

9. A entropia e seus demônios

(*Não se pode separar as coisas agitando-as*)

O pensamento interfere na probabilidade dos eventos e, portanto, na entropia a longo prazo.

David L. Watson, 1930¹

Seria um exagero dizer que ninguém conhecia o significado de *entropia*. Ainda assim, não deixava de ser uma daquelas palavras polêmicas. Nos Laboratórios Bell, os boatos diziam que Shannon tinha tomado emprestado o termo de John von Neumann, que teria dado a ele o conselho de que seria possível usá-lo para ganhar qualquer debate porque ninguém o compreenderia.² Falso, mas plausível. A palavra já chegou a significar até o oposto de si mesma. Continua penosamente difícil de definir. Fugindo às próprias características, o *Oxford English Dictionary* arrisca:

1. Nome dado a um dos elementos quantitativos que determinam a condição termodinâmica de uma porção de matéria.

Rudolf Clausius cunhou a palavra em 1865, durante o processo de criação da ciência termodinâmica. Ele precisava dar nome a uma certa quantidade que tinha descoberto — uma quantidade relacionada à energia, mas diferente dela.

A termodinâmica surgiu de mãos dadas com os motores a vapor; era a princípio nada mais do que “o estudo teórico do motor a vapor”.³ Seu objeto era a conversão do calor, ou energia, em trabalho. À medida que isso ocorre — o calor impulsiona o motor —, Clausius observou que o calor não se perde de fato, ele é simplesmente transferido de um corpo mais quente para um corpo mais frio. Nesse percurso, realiza algo. Funciona como uma roda-d’água, como insistia em apontar Nicolas Sadi Carnot, na França: a água começa no alto e termina no fundo, e nenhuma porção dela é ganhada ou perdida, mas a água realiza um trabalho no decorrer de sua descida. Carnot imaginou o calor como uma substância semelhante. A capacidade de produzir trabalho de um sistema termodinâmico não depende do calor em si, e sim do contraste entre quente e frio. Uma pedra quente mergulhada em água fria pode gerar trabalho — ao criar, por exemplo, o vapor que impulsiona uma turbina —, mas o calor total no sistema (pedra mais água) se mantém constante. No fim, a pedra e a água chegam à mesma temperatura. Independentemente da quantidade de energia contida num sistema fechado, quando tudo chega à mesma temperatura, nenhum trabalho pode ser feito.

É a indisponibilidade dessa energia — sua inutilidade para o trabalho — que Clausius queria medir. Ele chegou à palavra *entropia*, formada a partir do grego para significar “conteúdo transformacional”. Seus pares ingleses imediatamente enxergaram o conceito proposto, mas decidiram que Clausius o tinha invertido ao se concentrar na parte negativa. Em sua *Teoria do calor*, James Clerk Maxwell sugeriu que seria “mais conveniente” fazer com que a entropia significasse o oposto: “a parte que *pode* ser convertida em trabalho mecânico”. Assim:

Quando a pressão e a temperatura do sistema se tornam uniformes podemos dizer que a entropia se exauriu.

Mas, em questão de poucos anos, Maxwell virou a casaca e decidiu seguir Clausius.⁴ Reescreveu o próprio livro e acrescentou uma constrangida nota de rodapé:

Nas edições anteriores deste livro o significado do termo “entropia”, conforme apresentado por Clausius, foi equivocadamente descrito como a parte da energia que não pode ser convertida em trabalho. O livro então passou a usar a palavra

como equivalente à energia disponível, trazendo assim grande confusão para a linguagem da termodinâmica. Nesta edição agi no sentido de usar a palavra “entropia” de acordo com a definição original de Clausius.

O problema não estava apenas em escolher entre positivo e negativo. A questão era mais sutil. Maxwell tinha inicialmente imaginado a entropia como um subtipo de energia: a energia disponível para o trabalho. Reconsiderando, reconheceu que a termodinâmica precisava de uma medida diferente. A entropia não era um tipo de medida nem uma quantidade de energia; era, como tinha dito Clausius, a *indisponibilidade* de energia. Por mais abstrata que fosse, ela se revelou uma quantidade tão passível de ser medida quanto a temperatura, o volume e a pressão.

Ela se tornou um conceito totêmico. Com a entropia, as “leis” da termodinâmica podiam ser expressas organizadamente:

Primeira lei: A energia do universo é constante.

Segunda lei: A entropia do universo sempre aumenta.

Há muitas outras formulações dessas leis, passando da matemática à imprevisibilidade, por exemplo, “1. Não se pode vencer; 2. Não se pode sair sem perder”.⁵ Mas esta é a mais cósmica e fatalista. O universo está se esgotando. Trata-se de uma via degenerativa de mão única. O estado final de entropia máxima é nosso destino.

William Thomson, o lorde Kelvin, gravou a segunda lei na imaginação popular ao festejar seu lado sombrio: “Por mais que a energia mecânica seja *indestrutível*”, declarou ele em 1862, “existe uma tendência universal à dissipação, que produz o aumento gradual e a difusão do calor, o fim do movimento e a exaustão da energia potencial em todo o universo material. O resultado disso seria um estado de repouso universal e morte”.⁶ Assim, a entropia ditou o destino do universo no romance *A máquina do tempo*, de H. G. Wells: a vida se esgotando, o sol moribundo, a “abominável desolação que pesava sobre o mundo”. A morte do calor não é fria, e sim morna e monótona. Freud pensou ter enxergado algo de útil aqui em 1918, embora tenha expressado isso com pouca clareza: “Ao pensar na conversão da energia psíquica tanto como na da física, devemos recorrer ao conceito de uma entropia, que se opõe à reversão daquilo que já ocorreu”.⁷

Thomson gostava de aplicar a isso a palavra *dissipação*. A energia não se perde; é dissipada. A energia dissipada está presente, mas é inútil. Foi Maxwell, no entanto, quem começou a se concentrar na própria confusão — a desordem — como qualidade essencial da entropia. A desordem parecia estranhamente não física. Ela implicava que uma parte da equação deveria ser algo como o conhecimento, ou a inteligência, ou o juízo. “A ideia da dissipação da energia depende da extensão de nosso conhecimento”, afirmou Maxwell. “A energia disponível é a energia que pode ser dirigida a qualquer canal desejado. A energia dissipada é a energia da qual não podemos nos apoderar nem dirigir conforme nossos anseios, como a energia da confusa agitação das moléculas à qual damos o nome de calor.” Aquilo que *nós* podemos fazer, ou aquilo que sabemos, tornou-se parte da definição. Pareceu impossível falar em ordem e desordem sem envolver um agente ou um observador — sem falar a respeito da consciência:

A confusão, como a ordem, termo correlacionado, não é uma propriedade das coisas materiais em si, e sim algo associado à consciência que as percebe. Desde que seja escrito com clareza, um livro-memorando não parece confuso para uma pessoa iletrada nem para o dono que o compreende por inteiro, mas, para qualquer outra pessoa capaz de ler, a obra parece ser complexa e confusa. Da mesma maneira, a noção de energia dissipada não poderia ocorrer para alguém que não conseguisse transformar nenhuma das energias da natureza por conta própria, nem para alguém que pudesse rastrear o movimento de cada molécula e apreendê-lo no momento certo.⁸

A ordem é subjetiva — está no olhar do observador. Ordem e confusão não são o tipo de coisa que um matemático tentaria definir nem medir. Ou são? Se a desordem corresponde à entropia, talvez ela estivesse afinal pronta para receber tratamento científico.

Como caso ideal, os pioneiros da termodinâmica pensaram numa caixa contendo gás. Composta de átomos, tal substância está longe da simplicidade e da calma. Trata-se de um vasto conjunto de partículas agitadas. Os átomos nunca tinham sido vistos, e sua existência era hipotética, mas esses teóricos — Clausius, Kelvin, Maxwell, Ludwig Boltzmann, Willard Gibbs — aceitaram a

natureza atômica de um fluido e tentaram desvendar suas consequências: mistura, violência, movimento contínuo. Eles compreenderam então que tal movimento constitui o calor. O calor não é uma substância, nem um fluido, nem um “flogisto” — apenas o movimento das moléculas.

Individualmente as moléculas precisam obedecer às leis de Newton — e cada ação e cada colisão são, em teoria, passíveis de serem medidas e calculadas. Mas elas eram numerosas demais para serem medidas e calculadas uma a uma. A probabilidade entrou em cena. A nova ciência da mecânica estatística fez uma ponte entre os detalhes microscópicos e o comportamento macroscópico. Suponhamos que uma caixa de gás seja dividida por um diafragma. O gás no lado A é mais quente do que o gás no lado B — ou seja, as moléculas do lado A estão se movendo mais rápido, com mais energia. Assim que a divisória é removida, as moléculas começam a se misturar; as rápidas colidem com as lentas; a energia é trocada; e, depois de algum tempo, o gás atinge uma temperatura uniforme. O mistério é o seguinte: por que o processo não pode ser revertido? Nas equações newtonianas do movimento, o tempo pode ter um sinal negativo ou positivo — a matemática funciona em ambos os sentidos. No mundo real, o intercâmbio entre passado e futuro não se dá com tamanha facilidade.

“O tempo segue adiante, nunca recua”, afirmou Léon Brillouin em 1949. “Quando o físico é confrontado com esse fato, sente-se muito perturbado.” Maxwell tinha ficado um pouco perturbado. Ele escreveu a lord Rayleigh:

Se este mundo é um sistema puramente dinâmico, e se revertermos com precisão o movimento de cada partícula dele no mesmo instante, então todas as coisas ocorrerão de trás para a frente até o início de tudo, os pingos de chuva se erguerão do chão e voltarão para as nuvens etc. etc., e os homens verão seus amigos passando da tumba para o berço até que todos nós nos tornemos o inverso de nascidos, seja lá o que isso for.

O que ele queria dizer era que, nos detalhes microscópicos, se observarmos o movimento de moléculas individuais, seu comportamento é o mesmo avançando ou recuando no tempo. Podemos exibir o filme no sentido contrário. Mas, ao nos afastarmos e observarmos a caixa de gás como um conjunto, o processo de mistura se torna estatisticamente uma via de mão única. Podemos observar o fluido por toda a eternidade, e ele jamais se dividirá em moléculas

quentes de um lado e moléculas frias do outro. Em *Arcádia*, de Tom Stoppard, a inteligente jovem Thomasina diz: “Não se pode separar as coisas agitando-as”, e isso é exatamente o mesmo que “O tempo segue adiante, nunca recua”. Processos como esses só ocorrem numa direção. O motivo disso é a probabilidade. O que é notável — algo que os físicos levaram muito tempo para aceitar — é o fato de cada processo irreversível ter necessariamente que ser explicado da mesma maneira. O próprio tempo depende do acaso, ou dos “acidentes da vida”, como Richard Feynman gostava de dizer: “Bem, vemos que tudo não passa do fato de a irreversibilidade ser causada pelos acidentes da vida em geral”.¹⁰ Fazer com que a caixa de gás se desmisture não é fisicamente impossível, é apenas improvável ao extremo. Assim sendo, a segunda lei é apenas probabilística. Do ponto de vista estatístico, tudo tende à máxima entropia.

Mas a probabilidade é o bastante: o suficiente para que a segunda lei se mantenha como um pilar da ciência. Nas palavras de Maxwell:

Moral. A 2ª lei da Termodinâmica tem o mesmo grau de verdade da afirmação que diz que, se jogarmos uma jarra de água no mar, não se pode recuperar a mesma água novamente.¹¹

A improbabilidade de o calor passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente (sem ajuda externa) é idêntica à improbabilidade do surgimento espontâneo da ordem a partir da desordem (sem ajuda externa). Fundamentalmente, ambas decorrem da estatística. Ao contarmos todas as maneiras possíveis segundo as quais um sistema pode ser disposto, as moléculas desorganizadas somam um número muito maior do que as organizadas. Há muitos arranjos, ou “estados”, nos quais as moléculas se encontram todas amontoadas, e poucos nos quais elas se mostram cuidadosamente distribuídas. Os estados ordenados apresentam uma probabilidade baixa e uma entropia igualmente baixa. Para os graus mais impressionantes de organização, as probabilidades podem ser *muito* baixas. Certa vez Alan Turing propôs caprichosamente um número N , definido como “a probabilidade de um pedaço de giz saltar para o outro lado de um cômodo e escrever um verso de Shakespeare na lousa”.¹²

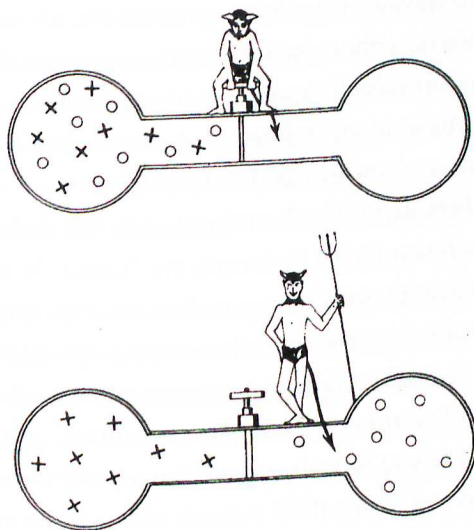
Com o passar do tempo, os físicos começaram a falar em microestados e macroestados. Um macroestado pode ser: todo o gás na metade superior da caixa. Os microestados correspondentes seriam todos os arranjos possíveis de

todas as partículas — posições e velocidades. Assim, a entropia se tornou uma equivalente física da probabilidade: a entropia de um determinado macroestado é o logaritmo do número de seus possíveis microestados. Dessa maneira, a segunda lei é a tendência do universo de fluir dos macroestados menos prováveis (organizados) para os mais prováveis (desordenados).

Mas ainda parecia surpreendente deixar que tamanha parte da física dependesse da mera probabilidade. Seria correto afirmar que nada na física impede o gás de se dividir em quente e frio — que tudo não passa de uma questão de acaso e estatística? Maxwell ilustrou essa charada com um experimento de raciocínio. Imaginemos, sugeriu ele, “um ser finito” que vigie um pequeno buraco no diafragma que divide a caixa de gás. Essa criatura pode ver as moléculas vindo, pode perceber se são rápidas ou lentas, e pode escolher deixá-las passar ou não. Assim, ele poderia alterar a probabilidade. Separando as rápidas das lentas, ele poderia tornar o lado A mais quente e o lado B mais frio — “e ainda assim, nenhum trabalho foi feito, sendo empregada apenas a inteligência de um ser extremamente observador e de dedos hábeis”.¹³ Esse ser desafia as probabilidades comuns. A tendência é que as coisas se misturem. Para separá-las, é necessária a informação.

Thomson adorou a ideia. Ele rotulou a criatura conceitual como demônio: “O demônio inteligente de Maxwell”, “o demônio organizador de Maxwell” e, em pouco tempo, simplesmente “o demônio de Maxwell”. Thomson discorria com eloquência a respeito da pequena criatura: “Ele difere dos animais vivos somente [*somente!*] em sua extrema agilidade e pequenez”.¹⁴ Falando a uma plateia noturna no Instituto Real da Grã-Bretanha, com a ajuda de tubos de líquidos tingidos de duas cores diferentes, Thomson demonstrou o processo aparentemente irreversível da difusão e declarou que somente o demônio poderia revertê-lo:

Ele pode fazer com que metade de um frasco fechado de ar, ou de uma barra de ferro, se torne cada vez mais quente enquanto a outra se torna gelada; pode dirigir as moléculas de uma bacia hidrográfica de modo a fazer a água subir e deixá-la ali proporcionalmente resfriada; pode “separar” as moléculas numa solução com sal ou numa mistura de dois gases, de modo a reverter o processo natural da difusão, e produzir uma concentração da solução numa porção da água, deixando a água pura no restante do espaço ocupado; ou, no outro caso, separar os gases em partes diferentes do recipiente que os contém.

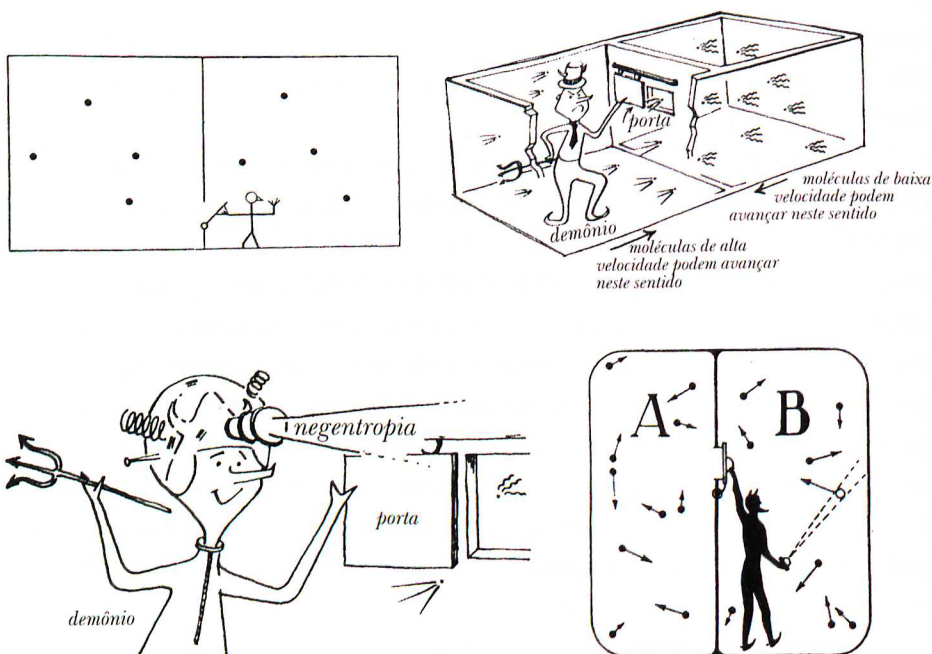


O repórter da *The Popular Science Monthly* considerou isso ridículo. “Devemos acreditar que a natureza está cheia de enxames infinitos de pequenos diabinhos microscópicos e absurdos”, caçoou ele. “Quando homens como Maxwell, de Cambridge, e Thomson, de Glasgow, sancionam um capricho hipotético tão grosseiro quanto o dos pequenos demônios que arremessam os átomos para lá e para cá [...] podemos nos perguntar: o que virá a seguir?”¹⁵ Ele não entendeu o raciocínio. Maxwell não quis dizer que seus demônios existiam, era apenas uma ferramenta pedagógica.

O demônio enxerga aquilo que não podemos ver — porque somos demasiadamente grosseiros e lentos —, ou seja, que a segunda lei é estatística, e não mecânica. No nível das moléculas, ela é violada o tempo inteiro, aqui e ali, simplesmente pelo acaso. O demônio substitui o acaso pelo propósito. Usa a informação para reduzir a entropia. Maxwell nunca imaginou o quanto seu demônio se tornaria popular, nem o quanto sobreviveria. Henry Adams, que queria incorporar alguma versão da entropia à sua teoria da história, escreveu para seu irmão Brooks em 1903: “O demônio de Clerk Maxwell, que administra a segunda lei da termodinâmica, deveria ser eleito presidente”.¹⁶ O demônio presidia um portal — inicialmente, um portal mágico — que levava do mundo da física ao mundo da informação.

Os cientistas invejavam os poderes do demônio. Ele se tornou um personagem conhecido nos desenhos que ilustravam as revistas de física. É claro que a criatura não passava de uma fantasia, mas o próprio átomo já parecera fantástico, e o demônio tinha ajudado a domá-lo. Por mais implacáveis que as leis da natureza parecessem, o demônio as desafiava. Tratava-se de um gatuno, que arrombava a fechadura de molécula em molécula. Ele tinha “sentidos de uma sutileza infinita”, escreveu Henri Poincaré, era “capaz de reverter o rumo do universo”.¹⁷ Não era justamente isso que os humanos sonhavam fazer?

Por meio de seus microscópios cada vez mais aperfeiçoados, os cientistas do início do século xx examinaram os processos ativos e seletivos das membranas biológicas. Descobriram que as células vivas funcionavam como bombas, filtros e fábricas. Processos propositais pareciam operar em escalas minúsculas. Quem ou o que estava no controle? A própria vida parecia ser uma força organizadora. “Não devemos agora introduzir a demonologia na ciência”, escreveu o biólogo britânico James Johnstone em 1914. Na física, afirmou ele, as moléculas individuais devem permanecer além do nosso controle. “Esses movimentos e rumos não são coordenados — caóticos — se nos agradar denominá-los



assim. A física leva em consideração apenas a *média* estatística das velocidades.” É por isso que os fenômenos da física são irreversíveis, “de modo que, para a ciência posterior, os demônios de Maxwell não existem”. Mas e quanto à vida? E à psicologia? Os processos da vida terrestre *são* reversíveis, argumentou ele. “Precisamos, portanto, buscar provas de que o organismo *é capaz* de controlar os movimentos naturalmente descoordenados das moléculas individuais.”¹⁸

Não é estranho que, embora vejamos que a maior parte de nosso esforço humano corresponde a *dirigir* agências e energias naturais no sentido de rumos que elas não tomariam por si mesmas, teríamos ainda assim falhado em pensar nos organismos primitivos, ou mesmo nos elementos de tecido nos corpos dos organismos superiores, como possuidores também do poder de dirigir os processos físico-químicos?

Quando a vida se mantinha tão misteriosa, talvez o demônio de Maxwell fosse mais do que um desenho.

Então o demônio começou a assombrar Leó Szilárd, um físico húngaro extremamente jovem dono de uma imaginação produtiva que mais tarde conceberia o microscópio de elétrons e, não por acaso, a reação em cadeia nuclear. Numa manifestação de instinto protetor digna de um tio, um de seus professores mais famosos, Albert Einstein, aconselhou-o a aceitar um emprego remunerado no escritório de patentes, mas Szilárd ignorou o conselho. Ele estava pensando, na década de 1920, em como a termodinâmica deveria lidar com as incessantes flutuações moleculares. Por definição, as flutuações funcionavam no sentido contrário das médias, como peixes nadando momentaneamente contra a corrente e, como não podia deixar de ser, as pessoas se perguntavam: como seria se pudséssemos aproveitar a força delas? Essa ideia irresistível levou a uma versão da máquina de movimento perpétuo, *perpetuum mobile*, o santo graal dos inventores excêntricos e vendedores picaretas. Tratava-se de outra forma de dizer: “Tanto calor — por que não podemos usá-lo?”

Era também outro dos paradoxos engendrados pelo demônio de Maxwell. Num sistema fechado, um demônio capaz de apanhar as moléculas rápidas e deixar passar as moléculas mais lentas teria uma fonte de energia útil, continuamente renovada. Ou, se não o quimérico diabinho, talvez algum outro “ser inteligente”? Um físico experimental, quem sabe? Uma máquina de movimento

perpétuo deveria ser possível, declarou Szilárd, “se enxergarmos o homem responsável pelo experimento como uma espécie de *deus ex machina*, alguém continuamente informado quanto ao estado existente da natureza”.¹⁹ Para sua versão do experimento de raciocínio, Szilárd deixou claro que não queria invocar um demônio vivo, dono de, digamos, um cérebro — a biologia trazia seus próprios problemas. “A própria existência de um sistema nervoso”, declarou ele, “depende da contínua dissipação de energia.” (Seu amigo Carl Eckart reelaborou isso de maneira sentenciosa: “Pensamento gera entropia”.²⁰) Em vez disso ele propôs um “dispositivo não vivo”, que interviria num modelo de sistema termodinâmico, operando um pistão num cilindro de fluido. Ele destacou que tal dispositivo exigiria, na prática, “algum tipo de faculdade de memória”. (Naquela época, em 1929, Alan Turing era um adolescente. Nos termos de Turing, Szilárd estava tratando a consciência do demônio como um computador dotado de uma memória de dois estados.)

Szilárd mostrou que até sua máquina de movimento perpétuo estaria destinada a falhar. Qual seria o problema? Em termos simples: a informação não é gratuita. Maxwell, Thomson e o restante tinham implicitamente falado como se o conhecimento estivesse à disposição de quem por ele se interessasse — o conhecimento das velocidades e trajetórias das moléculas indo e vindo diante dos olhos do demônio. Eles não levaram em consideração o custo dessa informação, nem poderiam fazê-lo. Para eles, numa época mais simples, era como se a informação pertencesse a um universo paralelo, um plano astral, dissociado do universo da matéria e da energia, das partículas e forças, cujo comportamento eles estavam aprendendo a calcular.

Mas a informação é física. O demônio de Maxwell faz o elo. O demônio realiza a conversão entre informação e energia ao ritmo de uma partícula por vez. Szilárd — que ainda não empregava a palavra *informação* — descobriu que, se registrasse com precisão cada medida e memória, a conversão poderia ser computada com exatidão. Sendo assim, ele a computou. Calculou que cada unidade de informação traz um aumento correspondente na entropia — especificamente um aumento de k unidades do logaritmo 2. Cada vez que o demônio faz uma escolha entre uma e outra partícula, isso tem o custo de um bit de informação. A compensação ocorre no fim do ciclo, quando é preciso limpar a memória (Szilárd não especificou esse último detalhe em palavras, mas em termos matemáticos). Registrar tudo isso devidamente é a única maneira de

eliminar o paradoxo do movimento perpétuo, de devolver a harmonia ao universo, de “restaurar a conformidade com a Segunda Lei”.

Szilárd tinha assim fechado um ciclo que conduzia à concepção de Shannon da entropia como informação. De sua parte, Shannon não sabia ler alemão e não acompanhou a *Zeitschrift für Physik*. “Acho que Szilárd estava de fato pensando nisso”, disse ele muito depois, “e conversou com Von Neumann a esse respeito, e Von Neumann pode ter comentado isso com Wiener. Mas nenhum deles chegou a falar comigo a respeito.”²¹ Independentemente de tudo isso, Shannon reinventou a matemática da entropia.

Para o físico, a entropia é a medida da incerteza em relação ao estado de um sistema físico: um dentre todos os estados possíveis que o sistema pode apresentar. Esses microestados podem não apresentar a mesma probabilidade e, por isso, o físico escreve $S = -\sum p_i \log p_i$.

Para o teórico da informação, a entropia é uma medida da incerteza em relação a uma mensagem: uma mensagem dentre todas as mensagens possíveis que uma fonte de comunicação pode produzir. As mensagens possíveis podem não ser igualmente prováveis e, assim sendo, Shannon escreveu $H = -\sum p_i \log p_i$.

Não é apenas uma coincidência nem um formalismo, como se a natureza oferecesse respostas semelhantes para problemas semelhantes. Trata-se de um único problema. Para reduzir a entropia numa caixa de gás, para realizar trabalho útil, é preciso pagar um preço em termos de informação. Da mesma maneira, uma mensagem específica reduz a entropia do conjunto de mensagens possíveis — em termos de sistemas dinâmicos, um espaço fásico.

Era assim que Shannon enxergava o problema. A versão de Wiener era um pouco diferente. Parecia adequado — tratando-se de uma palavra que surgiu significando o oposto daquilo que era — que colegas e rivais colocassem sinais opostos em suas formulações da entropia. Enquanto Shannon identificava a informação com a entropia, Wiener dizia que se tratava de entropia *negativa*. Wiener estava dizendo que informação significava ordem, mas algo ordenado não traz em si necessariamente muita informação. O próprio Shannon destacou a diferença entre eles e minimizou-a, descrevendo-a como uma espécie de “trocadilho matemático”. Ele destacou que ambos obtêm o mesmo resultado numérico:

Penso em quanta informação é *produzida* quando uma escolha é feita a partir de um conjunto — quanto maior o conjunto, *mais* informação. Você trata a incerteza maior inerente a um conjunto maior como representando menos conhecimento da situação e, portanto, *menos* informação.²²

Em outras palavras, *H* é uma medida da surpresa. De outra maneira ainda, *H* é o número médio de perguntas do tipo sim-não necessárias para adivinhar a mensagem desconhecida. Shannon estava correto — ao menos, sua abordagem se mostrou fértil para os matemáticos e físicos das gerações seguintes —, mas a confusão perdurou por alguns anos. Ordem e desordem ainda precisavam de mais separação.

Todos nós nos comportamos como o demônio de Maxwell. Os organismos organizam. Na experiência do dia a dia jaz o motivo pelo qual físicos sérios mantiveram viva essa fantasia cartunesca ao longo de dois séculos. Organizamos o correio, construímos castelos de areia, resolvemos quebra-cabeças, separamos o joio do trigo, rearranjamos as peças no tabuleiro de xadrez, colecionamos selos, dispomos os livros em ordem alfabética, criamos simetria, compomos sonetos e sonatas, arrumamos nossos cômodos, e para fazer tudo isso não é necessária muita energia, desde que possamos recorrer à inteligência. Propagamos estruturas (não apenas nós, os humanos, mas nós, os vivos). Perturbamos a tendência ao equilíbrio. Seria absurdo tentar fazer um registro termodinâmico de tais processos, mas não é absurdo dizer que estamos reduzindo a entropia, pedaço por pedaço. Bit por bit. O demônio original, identificando uma molécula de cada vez, distinguindo entre rápido e lento, e operando seu pequeno portal, é às vezes descrito como “superinteligente”, mas, comparado a um organismo real, ele não passa de um erudito idiota. Além de diminuir a desordem em seus ambientes, os seres vivos são, em si mesmos, em seu esqueleto e em sua carne, suas vesículas e membranas, conchas e carapaças, folhas e brotos, sistemas circulatórios e rumos metabólicos — milagres de padrões e estruturas. Às vezes é como se limitar a entropia fosse nosso propósito quixotesco neste universo.

Em 1943, Erwin Schrödinger, o fumante inveterado de gravata-borboleta, pioneiro da física quântica e incumbido de lecionar as Palestras Públicas

Obrigatórias do Trinity College, em Dublin, decidiu que tinha chegado a hora de responder a uma das grandes perguntas sem resposta: o que é a vida? A equação que traz seu nome era a formulação essencial da mecânica quântica. Ao olhar para além de seu campo, como fazem com frequência os premiados com o Nobel na meia-idade, Schrödinger trocou o rigor pela especulação e começou pedindo desculpas pelo fato “de alguns de nós ousarem embarcar numa síntese dos fatos e teorias, embora dispondo de um conhecimento incompleto e de segunda mão a seu respeito — e correndo o risco de fazer papel de bobos”.²³ Apesar disso, o pequeno livro que ele elaborou a partir dessas aulas se tornou influente. Sem descobrir nem afirmar nada de novo, a obra estabelecia as bases para uma ciência nascente, ainda sem nome, que combinava genética e bioquímica. “O livro de Schrödinger se tornou uma espécie de *A cabana do pai Tomás* da evolução da biologia que, depois que a poeira assentou, deixou como legado a biologia molecular”,²⁴ escreveu posteriormente um dos fundadores da disciplina. Os biólogos nunca tinham lido algo como aquilo antes, e os físicos viram a obra como um sinal de que o próximo grande problema a ser encarado poderia estar na biologia.

Schrödinger partiu daquilo que chamou de enigma da estabilidade biológica. Num notável contraste com a caixa de gás, com seus caprichos de probabilidade e flutuação, e aparentemente deixando de lado a própria mecânica de onda de Schrödinger, na qual a incerteza é a regra, as estruturas de uma criatura viva exibem uma impressionante permanência. Elas persistem, tanto na vida do organismo como nas diferentes gerações, por meio da hereditariedade. Para Schrödinger, isso parecia exigir uma explicação.

“Quando dizemos que uma matéria está viva?”²⁵ indagou ele. O autor pulou as sugestões habituais — crescimento, alimentação, reprodução — e respondeu da maneira mais simples possível: “Quando ela continua a ‘fazer algo’, movimentar-se, trocar material com seu meio ambiente, e assim por diante, durante um período muito mais longo do que seria de esperar que uma matéria inanimada ‘continuasse a fazer’ sob circunstâncias semelhantes”. Em geral, um pedaço de matéria chega à imobilidade; uma caixa de gás atinge temperatura uniforme; um sistema químico “perde força até se tornar uma quantidade inerte e morta de matéria” — de uma maneira ou de outra, a segunda lei é obedecida, e a entropia máxima é atingida. As coisas vivas conseguem se manter instáveis. Norbert Wiener explorou esse raciocínio em *Cibernética*: as enzimas,

escreveu ele, podem ser demônios de Maxwell “metaestáveis” — significando não exatamente estáveis, ou precariamente estáveis. “O estado estável de uma enzima é o de ser descondicionada”, escreveu ele, “e o estado estável de um organismo vivo é estar morto.”²⁶

Schrödinger sentiu que a fuga temporária à segunda lei, ou a aparência de fuga, seria exatamente o motivo pelo qual uma criatura viva “parece tão enigmática”. A habilidade do organismo de fingir um movimento perpétuo leva muitos a crer numa especial e sobrenatural *força vital*. Ele caçoou dessa ideia — *vis viva* ou enteleguia —, e também da noção popular segundo a qual os organismos “se alimentam de energia”. Energia e matéria eram apenas dois lados da mesma moeda e, seja como for, uma caloria vale tanto quanto qualquer outra. Não, afirmou ele: o organismo se alimenta de entropia negativa.

“Em termos menos paradoxais”, acrescentou Schrödinger, paradoxalmente, “o elemento essencial no metabolismo é o fato de o organismo conseguir se libertar de toda a entropia que é incapaz de deixar de produzir enquanto está vivo.”²⁷

Em outras palavras, o organismo suga o caráter ordenado de seus arredores. Herbívoros e carnívoros se alimentam de uma variedade de tipos de estruturas; alimentam-se de compostos orgânicos, matéria num estado bem ordenado, e a devolvem “numa forma muito degradada — mas não completamente degradada, entretanto, pois as plantas são capazes de utilizá-la”. As plantas, por sua vez, retiram não apenas a energia como também a entropia negativa da luz solar. Em termos de energia, o registro pode ser feito de maneira mais ou menos rigorosa. Em termos de ordem, os cálculos não são tão simples. O cálculo matemático da ordem e do caos continua sendo mais delicado, com suas definições mais suscetíveis a seus próprios ciclos de retroalimentação.

Haveria ainda muito mais a ser aprendido, segundo Schrödinger, a respeito de como a vida armazena e perpetua a ordem que obtém da natureza. Com seus microscópios, os biólogos aprenderam muita coisa sobre as células. Eram capazes de enxergar os gametas — células de espermatozoide e de óvulo. Dentro delas havia as fibras tubulares chamadas cromossomos, dispostas em pares, das quais se sabia que eram as portadoras das características hereditárias. Como Schrödinger agora expressava, o interior delas continha de alguma forma o “padrão” do organismo: “São esses cromossomos, ou provavelmente apenas uma fibra axial do esqueleto daquilo que de fato vemos sob o microscópio

como cromossomo, que contém em algum tipo de código-instrução o padrão completo do desenvolvimento futuro do indivíduo”. Ele considerou incrível — misterioso, mas sem dúvida fundamental de alguma maneira ainda desconhecida — que cada uma das células de um organismo “estivesse de posse de uma cópia completa (dupla) do código-instrução”.²⁸ Schrödinger comparou isso a um exército no qual cada soldado conhece cada detalhe dos planos do general.

Tais detalhes consistiam nas muitas “propriedades” distintas de um organismo, embora não estivessem nada claras as consequências de tais propriedades. (“Não parece adequado nem possível dissecar em ‘propriedades’ distintas o padrão de um organismo que é, essencialmente, uma unidade, um ‘todo’”,²⁹ brincou Schrödinger.) A cor dos olhos de um animal, azul ou castanha, pode ser uma propriedade, mas é mais útil concentrar-se na *diferença* entre um indivíduo e outro, e essa diferença seria controlada por algo transmitido nos cromossomos. Ele usou o termo *gene*: “o hipotético material de transporte de uma característica hereditária definida”. Ninguém era então capaz de enxergar esses genes hipotéticos, mas, sem dúvida, esse momento não estaria longe. As observações microscópicas tornavam possível estimar seu tamanho: talvez cem ou 150 distâncias atômicas; talvez mil átomos ou menos. Ainda assim, de algum modo essas entidades devem encapsular o padrão completo de uma criatura viva — uma mosca ou um rododendro, um camundongo ou um humano. E precisamos entender esse padrão como um objeto quadridimensional: a estrutura do organismo durante a totalidade de seu desenvolvimento ontogenético, cada estágio do embrião até o adulto.

Na busca por um indício da estrutura molecular do gene, pareceu natural voltar-se para as mais organizadas formas da matéria, os cristais. Os sólidos em forma cristalina têm uma permanência relativa; podem começar com um pequeno germe e construir estruturas cada vez maiores; e a mecânica quântica estava começando a proporcionar um entendimento mais profundo das forças envolvidas em sua associação. Mas Schrödinger teve a sensação de que havia algo faltando. Os cristais são ordenados *demais* — construídos de acordo com “a maneira comparativamente simplória da repetição da mesma estrutura em três direções, de novo e de novo”. Por mais que pareçam elaborados, os sólidos cristalinos contêm apenas alguns poucos tipos de átomos. A vida precisa depender de um nível maior de complexidade, uma estrutura sem repetição previsível, argumentou ele. Schrödinger inventou um termo: *cristais aperiódicos*.

Esta era a sua hipótese: *Acreditamos que um gene — ou talvez toda a fibra cromossômica — seja um sólido aperiódico.*³⁰ Não era fácil enfatizar suficientemente a glória dessa diferença entre periódico e aperiódico:

A diferença em termos de estrutura é do mesmo tipo que aquela existente entre um papel de parede comum, no qual o mesmo padrão é repetido de novo e de novo com periodicidade regular, e uma obra de arte do bordado, como uma tapeçaria de Rafael, que não apresenta uma repetição simplória, e sim um desenho elaborado, coerente e *pleno de significado*.³¹

Alguns dos leitores que mais o admiravam, como Léon Brillouin, físico francês que tinha se mudado recentemente para os Estados Unidos, disseram que Schrödinger era inteligente demais para ser totalmente convincente, apesar de demonstrarem em suas próprias obras o quanto estavam convencidos. Brillouin em especial ficou impressionado com a comparação com os cristais, com sua estrutura elaborada e inanimada. Os cristais são dotados de certa capacidade de autorreparo, destacou ele — sob estresse, seus átomos podem se transferir para novas posições em nome do equilíbrio. Isso pode ser compreendido em termos de termodinâmica e, agora, de mecânica quântica. O autorreparo no organismo é muito mais exaltado: “O organismo vivo cicatriza suas próprias feridas, cura suas doenças e pode reconstruir grandes partes de sua estrutura quando estas são destruídas por algum acidente. Trata-se do comportamento mais notável e inesperado”.³² Ele também seguiu Schrödinger no uso da entropia para ligar as menores e maiores escalas.

A Terra não é um sistema fechado, e a vida se alimenta de energia e entropia negativa que vazam para dentro do sistema da Terra. [...] O ciclo segue da seguinte maneira: primeiro, a criação de equilíbrios instáveis (combustíveis, alimento, quedas-d’água etc.); então o uso dessas reservas por parte de todas as criaturas vivas.

As criaturas vivas confundem a computação habitual da entropia. De uma maneira mais geral, o mesmo ocorre com a informação. “Tomemos um exemplar do *New York Times*, o livro sobre a cibernética e um peso equivalente de sobras de papel”, sugeriu Brillouin. “Eles apresentam a mesma entropia?” Se os

estamos usando para abastecer uma fornalha, sim. Mas não para um leitor. Há entropia na disposição das manchas de tinta.

Por esse motivo, os próprios físicos se dão ao trabalho de transformar a entropia negativa em informação, disse Brillouin. A partir das observações e medidas, o físico deriva as leis científicas. Com essas leis, as pessoas criam máquinas jamais vistas na natureza, usando as estruturas mais improváveis. Ele escreveu isso em 1950, quando estava deixando Harvard para se juntar à IBM Corporation em Poughkeepsie.³³

Não foi o fim do demônio de Maxwell — longe disso. O problema não pôde ser realmente solucionado, nem era possível banir para sempre o demônio na ausência de um entendimento mais aprofundado de um domínio bem distante da termodinâmica: a computação mecânica. Tempos depois, Peter Landsberg escreveu seu obituário da seguinte maneira: “O demônio de Maxwell morreu aos 62 anos (quando surgiu um estudo de Leó Szilárd), mas continua a assombrar os castelos da física como um espírito inquieto e adorável”.³⁴