, emocionantes palestras sobre seus planos. Tinha uma razão matemática específica para esse otimismo. Reconhecia que um sistema dinâmico complicado podia ter pontos de instabilidade — pontos críticos nos quais um pequeno empurrão pode ter grandes conseqüências, como acontece com uma bola equilibrada no alto de um morro. Com o computador funcionando, Von Neumann imaginava¹² que os cientistas calculariam as equações do movimento dos fluidos para os dias seguintes. Depois, uma comissão central de meteorologistas enviaria aviões para espalhar cortinas de fumaça ou pulverizar as nuvens, para levar o tempo às condições desejadas. Von Neumann tinha, porém, esquecido a possibilidade de caos, com a instabilidade em *todos* os pontos.

Na década de 80 uma enorme e cara burocracia¹³ dedicava-se à realização da missão de Von Neumann, ou pelo menos à sua parte relacionada com a previsão. Os mais importantes meteorologistas americanos operavam num edifício simples, em formato de cubo, numa pequena localidade de Maryland, perto da rodovia de contorno de Washington, com antenas de radar e rádio no telhado. O supercomputador que usavam era um modelo que só no espírito fundamental se assemelhava ao de Lorenz. Enquanto o Royal McBee era capaz de realizar 60 multiplicações por segundo, a velocidade

de um Control Data Cyber 205 era medida em megaflops, milhões de operações em pontos flutuantes por segundo. Enquanto Lorenz se satisfazia com 12 equações, o modelo global moderno calculava sistemas de 500.000 equações. Esse modelo compreendia a maneira pela qual a umidade aumentava ou diminuía o calor do ar quando se condensava e evaporava. Os ventos digitais eram modelados por cadeias de montanhas digitais. Torrentes de dados chegavam a cada hora de todas as nações do globo, vindas de aviões, satélites e navios. O Centro Meteorológico Nacional produzia as segundas melhores previsões do mundo.

As primeiras vinham de Reading, na Inglaterra, uma pequena cidade universitária a uma hora de Londres. O Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo ocupava um modesto edifício à sombra de árvores, do estilo geral das Nações Unidas, de uma arquitetura de tijolos e vidros, decorado com doações vindas de muitas terras. Tinha sido construído no auge do espírito de união europeia do Mercado Comum, quando a maioria das nações da Europa ocidental resolveram combinar seus talentos e recursos para a causa da previsão do tempo. Os europeus atribuíam o seu sucesso à equipe jovem e rotativa — não havia funcionários — e ao seu supercomputador Cray, que parecia estar sempre um modelo à frente do computador americano correspondente.

A previsão do tempo foi o começo, mas estava longe de ser o fim, da utilização dos computadores para formular sistemas complexos. As mesmas técnicas serviam a muitos tipos de cientistas físicos e cientistas sociais que alimentavam esperanças de fazer previsões sobre tudo, desde os fluxos de fluidos em pequena escala, de interesse dos projetistas de hélices, até os enormes fluxos financeiros, de interesse dos economistas. Realmente, nas décadas de 70 e 80 a previsão econômica pelo computador tinha uma semelhança real com a previsão de tempo global. Os modelos processavam teias complicadas, e um tanto arbitrarias, de equações, que pretendiam transformar as medições das condições iniciais — pressão atmosférica ou oferta de dinheiro — numa simulação de tendências futuras. Os programadores tinham esperanças de que os resultados não fossem demasiado deformados pelas muitas e inevitáveis simplificações. Se um modelo fazia alguma coisa flagrantemente estranha — inundasse o Saara ou triplicasse as taxas de juros —, os programadores reviam as equações para colocar o resultado em harmonia com as expectativas. Na prática, os modelos econométricos revelavam-se desanimadoramente cegos sobre o futuro, mas muita gente que deveria ter mais senso agia como se acreditasse nos resultados. Previsões de crescimento econômico ou de desemprego eram apresentadas com uma precisão implícita de duas ou três ca-

sas decimais.¹⁴ Governos e instituições financeiras pagavam por essas previsões e agiam de acordo com elas, talvez por necessidade ou à falta de coisa melhor. Presumivelmente, sabiam que variáveis como “otimismo do consumidor” não eram tão mensuráveis quanto a “umidade” e que equações diferenciais perfeitas ainda não tinham sido escritas para o movimento da política e da moda. Poucos, porém, davam-se conta de como era frágil o próprio processo de criar modelos de fluxos nos computadores, mesmo quando os dados eram razoavelmente fidedignos e as leis eram puramente físicas, como na previsão do tempo.

A criação de modelos no computador tinha, na verdade, conseguido transformar a meteorologia, de uma arte, numa ciência. As avaliações do Centro Europeu indicavam que o mundo tinha poupado bilhões de dólares anualmente com previsões que, estatisticamente, eram melhores do que nada. Mas, além de dois ou três dias, as melhores previsões do mundo eram especulativas, e além de seis ou sete, nada valiam.

A razão disso era o Efeito Borboleta.¹⁵ Para pequenas condições meteorológicas — e para um meteorologista global, pequeno pode significar tempestades e nevascas —, qualquer previsão perde o valor rapidamente. Os erros e as incertezas se multiplicam, formando um efeito de cascata ascendente através de uma cadeia de aspectos turbulentos, que vão dos demônios da poeira e tormentas até redemoinhos continentais que só os satélites conseguem ver.

Os modernos modelos das condições meteorológicas operam com uma rede de pontos da ordem de 96 km de distância, e mesmo assim, alguns dados de partida têm de ser supostos, já que as estações de terra e os satélites não podem ver tudo. Mas suponhamos que a terra¹⁶ pudesse ser coberta com sensores colocados a 30 centímetros uns dos outros, elevando-se a intervalos de 30 centímetros até o alto da atmosfera. Suponhamos que cada sensor forneça leituras perfeitamente precisas de temperatura, pressão, umidade e qualquer outra quantidade que o meteorologista possa desejar. Exatamente ao meio-dia um computador infinitamente potente recebe todos os dados e calcula o que acontecerá em cada ponto às 12:01, depois 12:02, depois 12:03...

Ainda assim, o computador não será capaz de prever se Princeton, em Nova Jersey, terá sol ou chuva dentro de um dia ou de um mês. Ao meio-dia os espaços entre os sensores ocultarão oscilações que o computador não conhecerá, pequenos desvios da média. Às 12:01 essas oscilações já terão criado pequenos erros a 30 centímetros de distância. Em pouco tempo os erros se terão multiplicado na escala de 10×30 , e assim por diante, até o tamanho do globo.

Até mesmo para os meteorologistas experientes, tudo isso se opõe à intuição. Um dos mais antigos amigos de Lorenz era Robert White, também meteorologista do M.I.T., que mais tarde seria chefe do Departamento Oceânico e Atmosférico Nacional. Lorenz falou-lhe do Efeito Borboleta e o que, na sua opinião, ele significava para a previsão do tempo a longo prazo. White deu a resposta de Von Neumann. “Que previsão, que nada”, disse ele.¹⁷ “Isso é o controle do tempo.” Sua idéia era que as pequenas modificações, perfeitamente dentro da capacidade humana, podiam causar desejadas mudanças em grande escala.

Lorenz viu as coisas de maneira diferente. Sim, era possível modificar o tempo. Podia-se levá-lo a fazer alguma coisa diferente do que ele faria, se não houvesse interferência. Mas, feito isso, não saberíamos então o que teria acontecido. Seria como dar mais uma baralhada num baralho já bem misturado. Sabemos que isso modificará a nossa sorte, mas não sabemos se para melhor, ou para pior.

A descoberta de Lorenz foi um acaso, mais um numa linha de acasos que remonta a Arquimedes e sua tina de banho. Lorenz não era do tipo de sair gritando *Eureka*. O acaso feliz apenas o levou ao ponto em que sempre estivera. Estava pronto para explorar as conseqüências da sua descoberta, desenvolvendo o significado que ela deveria ter para o entendimento, pela ciência, dos fluxos de todos os tipos de fluidos.

Se tivesse ficado apenas no Efeito Borboleta, uma imagem da previsibilidade substituída pelo simples acaso, Lorenz teria produzido apenas uma notícia muito ruim. Mas ele viu algo mais do que aleatoriedade em seu modelo do tempo. Percebeu nele uma bela estrutura geométrica, a ordem *mascarada* de aleatoriedade. Era um matemático vestido de meteorologista, afinal de contas, e começou então a levar uma vida dupla. Escrevia trabalhos que eram pura meteorologia. Mas escrevia também trabalhos que eram pura matemática, com uma dose levemente enganosa de conversa meteorológica como prefácio. Os prefácios acabaram por desaparecer totalmente.

Sua atenção voltou-se cada vez mais para a matemática de sistemas que nunca encontravam um regime estacionário, sistemas que quase se repetiam, mas nunca exatamente. Todos sabiam que o tempo atmosférico era um desses sistemas — aperiódico. A natureza possui muitos outros: populações animais que aumentam e diminuem quase regularmente, epidemias que vão e vêm em tantalizantes esquemas quase regulares. Se o tempo chegasse alguma vez a um regime exatamente como o atingido antes, em que todos os ventos e nuvens fossem os mesmos, então presumivelmente ele se repetiria para sempre e o problema da previsão se tornaria trivial.

Lorenz viu que devia haver um elo¹⁸ entre a recusa do tempo em repetir-se e a incapacidade dos meteorologistas de prevê-lo — um elo entre aperiodicidade e imprevisibilidade. Não era fácil encontrar equações simples que produzissem a aperiodicidade que ele buscava. A princípio seu computador tendia a fechar-se em ciclos repetitivos. Lorenz, porém, tentou diferentes tipos de complicações menores, e finalmente conseguiu, quando usou uma equação que variava a quantidade de calor de leste para oeste, correspondendo a uma variação no mundo real entre a maneira pela qual o sol aquece o litoral leste da América do Norte, por exemplo, e a maneira pela qual aquece o oceano Atlântico. A repetição desapareceu.

O Efeito Borboleta não era um acidente: era necessário. Suponhamos que as pequenas variações permanecessem pequenas, raciocinou ele, em lugar de se avolumarem pelo sistema. Então, quando o tempo se aproximasse arbitrariamente de um regime pelo qual já tinha passado antes, permaneceria arbitrariamente próximo dos padrões seguintes. Para finalidades práticas, os ciclos seriam previsíveis — e acabariam perdendo o interesse. Para produzir o rico repertório do tempo real da terra, a sua bela multiplicidade, dificilmente poderíamos desejar alguma coisa melhor do que um Efeito Borboleta.

O Efeito Borboleta recebeu um nome técnico: dependência sensível das condições iniciais. E a dependência sensível das condições iniciais não era uma noção totalmente nova. Tinha lugar no folclore:

*“Por falta de um prego, perdeu-se a ferradura;
Por falta de uma ferradura, perdeu-se o cavalo;
Por falta do cavalo, perdeu-se o cavaleiro;
Por falta do cavaleiro, perdeu-se a batalha;
Por falta da batalha, perdeu-se o reino!”¹⁹*

Sabe-se muito bem, tanto na ciência como na vida, que uma cadeia de acontecimentos pode ter um ponto de crise que aumente pequenas mudanças. Mas o caos significava que tais pontos estavam por toda parte. Eram generalizados. Em sistemas como o tempo, a dependência sensível das condições iniciais era consequência inevitável da maneira pela qual as pequenas escalas se combinavam com as grandes.

Seus colegas ficaram espantados por ter Lorenz imitado tanto a aperiodicidade como a dependência sensível de condições iniciais em sua versão de brincadeira do tempo: 12 equações, calcula-

das repetidas vezes com impiedosa eficiência mecânica. Como podia essa riqueza, essa imprevisibilidade — esse caos —, surgir de um sistema determinista simples?

Lorenz pôs de lado o tempo e procurou modos ainda mais simples de produzir esse comportamento complexo. Encontrou um, num sistema de apenas três equações. Eram não-lineares, significando isso que expressavam relações que não eram rigorosamente proporcionais. As relações lineares podem ser estabelecidas com uma linha reta num gráfico. As relações lineares são de compreensão fácil: *quanto mais, melhor*. As equações lineares são resolvíveis, o que as torna adequadas para os manuais. Os sistemas lineares têm uma importante virtude modular: podem ser desmontados e novamente montados — as peças se encaixam.

Os sistemas não-lineares não podem, em geral, ser solucionados e não podem ser somados uns aos outros. Em fluidos e em sistemas mecânicos, os termos lineares tendem a ser os aspectos que as pessoas querem deixar de fora quando tentam compreendê-los bem, de uma maneira simples. O atrito, por exemplo. Sem atrito, uma equação linear simples expressa a quantidade de energia necessária para acelerar um disco de borracha do jogo de hóquei. Com o atrito, a relação se complica, porque a quantidade de energia se modifica, dependendo da rapidez com que o disco já se está movendo. A não-linearidade significa que o ato de jogar o jogo modifica, de certa maneira, as regras. Não se pode atribuir uma importância constante ao atrito, porque sua importância depende da velocidade. A velocidade, por sua vez, depende do atrito. Essa mutabilidade dependente torna difícil o cálculo da não-linearidade, mas também cria tipos de comportamento de grande riqueza, que nunca ocorrem em sistemas lineares. Na dinâmica dos fluidos, tudo se resume a uma equação canônica, a equação de Navier-Stokes. É um milagre de brevidade, relacionando velocidade, pressão, densidade e viscosidade do fluido, mas é não-linear. Assim, a natureza dessas relações é, com freqüência, difícil de ser precisada. Analisar o comportamento de uma equação não-linear como a de Navier-Stokes é como caminhar por um labirinto cujas paredes modificam sua disposição a cada passo que damos. Como disse o próprio Von Neumann: "O caráter da equação (...) varia simultaneamente em todos os aspectos relevantes: tanto a ordem como o grau se modificam. Portanto, devemos esperar grandes dificuldades matemáticas."²⁰ O mundo seria diferente — e a ciência não precisaria de caos — se a equação de Navier-Stokes não contivesse o demônio da não-linearidade.

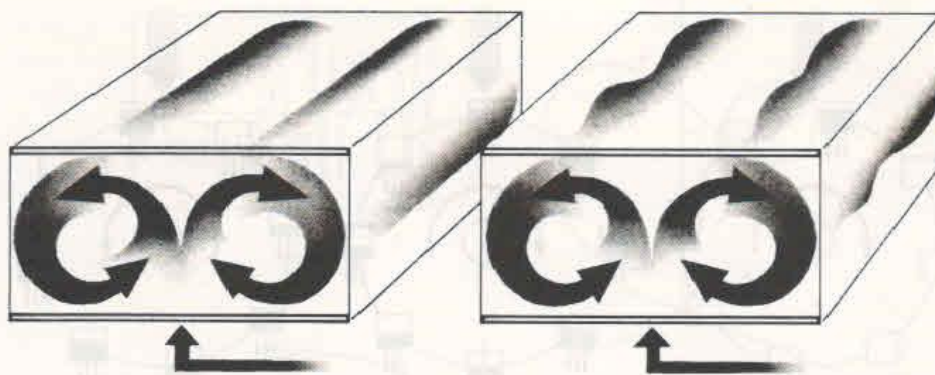
Um tipo específico de movimento dos fluidos inspirou as três equações de Lorenz: a ascensão do gás ou líquido quente, conhe-

cida como convecção. Na atmosfera, a convecção agita o ar aquecido pela terra banhada de sol, e ondas de convecção, tremeluzentes, sobem como fantasmas acima do asfalto e dos radiadores quentes. Lorenz tinha a mesma satisfação em falar sobre a convecção numa xícara de café quente.²¹ Como dizia, este era apenas um dos inumeráveis processos hidrodinâmicos em nosso universo cujo comportamento futuro gostaríamos de prever. Como calcular a rapidez com que uma xícara de café esfriará? Se o café estiver apenas morno, seu calor se dissipará sem qualquer movimento hidrodinâmico. O café permanece em regime constante. Mas, se estiver quente o bastante, uma rotação convectiva, ou propagadora, levará o café quente do fundo da xícara para a superfície mais fria. A convecção no café torna-se claramente visível quando um pouco de creme é pingado na xícara. Os movimentos giratórios podem ser complicados, mas a longo prazo o destino desse sistema é evidente. Como o calor se dissipa, e como o atrito retarda o fluido em agitação, o movimento terá de parar, inevitavelmente. Lorenz disse secamente a um grupo de cientistas: "Poderíamos ter problemas em prever a temperatura do café com um minuto de antecedência, mas não teremos dificuldades em prevê-la com uma hora de antecedência."²² As equações do movimento que governa uma xícara de café que esfria devem refletir o destino do sistema. Devem ser dissipantes. A temperatura deve pender para a temperatura do ambiente, e a velocidade, para zero.

Lorenz tomou uma série de equações²³ para a convecção e reduziu-a ao essencial, eliminando tudo o que pudesse ser irrelevante, tornando-a de uma simplicidade pouco realista. Quase nada do modelo original permaneceu, mas ele deixou a não-linearidade. Para os físicos, as equações pareciam simples. Olhavam-nas — muitos cientistas olharam, nos anos seguintes — e diziam: *Eu posso resolvê-las.*

"Sim", dizia Lorenz tranqüilamente. "Há uma tendência a pensar assim, ao vê-las. Há alguns termos não-lineares nelas, e parece haver alguma maneira de contorná-los. Mas não há."

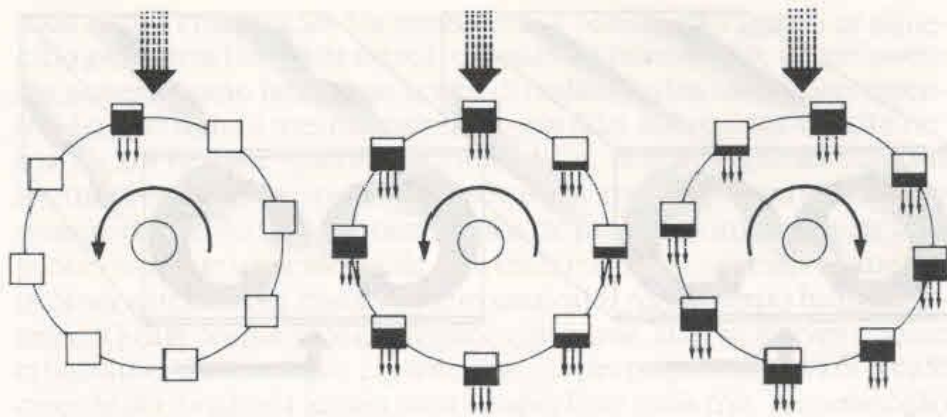
O tipo mais simples de convecção mostrado nos manuais ocorre numa célula de fluido, uma caixa com um fundo liso que pode ser aquecido e uma tampa lisa que pode ser resfriada. A diferença de temperatura entre o fundo quente e a tampa fria controla o fluxo. Se a diferença é pequena, o sistema permanece estável. O calor se movimenta para o alto pela condução, como acontece numa barra de metal, sem superar a tendência natural do fluido a permanecer em repouso. Além disso, o sistema é estável. Quaisquer movimentos fortuitos que possam ocorrer quando, digamos, um aluno esbarra no aparelho tendem a desaparecer, voltando o sistema a um regime estável.



ROLAGEM DE UM FLUIDO. Quando um líquido ou gás é aquecido por baixo, o fluido tende a organizar-se em rolos cilíndricos (*esquerda*). O fluido quente sobe de um lado, perde calor e desce do outro lado — o processo de convecção. Quando o calor aumenta (*direita*), ocorre uma instabilidade, e os rolos apresentam uma ondulação que vai e vem ao longo dos cilindros. Em temperaturas ainda mais elevadas, o fluxo se torna descontrolado e turbulento.

Aumente-se, porém, o calor, e um novo comportamento se manifesta. Quando esquenta, o fluido do fundo se expande. Ao se expandir, torna-se menos denso. Ao se tornar menos denso, torna-se mais leve, o suficiente para superar o atrito, e sobe para a superfície. Numa caixa cuidadosamente projetada, desenvolve-se uma rotação cilíndrica, com o fluido quente subindo de um lado e o fluido frio descendo do outro. Visto de lado, o movimento faz um círculo contínuo. Fora do laboratório, também a natureza faz, com frequência, suas células de convecção. Quando o sol esquenta o chão de um deserto, por exemplo, o ar que ondula pode provocar formas sombreadas nas nuvens, lá no alto, ou na areia, embaixo.

Aumente-se ainda mais o calor, e o comportamento se torna mais complexo. Os movimentos ondulatórios começam a oscilar. As equações simplificadas de Lorenz eram demasiado simples para criar um modelo desse tipo de complexidade. Elas abstraíam apenas um aspecto da convecção no mundo real: o movimento circular do fluido quente elevando-se como uma roda-gigante. As equações levavam em conta a velocidade desse movimento e a transferência de calor. Os processos físicos influenciavam-se mutuamente. Quando qualquer porção de fluido quente subia num movimento circular, entrava em contato com o fluido mais frio e com isso começava a perder calor. Se o círculo girava com rapidez suficiente, a bola de fluido não tinha perdido todo o seu calor extra no momento em que chegava ao alto, e começava a descer novamente pelo outro lado da câmara, de modo que começava a pressionar contra o impulso do outro fluido quente que vinha atrás dela.



A RODA D'ÁGUA LORENZIANA. O primeiro e famoso sistema caótico descoberto por Edward Lorenz corresponde exatamente a um aparelho mecânico, uma roda d'água. Esse aparelho simples mostra-se capaz de um comportamento surpreendentemente complicado.

A rotação da roda d'água tem certas propriedades em comum com os cilindros rotativos de fluido no processo de convecção. A roda d'água é como um corte no cilindro. Ambos os sistemas são impulsionados constantemente — pela água ou pelo calor — e ambos dispersam energia. O fluido perde calor, as palhetas da roda perdem água. Em ambos os sistemas, o comportamento a longo prazo depende da força da energia propulsora.

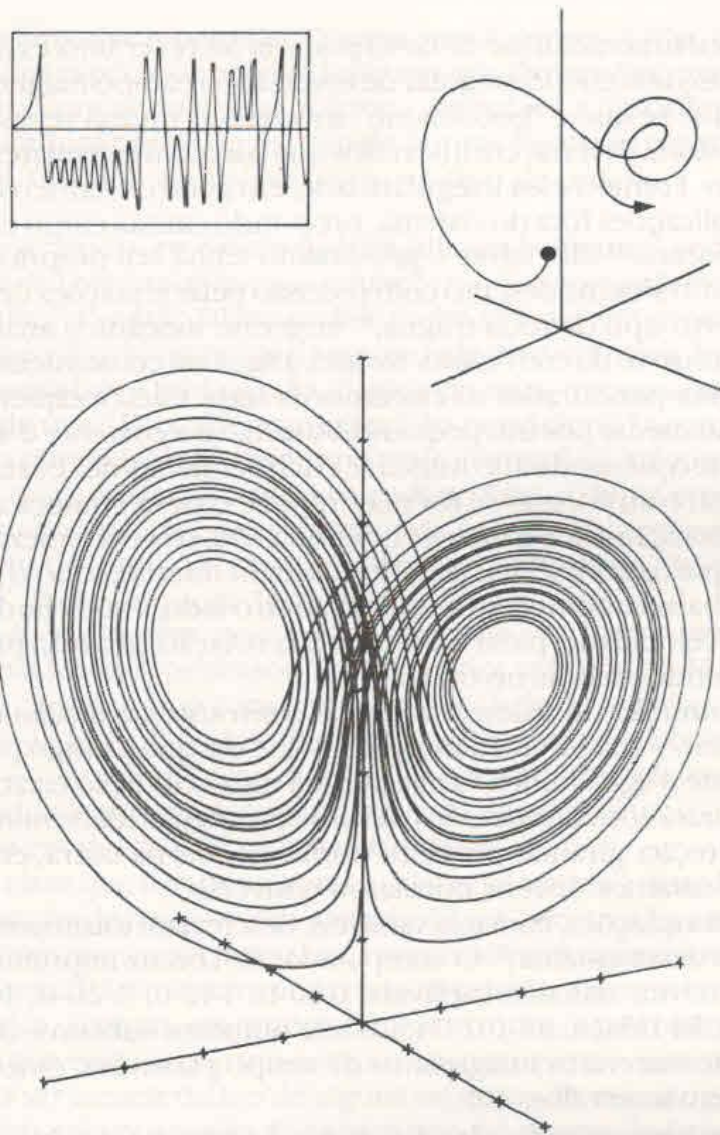
A água cai do alto, num escoamento constante. Se o fluxo da água for lento, a palheta ou caçamba do alto não se encherá nunca o suficiente para superar o atrito, e a roda nunca começará a girar. (Da mesma forma, num fluido, se o calor for demasiado baixo para superar a viscosidade, não movimentará o fluido.)

Se o fluxo for mais rápido, o peso da palheta superior coloca a roda em movimento (*esquerda*). A roda d'água pode estabilizar-se numa rotação que continua em ritmo constante (*centro*).

Se, porém, o fluxo for mais rápido ainda (*direita*), a rotação pode tornar-se caótica, em virtude dos efeitos não-lineares embutidos no sistema. Quando as palhetas passam sob o jorro d'água, as proporções em que se enchem dependem da velocidade de rotação. Se esta for rápida, as palhetas têm pouco tempo para se encherem. (Da mesma forma, o fluido no rolo de convecção que gira rapidamente tem pouco tempo para absorver calor.) E ainda, se a roda está girando depressa, as palhetas podem começar a subir do outro lado antes de se esvaziarem. Conseqüentemente, palhetas pesadas do lado que sobe podem provocar diminuição da velocidade e inverter o movimento.

De fato, Lorenz descobriu que em períodos prolongados a rotação deve reverter-se muitas vezes, sem se estabilizar nunca num ritmo constante, e sem repetir nunca um padrão previsível.

Embora o sistema de Lorenz não reproduzisse totalmente a convecção, tinha análogos exatos em sistemas reais. Por exemplo, suas equações descrevem com precisão um velho dínamo elétrico, precursor dos modernos geradores, no qual a corrente flui através de um disco que gira num campo magnético. Em certas condições, o dínamo pode reverter a si mesmo. E, depois que as equações de Lorenz se tornaram mais conhecidas, alguns cientistas afirmaram que



O ATRATOR DE LORENZ (*acima*). Essa imagem mágica, que se assemelha à máscara de uma coruja ou às asas de uma borboleta, tornou-se um emblema para os primeiros investigadores do caos. Revelava a estrutura fina oculta dentro de um fluxo desordenado de dados. Tradicionalmente, os valores oscilantes de qualquer variável podiam ser vistos na chamada série temporal (*ao alto*). Para mostrar as mudanças de relações entre três variáveis é necessária uma técnica diferente. Em qualquer instante do tempo, as três variáveis fixam a localização de um ponto no espaço tridimensional; quando o sistema se modifica, o movimento do ponto representa as variações que se modificam continuamente.

Como o sistema nunca se repete exatamente, a trajetória nunca se cruza. Em lugar disso, faz *loop* circulares. O movimento do atrator é abstrato, mas transmite o sabor do movimento do sistema real. Por exemplo, o cruzamento de uma asa do atrator para a outra corresponde a uma inversão na direção da rotação da roda d'água ou do fluido em convecção.

o comportamento desse dínamo poderia oferecer uma explicação para outro fenômeno singular de reversão: o campo magnético da terra. Sabe-se que o "geodínamo" inverteu-se muitas vezes ao longo da história da terra, em intervalos que parecem irregulares e inexplicáveis. Frente a essa irregularidade, em geral os teóricos procuram explicações fora do sistema, propondo causas como choques de meteoritos.²⁴ Mas talvez o geodínamo tenha seu próprio caos.

Outro sistema descrito com precisão pelas equações de Lorenz é um certo tipo de roda d'água,²⁵ engenho mecânico análogo ao círculo rotativo da convecção. No alto, a água cai constantemente em recipientes pendurados na estrutura da roda. Cada recipiente vaza constantemente por um pequeno buraco. Se a corrente d'água for lenta, o recipiente do alto nunca se enche com rapidez bastante para superar o atrito, mas se for mais rápida, o peso começa a girar a roda. A rotação pode tornar-se contínua. Ou, se a correnteza for tão rápida que os recipientes pesados oscilem durante todo o percurso para baixo e comecem a subir do outro lado, a roda pode diminuir de velocidade, parar e inverter sua rotação, girando primeiro num sentido, depois no outro.

A intuição do físico em relação a um sistema mecânico simples assim — sua intuição pré-caos — lhe diz que a longo prazo, se a corrente d'água nunca variar, surgirá uma condição estática. Ou a roda girará com firmeza, ou oscilará com regularidade numa e em outra direção, girando primeiro numa, depois na outra, em intervalos constantes. Lorenz constatou o inverso.

Três equações, com três variáveis, descreviam totalmente o movimento desse sistema.²⁶ O computador de Lorenz imprimiu os valores instáveis das três variáveis: 0-10-0; 4-12-0; 9-20-0; 16-36-2; 30-66-7; 54-115-24; 93-192-74. Os três números subiam e desciam enquanto intervalos imaginários de tempo passavam, cinco intervalos, cem intervalos, mil.

Para formar um quadro dos dados, Lorenz usou cada grupo de três números como coordenadas para especificar a localização de um ponto no espaço tridimensional. Assim, a seqüência de números produziu uma seqüência de pontos que traçavam uma linha contínua, um registro do comportamento do sistema. Essa linha podia levar a determinado lugar e parar, significando que o sistema se fixara num regime constante, no qual as variáveis da velocidade e temperatura já não mudavam. Ou podia formar um *loop*, indo sempre em círculo, significando isso que o sistema se fixara num padrão de comportamento que se repetiria periodicamente.

O sistema de Lorenz não fez nenhuma das duas coisas. Em lugar delas, o mapa mostrou uma espécie de complexidade infinita. Ficava sempre dentro de certos limites, nunca saindo da página, mas

também nunca se repetindo. Traçava uma forma estranha, característica, uma espécie de espiral dupla em três dimensões, como uma borboleta com as duas asas. A forma assinalava a desordem pura, já que nenhum ponto ou padrão de pontos jamais se repetiu. Não obstante, também assinalava um novo tipo de ordem.

Anos depois, os físicos tinham olhares brilhantes ao falar do trabalho de Lorenz sobre essas equações — “aquela bela maravilha de trabalho”. Já então falava-se dele como se fosse um pergaminho antigo, guardando segredos da eternidade. Nos milhares de artigos que constituíam a bibliografia técnica do caos, poucos eram mais citados do que “Fluxo Determinista Não-periódico”. Durante anos, nenhum objeto isolado inspiraria mais ilustrações, até mesmo filmes, do que a misteriosa curva traçada ao final, a dupla espiral que se tornou conhecida como o atrator de Lorenz. Pela primeira vez, as imagens de Lorenz mostravam o que ele queria dizer: “Isso é complicado”. Toda a riqueza do caos encontrava-se ali.

Na época, porém, poucos a conseguiam ver. Lorenz descreveu-a a Willem Malkus, professor de matemática aplicada no M.I.T., um cientista cavalheiresco com grande capacidade de apreciar o trabalho dos colegas. Malkus riu e disse: “Ed, nós *sabemos* — sabemos muito bem — que a convecção dos fluidos não se comporta assim.”²⁷ A complexidade seria certamente eliminada, disse Malkus, e o sistema se fixaria em movimento constante, regular.

“É claro que não percebemos do que se tratava”, disse Malkus, uma geração depois — anos depois de ter construído uma roda d’água lorenziana real em seu laboratório no porão para mostrar aos descrentes. “Ed não estava pensando absolutamente em termos de nossa física. Pensava em termos de algum modelo generalizado ou abstrato que evidenciava um comportamento que ele, intuitivamente, sentia ser característico de alguns aspectos do mundo exterior. Ele, porém, não nos podia dizer bem isso. Só depois do fato consumado é que percebemos que devia ter essas opiniões.”

Poucos leigos percebiam o quão departamentalizada a comunidade científica se tinha tornado, um navio de guerra com anteparas para evitar vazamentos. Os biólogos tinham muito o que ler sem procurar acompanhar a bibliografia da matemática — e até mesmo os biólogos moleculares tinham muito o que ler sem se preocupar com a biologia populacional. Os físicos tinham melhores maneiras de empregar seu tempo do que folhear revistas de meteorologia. Alguns matemáticos se teriam entusiasmado com a descoberta de Lorenz; em uma década, físicos, astrônomos e biólogos estavam procurando alguma coisa semelhante a ela, e por vezes redescobriam-a sozinhos. Mas Lorenz era um meteorologista, e nin-

guém pensou em procurar o caos na página 130 do volume 20 do *Journal of the Atmospheric Sciences*.²⁸

Notas

- 1 - Lorenz, Malkus, Spiegel, Farmer. O Lorenz essencial é um tríptico de artigos cuja peça central é "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20 (1963), pp. 130-41; ao lado dele estão "The Mechanics of Vacillation", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20 (1963), pp. 448-64, e "The Problem of Deducing the Climate from the Governing Equations", *Tellus*, 16 (1964), pp. 1-11. Constituem um trabalho enganosamente elegante, que continua a influenciar matemáticos e físicos, 20 anos depois. Algumas das recordações pessoais de Lorenz sobre seu primeiro modelo de computador da atmosfera encontram-se em "On the Prevalence of Aperiodicity in Simple Systems", em *Global Analysis*, Mgrmela e J. Marsden, orgs. (Nova York, Springer-Verlag, 1979), pp-53-75.
- 2 - Uma descrição contemporânea legível, escrita por Lorenz, do problema do uso de equações para criar modelos da atmosfera é "Large-Scale Motions of the Atmosphere: Circulation", em *Advances in Earth Science*, P.M. Hurlley, org. (Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1966), pp. 95-109. Uma análise mais antiga, e influente, desse problema é L.F. Richardson, *Weather Prediction by Numerical Process* (Cambridge, Cambridge University Press, 1922).
- 3 - Lorenz. Ver também uma exposição das tendências conflitantes da matemática e meteorologia em seu pensamento, em "Irregularity: A Fundamental Property of the Atmosphere", Crafoord Prize Lecture apresentada na Real Academia Sueca de Ciências, em Estocolmo, a 28 de setembro de 1983, em *Tellus*, 36-A (1984), pp. 98-110.
- 4 - Pierre Simon de Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (Nova York, Dover, 1951).
- 5 - Winfree.
- 6 - Lorenz.
- 7 - "On the Prevalence", p. 55.
- 8 - De todos os físicos e matemáticos clássicos que se ocuparam dos sistemas dinâmicos, o que melhor compreendeu a possibilidade do caos foi Jules Henri Poincaré. Ele observou em *Ciência e Método*: "Uma causa muito pequena, que nos passa despercebida, determina um efeito considerável que não podemos deixar de ver, e então dizemos que o efeito é devido ao acaso. Se conhecêssemos exatamente as leis da natureza e a situação do universo no momento inicial, poderíamos prever exatamente a situação desse mesmo universo no momento seguinte. Contudo, mesmo que as leis naturais já não tivessem segredos para nós, ainda assim poderíamos conhecer a situação aproximadamente. Se isso nos permitisse prever a situação seguinte com a mesma aproximação, seria tudo o que precisaríamos, e diríamos que o fenômeno tinha sido previsto, que é governado por leis. Mas nem sempre é assim; pode acontecer que pequenas diferenças nas condições iniciais produzam diferenças muito grandes nos fenômenos finais. Um pequeno erro nas primeiras produ-

C • A • O • S

Revolução

*Decerto, todo o empenho é para nos colocarmos
Fora do âmbito usual
Daquilo que chamam de estatística.*

— STEPHEN SPENDER

O historiador da ciência Thomas S. Kuh¹ descreve uma perturbadora experiência realizada por uma dupla de psicólogos na década de 40. Mostravam-se rapidamente aos pacientes cartas de baralho, uma de cada vez, pedindo-lhes que as identificassem. Havia, é claro, um estratagema. Algumas das cartas eram anormais: por exemplo, havia um seis de espadas vermelho ou uma dama de ouros preta.

Com a rapidez, os pacientes enganavam-se facilmente. Nada podia ser mais simples. Eles não percebiam as anomalias. Quando um seis de espadas vermelho lhes era mostrado, diziam “seis de copas” ou “seis de espadas”. Quando, porém, as cartas eram mostradas por mais tempo, os pacientes começavam a hesitar. Tornavam-se conscientes de um problema, sem ter certeza de qual era. Um paciente podia dizer que alguma coisa lhe parecia estranha, como uma margem vermelha em volta de um coração preto.

Por fim, quando o ritmo era ainda mais lento, a maioria dos pacientes se dava conta do que acontecia. Viam as cartas erradas e faziam a necessária transferência mental para não errar no jogo. Nem todos, porém. Alguns experimentavam uma sensação de desorientação que provocava um sofrimento verdadeiro. “Não consigo identificar esse naipe, qualquer que seja”, disse um deles. “Nem sequer parecia uma carta de baralho, desta vez. Não sei agora de que cor é, nem se é espadas ou copas. Não tenho nem mesmo a certeza de como são as espadas. Meu Deus!”²

Ao terem visões breves e incertas do funcionamento da natureza, os cientistas profissionais não são menos vulneráveis à angústia e à confusão quando se vêem frente a frente com a incongruidade. E a incongruidade, quando modifica a maneira como o cientista vê, torna possíveis os avanços mais importantes. É o que diz Kuhn, e o que mostra a história do caos.

As idéias de Kuhn sobre a maneira como os cientistas trabalham e as revoluções ocorrem provocou tanto hostilidade quanto admiração, ao serem publicadas em 1962, e a controvérsia não se encerrou nunca. Ele deu uma boa alfinetada na idéia tradicional de que a ciência progride pela acumulação de conhecimento, somando-se cada descoberta à anterior, e que as novas teorias surgem quando novos fatos experimentais as exigem. Ele esvaziou o conceito da ciência como um processo ordenado de fazer perguntas e encontrar as respostas. Enfatizou o contraste entre a maior parte daquilo que os cientistas fazem, trabalhando com problemas legítimos, bem compreendidos, dentro de suas disciplinas, e o trabalho excepcional, não-ortodoxo, que cria as revoluções. Não foi por acaso que ele fez os cientistas se parecerem a racionalistas nada perfeitos.

Na visão de Kuhn, a ciência normal consiste, em grande parte, em operações de limpeza.³ Experimentalistas realizam versões modificadas de experiências feitas muitas vezes antes.⁴ Os teóricos acrescentam um tijolo aqui, refazem uma cornija ali, num muro de teoria. Dificilmente poderia ser de outro modo. Se todos os cientistas tivessem de começar do começo, questionando pressupostos fundamentais, teriam dificuldades em atingir o nível de sofisticação técnica necessário à realização de trabalho útil. Na época de Benjamin Franklin, o punhado de cientistas que tentavam compreender a eletricidade podiam escolher os seus princípios iniciais — na verdade, tinham de escolhê-los.⁵ Um pesquisador podia julgar a atração o mais importante efeito elétrico, considerando a eletricidade uma espécie de “eflúvio” que emanava das substâncias. Outro poderia vê-la como um fluido, transmitido por material condutor. Esses cientistas podiam falar com os leigos quase que com a mesma facilidade com que conversavam entre si, porque ainda não tinham chegado à fase na qual podiam ter uma linguagem especializada, comum, para os fenômenos que estudavam. Em contraste, um especialista do século XX na dinâmica dos fluidos dificilmente pode pretender um avanço no conhecimento de seu campo sem adotar primeiro uma terminologia e uma técnica matemática. Em troca disso, ele estará, inconscientemente, abrindo mão de uma grande margem de liberdade de questionar as bases de sua ciência.

De importância capital para as idéias de Kuhn é a visão da ciência normal como a solução de problemas, dos tipos de problemas

que os estudantes aprendem da primeira vez que abrem seus manuais. Esses problemas definem um estilo consolidado de realização que conduz a maioria dos cientistas em seus cursos superiores, em sua tese e no preparo de artigos para revistas que constituem a essência de suas carreiras acadêmicas. "Em condições normais, o cientista pesquisador não é um inovador, mas um solucionador de problemas, e os problemas nos quais se concentra são exatamente aqueles que lhe parecem poder ser formulados e resolvidos dentro da tradição científica existente", escreveu Kuhn.⁶

Mas há as revoluções. Uma nova ciência nasce de uma outra, que chegou a um ponto morto. Com freqüência, uma revolução tem um caráter interdisciplinar — suas descobertas principais vêm, muitas vezes, de pessoas que se aventuraram fora dos limites normais de suas especialidades. Os problemas que preocupam esses teóricos não são considerados linhas de investigação legítimas. Propostas de teses são rejeitadas, e artigos não são publicados. Os próprios teóricos não têm certeza de que identificariam a solução, se a encontrassem. Aceitam colocar em risco as suas carreiras. Uns poucos livres-pensadores trabalham sozinhos, incapazes de explicar para onde vão, receosos até mesmo de dizer aos colegas o que estão fazendo — essa imagem romântica está no centro do esquema de Kuhn, e tem ocorrido na vida real, repetidamente, na investigação do caos.

Todo cientista que se voltou cedo para o caos tem uma história de desestímulo, ou de hostilidade clara, para contar. Alunos de pós-graduação foram advertidos de que suas carreiras podiam ser prejudicadas se escrevessem teses sobre uma disciplina desconhecida na qual seus orientadores não tinham especialização. Ao ouvir falar na nova matemática, um físico de partículas⁷ poderia começar a estudá-la por conta própria, julgando-a bela, ao mesmo tempo bela e difícil — mas sentiria que jamais poderia contar isso aos seus colegas. Professores mais velhos achavam que estavam passando por uma espécie de crise de meia-idade, apostando numa linha de pesquisa que muitos colegas poderiam não compreender, ou da qual se poderiam ressentir. Mas também sentiam uma animação intelectual que vem das coisas realmente novas. Até mesmo os leigos sentiam isso, os que estavam interessados nisso. Para Freeman Dyson, do Instituto de Estudos Avançados, a informação sobre o caos foi "como um choque elétrico" na década de 70. Outros sentiram que pela primeira vez em suas vidas profissionais estavam testemunhando uma verdadeira mudança de paradigma, uma transformação de uma maneira de pensar.

Os que perceberam o caos logo de início sofreram, sem saber como colocar seus pensamentos e suas descobertas em forma pu-

blicável. Seu trabalho situava-se entre disciplinas — por exemplo, era demasiado abstrato para os físicos, porém, demasiado experimental para os matemáticos. Para alguns, a dificuldade de comunicar as novas idéias e a feroz resistência dos círculos tradicionais mostrou como era revolucionária a nova ciência. Idéias superficiais podem ser assimiladas; idéias que exigem uma reorganização da imagem que se faz do mundo provocam hostilidade. Um físico do Instituto de Tecnologia da Geórgia, Joseph Ford, começou citando Tolstoi: “Eu sei que a maioria dos homens, inclusive os que se sentem à vontade com problemas da maior complexidade, raramente podem aceitar até mesmo a mais simples e óbvia verdade, se for de molde a obrigá-los a admitir a falsidade de conclusões que tiveram grande prazer em explicar aos colegas, que orgulhosamente ensinaram a outros e que adotaram, ponto por ponto, como parte de suas próprias vidas.”⁸

Muitos cientistas, que se mantinham na corrente principal da ciência, continuaram tendo apenas uma vaga idéia da ciência que surgia. Alguns deles, em especial os especialistas na dinâmica de fluidos tradicional, ressentiram-se ativamente da inovação. A princípio, as alegações feitas em favor do caos pareciam insensatas e nada científicas. E o caos valia-se de uma matemática que parecia inconvençional e difícil.

Quando os especialistas em caos se generalizaram, alguns departamentos de universidades não viram com bons olhos esses estudiosos um tanto desencaminhados; outros, procuraram mais especialistas em caos. Algumas publicações criaram regras tácitas contra artigos sobre o caos; outras passaram a publicar exclusivamente trabalhos sobre ele. Os caoticistas ou caologistas (esses neologismos eram ouvidos)⁹ começaram a surgir com desproporcional frequência nas listas anuais de bolsas e prêmios importantes. Em meados da década de 80 um processo de difusão acadêmica tinha levado os especialistas em caos a posições de influência nas burocracias universitárias. Centros e institutos foram fundados para especializar-se na “dinâmica não-linear” e nos “sistemas complexos”.

O caos tornou-se não apenas teoria, mas também método; não apenas um cânone de crenças, mas também uma maneira de fazer ciência. O caos criou sua técnica própria de usar computadores, técnica que não exige a enorme velocidade dos Crays e Cybers, mas até favorece terminais modestos que permitem interação flexível. Para os pesquisadores do caos, a matemática tornou-se uma ciência experimental, com o computador substituindo os laboratórios cheios de tubos de ensaio e microscópios. Imagens gráficas são a chave. “É masoquismo um matemático prescindir de imagens”, diria um especialista em caos. “Como podem eles ver a relação entre

este e aquele movimento? Como podem desenvolver a intuição?"¹⁰ Alguns realizam seu trabalho negando explicitamente que seja uma revolução; outros, deliberadamente, usam a linguagem de Kuhn, de mudanças de paradigmas para descrever as modificações que testemunham.

Estilisticamente, os primeiros trabalhos de caos lembravam a era de Benjamin Franklin, porque voltavam aos princípios básicos. Como observa Kuhn, as ciências tradicionais têm como certo um corpo de conhecimento que serve de ponto de partida comum para as investigações. Para não aborrecer os colegas, os cientistas começam e terminam habitualmente os seus trabalhos com observações esotéricas. Em contraste, os artigos sobre o caos, a partir de fins da década de 70, pareciam evangélicos, desde o preâmbulo até a peroração. Declaravam novos credos e com frequência terminavam com pedidos de ação. *Estes resultados parecem-nos ao mesmo tempo entusiasmantes e altamente provocativos.*¹¹ *Uma imagem teórica da transição para a turbulência está apenas começando a surgir. O coração do caos é matematicamente acessível.*¹² *O caos pressagia agora o futuro como ninguém negará.*¹³ *Mas, para aceitar o futuro, devemos renunciar a grande parte do passado.*

Novas esperanças, novos estilos e, o que é mais importante, uma nova maneira de ver. As revoluções não ocorrem aos poucos.¹⁴ Uma explicação da natureza substitui outra. Velhos problemas são vistos sob uma luz nova e outros problemas são identificados pela primeira vez. Ocorre algo semelhante à reformulação das ferramentas de toda uma indústria para uma nova produção. Nas palavras de Kuhn, "É antes como se a comunidade profissional tivesse sido subitamente transportada para outro planeta, onde os objetos familiares são vistos sob uma luz diferente e ao lado de outros, não-familiares."¹⁵

O camundongo de laboratório da nova ciência foi o pêndulo: emblema da mecânica clássica, exemplo de ação forçada, epítome da regularidade mecânica. Um peso oscila, livre, na ponta de uma haste. O que poderia estar mais longe do descontrole da turbulência?

Quando Arquimedes teve a sua tina de banho e Newton a sua maçã, segundo a lenda comum e suspeita, Galileu teve uma lâmpada de igreja, que oscilava de um lado para outro, repetidamente, sempre, enviando uma mensagem monótona para a sua consciência.¹⁶ Christian Huygens transformou a previsibilidade do pêndulo num meio de contar o tempo, lançando a civilização ocidental por uma estrada da qual não havia retorno. Foucault, no Panteão de Paris, usou um pêndulo da altura de vinte andares para demonstrar a rotação

da terra. Todos os relógios, mesmo os de pulso (até a era do quartzo vibratório), valiam-se de um pêndulo, de diferentes tamanhos ou formas. (A oscilação do quartzo não é, quanto a isso, muito diferente.) No espaço, livre de atrito, o movimento periódico vem das órbitas dos corpos celestes, mas na terra praticamente todas as oscilações regulares vêm de algum primo do pêndulo. Circuitos eletrônicos básicos são descritos por equações exatamente iguais às que descrevem o peso oscilante. As oscilações eletrônicas são milhares de vezes mais rápidas, mas a física é a mesma. No século XX, porém, a mecânica clássica era um assunto estritamente para salas de aula e projetos rotineiros de engenharia. Pêndulos enfeitavam os museus de ciência, tornavam mais animadas as lojas de presentes nos aeroportos, na forma de "bolas espaciais" rotativas, de plástico. Nenhum físico pesquisador se preocupava com eles.

Não obstante, o pêndulo ainda encerrava surpresas. Tornou-se uma pedra de toque, como havia sido para a revolução de Galileu. Quando Aristóteles olhou para um pêndulo,¹⁷ viu um peso tentando cair em direção à terra, mas oscilando violentamente de um lado para outro porque estava preso ao seu fio. Para o ouvido moderno, isso parece tolice. Para alguém limitado pelos conceitos clássicos de movimento, inércia e gravidade, é difícil apreciar a visão do mundo, coerente consigo mesma, que estava encerrada na compreensão aristotélica do pêndulo. O movimento físico, para Aristóteles, não era uma quantidade ou uma força, mas uma espécie de modificação, assim como o crescimento de uma pessoa é uma espécie de modificação. O peso que cai está simplesmente buscando o seu estado mais natural, aquele que atingirá se entregue a si mesmo. Nesse contexto, a opinião de Aristóteles tinha sentido. Por outro lado, quando Galileu olhava para um pêndulo, via uma regularidade que podia ser medida. Sua explicação exigia uma compreensão revolucionária dos objetos em movimento. A vantagem de Galileu sobre os gregos antigos não eram os dados melhores. Pelo contrário, sua idéia de medir com precisão os movimentos do pêndulo era reunir alguns amigos para contar as oscilações num período de 24 horas — uma experiência que exigia muito trabalho. Galileu via a regularidade porque já tinha uma teoria que a previa. Compreendia o que Aristóteles não podia compreender: que um objeto em movimento tende a manter esse movimento, que uma modificação de velocidade ou direção só podia ser explicada por alguma força externa, como o atrito.

De fato, tão vigorosa era a sua teoria que ele via regularidade onde esta não existia. Afirmou que um pêndulo de determinado comprimento não só faz seus movimentos com absoluta precisão de tempo, como também mantém esse tempo, qualquer que seja

a extensão do ângulo de oscilação. Um pêndulo de oscilação mais ampla tem de percorrer maior distância, mas o faz com mais rapidez. Em outras palavras, seu período permanece independente de sua amplitude. “Se dois amigos se puserem a contar as oscilações, um contando as mais amplas e outro as curtas, verão que podem contar não apenas dezenas, mas até mesmo centenas, sem discordar numa única, ou em parte de uma.”¹⁸ Galileu expôs sua idéia em termos de experimentação, mas a teoria a tornou convincente — a ponto de ser ainda ensinada como um evangelho na maioria dos cursos de física das escolas secundárias. Mas está errada. A regularidade vista por Galileu é apenas uma aproximação. A variação do ângulo do movimento do peso do pêndulo cria uma leve não-linearidade nas equações. Em baixas amplitudes de oscilação, o erro é quase inexistente. Mas existe, e é mensurável até mesmo numa experiência tão grosseira quanto a que Galileu descreve.

As pequenas não-linearidades eram facilmente ignoradas. Quem realiza experiências aprende logo que vive num mundo imperfeito. Nos séculos decorridos desde Galileu e Newton, a busca de regularidade na experimentação tem sido fundamental. Qualquer experimentalista procura quantidades que permaneçam estáveis, ou quantidades que sejam zero. Mas isso significa não levar em conta pequenas irregularidades que interferem numa imagem fixa. Se um químico verifica que duas substâncias mantêm uma proporção constante de 2,001 num dia, e 2,003 no dia seguinte, e 1,998 num terceiro dia, seria um tolo se não procurasse uma teoria para explicar uma proporção perfeita de dois para um.

Para conseguir resultados fixos, Galileu teve também de colocar de lado as não-linearidades que conhecia: atrito e resistência do ar. A resistência do ar é um problema conhecido nas experiências, uma complicação que tinha de ser afastada para se chegar à essência da nova ciência da mecânica. Cai a pena tão depressa quanto a pedra? Todas as experiências com objetos em queda dizem que não. A história de Galileu jogar bolas do alto da torre de Pisa, como mito, é uma história sobre a *modificação* das intuições com a invenção de um mundo científico ideal, onde as regularidades podem ser separadas da desordem da experiência.

Isolar os efeitos da gravidade sobre determinada massa dos efeitos da resistência do ar foi uma brilhante realização intelectual. Permitiu a Galileu aproximar-se da essência da inércia e do *momentum*. Ainda assim, no mundo real, os pêndulos acabam fazendo exatamente o que o estranho paradigma de Aristóteles previa. Eles param.

Ao lançar as bases para a modificação de paradigma seguinte, os físicos começaram a enfrentar o que muitos acreditavam ser uma

deficiência em seus conhecimentos dos sistemas simples, como o pêndulo. Em nosso século, processos dispersivos como o atrito foram identificados, e os estudantes aprenderam a incluí-los nas equações. Aprenderam também que os sistemas não-lineares eram habitualmente insolúveis, o que era verdade, e que tendiam a constituir exceções — o que não era verdade. A mecânica clássica descrevia o comportamento de classes inteiras de objetos móveis, pêndulos e pêndulos duplos, molas espirais e hastes recurvadas, cordas tocadas com os dedos e cordas de arcos. A matemática aplicava-se aos fluidos e aos sistemas elétricos. Mas quase ninguém, na era clássica, suspeitou o caos que podia ser encontrado por trás dos sistemas dinâmicos, se a não-linearidade fosse levada em conta.

O físico não podia compreender realmente a turbulência ou a complexidade, a não ser que compreendesse os pêndulos — e os compreendesse de uma maneira que era impossível na primeira metade do século XX. Quando o caos começou a unir o estudo de diferentes sistemas, a dinâmica do pêndulo ampliou-se, passando a cobrir altas tecnologias, que iam dos *lasers* às junções supercondutoras Josephson. Algumas reações químicas exibiam um comportamento semelhante ao pêndulo, como acontecia com o pulsar do coração. As inesperadas possibilidades estenderam-se, como escreveu um físico, à “medicina fisiológica e psiquiátrica, à previsão econômica e talvez à evolução da sociedade”.¹⁹

Observemos um balanço de criança. O balanço acelera quando desce, desacelera quando sobe, perdendo em todo o trajeto um pouco de velocidade em virtude do atrito. Recebe um impulso regular — de algum mecanismo, digamos. Toda a nossa intuição nos diz que, qualquer que seja o lugar por onde o balanço comece, todo o movimento acabará por chegar a um padrão regular, de um lado para outro, com o balanço atingindo a mesma altura, a cada vez. Isso pode acontecer.²⁰ Mas, por estranho que pareça, o movimento também pode tornar-se incerto, primeiro alto, depois baixo, sem seguir nunca um padrão constante e sem repetir nunca exatamente o mesmo padrão de oscilações.²¹

O comportamento surpreendente, irregular, vem de um desvio não-linear no fluxo de energia, tanto para o balanço como do balanço, que é um oscilador simples. O balanço é amortecido e impulsionado: amortecido porque o atrito tenta pará-lo, impulsionado porque recebe um impulso periódico. Mesmo quando um sistema amortecido e impulsionado está em equilíbrio, ele não está em equilíbrio, e o mundo está cheio desses sistemas, a começar pelas condições atmosféricas, amortecidas pelo atrito do ar e da água em movimento e pela dissipação do calor no espaço exterior, e impulsionadas pela pressão constante da energia solar.

A imprevisibilidade, porém, não foi a razão pela qual físicos e matemáticos começaram a levar os pêndulos novamente a sério nas décadas de 60 e 70. Ela foi apenas o chamariz da atenção. Os estudiosos da dinâmica caótica descobriram que o comportamento irregular de sistemas simples agia como um processo *criativo*. Gerava complexidade: padrões de organização variada, por vezes estáveis e por vezes instáveis, por vezes finitos e por vezes infinitos, mas sempre com o fascínio das coisas vivas. Era por isso que os cientistas brincavam com brinquedos.

Um desses brinquedos, vendido sob o nome de “Bolas Espaciais”, ou “Trapézio Espacial”, é um par de bolas nas pontas de uma haste, colocada como barra transversal do T no alto de um pêndulo, com uma terceira bola, mais pesada, na base.²² Esta última oscila de um lado para outro, enquanto a barra transversal gira livremente. Todas as três bolas têm pequenos ímãs dentro, e quando acionado, o aparelho mantém-se em movimento porque tem um eletroímã a pilhas em sua base. Esse ímã sente a aproximação da bola inferior e dá-lhe um pequeno impulso magnético quando ela passa. Por vezes o aparelho adquire uma oscilação rítmica, constante. Em outras ocasiões, porém, seu movimento parece caótico, sempre variado e sempre surpreendente.

Outro brinquedo comum feito com o pêndulo é chamado pêndulo esférico — um pêndulo que pode oscilar não apenas com o movimento de vai-e-vem, mas em qualquer direção. Pequenos ímãs são colocados na sua base; eles atraem o peso de metal, e quando o pêndulo parar, terá sido dominado por um dos ímãs. A idéia é colocar o pêndulo num movimento oscilatório e adivinhar que ímã ganhará. Nem mesmo com apenas três ímãs colocados num triângulo, o movimento do pêndulo pode ser previsto. Ele oscilará de um lado para outro entre A e B por algum tempo, depois passará a oscilar entre B e C e, quando parece que se decidirá por C, volta novamente a A. Suponhamos que um cientista explore sistematicamente o comportamento desse brinquedo fazendo um mapa, como se segue: escolhe um ponto de partida; coloca o peso do pêndulo ali e o solta; marca esse ponto de vermelho, azul ou verde, dependendo do ímã que acaba atraindo o peso. Que aspecto terá o mapa? Terá regiões só de vermelho, azul, ou verde, como se poderia esperar — regiões de onde o peso oscilará seguramente para determinado ímã. Mas também pode ter regiões nas quais as cores estarão misturadas, numa infinita complexidade. Junto a um ponto vermelho, por mais de perto que examinemos, e por mais que amplie-mos o mapa, haverá pontos verdes e azuis. Para todas as finalidades práticas, será impossível prever o destino do peso do pêndulo.

Tradicionalmente, os especialistas em dinâmica acreditam que escrever as equações de um sistema é compreendê-lo. Haveria melhor maneira de capturar-lhe os aspectos essenciais? Em relação ao balanço ou a um brinquedo, as equações reúnem o ângulo, a velocidade, o atrito e a força que impulsiona o pêndulo. Mas, em virtude das pequenas não-linearidades dessas equações, os especialistas se veriam incapazes de responder às mais fáceis perguntas práticas sobre o futuro do sistema. Um computador pode ocupar-se do problema simulando-o e calculando rapidamente cada ciclo. A simulação, porém, encerra problemas próprios: a minúscula imprecisão intrínseca a cada cálculo cresce rapidamente, porque se trata de um sistema com uma dependência sensível das condições iniciais. Em pouco tempo, o sinal desaparece e tudo o que resta é o barulho.

Mas será mesmo? Lorenz descobriu a imprevisibilidade, mas também descobriu padrões. Outros descobriram sugestões de estruturas em meio a comportamentos aparentemente aleatórios. O exemplo do pêndulo era demasiado simples e podia ser ignorado, mas os que preferiram não ignorá-lo descobriram uma mensagem estimulante. Perceberam que num certo sentido a física compreendia perfeitamente os mecanismos fundamentais do movimento pendular, mas não podia estender essa compreensão aos prazos longos. As peças microscópicas eram perfeitamente claras; o comportamento macroscópico permanecia um mistério. A tradição de examinar os sistemas localmente — de isolar os mecanismos para depois somá-los — estava começando a desmoronar. Para os pêndulos, para os fluidos, para os circuitos eletrônicos, para os *lasers*, o conhecimento das equações fundamentais já não parecia ser o tipo de conhecimento adequado.

No decorrer da década de 60, cientistas fizeram, individualmente, descobertas que se comparavam às de Lorenz: um astrônomo francês²³ ao estudar as órbitas galácticas, por exemplo, e um engenheiro eletricista japonês²⁴ ao criar modelos de circuitos eletrônicos. Mas a primeira tentativa deliberada, coordenada, de compreender como o comportamento global podia diferir do comportamento local foi feita por matemáticos. Entre eles estavam Stephen Smale, da Universidade da Califórnia em Berkeley, já famoso por deslindar os mais esotéricos problemas da topologia multidimensional. Um jovem físico,²⁵ para entabular conversa, perguntou a Smale em que ele estava trabalhando. A resposta o espantou: "Osciladores". Era absurdo. Osciladores: pêndulos, molas ou circuitos elétricos — eram problemas que o físico liquidava logo no início de seus estudos. Eram fáceis. Por que um grande matemático estaria estudando física elementar? Só anos depois o jovem compreendeu que Smale

se estava ocupando de osciladores não-lineares, osciladores caóticos, e vendo coisas que os físicos tinham aprendido a não ver.

Smale fez uma má conjectura. Nos mais rigorosos termos matemáticos, ele afirmou que praticamente todos os sistemas dinâmicos tendiam a adotar, na maioria dos casos, um comportamento que não era demasiado estranho. Como verificou logo, as coisas não eram assim tão simples.

Smale era um matemático que não só resolvia problemas, como também criava programas de problemas para que outros resolvessem.²⁶ Transformou seu conhecimento de história e sua intuição sobre a natureza na capacidade de anunciar, tranqüilamente, que toda uma área de pesquisa ainda não tentada era agora digna do tempo de um matemático. Como um homem de negócios bem-sucedido, calculou os riscos e planejou friamente sua estratégia; e ele tinha uma característica de Pied Piper*. Quando Smale liderava, muitos o seguiam. Sua reputação, porém, não se limitava à matemática. Em princípios da guerra do Vietnã, ele e Jerry Rubin organizaram "Dias Internacionais de Protesto" e patrocinaram tentativas de impedir que trens que transportavam soldados passassem pela Califórnia. Em 1966, enquanto a Comissão de Atividades Antiamericanas do Congresso tentava convocá-lo a depor, ele se dirigia para Moscou, a fim de comparecer ao Congresso Internacional de Matemáticos. Ali, foi agraciado com a Medalha Fields, a mais alta honraria de sua profissão.

O que aconteceu em Moscou naquele verão tornou-se parte indelével da lenda de Smale.²⁷ Cinco mil matemáticos agitados e agitadores se tinham reunido ali. A tensão política era forte. Circulavam petições. Quando o encontro se aproximava do fim, Smale atendeu à solicitação de um repórter norte-vietnamita, dando uma entrevista coletiva nas amplas escadarias da Universidade de Moscou. Começou condenando a intervenção americana no Vietnã e logo depois, quando seus anfitriões ainda estavam sorrindo, acrescentou uma condenação da invasão soviética da Hungria e da ausência de liberdade política na União Soviética. Quando terminou, foi retirado dali rapidamente, de carro, para ser interrogado por funcionários soviéticos. Ao voltar para a Califórnia, a Fundação Nacional da Ciência cancelou o auxílio que lhe vinha prestando para pesquisas.²⁸

* Herói alemão lendário, que tinha o dom de convencer as pessoas a segui-lo, especialmente em empresas absurdas. (N. do T.)

A Medalha Fields, ganha por Smale, honrava um famoso trabalho em topologia, ramo da matemática que floresceu no século XX e teve seus dias de maior glória na década de 50. A topologia estuda as propriedades que permanecem inalteradas quando as formas se modificam ao serem submetidas a torções, dilatações ou compressões. Se a forma é quadrada ou redonda, grande ou pequena, é irrelevante em topologia, porque a dilatação pode modificar tais propriedades. Os topologistas indagam se a forma está ligada, se tem buracos, se tem protuberâncias. Imaginam superfícies não apenas nos universos unidimensional, bidimensional e tridimensional de Euclides, mas em espaços de muitas dimensões, cuja visualização é impossível. A topologia é a geometria com formas de borracha. Preocupa-se mais com os aspectos qualitativos do que com os quantitativos. Pergunta, caso não saibamos as medidas, o que podemos dizer sobre a estrutura geral. Smale tinha resolvido um dos importantes e históricos problemas da topologia, a hipótese de Poincaré, para espaços de cinco dimensões ou mais, e com isso conquistou uma posição segura como um dos grandes homens deste campo. Na década de 60, porém, deixou a topologia para tentar um território inexplorado. Começou a estudar os sistemas dinâmicos.

As duas matérias, topologia e sistemas dinâmicos, remontavam a Henri Poincaré, que as via como as duas faces da mesma moeda. Poincaré foi, na passagem do século, o último grande matemático a fazer com que a imaginação geométrica tivesse influência nas leis do movimento do mundo físico. Foi o primeiro a perceber a possibilidade do caos; seus trabalhos indicavam uma espécie de imprevisibilidade quase tão séria como a descoberta por Lorenz. Depois da morte de Poincaré, porém, enquanto a topologia florescia, os sistemas dinâmicos se atrofiaram. Até o nome deixou de ser usado; a matéria para a qual Smale voltou-se era chamada, oficialmente, de equações diferenciais. As equações diferenciais descrevem a maneira pela qual os sistemas se modificam constantemente com o tempo. A tradição consistia em examinar tais coisas do ponto de vista local, isto é, engenheiros ou físicos examinavam uma série de possibilidades de cada vez. Como Poincaré, Smale queria compreendê-las globalmente, ou seja, queria compreender todo o reino de possibilidades ao mesmo tempo.

Qualquer série de equações descritivas de um sistema dinâmico — as de Lorenz, por exemplo — permite a fixação de certos parâmetros iniciais. No caso da convecção térmica, um parâmetro relaciona-se com a viscosidade do fluido. Grandes variações nos parâmetros podem causar grandes diferenças num sistema — por exemplo, a diferença entre chegar-se a um regime estacionário ou à oscilação periódica. Os físicos, porém, supunham que modifica-

ções muito pequenas provocariam apenas diferenças muito pequenas nos números, e não modificações qualitativas no comportamento.

Relacionar a topologia com os sistemas dinâmicos é criar a possibilidade de usar uma forma para ajudar a visualizar toda a gama de comportamentos de um sistema. Para um sistema simples, a forma poderia ser uma espécie de superfície curva; para um sistema complicado, um tubo de muitas dimensões. Um único ponto nessa superfície representa o estado de um sistema num momento congelado de tempo. Quando o sistema avança no tempo, o ponto se move, traçando uma órbita através dessa superfície. Encurvar um pouco a forma corresponde a modificar os parâmetros do sistema, tornando um fluido mais viscoso ou impulsionando o pêndulo com um pouco mais de força. Formas que mantêm aproximadamente a mesma aparência exibem aproximadamente os mesmos tipos de comportamento. Se pudermos visualizar a forma, poderemos compreender o sistema.

Quando Smale se voltou para os sistemas dinâmicos, a topologia, como a maioria da matemática pura, era praticada com um desprezo explícito pelas aplicações no mundo real. As origens da topologia estavam próximas da física, mas para os matemáticos as origens físicas estavam esquecidas, e as formas eram estudadas por si mesmas. Smale acreditava plenamente nessa atitude — era o mais puro dos puros — e apesar disso tinha a idéia de que o desenvolvimento abstrato, esotérico, da topologia poderia contribuir com alguma coisa para a física, tal como Poincaré pretendia na passagem do século.

Uma das primeiras contribuições de Smale foi a sua hipótese errônea. Em termos físicos, ele estava propondo uma lei da natureza mais ou menos assim: um sistema pode comportar-se de maneira irregular, mas o comportamento irregular não pode ser *estável*. A estabilidade — “estabilidade no sentido de Smale”, como os matemáticos diziam por vezes — era uma propriedade crucial. O comportamento estável num sistema era um comportamento que não desaparecia apenas porque algum número era modificado um pouquinho. Qualquer sistema podia ter comportamentos estável e instável ao mesmo tempo. As equações que governam a permanência de um lápis sobre a sua ponta têm uma boa solução matemática com o centro de gravidade diretamente acima da ponta — mas não podemos colocar um lápis sobre sua ponta porque a solução é instável. A menor perturbação faz com que o sistema escape dessa solução. Por outro lado, uma bola de gude no fundo de uma tigela permanece ali, porque se a bola for levemente perturbada, rola novamente para o ponto inicial. Os físicos supunham que qualquer comportamento que pudessem observar regularmente na prática, teria

de ser estável, já que nos sistemas reais pequenas perturbações e incertezas são inevitáveis. Nunca conhecemos exatamente os parâmetros. Se quisermos um modelo que seja ao mesmo tempo fisicamente realista e resistente às pequenas perturbações, os físicos dirão que certamente queremos um modelo estável.

A má notícia chegou pelo correio logo depois do Natal de 1959, quando Smale vivia temporariamente num apartamento no Rio de Janeiro, com a mulher, dois filhos pequenos e uma grande quantidade de fraldas. Sua hipótese tinha definido uma classe de equações diferenciais, todas estruturalmente estáveis. Qualquer sistema caótico, dizia ele, é passível de uma aproximação tão grande quanto se deseje, por um sistema na sua classe. Mas isso não acontecia. Uma carta de um colega²⁹ informava que muitos sistemas não se comportavam tão bem quanto ele imaginara, e descrevia um contra-exemplo, um sistema com caos e estabilidade, juntos. Esse sistema era resistente. Se fosse levemente perturbado, como qualquer sistema natural é constantemente perturbado pelo ruído, a estranheza não desaparecia. Resistente e estranho — Smale estudou a carta com uma descrença que foi desaparecendo lentamente.³⁰

Caos e instabilidade, conceitos que estavam apenas começando a adquirir definições formais, não eram a mesma coisa. Um sistema caótico podia ser estável se sua irregularidade específica perdesse diante de pequenas perturbações. O sistema de Lorenz era um exemplo, embora transcorressem anos antes que Smale ouvisse falar de Lorenz. O caos descoberto por Lorenz, com toda a sua imprevisibilidade, era tão estável quanto uma bola de gude numa tigela. Poderíamos acrescentar ruído ao sistema, sacudi-lo, agitá-lo, interferir em seu movimento, mas quando tudo se acalmava, quando as interferências passageiras desapareciam como ecos num precipício, o sistema voltava ao mesmo padrão singular de irregularidades de antes. Era localmente imprevisível, globalmente estável. Sistemas dinâmicos reais agiam segundo uma série de regras mais complicadas do que se tinha imaginado. O exemplo descrito na carta do colega de Smale era um outro sistema simples, descoberto havia mais de uma geração, e quase esquecido. Era um pêndulo disfarçado: um circuito eletrônico oscilante. Era não-linear e era periodicamente alimentado, como uma criança num balanço.

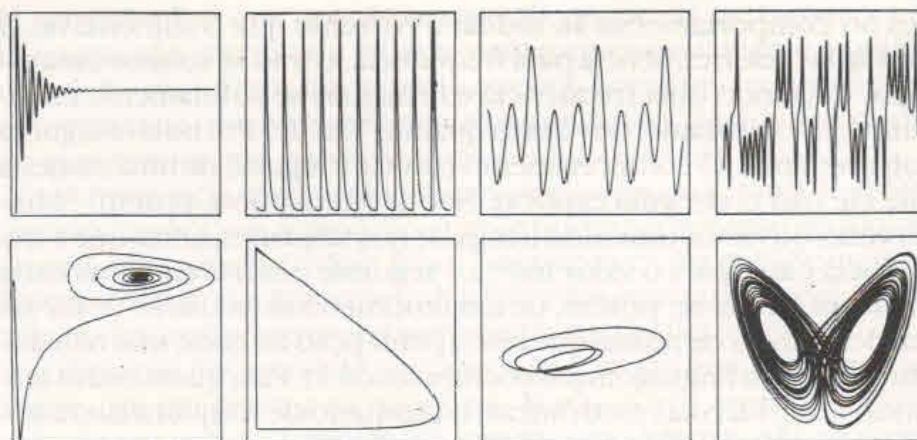
Era uma válvula eletrônica, realmente, investigada na década de 20 por um engenheiro eletricista holandês chamado Balthasar van der Pol.³¹ Um estudante moderno de física investigaria o comportamento desse oscilador examinando a linha traçada na tela de um osciloscópio. Van der Pol não dispunha de um osciloscópio, por isso tinha de acompanhar seu circuito ouvindo as variações de tom num aparelho telefônico. Teve a satisfação de descobrir regularida-

des no comportamento ao mudar a corrente que o alimentava. O tom saltava de frequência para frequência, como se subisse uma escada, deixando uma frequência e firmando-se solidamente na seguinte. Não obstante, de vez em quando Van der Pol notava alguma coisa estranha. O comportamento parecia irregular, de uma maneira que ele não conseguia explicar. Não se preocupou, porém. “Muitas vezes ouvimos um ruído irregular nos telefones, antes que a frequência passe para o valor inferior seguinte”, escreveu numa carta a *Nature*. “Trata-se, porém, de um fenômeno subsidiário”.³² Ele foi um dos muitos cientistas que teve a percepção do caos, mas não dispunha de uma linguagem para compreendê-lo. Para quem estava tentando fazer válvulas eletrônicas, o bloqueio de frequência era importante. Mas, para as pessoas que tentavam compreender a natureza da complexidade, o comportamento realmente interessante seria o “barulho irregular” criado pelas trações conflitantes de frequências maiores e menores.

Mesmo errada, a hipótese de Smale o colocou diretamente no caminho de uma nova maneira de conceber toda a complexidade dos sistemas dinâmicos. Vários matemáticos tinham examinado as possibilidades do oscilador de Van der Pol, e Smale transferiu o trabalho deles para uma nova esfera. Sua única tela de osciloscópio era sua mente, mas uma mente condicionada por anos de exploração do universo topológico. Smale concebeu toda a gama de possibilidades do oscilador, todo o espaço de fase, como os físicos diziam. Qualquer estado do sistema num momento congelado no tempo era representado como um ponto no espaço de fase; toda informação sobre sua posição ou velocidade estava encerrada nas coordenadas daquele ponto. Quando o sistema se modificava de alguma maneira, o ponto movia-se para uma nova posição no espaço de fase. Quando o sistema se modificava continuamente, o ponto traçava uma trajetória.

Para um sistema simples como o pêndulo, o espaço de fase poderia ser apenas um retângulo: o ângulo do pêndulo num dado momento determinaria a posição leste-oeste de um ponto e a velocidade do pêndulo determinaria a posição norte-sul. Para um pêndulo que oscilasse regularmente de um lado para outro, a trajetória pelo espaço de fase seria um *loop*, repetindo-se à medida que o sistema atravessasse a mesma seqüência de posições repetidas vezes.

Em lugar de examinar uma trajetória específica, Smale concentrou-se no comportamento de todo o espaço, à medida que o sistema se modificava — quando maior energia propulsora lhe era acrescentada, por exemplo. Sua intuição pulou da essência física do sistema para um novo tipo de essência geométrica. Seus instrumentos eram as transformações topológicas das formas no espaço

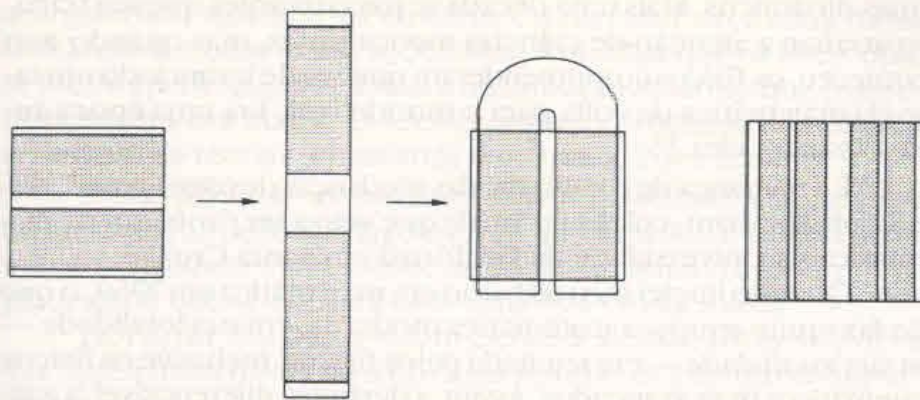


RETRATOS NO ESPAÇO DE FASE. As séries temporais tradicionais (ao alto) e as trajetórias no espaço de fase (embaixo) são duas maneiras de mostrar os mesmos dados e conseguir um retrato do comportamento do sistema a longo prazo. O primeiro sistema (esquerda) converge para um regime estacionário — um ponto no espaço de fase. O segundo repete-se periodicamente, formando uma órbita cíclica. O terceiro repete-se num ritmo de valsa mais complicada, um ciclo com “período três”. O quarto é caótico.

de fase — transformações como dilatação e compressão. Por vezes essas transformações tinham um significado físico claro. A dissipação num sistema, a perda de energia pelo atrito, significava que a forma do sistema no espaço de fase se contrairia como um balão que perde o gás — encolhendo-se finalmente a um ponto, no momento em que o sistema pára totalmente. Para representar a complexidade total do oscilador de Van der Pol, ele compreendeu que o espaço de fase teria de sofrer um novo e complexo tipo de combinação de transformações. Converteu rapidamente sua idéia sobre a visualização do comportamento global num novo tipo de modelo. Sua inovação — uma imagem duradoura do caos nos anos que se seguiram — foi uma estrutura que se tornou conhecida como a ferradura.

Para fazer uma versão simples da ferradura de Smale,³³ toma-se um retângulo, aperta-se no alto e embaixo, até transformá-lo numa barra horizontal. Toma-se uma das pontas da barra, dobra-se e estende-se até a altura da outra ponta, formando uma espécie de C, como uma ferradura. Imagine-se em seguida a ferradura enquadrada num novo retângulo e repita-se a mesma transformação, encolhendo, dobrando e espichando.

O processo reproduz o trabalho de uma máquina de fazer caramelo, ou puxa-puxa,³⁴ com braços rotativos que abrem a mas-



A FERRADURA DE SMALE. Essa transformação topológica constitui uma base para o entendimento das propriedades caóticas dos sistemas dinâmicos. Os fundamentos são simples: um espaço é estendido numa direção, apertado na outra e depois dobrado. Quando o processo é repetido, produz uma espécie de mistura estruturada, conhecida de quem já bateu massa de rosca de muitas camadas. Um par de pontos que acabam juntos pode ter começado muito separados.

sa, estendem-na, dobram-na, estendem-na novamente, e assim por diante até que a sua superfície se torna bastante longa, fina e intrinsecamente contida em si mesma. Smale submeteu sua ferradura a uma variedade de fases topológicas e, matemática à parte, a ferradura proporcionou um claro visual análogo da dependência sensível das condições iniciais que Lorenz descobriria na atmosfera, alguns anos depois. Tomem-se dois pontos próximos no espaço original, e não poderemos supor onde acabarão. Eles serão muito afastados um do outro, arbitrariamente, pelo movimento de esticar e dobrar. Depois disso, dois pontos que por acaso se encontram próximos terão começado arbitrariamente muito distantes.

Originalmente, Smale esperava explicar todos os sistemas dinâmicos em termos desses movimentos de esticar e apertar — sem dobrar, ou pelo menos sem dobrar a ponto de solapar drasticamente a estabilidade do sistema. Mas comprovou-se ser necessário dobrar,³⁵ e isso permitiu acentuadas modificações no comportamento dinâmico. A ferradura de Smale ficou sendo a primeira de muitas formas geométricas novas que deram aos matemáticos e físicos uma nova intuição sobre as possibilidades do movimento. Sob certos aspectos, ela era demasiado artificial para ser útil, ainda era muito uma criatura da topologia matemática para interessar os físicos. Serviu, porém, de ponto de partida. No decorrer da década de 60 Smale reuniu à sua volta, em Berkeley, um grupo de jovens matemáticos que compartilhavam de seu entusiasmo pelo novo trabalho com sis-

temas dinâmicos. Mais uma década se passaria antes que seu trabalho atraísse a atenção de ciências menos puras, mas quando isso aconteceu, os físicos compreenderam que Smale levava todo um ramo da matemática de volta para o mundo real. Era uma época áurea, disseram eles.³⁶

“É a mudança de paradigma das mudanças de paradigmas”, disse Ralph Abraham, colega de Smale que veio a ser professor de matemática da Universidade da Califórnia em Santa Cruz.³⁷

“Quando iniciei meu trabalho em matemática em 1960, o que não faz muito tempo, a matemática moderna, em sua totalidade — em sua *totalidade* —, era rejeitada pelos físicos, inclusive os físicos matemáticos mais avançados. Assim, a dinâmica diferenciável, a análise global, as variedades de mapeamento, a geometria diferencial — tudo o que estava um ou dois anos à frente do que Einstein tinha usado —, eram rejeitadas. O romance entre a matemática e os físicos terminara em divórcio na década de 30. Já não se falavam. Simplesmente, desprezavam-se uns aos outros. Os físicos matemáticos não davam aos seus alunos permissão para seguir cursos de matemática com matemáticos: *Aprenda matemática conosco. Nós lhe ensinaremos tudo o que você precisa saber. Os matemáticos estão numa espécie de orgia de egoísmo terrível e destruirão a sua mente.* Isso foi em 1960. Em 1968 a situação se tinha modificado totalmente.” Físicos, astrônomos e biólogos acabaram sabendo, todos, que tinham de se inteirar das novidades.

Um modesto mistério cósmico:³⁸ a Grande Mancha Vermelha de Júpiter, um enorme oval rotativo, como uma tempestade gigantesca, que nunca se move e nunca se esgota. Quem viu as imagens transmitidas através do espaço pelo *Voyager 2*, em 1978, reconheceu a aparência familiar de turbulência numa escala gigantesca e nada familiar. Era um dos marcos mais veneráveis do sistema solar — “a mancha vermelha bramindo como um olho angustiado / em meio à turbulência de sobranceiras ferventes”,³⁹ como John Updike a descreveu. Mas o que era ela? Vinte anos depois de Lorenz, Smale e outros cientistas terem apresentado um novo modo de entender os fluxos da natureza, as condições de tempo extra-terrenas de Júpiter revelavam-se um dos muitos problemas que esperavam um novo sentimento das possibilidades da natureza, proporcionado pela ciência do caos.

Durante três séculos, a mancha vinha sendo um exemplo do fenômeno em relação ao qual quanto mais se sabe, menos se sabe. Astrônomos notaram uma mancha no grande planeta pouco depois que Galileu apontou pela primeira vez seus telescópios para Júpiter. Robert Hooke viu-a na década de 1600-1610. Donati Creti pintou-

a na galeria de quadros do Vaticano. Como colorido, a mancha não demandava muitas explicações. Mas, à medida que os telescópios se foram aperfeiçoando, a maior informação mostrou que o desconhecimento era maior. O século passado produziu uma marcha constante de teorias, umas atrás das outras. Por exemplo:

Teoria do fluxo de lava — Em fins do século XIX cientistas imaginaram um enorme lago oval de lava liquefeita, saindo de um vulcão. Ou talvez a lava tivesse saído de um buraco criado por um planetóide que se chocara com uma fina crosta sólida.

Teoria da Nova Lua — Um cientista alemão afirmou, por sua vez, que a mancha era uma nova lua a ponto de emergir da superfície do planeta.

Teoria do ovo — Um fato novo e estranho: constatou-se que a mancha vagava lentamente sobre o pano de fundo do planeta. Assim, foi apresentada uma idéia em 1939, segundo a qual a mancha seria um corpo mais ou menos sólido flutuando na atmosfera tal como um ovo flutua na água. Variações dessa teoria — inclusive a idéia de uma bolha flutuante de hidrogênio ou hélio — perduraram durante décadas.

Teoria da coluna de gás — Outro fato novo: embora a mancha flutuasse, não ia nunca longe, razão pela qual cientistas afirmaram, na década de 60, que ela seria o alto de uma coluna de gás ascendente, possivelmente saindo de uma cratera.

Veio então o *Voyager*. A maioria dos astrônomos achou que o mistério desapareceria tão logo pudessem examiná-lo de perto, e na verdade a aproximação do *Voyager* proporcionou um esplêndido álbum de novas informações, mas estas, em última análise, não foram suficientes. As fotos da nave espacial revelaram, em 1978, ventos fortes e redemoinhos coloridos. Os astrônomos viram, em detalhes espetaculares, a própria mancha como um sistema de fluxo giratório semelhante a um furacão, empurrando para o lado as nuvens, mergulhado em zonas de vento leste-oeste que criava faixas horizontais em volta do planeta. Furacão foi a melhor descrição que se pôde imaginar, mas era inadequada por várias razões. Os furacões terrestres são impulsionados pelo calor liberado quando a umidade se condensa em chuva: nenhum processo de umidade impulsiona a Mancha Vermelha. Os furacões giram numa direção ciclônica, no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, acima do Equador, e no sentido dos ponteiros abaixo dele, como todas as tempestades da terra. A rotação da Mancha Vermelha é anticiclônica. E, o que é mais importante, os furacões se esgotam em poucos dias.

Ao estudarem as fotos do *Voyager*, os astrônomos também perceberam que o planeta era praticamente todo de fluido em movimento. Estavam condicionados a esperar um planeta sólido, cerca-

do de uma atmosfera muito pequena como a da terra, mas se Júpiter tinha um núcleo sólido, estava muito longe da superfície. O planeta passou a ter, de repente, a aparência de um grande experimento na dinâmica dos fluidos, e ali estava a Mancha Vermelha, girando constantemente, sem ser perturbada pelo caos que a cercava.

A mancha tornou-se um teste de *gestalt*. Os cientistas viam nela o que sua intuição lhes permitia ver. Um especialista em dinâmica de fluidos, que via a turbulência como aleatória e ruidosa, não tinha contexto para compreender uma ilha de estabilidade em seu meio. O *Voyager* tinha tornado o mistério ainda mais enlouquecedor, mostrando aspectos pequenos do fluxo, demasiado pequenos para serem vistos pelos mais potentes telescópios da terra.⁴⁰ Esses detalhes revelavam desorganização rápida, redemoinhos que apareciam e desapareciam num dia, ou menos. Não obstante, a mancha permanecia imune. O que a mantinha em movimento? O que a mantinha no lugar?

A Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) guarda suas fotos em arquivos, uma meia dúzia, aproximadamente, espalhados por todo o país. Um desses arquivos está na Universidade de Cornell. Ali perto, em princípios da década de 80, Philip Marcus, jovem astrônomo e estudioso da matemática aplicada, tinha seu escritório. Depois do *Voyager*, Marcus era um entre uma meia dúzia de cientistas, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha, que procuravam meios de criar um modelo da Mancha Vermelha. Libertados da teoria *ersatz* do furacão, encontraram análogos mais adequados em outros elementos. A Corrente do Golfo, por exemplo, serpenteando pelo oceano Atlântico ocidental, o faz de maneira que lembra sutilmente a mancha. Desenvolve pequenas ondas, que se transformam em nós, que se transformam em anéis e, girando, libertam-se da corrente principal — formando vértices lentos, de longa duração, anticiclônicos. Outro paralelo podia ser estabelecido com um fenômeno singular da meteorologia, conhecido como bloqueio. Por vezes um sistema de alta pressão se desloca para longe da costa, girando lentamente, durante semanas, ou meses, num desafio ao habitual fluxo leste-oeste. O bloqueio perturbava os modelos de previsão global, mas também dava aos meteorologistas alguma esperança, já que produzia características ordenadas de excepcional longevidade.

Marcus estudou essas fotos da NASA durante horas, as maravilhosas fotos de Hasselblad de homens na lua e as fotos da turbulência de Júpiter. Como as leis de Newton se aplicam a qualquer lugar, Marcus programou um computador com um sistema de equações de um fluido. Para entender a meteorologia joviana era necessário escrever regras para uma massa de hidrogênio e hélio densos, se-

melhante a uma estrela não-iluminada. O planeta gira depressa, cada dia valendo dez horas da terra. Esse movimento giratório produz uma violenta força de Coriolis, a força lateral que empurra uma pessoa que acesse um carrossel, e a força de Coriolis impulsiona a mancha.

Enquanto Lorenz usou seu pequeno modelo do tempo na terra para imprimir grosseiras linhas num rolo de papel, Marcus usou um computador muito mais potente para reunir notáveis imagens coloridas. Primeiro, ele fez gráficos de contorno. Mal podia ver o que estava acontecendo. Fez em seguida, *slides*, e depois montou as imagens num desenho animado. Foi uma revelação. Em azuis, vermelhos e amarelos brilhantes, uma configuração quadriculada de vórtices em rotação se aglutinam num oval com uma fantasmagórica semelhança com a Grande Mancha Vermelha do filme animado que a NASA fez do fenômeno real. "Vê-se essa mancha em grande escala, feliz como um marisco em meio ao caótico fluxo em pequena escala, e o fluxo caótico está sugando a energia como uma esponja", disse ele. "Vêm-se pequenas estruturas filamentosas num pano de fundo de um mar de caos."⁴¹

A mancha é um sistema auto-organizador, criado e regulado pelas mesmas mudanças não-lineares que criam a agitação imprevisível à sua volta. É o caos estável.

Durante o curso de pós-graduação, Marcus estudara a física tradicional, resolvendo equações lineares, realizando experiências destinadas a corresponder a análises lineares. Era uma existência tranqüila, mas, afinal de contas, as equações não-lineares desafiam solução, e assim sendo, por que desperdiçar o tempo do estudante? Sua formação deveria proporcionar-lhe satisfação. Desde que mantivesse as experiências dentro de certos limites, as aproximações lineares bastavam, e ele seria recompensado com a solução esperada. De vez em quando, inevitavelmente, o mundo real se intrometeria, e Marcus veria aquilo que, anos depois, compreenderia serem sinais do caos. Parava, e dizia: "Ora, e essa pequena falha aqui?". Respondiam-lhe: "Ah, é um erro de experiência, não se preocupe com ela."⁴²

Ao contrário da maioria dos físicos, porém, Marcus acabou aprendendo a lição de Lorenz, de que um sistema determinista pode produzir muito mais do que apenas um comportamento periódico. Sabia procurar a desordem, e sabia que ilhas de estrutura podem aparecer dentro da desordem. Portanto, levou para o estudo da Grande Mancha Vermelha a compreensão de que um sistema complexo pode dar origem à turbulência e à coerência, ao mesmo tempo. Podia trabalhar dentro de uma disciplina que surgia e que estava criando sua tradição própria no uso de computadores como

ferramenta de experiências. E estava disposto a considerar-se um novo tipo de cientista: e não principalmente um astrônomo, não um especialista em dinâmica dos fluidos, ou em matemática aplicada, mas um especialista em caos.

Notas

- 1 - O entendimento que tem Kuhn das revoluções científicas foi amplamente analisado e debatido nos 25 anos decorridos desde a sua apresentação, mais ou menos na época em que Lorenz estava programando seu computador para produzir um modelo das condições meteorológicas. Quanto às opiniões de Kuhn, baseei-me principalmente em *The Structure of Scientific Revolutions*, 2ª ed. aumentada (Chicago, University of Chicago Press, 1970), e secundariamente em *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change* (Chicago, University of Chicago, 1977); "What Are Scientific Revolutions?" (Occasional Paper n.º 18, Centro de Ciência Cognitiva, Instituto de Tecnologia de Massachusetts); e em entrevista com Kuhn. Outra análise útil e importante do assunto encontra-se em I. Bernard Cohen, *Revolution in Science* (Cambridge, Mass., Belknap Press, 1985.)
- 2 - *Structure*, pp. 62-65, citando J.S. Bruner e Leo Postman, "On the Perception of Incongruity: A Paradigm", *Journal of Personality*, XVIII (1949), p. 206.
- 3 - *Structure*, p. 24.
- 4 - *Tension*, p. 229.
- 5 - *Structure*, pp. 13-15.
- 6 - *Tension*, p. 234.
- 7 - Cvitanovic.
- 8 - Ford, entrevista e "Chaos: Solving the Unsolvables, Predicting the Unpredictable", em *Chaotic Dynamics and Fractals*, M.F. Barnsley e S.G. Demko, orgs. (Nova York, Academic Press, 1985.)
- 9 - Michael Berry, porém, observa que o *Oxford English Dictionary* tem "Chaology" (raro), "a história ou descrição do caos". Berry, "The Unpredictable Bouncing Rotator: A Chaology Tutorial Machine" pré-publicação, H.H. Wills Physics Laboratory, Bristol.
- 10 - Richter.
- 11 - J. Crutchfield, M. Nauenberg e J. Rudnick, "Scaling for External Noise at the Onset of Chaos", *Physical Review Letters*, 46 (1981), p. 933.
- 12 - Alan Wolf, "Simplicity and Universality in the Transition to Chaos", *Nature*, 305 (1983), p. 182.
- 13 - Joseph Ford, "What is Chaos That We Should Be Mindful of It?", pré-publicação, Instituto de Tecnologia da Geórgia, Atlanta.
- 14 - "What Are Scientific Revolutions?", p. 23.
- 15 - *Structure*, p. 111.
- 16 - Yorke e outros.