

## KAPITOLA DEVÁTÁ

## ENTROPIE A JEJÍ DÉMONI

## Věci od sebe nemůžete oddělit

Myšlení zasahuje do pravděpodobnosti dějů, a dlouhodobě tedy i do entropie.<sup>1</sup>

DAVID L. WATSON (1930)

Říci, že nikdo neví, co znamená *entropie*, by bývalo trochu přehnané, přesto to bylo jedno z těch kouzelných slov. V Bell Labs se šuškal, že Shannon ho slyšel od Johna von Neumanna, který mu prý poradil, že s ním vyhraje každou polemiku, protože mu nikdo nebude rozumět.<sup>2</sup> Nebyla to pravda, ale znělo to věrohodně. Původně toto slovo znamenalo úplný opak. Dodnes je neobyčejně těžké blíže určit jeho význam. Slovník OED netypicky vsadil na jednu definici:

*entropie* = Pojmenování jedné z kvantitativních veličin, které určují termodynamický stav části látky.

Slovo vymyslel v roce 1865 Rudolf Clausius, když utvářel termodynamiku a potřeboval pojmenovat určitou veličinu, kterou objevil - měla souviset s energií, ale nebyla to přímo energie.

Termodynamika se objevila rukou v ruce s parními stroji a nejprve byla pouhou „teoretickou studií parního stroje“,<sup>3</sup> neboť se zabývala přeměnou tepla či energie na práci. Když k tomu docházelo - teplo pohánělo stroj - Clausius si všiml, že teplo se ve skutečnosti neztrácí, ale jen přejde z teplejšího tělesa na chladnější. Při tom cosi uskutečňuje. Nicolas Sadi Carnot z Francie často poukazyval na to, že se to podobá vodnímu kolu - voda se objeví nahoře a skončí dole, při tom se nijak nezískává ani neztrácí, nicméně při průtoku směrem dolů vykonává práci. Carnot si představil v roli takové látky teplo. Schopnost termodynamického systému vykonávat práci nezávisí na samotném teple, ale na kontrastu mezi teplem a chladem. Horký kámen, který se ponoří do studené vody, dokáže vykonat práci - například tak, že vytvoří páru, která pohání turbínu - ale celkové teplo systému (kámen plus voda) si zachová stálou hodnotu. Nakonec kámen a voda dosáhnou stejné teploty. Jak-

mile má vše stejnou teplotu, pak bez ohledu na množství energie v uzavřeném systému žádnou práci vykonat nelze.

Clausius chtěl měřit nedostupnost této energie, její nepoužitelnost pro práci. Přišel se slovem *entropie*, jehož význam přetvořil z řečtiny na „obsah přeměny“. Jeho kolegové v anglofonních zemích okamžitě pochopili, o co mu jde. Usoudili však, že tím, jak se Clausius soustředil na záporné tvrzení, otočil význam. James Clerk Maxwell ve svém díle *Theory of Heat* (Teorie tepla) navrhl, že bude „vhodnější“, aby entropie znamenala opak - „část, kterou lze přeměnit na mechanickou práci“. Z toho tedy vyšlo:

Když se tlak a teplota v systému vyrovnají, dochází k vyčerpání entropie.

Za několik let však Maxwell změnil názor a rozhodl se následovat Clausiuse.<sup>4</sup> Svou knihu přepsal a dodal poznámku pod čarou, která líčila jeho rozpaky:

V předchozích vydáních této knihy byl význam pojmu entropie, který předložil Clausius, chybně uveden - jako část energie, jež se nedá přeměnit na práci. Pak se tento pojem používal ve smyslu dostupné energie, a tím se do jazyka termodynamiky vnesl velký zmatek. V tomto vydání jsem se vynasnažil používat slovo entropie v souladu s původní definicí, kterou vymezil Clausius.

Problém nespočíval jen ve volbě mezi kladným a záporným znaménkem, byl rafinovanější. Maxwell nejprve pokládal entropii za podtyp energie - energii, která je dostupná k práci. Když to znovu uvážil, uvědomil si, že termodynamika potřebuje zcela jinou veličinu. Entropie nebyla typem ani množstvím energie, ale - slovy Clausiuse - *nedostupností* energie. I když to bylo abstraktní, ukázalo se, že je to veličina, která se dá měřit stejně jako teplota, kapacita nebo tlak.

Tento koncept se začal cítit jako zákon. Pomocí entropie se daly termodynamické „zákony“ vyjádřit elegantně:

První termodynamický zákon: Energie vesmíru je stálá.

Druhý termodynamický zákon: Entropie vesmíru stále roste.

Existuje mnoho dalších formulací těchto zákonů, od matematických až po výstřední: „1. Nemůžeš vyhrát; 2. Ani remízu neuhraješ.“<sup>5</sup> Toto je však vesmírná, osudová formulace - vesmír se blíží svému konci. Je to jednosměrka, která vede k postupnému zániku. Naším osudem je konečný stav nejvyšší entropie.

William Thomson, který je nyní známý spíše jako lord Kelvin, vštípl druhý termodynamický zákon do představ veřejnosti jeho pochmurnými interpretacemi. V roce 1862 pronesl: „Třebaže je mechanická energie nezničitelná, vše směřuje k jejímu rozptýlení, jež vytváří postupný nárůst a šíření tepla, zastavení pohybu a vyčerpání možné energie do hmotného vesmíru. Výsledkem by měl být stav vesmírného spočinutí a smrti.“<sup>6</sup> Entropie pak určovala osud vesmíru v románu H. G. Wellse *Stroj času*: život zaniká, slunce vyhasíná, „nad světem se vznáší přízrak strašlivého zpusťování“. Tepelná smrt není chladná, ale vlažná, netečná. Freud se v roce 1918 domníval, že v tom našel něco užitečného, ovšem poněkud to popletl: „Když uvažujeme o přeměně duševní energie stejně jako o přeměně hmotné energie, musíme využít konceptu entropie, který brání anulaci toho, co se již stalo.“<sup>7</sup>

Thomson za tímto účelem rád používal slovo *rozptýlení*. Energie se neztratí, ale rozptýlí. Taková rozptýlená energie zde existuje, ale je nepoužitelná. Byl to však Maxwell, kdo se zaměřil na samotný zmatek, neuspořádanost, jako zásadní vlastnost entropie. Zdálo se, že neuspořádanost je podivně nehmotná, že součástí rovnice musí být něco jako poznání, inteligence, úsudek. Maxwell prohlásil: „Idea rozptýlení energie závisí na rozsahu našeho poznání. Dostupnou energií je ta energie, kterou můžeme nasměřovat na jakoukoli požadovanou cestu. Rozptýlená energie je ta, již se nemůžeme podle libosti zmocnit a nasměřovat ji, například energie zmateného pohybu molekul, které říkáme teplo.“ Součástí definice se stalo to, co můžeme udělat nebo vědět *my*. Zdálo se nemožné hovořit o pořádku a neuspořádanosti a nezapojit do toho konajícího či pozorovatele - nehovořit o mysli:

Zmatek, podobně jako souvztažný pojem řád, není vlastností samotných hmotných věcí, ale pouze hmotných věcí ve vztahu k mysli, která je vnímá. Pokud máte úhledně psaný diář, vůbec nepřipadá chaotický ngramotnému člověku ani jeho vlastníkov, který ho dobře zná. Jinému gramotnému člověku se však zdá nesmírně spleť a zmatený. Podobně ani představa rozptýlené energie nemůže přijít na mysl někomu, kdo nedokáže obrátit energii přírody ve svůj prospěch, ani tomu, kdo umí zachytit pohyb každé molekuly a ve správnou chvíli se jí zmocnit.<sup>8</sup>

Řád je subjektivní - závisí na pozorovateli. Řád a zmatek nejsou tím, co by matematik mohl definovat a měřit. Nebo snad ano? Pokud by neuspořádanost odpovídala entropii, mohla by se stát předmětem vědeckého zkoumání přece jen ona.

Průkopníci termodynamiky považovali za ideální případ nádobu s plynem. Jelikož plyn je tvořen atomy, jako systém vůbec není jednoduchý ani klidný. Je obrovským celkem, jehož částice se neustále pohybují. Atomy byly neviditelné a pouze hypotetické, ale teoretici jako Clausius, Kelvin, Maxwell, Ludwig Boltzmann či Willard Gibbs uznali atomy za základ kapalných a plyných látek a snažili se vypočítat důsledky - směšování, střety, neustálý pohyb. Nyní pochopili, že tento pohyb vytváří teplo. Teplo není pevnou látkou, tekutinou ani „flogistonem“, ale jen pohybem molekul.

Každá molekula se musí řídit Newtonovými zákony - každý úkon či střet se teoreticky dá změřit a vypočítat. Molekul však bylo obrovské množství; nedaly se měřit a počítat zvlášť. A tak do hry vstoupila pravděpodobnost. Nová věda, statistická mechanika, spojila mikroskopické detaily a makroskopické chování. Nyní si představte, že nádobu s plynem dělí přepážka na dvě části. Plyn na straně A má vyšší teplotu než plyn na straně B. To znamená, že molekuly v A se pohybují rychleji, s větší energií. Jakmile přepážku odstraníme, molekuly se začnou mísit, rychlé molekuly narážejí do pomalých, dochází k výměně energie a po určité době dosáhne plyn stálé teploty. Záhada spočívá v otázce: Proč se celý proces nedá otočit? V Newtonových pohybových rovnicích může mít čas znaménko plus i minus - matematika funguje v obou případech. Ve skutečném světě tak snadno minulost a budoucnost zaměňovat nelze.

V roce 1949 prohlásil Léon Brillouin: „Čas plyne a nikdy se nevrací. Když fyzik čelí této pravdě, velmi ho to rozruší.“<sup>9</sup> Maxwell byl rozrušen mírně. Lordu Rayleighovi napsal:

Pokud je tento svět jen dynamickým systémem a ve stejném okamžiku se přesně obrátí pohyb každé jeho částice, pak se vše bude dít pozpátku, směrem ke svému počátku - kapky deště se shromáždí ze země a poletí do mraků, lidé uvidí své přátele, jak se vracejí od hrobu ke kolébce, až i my sami prožijeme obrácené narození, ať už to znamená cokoli.

Šlo mu o to, že pokud pozorujeme pohyby jednotlivých molekul v mikroskopických detailech, chovají se stejně, ať sledujeme čas směrem dopředu nebo zpět. I film si přece můžeme pustit pozpátku. Když se ale podíváme na nádobu s plynem jako na celek, proces směšování se statisticky stane jednosměrným. Tekutinu můžeme pozorovat celou věčnost a nikdy se nerozdělí na teplé molekuly na jedné straně a studené molekuly na straně druhé. Ve hře *Arkádie* od Toma Stopparda říká mladičká chytrá Thomasina: „Věci od sebe nemůžete oddělit.“ A to je přesně totéž, co „Čas běží dopředu, nikdy se nevrací“. Takové procesy jsou výhradně jednosměrné, a důvodem je pravděpodobnost. Fyzici

dlouho odmítali přijmout pozoruhodnou skutečnost, že všechny nevratné procesy mají stejné vysvětlení. Samotný čas závisí na náhodě, „nepředvídatelných životních událostech“, jak s oblibou říkával Richard Feynman: „Jak vidíte, všechno nasvědčuje tomu, že nevratnost způsobují běžné nepředvídatelné životní události.“<sup>10</sup> Fyzikálně není nemožné, aby se prvky v nádobě s plynem nsmísily; je to jen mimořádně nepravděpodobné. Druhý termodynamický zákon je tedy pouze pravděpodobnostní. Statisticky vše směřuje k nejvyšší entropii.

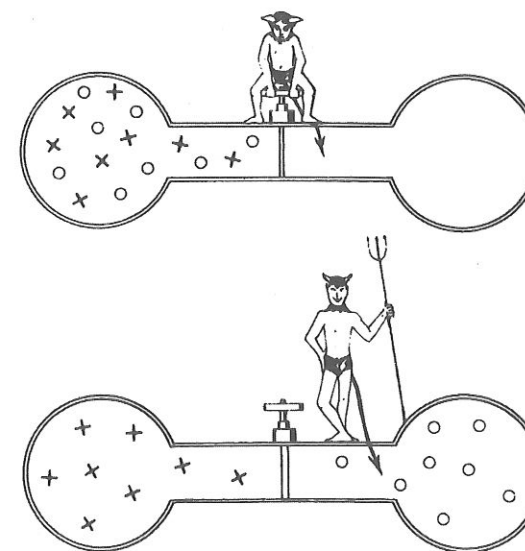
Pravděpodobnost však stačí. Rozhodně stačí k tomu, aby druhý termodynamický zákon stál jako jeden z pilířů vědy. Maxwell to vyjádřil takto:

*Poučení.* Druhý termodynamický zákon obsahuje stejnou míru pravdy jako tvrzení, že když hodíte plnou sklenku vody do moře, nemůžete z něho už vylovit stejnou sklenku vody.<sup>11</sup>

Nepřítelněpodobnost toho, že teplo přejde z chladnějšího tělesa na teplejší (bez cizí pomoci) je stejná jako nepřítelněpodobnost toho, že řád se sám (bez cizí pomoci) sestaví z chaosu. Obě nepřítelněpodobnosti v podstatě existují jen díky statistikám. Když budeme počítat všechny možné způsoby, jak může fungovat systém, počet neuspořádaných způsobů daleko převyší uspořádané. Je mnoho způsobů fungování či „stavů“, ve kterých se všechny molekuly pomíchají, a málo těch, ve kterých jsou úhledně seřazeny. Uspořádané stavy mají nízkou pravděpodobnost a vysokou entropii. Působivé míry uspořádanosti mohou mít pravděpodobnosti velmi nízké. Alan Turing jednou z rozmaru navrhl číslo  $N$  a definoval ho jako „šanci proti možnosti, že křída bude poletovat po místnosti a napíše při tom na tabuli úryvek ze Shakespeara“.<sup>12</sup>

Fyzici nakonec začali hovořit o mikrostavech a makrostavech. Makrostavem by mohl být všechny plyn v horní části nádoby. Odpovídajícími mikrostavy by pak byla veškerá možná uspořádání všech částic - jejich polohy a rychlosti. Entropie se tak stala fyzikální obdobou pravděpodobnosti - entropie daného makrostavu je logaritmem počtu jeho možných mikrostavů. Druhý termodynamický zákon potom znamená sklon vesmíru plynout od méně pravděpodobných (uspořádaných) makrostavů k pravděpodobnějším (neuspořádaným).

Přesto bylo matoucí vnášet tolik fyziky do tématu pouhé pravděpodobnosti. Dá se říci, že ve fyzice nic nezabrání plynu, aby se rozdělil na teplo a chlad - tedy že se jedná o pouhou náhodu a statistiku? Maxwell objasnil tento hlavolam na myšlenkovém experimentu. Navrhl, abychom si představili „nějakou bytost“, která dohlíží na nepatrný otvor v přepážce, jež rozděluje nádobu s plynem. Tento tvor vidí, jak se blíží molekuly, zda jsou rychlé nebo



pomalé, a může se rozhodnout, zda je nechá projít. Tím dokáže ovlivnit pravděpodobnost. Když oddělí rychlé molekuly od pomalých, může způsobit, že strana A bude teplejší a strana B chladnější - „a přesto nebyla vykonána žádná práce, pouze došlo k použití inteligence velmi pozorné, bdělé bytosti“.<sup>13</sup> Tato bytost porušuje běžné pravděpodobnosti, podle nichž se vše má pomíchat. K rozřídění je nutná informace.

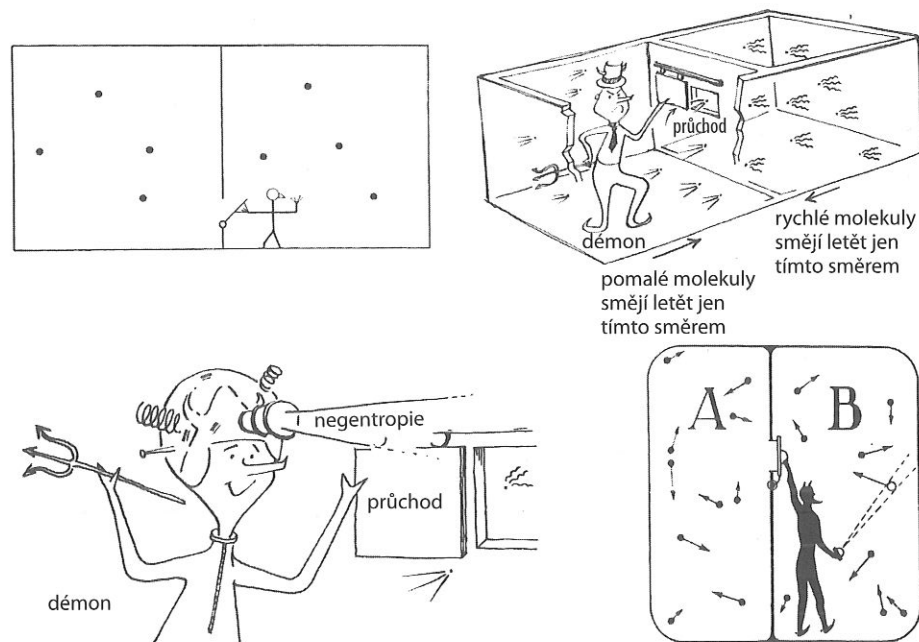
Thomsonovi se tato představa velmi líbila. Nazval pomyslného tvora démonem: „Maxwellovým inteligentním démonem“, „Maxwellovým třídícím démonem“ a brzy nato už jen „Maxwellovým démonem“. O tomto tvorečkovi se rozepsal: „Od skutečných žijících zvířat se liší jen [jen!] svou extrémní nepatrností a čilostí.“<sup>14</sup> Při večerní přednášce v Royal Institution of Great Britain si Thomson vzal zkumavky s tekutinou obarvenou dvěma barvami a předvedl obecenstvu zjevně nevratný proces difuze, přičemž prohlásil, že zvrátit ho může jen démon:

Může způsobit, že polovina uzavřené skleněné nádoby plné vzduchu nebo polovina železné tyče se rozpálí a druhá bude jako led. Dále dokáže nasměrovat energii agilních molekul v nádobě s vodou tak, že vychrstne vodu do výšky a přiměřeně ochlazenou ji tam ponechá viset. Je schopen „uspořádat“ molekuly v roztoku soli nebo ve směsi dvou plynů, aby obrátil přirozený proces difuze, a vytvoří zhuštěný roztok v jedné části nádoby s vodou, zatímco ve zbývajícím prostoru ponechá čistou vodu. V případě směsi plynů dokáže rozdělit její složky do různých částí nádoby.

Zpravodaj měsíčníku *The Popular Science Monthly* měl pocit, že je to k smíchu. Posměšně si odfrkl: „Celá příroda se prý hemží nekonečnými hejny absurdních mikroskopických dáblíků. Když muži jako Maxwell z Cambridge a Thomson z Glasgow posvěti tak neomalenou hypotetickou domněnku, že do atomů tlučou dáblíci a odkopávají je na všechny strany... pak se můžeme jistě zeptat, co přijde příště.“<sup>15</sup> Zpravodaj to nepochopil. Maxwell nechtěl říci, že démon existuje, ale pouze ho předvést jako názornou učební pomůcku.

Démon vidí to, co my kvůli své tělesnosti a pomalosti nemůžeme - že druhý termodynamický zákon není mechanický, ale statistický. Na úrovni molekul je porušován neustále, vždy náhodně. Démon nahrazuje náhodu účelem. Používá informaci k tomu, aby snížil entropii. Maxwella nikdy ani nenapadlo, jakého věku a popularity se jeho démon dožije. Henry Adams, který chtěl určité podání entropie přidat do své teorie dějin, v roce 1903 napsal svému bratru Brooksovi: „Démon Clerka Maxwella, který řídí druhý termodynamický zákon, by měl být prezidentem.“<sup>16</sup> Démon vládl magické bráně mezi světem fyziky a světem informace.

Vědci démonovi záviděli jeho schopnosti. Stal se známou postavou komiksů, které zpestřovaly obsah časopisů o fyzice. Tento tvoreček byl bezpochyby jen výplodem fantazie, ale fantasticky tehdy vypadal i samotný atom, a démon



napomohl k jeho zkracení. I když se zákony přírody zdály neúprosné, démon je porušoval a načerno pouštěl svými vrátky jednu vybranou molekulu po druhé. Henri Poincaré napsal, že démon má „nekonečně subtilní smysly a je schopen zvrátit chod celého vesmíru“.<sup>17</sup> Nebylo to snad právě to, o čem lidé snili?

Na začátku 20. století se neustále vylepšovaly mikroskopy, jimiž vědci zkoumali aktivní, třídící procesy buněčných membrán. Zjistili, že živé buňky se chovají jako čerpadla, filtry a továrny. Zdálo se, že v nepatrném měřítku účelové procesy fungují. Co nebo kdo to ovládá? Zdálo se, že silou, která to vše řídí, je sám život. V roce 1914 napsal britský biolog James Johnstone: „Do vědy teď nesmíme vnést démonologii.“<sup>18</sup> Uvedl, že ve fyzice musí zůstat individuální molekuly mimo naši kontrolu: „Tyto pohyby a cesty nepomáhá nikdo koordinovat. Mohli bychom říci, že jsou bez ladu a skladu. Fyzika uznává jen statistické průměrné rychlosti.“ Z toho důvodu jsou fyzické jevy nevratné, „takže pro pozdější vědu Maxwellovy démoni neexistují“. Ale co život? Co fyziologie? Johnstone odporoval a prohlásil, že procesy pozemského života vratné jsou: „Musíme tedy hledat důkazy toho, že organismus dokáže řídit pohyby individuálních molekul, které jsou jinak neřízené.“ A dodal:

Není to zvláštní? Zatímco vidíme, že většina lidského úsilí spočívá v řízení přírodních sil a energií cestami, kterými by se jinak nedaly, přesto jsme ještě nepomysleli na to, že primitivní organismy nebo i tkáňové elementy v tělech vyšších organismů by rovněž mohly ovládat schopnost řízení fyzikálně-chemických procesů.

Protože život zůstával stále záhadný, Maxwellovi démoni možná nebyli pouhými obrázky.

Démon pak začal pronásledovat Leó Szilárda. Tento velmi mladý maďarský fyzik byl obdařen tvůrčí představivostí. Szilárd později vymyslel elektronový mikroskop a není náhoda, že i jadernou řetězovou reakci. Jeden z jeho nejslavnějších učitelů, Albert Einstein, mu jako starostlivý strýček poradil přijmout placenou práci na patentovém úřadě. Szilárd však na jeho radu nedbal. Ve 20. letech 20. století přemýšlel o tom, jak se má termodynamika vypořádat s neustálými fluktuacemi molekul. Tyto výkyvy přirozeně odporovaly průměru, stejně jako ryba, která zrovna pluje proti proudu. A lidé se pochopitelně ptali: Co kdybychom je dokázali spoutat? Tato neodolatelná myšlenka vedla k zařízení, které by nepřetržitě fungovalo bez vnějšího zdroje - k *perpetuu mobile*, svatému grálu podvodníků a bláznů. Byl to jiný způsob, jak říct: „Všechno to teplo... proč ho nevyužijeme?“

Šlo také o další z paradoxů zplozených Maxwellovým démonem. V uzavřeném systému by démon, který je schopný chytat rychlé molekuly a umožnit průchod pomalým, představoval zdroj využitelné energie, jež by se neustále obnovovala. A kdyby to nebyl chimérický ďáblík, co takhle jiná „inteligentní bytost“? Možná experimentální fyzik? Szilárd prohlásil, že existence perpetuum mobile je možná, „pokud chápeme experimentátora jako určitý druh *deus ex machina*, boha ze stroje, který je nepřetržitě informován o bezprostředním stavu přírody“.<sup>19</sup> Szilárd vyjasnil, že ve své variantě myšlenkového experimentu nechtěl vzývat živého démona, který by byl obdařen například mozkiem; biologie přinášela své vlastní problémy. Poznamenal: „Sama existence nervové soustavy závisí na neustálém rozptylování energie.“ (Jeho přítel Carl Eckart to jadrně parafrázoval větou „Myšlení vytváří entropii.“)<sup>20</sup> Místo toho Szilárd navrhl „neživý prostředek“, jenž by zasahoval do modelového termodynamického systému – tento prostředek by řídil píst ve válci s tekutinou. Upozornil na to, že takové zařízení by vlastně potřebovalo „určité paměťové schopnosti“. (Psal se rok 1929 a Alanu Turingovi bylo 17 let. Podle Turingovy terminologie považoval Szilárd mysl démona za počítač s dvoustavovou pamětí.)

Szilárd prokázal, že i takové perpetuum mobile by nutně selhalo. V čem byl háček? Jednoduše řečeno, informace není volně dostupná. Maxwell, Thomson a ostatní s naprostou samozřejmostí předpokládali, že poznání je zde k dispozici – informace o rychlosti a trajektoriích molekul, které démonovi poletují před očima. Nevzali v úvahu cenu této informace. Ani nemohli – v jejich o něco jednodušší době informace patřila do paralelního vesmíru, do astrální sféry, která není spojená s hmotným vesmírem a jeho energií, částicemi a silami, jejichž chování se učili odhadovat.

Informace však má fyzikální podstatu a spojovacím prvkem je Maxwellův démon. Zajišťuje přeměnu mezi informací a energií, jednu částici po druhé. Szilárd – který ještě nepoužil slovo *informace* – zjistil, že kdyby měl přesné údaje a dostatek paměti, pak by šlo přesně vypočítat konverzní faktor. A tak to udělal. Spočítal, že každá jednotka informace přináší odpovídající nárůst entropie – konkrétně v poměru  $k \log 2$  jednotky. Pokaždé, když se démon rozhodne mezi dvěma částicemi, stojí to jeden bit informace. Zaplatit za to musí na konci cyklu, když si potřebuje vyčistit paměť (Szilárd nevyjádřil tento poslední detail slovy, ale matematicky.) Náležitě vyúčtování této bilance je jediným způsobem, jak zdolat paradox perpetua mobile, vrátit do vesmíru soulad a „obnovit shodu s druhým termodynamickým zákonem“.

Szilárd tak uzavřel smyčku, která vedla k Shannonově konceptu entropie jako informace. Shannon nečetl *Zeitschrift für Physik* ani jiné materiály v němčině.

O mnoho let později uvedl: „Domnívám se, že na to Szilárd myslel, mluvil o tom s von Neumannem a ten o tom mohl říci Wienerovi. Nikdo z nich o tom ale se mnou nemluvil.“<sup>21</sup> Shannon musel objevit matematiku entropie sám.

Pro fyzika je entropie mírou neurčitosti stavu fyzikálního systému – pravděpodobnosti jednoho stavu mezi veškerými možnými. Tyto mikrostavy nemusí být stejně pravděpodobné, a proto fyzik napíše  $S = - \sum p_i \log p_i$ .

Pro informatika je entropie mírou neurčitosti zprávy – jedné zprávy mezi veškerými možnými zprávami, které může vytvořit informační zdroj. Možné zprávy nemusí být stejně pravděpodobné, a proto Shannon napsal  $H = - \sum p_i \log p_i$ .

Není to pouhá shoda formálního zápisu; příroda dává na podobné otázky podobné odpovědi. Vše se redukuje na jeden problém. Když chce člověk snížit entropii v nádobě s plynem a vykonávat užitečnou práci, platí za to informaci. Stejně tak i konkrétní zpráva omezuje entropii v celku možných zpráv – z hlediska dynamických systémů je jím fázový prostor.

Tak to chápal Shannon. Wienerův pohled byl nepatrně odlišný. V případě pojmu, který původně znamenal svůj pravý opak, bylo jistě trefné, že tito kolegové a rivalové opatřili své formulace entropie opačnými znaménky. Zatímco Shannon ztotožnil informaci s entropií, pro Wienera to byla *negativní entropie*. Wiener tvrdil, že informace znamená řád, ale něco uspořádaného nemusí nutně ztělesňovat velké množství informace. Na rozdílné chápání poukázal sám Shannon. Neviděl v tom nic závažného a nazval to jistou „matematickou slovní hříčkou“. Poznamenal, že oba docházejí ke stejným číslům:

Já uvažuji o tom, jaké množství informace se vytvoří, když se zvolí jedna z množiny možností – čím větší množina, tím větší množství informace. Vy uvažujete o tom, že větší neurčitost v případě větší množiny znamená menší poznání situace, a tím i *menší* množství informace.<sup>22</sup>

Jinak řečeno,  $H$  je mírou překvapení. A ještě jinak,  $H$  je průměrný počet otázek typu ano/ne, které je třeba položit k uhodnutí neznámé zprávy. Shannon to měl správně – přinejmenším se jeho přístup ukázal jako plodný pro matematiky a fyziky další generace – ale zmatek přetrvával celé roky. Řád a neuspořádanost bylo třeba lépe rozmyslet.

Jako Maxwellův démon se chováme i my všichni. Organismy organizují. Důvod, proč rozvážní fyzici ponechali tento kreslený výplod fantazie při životě, spočívá v každodenní zkušenosti. Třídíme poštu, stavíme zámky z písku, skládáme puzzle, oddělujeme zrno od plev, sbíráme známky, pořizujeme abecední seznamy knih, vytváříme symetrii, skládáme sonety a sonáty, děláme v bytě

pořádek - a k tomu všemu není zapotřebí velkého množství energie, pokud používáme inteligenci. Jsme propagátory struktury (nejen my lidé, ale vše živé). Narušujeme sklon k rovnováze. Bylo by těžké provádět pro tyto postupy termodynamické výpočty, ale je namístě říci, že snižujeme entropii - krok po kroku, bit po bitu. Původní démon, který rozeznává rychlou molekulu od pomalé a ovládá svou malou bránu, je občas popisován jako „superinteligentní“, ale v porovnání se skutečným organismem je dost hloupý. Živé bytosti nejen snižují neuspořádanost ve svém okolí, ale samy představují zázračné uspořádané struktury - jejich kostry a tkáň, váčky a membrány, ulity a krunýře, listy a květy, kardiovaskulární systémy a metabolické cykly. Někdy to vypadá, jako by naším donkichotským úkolem ve vesmíru bylo krocení entropie.

Erwin Schrödinger byl jedním z průkopníků kvantové fyziky. Rád nosil motýlka a kouřil jednu cigaretu za druhou. Když měl v roce 1943 veřejně přednášet na Trinity College v Dublinu, rozhodl se, že dožrá čas zodpovědět jednu z nejzávažnějších nezodpověditelných otázek: Co je život? Rovnice, která nese jeho jméno, byla zásadní formulací kvantové mechaniky. Když se rozhlížel za hranice svého oboru, jak už to laureáti Nobelovy ceny ve středním věku dělávají, vyměnil preciznost za spekulaci a začal omluvou: „Někteří z nás by se měli odvážně pustit do syntézy faktů a teorií, byť s pomocí převzatého a nedokonalého poznání a s rizikem, že ze sebe uděláme hlupáky.“<sup>23</sup> Knížka, kterou z těchto přednášek sestavil, nicméně zapůsobila. Přestože nepřinesla žádné nové objevy ani tvrzení, stala se základem vznikající vědy, která ještě neměla jméno a spojovala genetiku s biochemií. Jeden ze zakladatelů tohoto vědního oboru později napsal: „Schrödingerova kniha byla něco jako *Chaloupka strýčka Toma* pro revoluci v biologii, jež po opadnutí zvířeného prachu po sobě zanechala molekulární biologii.“<sup>24</sup> Biologové předtím nic podobného nečetli. Fyzici to vnímali jako znamení, že další velká témata mohou být v biologii.

Schrödinger začal s tím, čemu říkal záhada biologické stability. Stavba živé bytosti projevuje pozoruhodnou stálost, na rozdíl od nádoby plné plynu s jejími rozmary v pravděpodobnosti a fluktuaci a zjevně i na rozdíl od Schrödingerovy vlastní vlnové mechaniky, kde je neurčitost pravidlem. Stavba živého organismu přetrvává po celý jeho život i napříč generacemi zásluhou dědičnosti. Schrödinger si uvědomil, že to potřebuje vysvětlení.

Zeptal se: „Kdy lze hmotu prohlásit za živou?“<sup>25</sup> Přeskočil obvyklé odpovědi, jako „když roste, žije se a rozmnožuje“, a odpověděl tak jednoduše, jak jen to bylo možné: „Když stále ‚něco dělá‘, hýbe se, vyměňuje si materiál s okolím a podobně o mnoho déle, než by takovou ‚činnost‘ mohla za podobných okolností konat neživá hmota.“ Hmota se běžně ustálí - nádoba s plynem dosáhne stálé teploty a z umělého systému „se postupně stane neživý, netečný kus

hmoty“. V každém případě je dodržován druhý termodynamický zákon a systém dosáhne nejvyšší entropie. Živé bytosti dokážou zůstat nestálé. Norbert Wiener se zabýval touto myšlenkou v *Kybernetice*. Napsal, že enzymy mohou být „metastabilními“ Maxwellovými démony, a myslel tím, že nejsou úplně a dlouhodobě stabilní. Poznamenal, že „stabilním stavem enzymu je dezaktivace a stabilním stavem živého organismu je být mrtev“.<sup>26</sup>

Schrödinger měl pocit, že (alespoň zdánlivě) chvilkové unikání živé bytosti druhému termodynamickému zákonu je přesně tím důvodem, proč „vypadá tak záhadně“. Schopnost organismu napodobovat věčný pohyb může vést mnoho lidí k víře ve zvláštní, nadpřirozenou *životní sílu*. Těto teorii *vis viva* či entelechie se vysmíval, stejně jako oblíbené představě, že organismy „mají za potravu energii“. Energie a hmota v ní byly jen dvě strany stejné mince a jedna kalorie je v každém případě stejně dobrá jako každá jiná. Odmítl to slovy, že organismus se živí negativní entropií.

Poněkud paradoxně dodal: „Když to vyjádříme o něco méně paradoxně, klíčové pro metabolismus je, aby se organismus úspěšně osvobodil od veškeré entropie, jejímuž vytváření se za svého života nemůže ubránit.“<sup>27</sup>

Jinými slovy, organismus vysává ze svého okolí uspořádanost. Býložravci a masožravci hodují u švédských stolů plných struktur - žijí se organickými látkami, jež jsou ve značně uspořádaném stavu, a vrací je „ve velmi znehodnoceném stavu, který však není degradovaný úplně, neboť ho dokážou využít ještě rostliny“. Navíc rostliny nezískávají ze slunce pouze energii, ale i negativní entropii. Energetickou bilanci lze provést víceméně přesně, z hlediska řádu již nejsou propočty tak jednoduché. Matematické kalkulace řádu a chaosu zůstávají choulostivější, neboť patřičné definice podléhají vlastním zpětnovazebním smyčkám.

Schrödinger uvedl, že se musíme ještě hodně učit, jak život uchovává a udržuje uspořádání, které získává z přírody. O buňkách se biologové s pomocí svých mikroskopů naučili hodně. Pozorují gamety - spermie a vajíčka. V jejich nitru našli tyčkovitá vlákna, kterým se říká chromozomy. Existují v párech, každý druh jich má pevně daný počet a přenášejí dědičné rysy. Schrödinger to nyní vyjádřil tak, že v sobě nějakým způsobem udržují „strukturu“ organismu: „Právě tyto chromozomy nebo zřejmě jen osově skeletové vlákno toho, co pod mikroskopem vidíme jako chromozom, obsahují v jakémsi kódovaném zápisu celou strukturu budoucího vývoje každého jednotlivce.“ Považoval za úžasné - záhadné, ale určitým, ještě neznámým způsobem bezpochyby klíčové - že každá buňka organismu „vlastní úplnou kopii tohoto kódovaného zápisu, a to dvakrát“.<sup>28</sup> Přirovnal to k vojsku, ve kterém zná každý voják každou podrobnost generálových plánů.

Tyto jednotlivosti představují mnoho samostatných „vlastností“ organismu, i když nebylo ještě zdaleka jasné, co každá taková vlastnost znamená. (Schrödinger přemítal: „Nezdá se, že by bylo přiměřené či možné rozpitvat samostatné ‚vlastnosti‘ na strukturu organismu, který je ve své podstatě jednotou, ‚celkem‘.“)<sup>29</sup> Hnědá nebo modrá barva očí zvířete může být vlastností, ale užitečnější je soustředit se na rozdíly mezi jednotlivci. A lidé chápali, že tento rozdíl řídí něco, co se předává v chromozomech. Použil pojem *gen* - „hypotetický hmotný nositel konečného dědičného rysu“. Nikdo tyto pomyslné geny ještě neviděl, ale jejich čas se blížil. Pozorování mikroskopem umožnilo odhadnout jejich velikost: možná 100 nebo 150 průměrů atomu, snad 1 000 či o něco méně atomů. Tyto nepatrné entity přesto musí nějak zahrnout celý vzorec živého tvora - mouchy, rododendronu, myši nebo člověka. A tento vzorec musíme chápat jako čtyřrozměrný objekt - strukturu organismu skrze celek jeho ontogenetického vývoje, od stadia embrya až po dospělost.

Při luštění molekulární struktury genu se zdálo přirozené zaměřit se na nejorganizovanější podoby hmoty, kterými jsou krystaly. Pevné látky v krystalickém tvaru jsou relativně stálé - začínou u nepatrného jádřerka a vytvářejí narůstající struktury. Kvantová mechanika začala pronikat do podstaty sil, které vytvářejí jejich vazby. Schrödinger měl však pocit, že zde něco chybí. Krystaly jsou příliš uspořádané - vytvářejí se „poměrně omezeně, neustálým opakováním stejné struktury ve třech směrech“. Ačkoli krystalické pevné látky vypadají propracovaně, obsahují jen několik druhů atomů. Schrödinger namítal, že život musí záviset na struktuře, která má vyšší úroveň složitosti a nepodléhá předvídatelnému opakování. Vymyslel pro to pojem *aperiodické krystaly*. Jeho hypotéza zněla: *Jsmo přesvědčeni, že gen - nebo možná celé chromozomové vlákno - je aperiodický mnohostěn.*<sup>30</sup> Stěží by mohl lépe zdůraznit tento úžasný rozdíl mezi aperiodickým a periodickým:

Rozdíl ve struktuře je stejný jako mezi obyčejnou tapetou s jedním vzorem, který se pravidelně opakuje, a mistrovskými tapisériemi, například Rafaelovými, na nichž nenajdeme primitivní opakování, ale umně vyvedený, spojitý, *smysluplný* vzor.<sup>31</sup>

Někteří ze Schrödingerových ctitelů - jako francouzský fyzik Léon Brillouin, který se nedlouho předtím přestěhoval do Spojených států - se zmínili, že Schrödinger byl příliš chytrý na to, aby zněl zcela přesvědčivě, i když jejich vlastní práce ukazují, že přinejmenším je přesvědčil. Brillouina zvláště uchvátilo přirovnání ke krystalům s jejich propracovanou, ale neživou strukturou. Poznamenal, že krystaly mají určitou schopnost sebeobnovy - pod tlakem

mohou jejich atomy změnit postavení, aby se udržela rovnováha. To lze vnímat z hlediska termodynamiky a nyní už i kvantové mechaniky. O co ušlechtlejší je potom sebeobnova u organismu: „Živý organismus léčí vlastní rány a nemoci a umí znovu vytvořit velké části své struktury, které byly zničeny následkem nějaké nehody. Jde o nanejvýš pozoruhodné a neočekávané chování.“<sup>32</sup> Brillouin také následoval Schrödingera v používání entropie ke spojování nejmenších a největších měřítek:

Země není uzavřený systém a život má za potravu energii a negativní entropii, jež do zemského systému proniká... Jako první v tomto cyklu probíhá tvoření nestálých rovnovážných stavů (palivo, jídlo, vodopády a podobně) a potom tyto zásoby používají všechny živé bytosti.

Živé organismy komplikují propočty entropie. V obecnějším smyslu dělá totéž informace. Brillouin navrhl: „Vezměte si výtisk *The New York Times*, knihu o kybernetice a papírový odpad o stejné hmotnosti. Mají stejnou entropii?“ Pokud s nimi zatopíte, tak ano. Pro čtenáře ale stejnou entropii nemají. Entropie zde spočívá v řazení stop barviva.

Brillouin uvedl, že ostatně i sami fyzici přetvářejí negativní entropii na informaci. Z pozorování a měření fyzik odvozuje přírodní zákony a s jejich pomocí pak lidé vytvářejí stroje, které mají tu nejnepravděpodobnější strukturu a v přírodě je nespátříme. Brillouin tato slova napsal v roce 1950, když opouštěl Harvard a odjížděl pracovat do Poughkeepsie pro společnost IBM.<sup>33</sup>

To však ani zdaleka nebyl konec Maxwellova démona. Problém nemohl být skutečně vyřešen a démon účinně zapuzen bez hlubšího pochopení oblasti, která je velmi vzdálená termodynamice - výpočetní techniky. Peter Landsberg později napsal následující úmrtní oznámení: „Maxwellův démon zemřel ve věku 62 let (když se objevilo pojednání Leó Szilárda), ale v podobě roztočilého ducha dál straší na hradě fyziky.“<sup>34</sup>