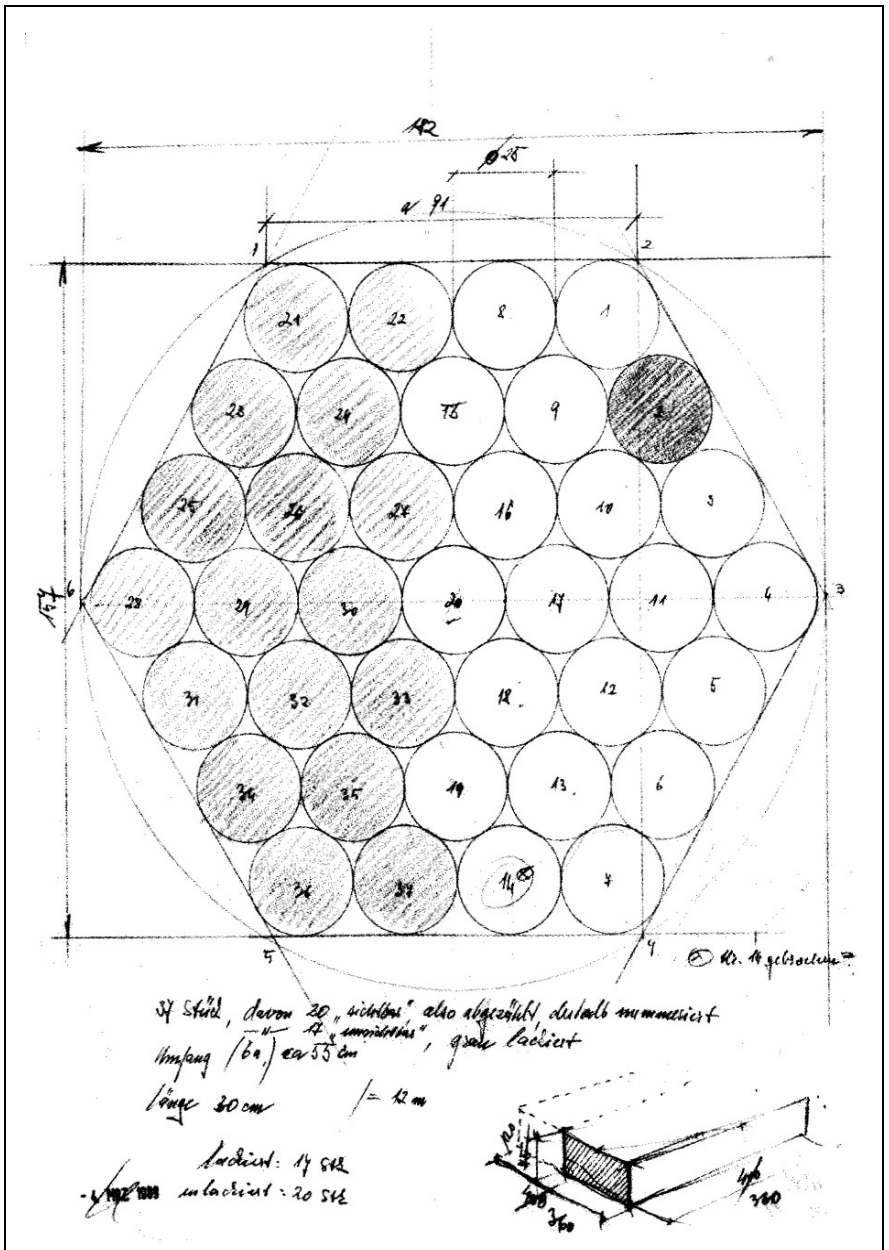


Peter Coveney  
Roger Highfield

# Mezi chaosem a řádem



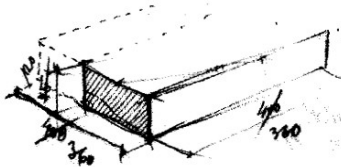
Hranice komplexity:  
hledání řádu v chaotickém světě



37 Stuhl, davon 20 "wickeln" also abgezählt, dazu 17 nummeriert  
 Umfang (60) ca 55 cm

länge 30 cm / = 12 m

Lackiert: 14 Stk  
 unlackiert: 20 Stk



Peter Coveney  
Roger Highfield.

# Mezi chaosem a řádem

Hranice komplexity:  
hledání řádu  
v chaotickém světě

s předmluvou Barucha Blumberga

MLADÁ FRONTA

Copyright © 1995 by Peter Coveney and Roger Highfield.  
All rights reserved.  
Translation © František Slanina, 2003  
ISBN 80-204-0989-0

Pro Samii a Elenu  
a Julii, Rona a Doris

At' všechny předměty grošované Boha oslaví —  
za nebe s paletou barev jak kravka strakatá,  
za hrotky růžových bodů pod ploutví plovoucích pstruhů;

za klapot kaštanů, uhlíků žhavých; křídla pěnkaví;  
tu krajinu plůtků, zeminy, pastvin, samá záplata;  
za výstroj a úbor a nástroj řemesel všeho druhu.

Za všechny věci vzdorné, nezvyklé, vzácné, původní,  
cokoli chvilkové, všelijak pihovaté (a co já vím)  
a pomalým, prudkým; kyselým, sladkým; temným, blysknavým;  
to on tvoří, sám nádhera mimo změnu dní.  
Nadchni se jím!\*

GERARD MANLEY HOPKINS  
Kropenatá krása

\* Překlad Ivan Slavík a Rio Preisner, Zánik Eurydiky. Torst, Praha 1995

## Předmluva

V Molièrově hře Měšťák šlechticem hrdina zjišťuje, poté, co poznal význam slova "próza", že v ní nevědomky po čtyřicet let hovořil. Podobně jsem zjistil, když jsem četl Mezi chaosem a řádem, že jsem desítky let provozoval komplexitu, aniž bych věděl, v jak vznešené společnosti se pohybuji. Podle mé zkušenosti z medicíny, v níž tvoří pozorování rozhodující součást vědy, mohou být projevy komplexity pochopeny, alespoň zčásti, opakovaným pozorováním organismů za nejrůznějších okolností; všechny proměnné jsou ponechány a zkoumá se jich tolik, kolik je jen možné. Například při studiu nemoci je možné shromáždit znalosti o vlivu velkého množství proměnných parametrů na hostitele, genetických předpokladech k nemoci a vnějších faktorech a o vzájemném působení faktorů mezi sebou, o hostiteli a okolním prostředí. Naproti tomu při redukcionistickém přístupu, s nímž se setkáváme tradičně ve fyzice, chemii a molekulární biologii, jsou experimenty navrženy tak, aby se studium přírodního jevu zjednodušilo vyloučením všech veličin až na několik málo zbývajících a vysvětlení se podávalo pomocí těch nejzákladnějších jednotek.

Jako příklad vědy založené na pozorování lze uvést studium viru žloutenky B (zkratka HBV) a jeho interakcí. HBV způsobuje primární rakovinu jater, jeden z nejrozšířenějších typů rakoviny na světě. Avšak ne u všech, kteří jsou vystaveni HBV, se projeví chronická forma a ne u všech nakažených se vyvine rakovina. Vnitřní a vnější faktory, které ovlivňují infekci a její výsledek, se navzájem ovlivňují a závisejí na čase. Vzájemně na sebe působí HBV a jiné viry napadající játra, virus AIDS, původce malárie a pravděpodobně i jiné mikroorganismy, které ovlivňují jak pravděpodobnost infekce, tak její výsledek. Zásadní vliv mají geny, pohlaví a věk. Kromě toho zvyšují riziko rakoviny a chronického stadia choroby faktory z okolního prostředí, jako jsou aflatoxin (karcinogen, který produkují plísně kontaminující potraviny),

železo, arzén a pravděpodobně i řada dalších. Jinou komplikací je to, že vlivy prostředí jsou ovlivněny produkty hostitelových genů.

Virus si vyvinul pozoruhodně důmyslné strategie, aby přežival co nejdéle, aniž by svého hostitele předčasně zabil, a aby se dále šířil, především prostřednictvím pohlavního styku a přenosem z matky na dítě během porodu a raného dětství. Jeho strategie unikání lidskému ochrannému imunitnímu systému je obzvlášť mazaná. Její součástí jsou "kouřové clony" povrchového antigenu produkovaného v nadměrném množství na otupení imunitní odezvy, vznik tolerance na virový antigen, což mu umožňuje celé roky přežívat v jaterních buňkách svého hostitele, množit se a šířit, ale bezprostředně neoslabit svého nevinného nositele, a mnoho dalších "inteligentních" schémat.

Všechna tato data si žádají model, který odhalí komplexní a časově závislé interakce známých a neznámých proměnných. Zde se však tvůrci konvenčních modelů dostávají do potíží, mají-li se zabývat takovouto komplexitou, protože je potřeba učinit příliš mnoho předpokladů. Dává věda o komplexitě naději na konstrukci dynamických a evolučních modelů, které poskytnou obsažnější a komplexnější obraz? Kniha Mezi chaosem a řádem nás povzbuzuje ve víře, že by to mohlo být možné, neboť dnes se pouštíme i do jiných velmi komplexních problémů: reálných problémů, tak jak existují ve světě, nikoli konstrukcí experimentátora odříznutého od bohatství skutečných událostí. Tato kniha v sobě skrývá slib, že komplexní problémy nejsou neřešitelné. Popsané formy syntézy a analýzy již začínají mít vliv na biologie a lékařské vědce, kteří jsou zaskočení obrovským množstvím proměnných, jež musejí brát v úvahu.

Autoři hovoří o svůdné přitažlivosti redukcionismu. Tradiční věda, zvláště její řecký ideál, oslavuje jednoduchost, harmonii, symetrii a další atributy čisté krásy. Podle některých interpretací Platón učil, že pozorovaný svět není tak skutečný jako jeho esence, která může být překryta složitostmi, jež ji zastíňují, a právě tuto esenci bychom si měli přát poznat. Experimentální věda se snaží přiblížit se k této esenci vytvořením světa sice odvozeného ze zkušenosti, ale s minimem komplikací. Například redukcionistická věda, zabývající se elementárními částicemi a fyzikálními silami nebo molekulami a geny v biologii, byla hnací silou zejména v posledních několika desetiletích, kdy jsme dostali k dispozici přístroje a metody, které nebyly dříve ani myslitelné. U nelineárních systémů je však celek víc než součet částí. Jediným způsobem, jak lze tyto systémy pochopit, je kromě podrobného

studia jednotlivých částí zkoumat i "globální" chování celku. U intervenční vědy, jakou je medicína, to může být sama komplexita, která poskytuje klíč k problému. V biologickém systému narušeném nemocí je to tak, že čím více komplexity si uvědomujeme, tím četnější jsou místa, kde můžeme zasáhnout. Znalost "skutečné" příčiny choroby čili onoho jednotlivého prvku, který ji způsobuje, je jistě cenná; často ji však zjistit nelze a může jít o fikci vytvořenou badatelem toužícím po jednoduché odpovědi na složité otázky. Avšak, jak se dočtete, úspěšní inženýři a další aplikovaní vědci jsou praktičtí lidé a nedovolí dokonalému, aby vystrnadilo dobré. Poznání získané na hranici mezi chaosem a řádem, kde se, podle některých, nacházejí mnohé problémy přírody, možná nepodává matematicky přesná řešení, ale spíše taková, která dovolují, aby z nich povstaly praktické aplikace a pochopení.

V knize Mezi chaosem a řádem se dočtete opojné věci. Například "Hra na Boha" začala jako matematická zábava s jednoduchými pravidly. Odstartovala však konstrukci modelů s rysy živých systémů, jako jsou virtuální ryby, jež se rozprchnou, když se přiblíží virtuální žralok, a virtuální včely, které mají podobné preference, pokud jde o květy, jako mají skutečné včely. I samotná DNA se dnes používá k provádění komplexních výpočtů. Již existuje umělý život, což jsou počítačové systémy, jež mají atributy života. A tyto atributy se dají přenést na roboty, kteří samostatně operují na vzdálených místech, jako jsou krátery aktivních vulkánů, na Měsíci, na Marsu. Vypadají jako hmyz vybavený logickým myšlením, jsou však sestrojeny ve snaze vystihnout chování přírodních bytostí.

V těchto schématech umělého života jsou zabudovány evoluční programy, které dovolují, aby v jejich rámci soutěžily "biomorfy" o přežití prostřednictvím přístupu do paměťového prostoru a spotřeby strojového času v počítači. Od přirozeného výběru se liší tím, že pravidla přežití dodává vědec. A tak se tvůrčí vědec připodobňuje Bohu ve vesmíru, jenž sám vytvořil. Skutečně, Richard Dawkins, zoolog z Oxfordu, představil na první konferenci o umělém životě, která se konala roku 1987 v Los Alamos, svého Slepého hodináře. Byl to program dovolující evoluční vznikání forem vykazujících řád, přičemž Dawkins vybíral ty, jež měly estetickou přitažlivost. Nyní vyvinuli Thomas Ray a další programy, které dovolují vznikat plejádám forem, aniž by se do toho vložil tvůrce s určitým záměrem.

Je to oblast jako stvořená pro neutuchající obavy laického publika z tvůrčí "arogance" vědy. Děsy zplozené Netvorem Viktora



Frankensteina, který strašil představivost světa téměř dvě století, se mohou těmito fantazií povzbuzujícími možnostmi znovu roznítit. Tyto myšlenky mají svou moderní podobu. Cituje se tvrzení krystalografa Bernala, že lidé se nespokojí jen s výrobou náhražky života, ale budou jej chtít vylepšovat. Molekulární biolog ve filmu a románu Jurský park se při vytváření svých dinosaurů nespokojil s tím, že ponechá DNA tak, jak ji našel. Přidal geny k rychlejšímu vývinu, pokusil se vytvořit jednopohlavní populace a chtěl změnit chůzi dinosaurů tak, aby souhlasila s představou lidí o chování dinosaura. Přesto byly tyto troufalé snahy odsouzeny ke katastrofě a zkáze, částečně proto, že tak málo rozumíme tomu, jak jsou detaily, které věda zkoumá, propojeny s okolním prostředím a s jinými životními silami v něm.

Kritik a esejistka Gilbert Highet píše o Jobovi, kterého strašlivá bouře přiměje uvědomit si mohutnost a velikost přírodních sil. Pokračující studium komplexity, i kdyby neposkytlo úplně uspokojivá řešení, by mělo přimět redukcionistickou vědu uvědomit si, že bez ohledu na to, kolik podrobností se odhalí a bez ohledu na to, jak obsažné může být poznání, zůstanou v pozadí všech dosavadních znalostí vždy nějaké neznámé. Při každém experimentálním ověřování hypotézy odhalujeme další otázky. Tajemství přírody ani naše touha jim porozumět nemají žádné meze. Studium komplexity nabízí možnost dívat se na věci z odstupu a přemýšlet o tom, jak globální interakce základních jednotek - atomů, elementárních částic či genů - vytvářejí syntézu, která překračuje hranice vědeckých disciplín. Komplexita nám odkrývá pohled na velkolepou nádheru přírody.

# Poděkování

Je tomu téměř deset let, co jsme za nočního rozhovoru o podstatě času a jeho vztahu k evoluci komplexních systémů poprvé pomysleli na to, že spolu napíšeme knihu. Pak jsme napsali Šíp času, který vyšel poprvé roku 1990 a od té doby byl přeložen do více než tuctu jazyků. Kniha Mezi chaosem a řádem je pokračováním téhož úsilí, rozvíjí a rozšiřuje pojmy, s nimiž jsme se setkali v Šípu času, a to zejména komplexitu, samoorganizaci a umělý život.

Od těchto klíčových myšlenek se odvíjí struktura knihy. To proto, aby nebyly zastíněny barvitým popisem zúčastněných osobností. Pokoušíme se také včlenit tyto myšlenky do širšího kontextu tím, že načrtne historický vývoj rozhodujících oborů vědy, techniky a matematiky. Vyhýbali jsme se, jak to jen šlo užívání odborného žargonu a matematické formule jsme si zakázali úplně. Číslované poznámky, určené odbornému čtenáři, najdete na konci každé kapitoly, spolu s podrobnými odkazy na odbornou literaturu a podivnými, zvláštními nebo fascinujícími informacemi, které jsme museli odložit stranou. Každý, v kom se probudí zájem, bude moci jít za problémem dále prostřednictvím bibliografie. Čtenář také možná zjistí, že je pro něj užitečný slovníček pojmů.

Jsme zavázáni neobyčejnou vděčností mnoha lidem, kteří nám v průběhu práce pomáhali. Srdečné díky patří Maxi Hastingsovi, redaktorovi The Daily Telegraph, že dovolil Rogeru Highfieldovi vzít si v letním semestru roku 1994 tvůrčí dovolenou k pobytu na Balliol College na Oxfordské univerzitě. V té době se těšil vydatné podpoře Barucha Blumberga, tehdejšího rektora koleje Balliol. Vědecké prostředí vybavené pokročilou technologií v Schlumbergerově laboratoři poskytlo Peteru Coveneyovi během psaní této knihy spoustu podnětů.

Velmi mnoho vědeckých přátel a kolegů nám velkoryse věnovalo svůj čas a poskytlo nám informace a vysvětlení. Jsme obzvláště zavázáni Johnu Billinghamovi, který více než jednou přečetl celý rukopis, a Bruci Boghosianovi za mnohé cenné diskuse a zdravě kritické rady. Chceme

též vyjádřit vděčnost Baruchu Blumbergovi za jeho povzbuzování, za jeho komentáře k rukopisu a za to, že napsal k této knize předmluvu.

Pokud jde o konstruktivní kritiku předběžných verzí jednotlivých kapitol, jsme zejména zavázáni za poznámky, které nám adresovali Len Adleman, Shara Amin, Steve Appleby, Michael Arbib, Robert Axelrod, Per Bak, Gary Barker, Mark Bedau, Colin Blakemore, Tim Bliss, Gregory Chaitin, Dave Cliff, Francis Crick, Jim Crutchfield, Derek Denton, David Deutsch, Rodney Douglas, Gerald Edelman, Manfred Eigen, José Luis Fernández, Brian Goodwin, Geoffrey Hinton, Andrew Hodges, John Holland, Xiaoping Hu, Gerald Joyce, Stuart Kauffman, James Lake, Chris Langton, William Latham, Ralph Linsker, Seth Lloyd, James Lovelock, Luigi Luisi, Paul Mellroy, Misha Mahowald, Carlo Maley, Christof von der Malsburg, Norman Margolus, Mario Markus, Robert May, David Miller, Melanie Mitchellová, Denis Noble, Martin Nowak, Leslie Orgel, Oliver Penrose, Roger Penrose, Edmund Rolls, Stever Rose, Riitta Salmelinová, Antoine Schlijper, Terry Sejnowski, David Sherrington, Karl Sims, Olaf Sporns, Oliver Strimpel, Doron Swade, Harry Swinney, Jim Tabony, John Taylor, Roger Traub, Lotfi Zadeh a Semir Zeki.

Osoby, kterým bychom rovněž rádi poděkovali za svolení k interview nebo za poskytnutí informací, jsou: Igor Aleksander, Anthony Arak, Wallace Broecker, Rodney Brooks, Marilyn Butlerová, John Conway, Malcolm Cooper, Elena Coveneyová, Richard Dawkins, Dan Dennett, Rodney Douglas, Tim Dowling, Karl Friston, Peter Fromherz, Hugo de Garis, Murray Gell-Mann, John Habgood, Danny Hillis, Peter Hilton, Rufus Johnstone, Julian Lewis, Robert Littell, Christopher Longuet-Higgins, Sidney Nagel, Tom Ray, Urs Ribary, John Searle, Hava Siegelmann, Tom Stoppard, Demetri Terzopoulos, Tom Toffoli, Giulio Tononi, Paul Verschure, Peter Walde, James Watson, Gerard Weisbuch a Stephen Wolfram.

Mnoho lidí četlo a mělo připomínky k částem této knihy a trvalo na tom, abychom výklad a jeho srozumitelnost na mnoha místech vylepšili. Mezi nimi jsou Samira Ahmed, Oscar Bandtlow, Julia Brookesová, Jon Dagley, Richard Daly, Andrew Emerton, Allan Evans, Heather Gethingová, Ronald a Doris Highfieldovi, David Johnson, Mehul Khimasia, Tony Manzi, Samia Nehmé a Keir Novik. Mehul a Keir nám pomohli i při čtení korektur.

Chyby, které zůstaly, jdou samozřejmě pouze na náš vrub. Nikdo z jmenovaných nemusí nutně souhlasit s názory, které v této knize vyjadřujeme.

Jsme velmi vděční všem, kteří poskytli obrázky, a to zejména Williamu Lathamovi, Mario Markusovi, Karlu Simsovi, Nickovi Watersovi a Michaelu Whiteleyovi. Děkujeme kromě toho Daresburské laboratoři a Davidu Stuartovi a jeho spolupracovníkům z oddělení molekulární biofyziky Oxfordské univerzity za to, že jsme mohli použít obrázků struktury viru slintavky a kulhavky.

Za povolení použít diagramy, kresby nebo obrázky si poděkování zaslouží následující osoby: American Association for the Advancement of Science; J. Baldeschwieler; Gary Barker; British Telecom; 9ph; Richard Dawkins; Gerald Edelman; J. L. Fernández; Hugo de Garis; Joseph Harrington; Martin Harvey; Institute for Advanced Study; Gerald Joyce; William Latham; Norman Margolus; Mario Markus; Kevan Martin; Peter Newmark; Denis Noble; Martin Nowak; Przemyslaw Prusinkiewicz; Thomas Ray; Julius Rebek; Riitta Salmelinová; The Science Museum, London; Kenneth Showalter; Karl Sims; Jakob Skipper (autor programu C-Zoo); David Stuart; Demetri Terzopoulos; Manuel Velarde; Nick Waters; Michael Whiteley; Andrew Wuensche; Semir Zeki. Tým grafiků z The Daily Telegraph, Alan Gilliland a Richard Burgess, poskytl pro knihu pérovky.

Rádi bychom také poděkovali paní Gulshan Chunarové z The Daily Telegraph za její věrné služby sekretářky; Johnu Brockmanovi, který byl první, kdo nás přiměl knihu napsat; našim editorům: byli to Joëlle Delbourgo a Andrea Schulzová v New Yorku a Julian Loose v Londýně. Těžili jsme obzvláště z těsné spolupráce při redigování postupných předběžných verzí rukopisu, které prováděl Andrea Schulz. Rádi bychom také poděkovali Susanne McDaddové, která hrála klíčovou roli v raných stádiích této knihy a v Šípu času. A ze všeho nejvíce děkujeme Samii a Julii za to, že tolerovaly ještě další dlouhý a vyčerpávající projekt.

Peter Coveney, *Schlumberger Cambridge Research*  
Roger Highfield, *The Daily Telegraph*

Březen 1995

# Prolog

Těžko si představit dvě odlišnější povahy, než byli John von Neumann a Alan Mathison Turing. "Jenda veselá kopa" si liboval ve vtipech a užíval si společnosti žen.<sup>1</sup> Miloval také elegantní obleky, pikantní historky a večírky. Alan Turing byl neobratný, těžko přístupný samotář, kterému říkali "pan profesor". Obvykle chodil v obnošené sportovní bundě, měl váhavý hlas, zažloutlé zuby a neudržované nehty.<sup>2</sup> O Vánocích předtím, než se tyto muži poprvé spatřili, prosil dvaadvacetiletý Turing svou matku o plyšového medvídka, kterému dal jméno Porgy.

Tito muži, kteří mají pro naši knihu zásadní význam, měli sotva co společného. Alan Turing se narodil 23. června 1912 v malé nemocnici poblíž Paddingtonu u Londýna. Von Neumannovi bylo tou dobou osm a věnovali se mu soukromí učitelé v domě jeho bohatého maďarského otce. Jejich oslnivý intelekt však sdílel společnou vizi od té doby, co se poprvé setkali v Cambridgi roku 1935. Během následujících deseti let nezávisle na sobě položili matematické, logické a fyzikální základy elektronického číslicového počítače.

Jejich jména budou navždy spojována s tímto strojem, který dnes zasahuje do každé transakce denního života: elektronické finanční převody, telekomunikace, textové editory, pokladny v supermarketu, programovatelné videorekordéry, speciální filmové efekty, internet -seznam aplikací nemá konce. Bity digitální logiky krouží kolem planety se zběsilou intenzitou, přenášejí technické údaje, obchodní rozhodnutí, ultimáta, příkazy k palbě, videokonference, pozdní noční rozhovory a milostné vzkazy.

---

<sup>1</sup> Von Neumannův bratr uvádí některé příklady jeho humoru. Jedna oblíbená historka líčila pouliční scénu z Berlína za první světové války: Jakýsi muž na rohu ulice vříská na celé kolo: „Císař je idiot.“ Objeví se dva policejní agenti a zatknou ho pro velezradu. „Ale já jsem myslel rakouského císaře, ne našeho císaře,“ křičí muž. Policisté odvětlí: „Nedělejte z nás blbce! My víme, kdo je idiot.“ Převzato z Nicholas A. Vonneuman, John von Neumann, as seen by his brother © Nicholas Vonneuman, PO Box 3097, Meadowbrook, PA 19046 USA, 1987), str. 39, s laskavým svolením.

<sup>2</sup> A. Hodges, Alan Turing: The Enigma (Vintage, London 1992), str. 95. P. Hilton, American Association for the Advancement of Science, únor 1995.

Turing a von Neumann byli průkopníky studia komplexních systémů, od vířících tekutin po myslící mozky. Stali se osobami zásadního významu pro vědu o komplexitě, snahu skrze stromy vidět les, vydestilovat jednotu z různorodosti a hledat vysvětlení toho, jak povstává uspořádanost, ať jde o plující oblak nebo inspirovanou mysl. Není vůbec náhodou, že jejich odkaz - číslicový počítač - je dnes nejdůležitějším nástrojem při provádění těchto výzkumů, neboť matematické rovnice popisující komplexitu jsou obvykle příliš složité, aby se daly řešit s papírem a tužkou. Strategie shánění potravy u mravenců, konvektivní obrazce, které se tvoří v zahřívané nádobě s olejem, a nepravidelný tlukot nemocného lidského srdce patří k nesmírnému množství komplexních systémů, jež by nebylo možné simulovat bez číslicového počítače.

Jeich vize však šla ještě dále než k počítačovým simulacím. Von Neumann vynalezl sebereprodukcující se automat, abstrakci, která spojovala jeho zájem o logiku, počítače a biologii, aby ukázal, jak stroj může vykonávat nejzákladnější funkci života - rozmnožování. Von Neumann se tak stal otcem umělého života, jedné z nejúžasnějších oblastí současného výzkumu. Podobně Turingovou nejzazší metou bylo sestrojít umělý "mozek" a neviděl žádný důvod, proč by jednou nemohl počítač tento sen uskutečnit. V dnes již slavném článku publikovaném roku 1950 formuloval pracovní definici inteligence, která byla dostatečně široká, aby zahrnovala jak biologická, tak mechanická zařízení.<sup>3</sup> Jeho práce o počítačích a jejich vztahu k mozku z něho učinily otce umělé inteligence.

Jelikož byl přesvědčen o důležitosti učení jako základního předstupně inteligence, ať už biologické či umělé, strávil Turing velkou část svých posledních let přemýšlením o struktuře mozku živých bytostí a o tom, jak obrovské soubory mozkových buněk (neuronů) během učení spolupracují. Tyto otázky vedly jeho zájem k morfogenezi - vývinu biologických tvarů, tak jak to vidíme u sedmikrásky. To však měl být poslední rozkvět výjimečné kariéry. Když policie vyšetřovala vloupání do jeho bytu, byl nucen přiznat, že je homosexuál. Tato sexuální orientace nebyla tehdy v Británii tolerována. V roce 1952 Turing napsal příteli, že čelí obvinění ze sexuálních přestupků. Dopis odrážel absurditu jeho situace, ale také narážel na to, jak se cítí pošpiněn, a končil sylogismem: "Turing tvrdí, že stroje myslí. Turing

---

<sup>3</sup> A. Turing, "Computing machinery and intelligence", *Mind* 59, číslo 236. Viz též Hofstadter, D. and Dennett, D. (eds.), *The Mind Is I* (Basic Books, New York 1981).

spí s muži. Tudíž stroje nemyslí." Byl shledán vinným z "hrubé neslušnosti", byl podmíněně propuštěn a poslán na léčení - "organoterapii" kde mu byly podávány hormony, aby zkrotily jeho "nepřirozenou" sexuální touhu. Jakákoli naděje na udržení efektivní spolupráce s von Neumannem se rozplynula, neboť Turing už nemohl dostat vízum do Ameriky. Tlak konformity se nedal vydržet. Sedmého června 1954, na nejchladnější a nejvlhčí Pondělí svatodušní za posledních padesát let, jedenačtyřicetiletý Alan Turing pozřel několik soust jablka, které předtím namočil do kyanidu.



Alan Turing



John von Neumann

Turing byl neopěvovaným hrdinou, zakladatelskou postavou v britské válečné zpravodajské službě, vrchním luštitelem kódů, jak skrývajících tajemství přírody, tak zpráv zasílaných stroji Enigma německého námořnictva. Britská ani americká vláda dosud nepřipustily otevřenou diskusi o metodách, které používal, avšak jeden z jeho bývalých kolegů tvrdil, že Turingova práce na analýze tajných kódů během druhé světové války byla nejdůležitějším příspěvkem jednotlivce k vítězství Spojenců. Tato práce byla také rozhodujícím odrazovým můstkem v jeho poslání postavit skutečný počítač. A přece se jeho oslnivě svérázná, logická mysl už nedokázala vypořádat s vyhlídkou na život v bezohledném a iracionálním světě.

Zatímco Turing umíral oceňován jako potenciální bezpečnostní riziko, von Neumann se stal dobře známou osobou v mnoha komisích amerických vojenských úřadů a hrál klíčovou roli ve vývoji vodíkové bomby a mezikontinentální balistické rakety, stejně jako číslicového počítače. Jeho nová vlast ho neovládala, on ovládal ji. V roce 1956 mu byla prezidentem Eisenhowerem při slavnosti v Bílém domě udělena Medaile svobody. Byla to jedna z posledních příležitostí, kdy se objevil na veřejnosti<sup>4</sup> a, tou dobou už nebylo pochyb, jak skončí jeho zničující choroba. Von Neumann poznamenal: "Přeji si, abych žil dost dlouho, abych si tuto poctu zasloužil." Prezident odpověděl: "Ale ovšem, budete tady s námi dlouho."

Von Neumann se slavnosti účastnil na invalidním vozíku. Dostal pozvání, aby na jaře toho roku přednesl Sillimanovy přednášky na Yaleově univerzitě, ale tou dobou byl hospitalizován s rakovinou v Nemocnici Waltera Reeda ve Washingtonu. Dvě z jeho přednášek, částečně napsané na smrtelné posteli, byly nakonec uveřejněny v *The Computer and the Brain*. V této knize vyjádřil von Neumann své přesvědčení, že matematika je druhotným jazykem, odvozeným od prvotního jazyka, používaného centrální nervovou soustavou těla<sup>4</sup>

Tak dlouho, jak toho byl schopen, usiloval von Neumann o odhalení, jaký ten jazyk nervuje. Ale 8. února 1958 se jeho boj o život dovršil a své poslání, podobně jako Alan Turing, zanechal nedokončené.

A přece měl Eisenhower pravdu: von Neumannova vize, ta kterou sdílel s Turingem, s námi zůstává. Jejich památce věnujeme tuto knihu

---

<sup>4</sup> J. von Neumann, *The Computer and the Brain* (Yale University Press, New Haven 1958), str. 82.



# 1 Tajné umění

Bůh vložil do sil přírody tajné umění,  
aby jí umožnil zformovat se z chaosu  
v dokonalý světový systém.

IMMANUEL KANT <sup>5</sup>

Díváme-li se ze zcela bezprostřední blízkosti, je vesmír ohromující a nepředstavitelné množství částic, tančících na melodii fundamentálních sil. Všude kolem nás a v nás se srážejí, kmitají a otáčejí molekuly a atomy. Při každém nádechu vtaujeme do plic doušky dusíkových a kyslíkových molekul. V zrníčkách písku mezi prsty u nohou se třesou a vrážejí do sebe mřížky atomů. Armády enzymů se namáhají, aby přeměnily chemikálie na životní energii pro naše buňky. Přesto přemýšlíme o vesmíru jako o jediném harmonickém systému neboli kosmu, jak mu říkali Řekové. Nyní je tu ale nová oblast vědy, která se snaží ukázat, proč je celý vesmír více než souhrn mnoha svých částí a jak se všechny jeho komponenty skládají a tvoří tak všepokrývající obrazce. Toto úsilí vytušit řád v chaotickém kosmu je nová věda o komplexitě. Splétá dohromady pozoruhodné souvislosti mezi mnoha rozličnými výsledky badatelů pracujících na její čelné frontě, napříč úžasně širokou škálou oborů.

Francouzští vědci zkoumají, jak v polévce chemických sloučenin spontánně vznikají tečky a proužky. Jsou neskutečně podobné obrazcům, které nacházíme na srsti zvířat, na křídlech hmyzu a na ulitách plžů. Cykly chemických reakcí se v polévce proplétají a otáčejí, takže se zdá, že nesčetné molekuly přesně vědí, co každá z nich dělá. Díky vzájemné komunikaci mezi myriádami molekul vznikají pestré vzory.

Na východním pobřeží Ameriky se formují obrazce elektrické aktivity v síti stovek tisíc umělých mozkových buněk. Nikdo síti neříká, co má dělat: vše, co je předepsáno, je jen pár jednoduchých pravidel,

---

<sup>5</sup> I Kant, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (Aufbau-Verlag, Berlin 1955).

určujících, jak má jedna buňka "hovořit" s druhou. Buňky se však postupně organizují, takže různé úlohy jsou uvnitř sítě prováděny rozdílnými skupinami buněk. Pozoruhodné je, že se síť spojuje podobným způsobem, jako když buňky v lidském těle zpracovávají zrakové signály.

Na předměstí San Diega napodobují molekulární biologové proces, který umožnil vývoj lidstva v průběhu věků. Vědci nechávají imitovat a vyvíjet se biliony molekulárních variací na přírodní téma - úsek genetického kódu, jehož optimalizace trvala přírodě miliardy let. Tato "evoluce ve zkumavce" potřebuje jen několik dní na to, aby se úsek kódu změnil tak, aby kódoval enzym schopný urychlit nový chemický proces, třeba takový, jenž může pomoci zachránit život člověka.

Ekolog v Kjótu zírá na sled mnohobarevných proužků na obrazovce počítače. Pruhoaná duha se vyvíjí a proměňuje, a znázorňuje tak úseky mutujících počítačových programů, které přežily v bitvě o paměťový prostor v jádru počítače. Necháme-li se tyto soutěžící programy vyvíjet v průběhu několika tisíců generací, dostaneme pestrý zvěřinec, podobný tomu, který bují v deštném pralese.

A tisíce mil odtud, na univerzitě v Oxfordu, pomáhá teoretickému fyzikovi jev zvaný frustrace odhalit soupeřící meziatomové síly, které obdařily kovové slitiny podivnými magnetickými vlastnostmi. Frustrace v běžném životě nastává, když narazíme na zbytečnou byrokracii, hnidopišství či odpor. Podobně vzniká magnetická frustrace, když jsou meziatomové síly ve sporu. Tím, že tento konflikt pochopíme, můžeme nejen porozumět vlastnostem slitin, ale také řídit provoz globálních telekomunikačních sítí a rozluštit tajemství paměti.

Všichni tito vědci zkoumají projevy téhož fenoménu: "tajného umění" letmo zahlédnutého Kantem. V makroskopickém světě vidíme nesčetné komplexní procesy a systémy: náboženské obřady a prchavé emoce, přemítání s hudbou a blátivé louky, globální burzovní krachy a vlhká nedělní odpoledne. Tato komplexita je přírodě vrozena; není to pouhý výsledek kombinace mnoha jednoduchých procesů, které probíhají na nějaké základnější úrovni.<sup>6</sup>

V rámci vědy je komplexita sloganem nového způsobu přemýšlení o kolektivním chování velkého počtu základních interagujících jednotek,

---

<sup>6</sup> Jak bylo zmíněno, nevratnost je podstatným prvkem makroskopické komplexity, jak ji vyžaduje druhá věta termodynamická. Tento zákon je v rozporu s jinými zákony mikroskopické fyziky, které popisují pouze vratné jevy, což jsme rozebírali v naší předešlé knize Šíp času, (W. H. Allen, London 1990; Ballantine, New York 1991), český překlad OLDAG, Ostrava.

ať už to jsou atomy, molekuly, neurony nebo bity v počítači. Řečeno přesněji, naše definice bude znít, že komplexita je studium chování makroskopických souborů takových jednotek, které jsou nadány schopností vyvíjet se v čase. Jejich interakce mají za následek koherentní kolektivní jevy, takzvané emergentní vlastnosti, jež se dají popisovat pouze na vyšších úrovních, než je úroveň individuálních jednotek. V tomto smyslu je celek více než souhrn svých částí, právě tak jako van Goghova malba je mnohem více než soubor rázných tahů štětcem. To platí stejně tak pro lidskou společnost jako pro běsnící moře nebo obrazce elektrochemických vzruchů v neuronech lidského mozku. Prudce se točící vír v rozbouřeném oceánu se nedá vyjádřit z hlediska jednotlivých molekul vody o nic lépe, než může být šťastná myšlenka popsána z hlediska pochodů uvnitř jednotlivé mozkové buňky. Naproti tomu pohyb pouhých tří koulí na kulečnickovém stole je v dlouhém časovém horizontu nepředvídatelný, i když pohybové rovnice popisující tento systém jsou známy zcela přesně.<sup>7</sup>

Konvenční věda je často slepá k souvislostem mezi frustrovanými kovy, růstem a pádem cen akcií a celou řadou dalších komplexních jevů. Většina vědců se dnes omezuje na podrobné studium jednoho drobného aspektu jediného podoboru v rámci jedné větve stromu vědy: například na pěnovou strukturu vesmíru, vymírání plžů rodu *Partula* na tichomořském ostrově Moorea nebo na molekulární strukturu jednoho enzymu viru HIV. Je to nevyhnutelné, protože víc a víc výzkumů se soustřeďuje na stále menší podrobnosti. Rozsah nezbytných odborných znalostí a komplikovanost technik užívaných v každém oboru jsou tak skličující, že je obtížné dosáhnout až na samou hranici poznání bez nesmírného obětavého nadšení. Nevyhnutelná specializace vede k tomu, že každá i malá oblast zkoumání má svou vlastní metodologii a hantýrku, které sotva porozumí člověk odjinud, natož aby přišel na to, zda by mohl sdílet společný pojmový rámec s jinými vědci, pracujícími v odlišných oborech.

Avšak většina problémů reálného světa - a tedy většina těch, které trápí moderní průmysl a společnost - nezapadá do jasných škatulek. Chtějí-li je vyřešit, musejí být lidé schopni komunikovat přes tradiční hranice, přistupovat k věcem s ochotou spolupracovat a ne se

---

<sup>7</sup> O. Penrose and P. V. Coveney, Proc. R. Soc. London A 447 631 (1994). Mezi jiným tento článek ukazuje, pro velmi jednoduchý modelový problém, že aby se mikroskopický (klasický) mechanický popis stal kompatibilním s makroskopickým, jsou nutná určitá omezení pro to, co se v mikroskopickém popisu dá pozorovat.

segregovat. Mnoho vědců, kteří jsou dnes téměř z definice specialisty, se může na toto poselství dívat podezřívavě, pokud se jim necítí přímo ohroženi. Bohužel, náš nynější vzdělávací systém nás stěží připraví na takový přístup. Jak řekl laureát Nobelovy ceny Murray Gell-Mann, musíme se zbavit představy, že seriózní práce se omezuje na snahu "definitivně zvítězit nad dobře definovaným problémem v úzké disciplíně, kdežto široce shrnující myšlení je vykázano na koktejlové dýchánky. V akademickém životě, mezi úředníky i jinde se setkáváme s přezíráním povinnosti vědu integrovat."<sup>8</sup> Před staletími bylo možné, aby špičkoví intelektuálové byli ryzími polyhistory a přispívali zásadním způsobem k celé šíři lidského myšlení a idejí. Dnes se to zdá nemožné.

Existuje nicméně komunita vědců - a filozofů -, kteří plavou proto tomuto proudu. Motivováni touhou vybudovat vztahy mezi vědeckými disciplínami, jež jsou konvenčně odděleny, chtějí ukázat, že existuje soustava pojmů, nezbytných pro pochopení fungování světa. Jejich konečným cílem není jen pochopit komplexitu některého jednotlivého jevu, ale také univerzální rysy samotné komplexity, ať už se projevuje v evoluci deštného pralesa či programů uvnitř počítače, v kapání netěsnícího kohoutku, v barevných spirálách vznikajících při chemických reakcích, v magnetických vlastnostech slitin nebo ve fungování mozku nadaného vědomím. Je to úsilí najít jednotu v různorodosti, vysvětlit, jak může řád povstat z množství vyvíjejících se elementů, ať jsou to atomy, buňky nebo organismy.

Konvenční fyzika je schopná předpovědět události velkého rozsahu, takové jako jsou ohyb světla kolem těles o vysoké hmotnosti, včetně černých děr, a pohyb spirálních galaxií. Může také vyšetřovat události na té nejjemnější škále, například když elektron přeskakuje mezi energetickými hladinami vodíkového atomu. Fyzikové se však obvykle vyhýbali pokusům porozumět fungování mozku a vlastně jakékoli komplexitě, která je tak častá na délkových a časových škálách, jež jsou pro lidský mozek paradoxně ty nejběžnější. Procesy vytvářející z prvopočáteční jednoduchosti atomů a molekul nádhernou makroskopickou komplexitu, kterou tak dobře známe, jsou součástí tajného umění přírody. Pro německého filozofa Immanuela Kanta bylo toto "tajné umění" znamením Boží ruky řídící chod událostí příznivým směrem.

---

<sup>8</sup> M. Gell-Mann: *The Quark and the Jaguar* (Little, Brown, Boston and London 1994), str. 352.

Právě se chystáme vydat na naši vlastní výpravu za pochopením podstaty komplexity. V následujících kapitolách budeme zkoumat její základní matematický popis a hledat její projevy v tak odlišných oblastech, jako jsou chemie, fyzika, biologie a informatika. Cestou zahlédneme úžasnou moc této nové vědy a její schopnost propojit procesy, k nimž dochází uvnitř našich těl a kolem nás v kosmu. Doufáme, že ukážeme vztahy mezi těmito procesy tak, jak to ještě nikdy nebylo možné.

## Jak se tvoří komplexita

Aby se komplexita objevila, jsou nezbytné dvě složky. Tou první a nejdůležitější je nevratné prostředí, v němž se může něco odehrávat: tímto prostředím je čas tekoucí z minulosti, kterou necháváme uzavřenou za sebou, směrem k budoucnosti, jež je otevřená. Důvod, proč říkáme zdánlivě zřejmou věc, je ten, že pohybové zákony tradičně užívané k popisu chování hmoty na mikroskopické úrovni nerozlišují jeden směr času od druhého. A přece z toho, že sněhulák má tendenci roztát a že na naší kůži přibývají vrásky, víme, že na makroskopické úrovni je preferovaný směr času jednoznačně vybrán. Tento slavný paradox nevratnosti vzniká z toho, že se ztrácí souvislost mezi těmito dvěma úrovněmi popisu, což je problém, který jsme zkoumali v naší předchozí knize *Šíp času*.<sup>□</sup>

Druhou podstatnou složkou je nelinearita. Všichni dobře známe lineární systémy, které byly hlavní doménou vědy po více než tři sta let: protože jedna a jedna jsou dvě, můžeme předpovědět, že se objem vody odtékající výlevkou zdvojnásobí, bude-li kohoutek kapat dvakrát déle. Nelineární systémy tato jednoduchá sčítací pravidla nespĺňují. Porovnejte jednoduchý proud vody tekoucí výlevkou s komplexními nelineárními jevy, které regulují množství vody v lidském těle nebo pohyb vodní páry v mracích nad vaší hlavou. Nelinearita způsobuje, že malé změny na jedné úrovni organizace mohou vyvolat velké účinky na téže nebo na jiných úrovních. Většina z nás to dobře zná na příkladu kladné zpětné vazby, která mění zesílenou hudbu v ohlušující vytí, tentýž jev se však uplatňuje i v tendenci atomů plutonia rozpadat se řetězovou reakcí při jaderném výbuchu. Obecně platí, že nelinearita přináší komplexní a často neočekávané výsledky.

---

<sup>□</sup> P. Coveney, R. Highfield, *Šíp času*, OLDAG, Ostrava 1995 (pozn. překl.)

Nevratnost a nelinearita jsou charakteristické pro jevy v každém vědeckém oboru: komplexita zbarvení motýlích křídel a levhartích skvrn, tvar kapradiny sleziníku, přesleny malé zelené řasy acetabularie (*Acetabularia crenulata*), rytmické projevy života, jako jsou tlukot srdce, vzruchy nervových buněk v mozku a tak dále. Z nelinearity povstávají i podobné, ale složitější chaotické formy komplexity včetně zdánlivě náhodného chování počasí, propukání epidemie chřipky a šíření informací a myšlenek.

Jedním z nejpůsobivějších způsobů, jak získat cit pro komplexitu, je probrat si bohaté vlastnosti velmi jednoduché nelineární matematické rovnice, která popisuje, jak se mění populace organismů v ekosystému od jedné generace k následující v důsledku narození a úmrtí. S použitím počítačové grafiky lze zobrazit pozoruhodnou šíři možného chování, zachyceného touto logistickou rovnicí, jako tajuplnou a fantazii jitrící krajinu (viz obr. 1 barevné přílohy). Každý z obrázků ukazuje výsledky výpočtů, prováděných Mario Markusem a jeho kolegý v Ústavu Maxe Plancka pro molekulární fyziologii v německém Dortmundu, pro téměř milion možných kombinací parametrů okolního prostředí. Tato vyobrazení odkrývají vzrušujícím způsobem komplexitu, která je vlastní nelineárním rovnicím.<sup>9</sup> Takové chování jsme schopni zkoumat jedině s pomocí počítače.

## Původ komplexity

Hmota má vrozenou tendenci organizovat sebe sama a vytvářet komplexitu. Tato tendence působila od zrození vesmíru, kdy z naprosté nicoty vypučela tečička beztvaré hmoty. Z tohoto velkého třesku, o kterém se předpokládá, že byl naprosto nekomplikovaný, se rozepjal vesmír. Ze začátku hmota představovala jen plyn elementárních částic a polí, ale asi za miliardtinu vteřiny po velkém třesku se začínala spojovat do subatomárních částic, jako jsou protony, neutrony a elektrony. Tyto společné stavební kameny se řídí tím, co fyzikové považují za jednoduché matematické zákonitosti, a přesto tato hmota zrodila struktury pozoruhodné složitosti, jak se shlukovala a vytvářela sraženinu chuchvalcovitých útvarů, jako jsou galaxie, hvězdy a planety. Energie a chemické prvky vznikající ve hvězdách vedly k povstávání

---

<sup>9</sup> Technicky řečeno jsou zde vyneseny Ljapunovovy exponenty. Chaotické řešení je takové, které má alespoň jeden pozitivně definitní Ljapunovův exponent.

komplikovaných struktur, tak organizovaných, jako jsou krystaly nebo lidský mozek. Nejúčvatnějším příkladem, jaký známe, je uspořádání života na Zemi, v celé jeho kypící různorodosti.

Avšak kosmologie, astrofyzika a fyzika částic neříkají zdaleka všechno. Pokud jde o život na Zemi, komplexitu přírody vytříbilo soutěžení o omezené zdroje. Díky Darwinovi se stal populárním pojem přežití nejzdatnějšího neboli usilovná snaha každého druhu - a samozřejmě každého jedince v rámci tohoto druhu - o přizpůsobení se neboli optimalizaci své schopnosti přežít. Jak plyne čas, stále se mění prostředí, v němž se jedinec nachází, a tím i jeho naděje na přežití v závislosti na tom, jak se vyčerpávají zdroje potravy, mění se lokální podnebí nebo se šíří zhoubný virus. Jak se vyvíjejí ostatní druhy a soutěží v rámci téhož prostředí, musí se jim organismus průběžně přizpůsobovat, aby přežil. Opice je jednou z milionů formací v prostoru a čase, které vznikly při evoluci deštného pralesa. Opice ale ztělesňuje ohromnou šíři komplexity, od chemických reakcí v buňkách po elektrickou aktivitu jiskřící v jejím mozku.

Pochopení komplexity života je tou největší výzvou, která stojí před moderní vědou. Co můžeme tímto úsilím získat, je zřejmé. Když pochopíme uspořádání života na naší planetě, máme v ruce klíč k zabezpečení její budoucnosti. Pochopení toho, jak je uspořádáno živé lidské tělo může napomáhat k jeho léčení, přijde-li nemoc. Mohlo by nám podobné pochopení komplexity lidských společností pomoci předvídat nepokoje, občanské rozbroje a války?

Ve vědě a technice existují mnohé neocenitelné aplikace těchto znalostí. Vědci vyvinuli nové prostředky k řešení mnoha komplexních problémů tak, že okopírovali metodu, kterou používají živé organismy k řešení problémů, jimž čelí v boji o přežití. Dva takové příklady jsou genetické algoritmy, počítačové programy, jež si půjčují nápady z biologické evoluce, a umělé neuronové sítě, inspirované strukturou mozku. Oba hrají klíčovou roli v moderních přístupech k umělé inteligenci; oba je těžké pochopit s použitím pouze konvenční vědy.

## Vychutnat si jednoduchost

Po tisíciletí byli ti, kdo se snažili pochopit přirozený svět kolem nás, sváděni pokušením jednoduchosti. Jejich cílem bylo odvodit fungování přírody z jejích stavebních kamenů. Takzvaný redukcionismus je snahou vysvětlit komplexní jevy prostřednictvím něčeho jednoduššího.

Pro fyzika to znamená popisovat vlastnosti plynu pomocí chování atomů či molekul, z nichž se skládá. Pro chemika to znamená vysvětlovat reakci pomocí změn, kterým podléhají molekuly.

Nikde nepřevažuje redukcionistické hledisko více než v teorii elementárních částic, kde vědci dychtí po "teorii všeho", která by byla vyjádřena jednou nebo několika málo rovnicemi popisujícími základní interakce mezi všemi formami hmoty. To, co bývalo pro fyzika tou vůbec nejlepší taktikou - hledat nejjednodušší součástky hmoty, elementární částice a jejich původ -, však působí poněkud obstarožně, když uvážíme, jak málo přibylo objevů od té doby, co byly roku 1983 nalezeny částice W a Z<sup>10</sup>, a jak netečně bylo přijato pozorování top kvarku v roce 1995. Ještě vážnější je ale stále větší nedostatek kontaktu řady těžko srozumitelných teorií s pozorovatelným světem.

V chemii se tatáž strategie drží široce uznávaného názoru, že všechny procesy se dají pochopit na základě vlastností jednotlivých zúčastněných atomů či molekul. Podobně ve vědách o živé přírodě jej rozpoznáváme v "doktríně DNA". Ta má svůj počátek v objevu struktury DNA, který učinili Francis Crick a James Watson roku 1953. Tím se zrodila molekulární biologie a od té doby mohly být rozsáhlé části biologie postaveny na racionální základ molekulárních pochodů. Nikdo nemůže popřít obrovský dopad tohoto triumfu redukcionismu na náš život: legie vědců po celé planetě užívají těchto znalostí k odhalování dědičných chorob a k jejich nápravě transplantováním genů. Takzvaná genová terapie ohlašuje schopnost léčit řadu dědičných chorob, jako jsou cystická fibróza a muskulární dystrofie, a nabízí dokonce perspektivu manipulace s dalšími rysy ovlivňovanými dědičností, jako jsou atletická výkonnost nebo inteligence.

Jelikož je redukcionismus tak mocný, bývá často vnímán jako univerzální cesta k poznání. Přesto ale vsunul klín mezi vědu a ostatní aspekty lidského života. Naivně používaný redukcionismus nabízí takovou analýzu jevů, která je rozčlení na co nejmenší části; avšak, jak poznamenal Alvin Toffler, moderní vědě se tak dobře daří rozčlenit problém na části, že často zapomínáme složit je zase dohromady.<sup>11</sup> Lidé jsou považováni za jen o málo více než roboty, nástroje přežití rozšiřující geny. Bolest, strádání a občanské rozbroje nejsou ničím víc

---

<sup>10</sup> Což potvrzuje sjednocení elektromagnetických a slabých jaderných sil.

<sup>11</sup> A. Toffler v předmluvě k: I. Prigogine a I. Stengers, Řád z chaosu, (Heinemann, London 1984) str. 7, český překlad Mladá fronta, Praha 2001.



než projevy defektních genů. A homosexualita je způsobována "homosexuálním mozkiem", produktem homosexuálních genů.

Redukcionistický názor, že úplně všechno se dá odvodit z atomů a molekul, je ne-vědci široce vnímán jako filozofie, která nahlodává naši víru v "lidskost" a hodnotu, kterou jí přikládáme: "Koneckonců, máme-li to říci na rovinu, lidské tělo je jen trocha chemikálií v ceně několika dolarů." Kromě toho, je-li lidstvo řízeno přírodními silami a deterministickými mechanismy, nedokážeme vytvořit teorii lidského konání založenou na svobodné vůli. Vize světa, kterou hlásá redukcionistická věda, je chladná a osamělá a odděluje lidstvo od slepého a bezohledného vesmíru.<sup>12</sup> To není podnětná představa; mnohé lidi přivedla ke kritickému postoji k vědě a k vědecké metodě, neboť ta má jen málo co společného se značnou částí lidské zkušenosti. V důsledku toho tento strohý světový názor napomohl prosazení pohledu na vědu jako na něco odděleného od zbytku lidské kultury.

Komplexita skýtá holistickou perspektivu a s ní vhléd do mnoha náročných pojmů, jako jsou život, vědomí a inteligence, které soustavně unikaly vědě a filozofii. Často se například debatuje o otázce, zda jsou viry živé či nikoli. Z hlediska komplexity nemá tato otázka smysl, neboť život je spíše vlastností velkého souboru jednotek podléhajících evoluci přírodním výběrem než termín, který se dá použít na každou jednotlivou jednotku tohoto souboru. Popis života založený na emergenci a komplexitě získává podporu, která někdy přichází z neočekávané strany.

"Život není něco jako esence přidaná k fyzikálně-chemickému systému, ale stejně tak nemůže být jednoduše popsán obvyklými fyzikálními a chemickými termíny. Je to emergentní vlastnost, která se projevuje tehdy, když jsou fyzikálně-chemické systémy organizovány a interagují zvláštním způsobem." Toto jsou slova bývalého arcibiskupa z Yorku, Johna Habgooda, který býval fyziologem a jenž věří, že vědecký světový názor skýtaný komplexitou je v mnoha ohledech teologicky přijatelnější než staré vitalistické představy.<sup>13</sup> Ve svém proslovu při příležitosti výroční schůze Britské asociace pro podporu vědy v roce 1994 Habgood vyslovil názor, že Boží tvůrčí dílo lze nalézt v rostoucí složitosti organizace během vývinu organismů: "Je to tak, narážejí na to

---

<sup>12</sup> J. Monod, *Chance and Necessity* (Fontána, London 1972).

<sup>13</sup> To neznamená, že Habgoodův speciální pohled opouští Boha. „V celém procesu můžete rozpoznat Boží ruku. Formulováno velmi hrubě, lze říci, že právě v Boží mysli jsou vepsány zákony přírody.“ Arcibiskup Habgood, interview s Rogerem Highfieldem, září 1994.

počáteční slova první kapitoly knihy Genesis, kde vidíme Boha, jak tvoří řád z chaosu".<sup>14</sup>

Pokud jde o živočišnou říši, probíhá podobná diskuse o tom, kde se nachází hranice, za níž začíná vědomí a inteligence, a kde končí činnost nemyslicích automatů, ačkoli to určitě závisí na složitosti nervového systému, který máme na mysli. Opět dejme slovo arcibiskupovi z Yorku: "Jedním z dlouhodobých důsledků přijetí evoluce je to, že vnímáme veškerý život spojitě, není tedy žádný jednoznačný zlom mezi jinými zvířaty a námi. ... Čím více si uvědomujeme některé velmi lidsky vyhlížející schopnosti zvířat, jakými jsou vyšší primáti, tím víc, myslím si, nás znepokojuje, že mohou mít něco, co se přinejmenším začíná blížit vědomí." Z podobných důvodů se nedají umělému životu, umělému vědomí a umělé inteligenci vymezit jednoduché ostré hranice, diktované redukcionistickým světovým názorem.<sup>15</sup>

Lidský mozek je vrcholným příkladem komplexity dosažené biologickou evolucí. Nikde není cítit napětí mezi redukcionismem a emergencí ostřeji. Je jasné, že fungování mozku závisí na spoustě mikroskopických detailů na buněčné úrovni i níže, a přesto je stejně tak evidentní, že jeho výjimečné schopnosti jsou emergentní vlastnosti celého orgánu. Jednou z těchto vlastností je vědomí, z něhož plynou lidské emoce a duchovní hodnoty. Svým důrazem na studium celku spíše než jednotlivých částí tak komplexita poskytuje prostředek k překročení materialistických omezení redukcionismu a dovoluje místo toho zbudovat most mezi vědou a lidskou situací.

## Jazyk komplexity

Právě tak jako nemůžeme rozumět žádnému lidskému jazyku, aniž bychom znali jeho gramatiku, lze komplexitu plně uchopit a nakládat s ní jen tehdy, budeme-li znát její vlastní gramatickou strukturu vyjádřenou jazykem matematiky. Naši vědeckou definici komplexity jsme uvedli na začátku této kapitoly. Slovo "komplexita" se však často používá s rozčilující vágností a vědci přitom mohou mít na mysli

---

<sup>14</sup> Arcibiskup Habgood, „A Theological Understanding of Life and Death“, British Association for the Advancement of Science (září 1994).

<sup>15</sup> Jedna věc by však měla být jasná: výpočetní pochody a přírodní jevy nebudou nikdy identické. Ty první jsou výsledkem diskrétních (digitálních) výpočtů, zatímco ty druhé povstávají ze spojitých (analogových) procesů. Tento rozdíl se bude dále rozebírat v kapitolách 2, 3 a 9.

rozdílné věci.<sup>16</sup> Ve sféře matematiky je však definice komplexity jednoznačná. Tam je komplexita problému definovaná jako počet matematických operací potřebných k jeho řešení. Měřením stupně komplexity daného problému se zabývá matematická teorie složitosti. Říká nám, zda bude problém zvládnutelný - tedy zda se vyplatí pokusit se ho systematicky řešit. Jelikož mnoho stránek komplexity přírody se týká řešení obtížných problémů (ať už je to vývoj nejlepšího enzymu pro trávení jídla nebo dostatečně ostrý zrak, aby si v noci všiml predátora), existuje hluboká souvislost mezi matematickou a přírodovědeckou komplexitou.

Rostoucí pozornost věnovaná komplexitě otrásla naši dojemnou vírou v moc matematiky, čisté i aplikované. Velký francouzský matematik Henri Poincaré již na konci 19. století ukázal, že pohyb pouhých tří těles je příliš složitý na to, aby jeho matematické řešení mělo přehledný a uzavřený tvar. Tím nastínil moderní pojetí teorie chaosu. Mnoho důležitých problémů reálného života, jako je problém obchodního cestujícího, který musí navrhnout nejúspornější způsob, jak navštívit nějakou množinu měst, se dá dosti jednoduše formulovat. Pokusy nalézt systematicky jejich řešení se však rychle přestávají vyplácet, když velikost problému (pro cestujícího je to počet měst) začne přesahovat určitou mez. Jako jiný příklad matematicky komplexního problému můžeme uvést popis toho, jak se mozek učí prostřednictvím své interakce s vnějším světem nebo jak evoluce došla k tak komplikovaným orgánům, jako je v první řadě mozek. Takové problémy leží mimo dosah pera, tužky a matematické analýzy. Jediným prostředkem k jejich řešení jsou díky svým nesmírným možnostem počítače.

Abychom se mohli s komplexitou vypořádat pomocí počítače, potřebujeme jak chytrost, tak hrubou sílu. Inteligence je nezbytná k přesné matematické formulaci problému, na nějž se chystáme. Hrubá síla znamená dosadit čísla, případně jiné znaky, do tohoto popisu a pomocí počítače z nich vypočítat, jak se náš systém chová v jakýchkoli požadovaných situacích. Podstatná role, kterou počítač hraje, do značné míry vysvětluje, proč tak bohatý obor bádání, jakým je studium komplexity, byl tak dlouho tolika lidmi přehlížen. Než přišel číslicový

---

<sup>16</sup> Jeden příklad: „Žádná definice komplexity není platná sama o sobě. Vždy závisí na kontextu.“ M. Gell-Mann, diskuse s autory, březen 1994. Uvědomme si, že termín „chaos“ připouští přesnou technickou definici, dosti odlišnou od jeho běžného každodenního významu. Často a záměrně jej vědečtí popularizátoři používají nejednoznačně a laikové jej obvykle chápou naprosto špatně.

počítač, nikomu se nevyplatilo sednout si a dosazovat tisíce nebo dokonce miliony čísel do soustavy rovnic popisujících daný komplexní problém - uběhl by celý lidský život bez naděje na získání jediného užitečného výsledku. Věda o komplexitě je složitě propojena s počítačovou technikou a rozhodujícím způsobem na ní závisí. Závratný růst výkonu počítačů v průběhu posledních padesáti let umožnil přírodovědcům a matematikům simulovat postupně stále složitější a stále zajímavější jevy.

## Symbióza

Pradávný "počítač", jak si ho představoval Charles Babbage, byl stroj navržený k hromadné produkci pracně počítaných aritmetických tabulek. I dnes je mnoho z jeho potomků sotva něčím více než hloupými dřiči, kteří provádějí nudně se opakující úkony. To se dnes mění s příchodem nové generace strojů, jejichž návrh a funkce byly opsány ze skicáku přírody. Použitím technik paralelismu a masivního paralelismu se počítače přiblížily fungování lidského mozku.

Žádný ze zdrojů inspirace, po nichž vědci sáhli, se nevyrovná tomuto orgánu. Dlouhou dobu bylo cílem těch, kdo pracovali v informatice, vybavit stroj rysy připomínajícími lidskou inteligenci, avšak dosud všechny pokusy toho dosáhnout žalostně selhaly. To proto, že zatímco konvenční počítače vynikají v činnostech, které většina lidí považuje za obtížné, jako jsou aritmetika či algebra, lidé naopak běžně a efektivně používají schopností, jako vidění a mluvení, v čemž se s nimi ani ty nejvýkonnější stroje nemohou měřit.

Napodobením stavby mozku - klíče k jeho emergentním vlastnostem, jako jsou inteligence a vědomí - však počítače založené na neuronových sítích zvládly učení ze zkušeností s okolním světem a adaptaci na něj. Metody adaptace a optimalizace používané přírodou, které vylepšují stavbu organismů prostřednictvím evoluce, jsou nyní přejímány počítači, používajícími genetické algoritmy ke zvládnání nezvládnutelných problémů. Podobně jako příroda mají v sobě všechny tyto evoluční techniky programování počítačů - které jsou tak výkonné, neotřelé a úspěšné při řešení vysoce komplexních problémů - prvky náhodnosti. Tato náhodnost vede k inovaci - objevu nečekaně vtipného řešení velmi těžkých problémů.

Symbiózou vědy s počítačem se otevírá možnost začít chápat a simulovat některé z pozoruhodných schopností mozku. Tento orgán

obsahuje bilion buněk, z toho sto miliard nervových buněk, představujících skutečný substrát myšlenek, emocí a myslí. Toto číslo soupeří s počtem hvězd v Mléčné dráze. Přesto dnes vědci poprvé vytvářejí hodnověrné modely některých aspektů fungování mozku s pomocí umělých neuronových sítí. Odhalují tím cíp závoje, který od nejstarších dob odděloval mysl od hmoty.

Tyto přístupy ke komplexitě jsou natolik úspěšné, že sám život nyní dostává nový význam. Ani skutečný, ani možný život nejsou podmíněny hmotou, z níž se skládají. Život je proces a esencí života je forma tohoto procesu, nikoli hmota.<sup>17</sup> Jak se snažil ukázat von Neumann, je možné ignorovat fyzické médium a soustředit se na logiku, již se tento proces řídí. V principu je možné vytvořit tutéž logiku v jiném materiálním "šatě", naprosto odlišném od formy života, jak ho známe, založené na uhlíku. Jinak řečeno, život je ve své podstatě nezávislý na médiu, v němž se odehrává. Důsledky oddělení komplexity života od jeho média jsou ohromující. Představte si, že vytvoříte umělý svět a zasejete do něj semena logiky života. Budete-li mít dostatek času, můžete pozorovat, jak pracuje evoluce, jak se primitivní sebereprodukující organismus množí a mutuje a dává vznik nesmírně různorodému "potomstvu".

Tyto myšlenky už nejsou záchvaty nespoutané fantazie, vyhrazené vědecko-fantastické literatuře. Pokusy vytvořit živoucí komplexitu v počítači už probíhají.

---

<sup>17</sup> C. Emmeche, *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life* (Princeton University Press 1994), str. 18. D. Johnson, redaktor umělecké a knižní rubriky *The Daily Telegraph*, zdůrazňuje, že jeden koncepční přístup k výchově umělců definuje umění téměř identickými slovy - nějakou věc, co se dá vidět nebo hmatat, ale jako proces, v němž myšlenky jsou uměním.

## 2 Umělcův kód

Jdiž tvoře divný! vstup kam jen věda vésti tě žádá,  
Jdi, změř zem, zvaž vzduch, stanov odtok, přítok i mořský;  
Zákony vysvětlíš jakovým hvězdy se řídí,  
Počty zprav minulých let, sluncím vytkni jejich běh:  
Jdiž k nejvyššímu, jako Plato, okřešleku se vznes,  
K dobrotě nejvyšší, k dokonalotě, verchu i krási,  
Neb v labyrinta kolo vkroč nástupcův jeho pilných,  
Výhost dej rozumu, rci: boží totě následování;  
Tak jakž v závratním kolu východní se točí kněz,  
Divně vyvrací vaz, žádá tudy slunci se rovnat.

ALEXANDER POPE<sup>18</sup>

Matematika je jazyk, kterým můžeme "planety učit, jak se mají otáčet/opravit starý Čas a Slunci poroučet". Osvobodila nás od tyranie mysticismu a magie a dovolila nám zahlédnout tajemství komplexity. Tím, že poskytla algebraická schémata, která dokážou napodobit chování reálného světa, se stala kolébkou zákonů přírody. Je odolným podkladovým nátěrem, který poskytuje vědě její okouzující vnější lesk. Moc matematiky je taková, že mnozí snili o konstrukci stroje, který by dokázal reprezentovat kterýkoli sebesložitější jev ve vesmíru pouze s použitím stavebních kamenů matematické logiky. Takový stroj by představoval neocenitelnou pomůcku pro zkoumání a simulaci komplexity vesmíru. Matematikové však stále více zpochybňovali hlubokou víru v neomylnost matematiky, na níž je tato představa založena.

Většina lidí, která má trochu přírodovědného vzdělání, matematice překvapivě věří. Věří, že matematika je základem pro uchopení podstaty skutečnosti. Jedna a jedna jsou dvě - ať se přitom počítá dekgram mouky a dekgram másla nebo se sčítá jedno závaží přihazované k

---

<sup>18</sup> A. Pope, An Essay on Man 1732. Epistle II. Vznění této básně je rozhodně dvojznačné, ve srovnání se slavným epitafem, který Pope navrhl pro Newtonův náhrobek: „Přírodu a její řád noční temno krylo / Bůh řekl: Budiž Newton! a vtom vše se rozzářilo.“

druhému. Každý kruh, kdekoli, má obvod, který se dá vyjádřit pomocí průměru a tajemného čísla (3,1415...).

Anglický františkán Roger Bacon oslavoval matematiku coby bránu, kterou vstupujeme ke všem vědám.<sup>19</sup> Matematika je konečnou jediným známým způsobem, jak vést přesnou argumentaci, jak vyvodit neomylné závěry z nějakého souboru tvrzení. Jako taková je mocným jazykem, který přírodovědci používají k vyjadřování vztahů mezi měřitelnými veličinami. A co je nejvíce vzrušující, můžeme ji používat i k předvídaní jevů světa kolem nás. Z jediného pohybového zákona můžeme předpovědět pohyb družice po nebi nebo baseballového míčku na zemi. Pomocí Schrödingerovy rovnice můžeme popsat tvar záporně nabitého obláčku, který halí jádro atomu vodíku. Z Einsteinovy speciální teorie relativity můžeme vyvodit, že pohybující se atomové hodiny vypadají, jako by tikaly pomaleji než hodiny v klidu.

Tak jako umělec zobrazuje svět kolem nás pomocí hlíny, barev a kovu, vědci reprodukují složitost přírody pomocí obrazů utkaných na matematické osnově. Malíř může nanést poloprůsvitnou barvu na povrch částečně zaschlého plátna, a znázornit tak strukturu kmene stromu. S použitím hadru, kartáče, či dokonce prstů se dají technikou zvanou těrkování ztvárnit obloha, skály a budovy. Podobným způsobem mohou vědci mnohonásobným opakováním jednoduché matematické operace generovat rozvětvené struktury, které se překvapivě podobají stromům a kapradinám.

Dnes jsou ti, kdo se věnují studiu komplexity, následovníky tajného umění, v němž jsou barva, tvar a pohyby vesmíru namalovány atomy logiky. A podobně jako jejich postimpresionističtí předkové, tito logičtí pointilisté očekávají, že větší celek - podstata světa - vyvstane z diskrétních elementů jejich matematického kódu. Zda jsou výsledky těchto snah povrchními metaforami, nebo přesvědčivým vzhledem do skutečnosti, je ústřední otázkou vztahu matematiky k reálnému světu. Většině vědců stačí, že matematické vztahy dokážou spolehlivě předvídat chování reálného světa. Nedávné výsledky, obzvláště v matematické logice, stále více prověřují naši víru v matematiku a vedou nás k otázce, zda má matematika dost síly k popsání všech forem komplexity. Naštěstí, jak uvidíme, jsou tyto problémy spíše teoretické než praktické.

---

<sup>19</sup> R. Bacon, Opus maius 4 III. „Tato věda (matematika) je starší než ostatní vědy a přirozeně je předchází. Je tedy jasné, že se má studovat jako první, že jejím prostřednictvím můžeme pokročit ke všem pozdějším vědám.“

# Matematické náboženství

Jedna z prvních závažných trhlin ve fasádě matematiky se objevila v roce 1936, kdy si čtyřiaadvacetiletý Alan Turing položil otázku, zda lze vykonávat čistě "mechanickými postupy" jakýkoli matematický a logický proces. Tato otázka odkazuje k samotným základům matematiky. Záporná odpověď by totiž znamenala, že naše schopnost extrahovat z procesů reálného světa mechanickou logiku, a tedy simulovat komplexní systémy, je podstatně omezená. Uvidíme, že důsledky jeho práce na tom, co bylo později nazváno univerzální Turingův stroj, budou mít pro studium komplexity hořkosladkou příchuť.

Turing zjistil, že je opravdu možné vytvořit abstraktní univerzální stroj, který může převzít práci kteréhokoli jiného tak, že svým vlastním způsobem zpracuje jakoukoli myslitelnou operaci v libovolném matematickém či logickém výpočetním systému. Fyzickou realizací takového stroje byl číslicový počítač, objekt ve vesmíru, který může napodobit jakoukoli jinou část vesmíru, ať je to výbuch supernovy nebo vzkypění krve v lidském srdci, a stačí k tomu jen to, aby se proces, který se má simulovat, dal převést na konečnou posloupnost logických kroků. Sám Turing argumentoval, že cokoli, co dělá lidský "počítač", může dělat stroj. Jinými slovy, univerzální stroj může provozovat dokonalou napodobeninu myšlenkové činnosti odehrávající se v onom molekulárním stroji, jenž nazýváme mozek.

Avšak Turingovy práce o univerzálním stroji obsahovaly také hluboce nepříznivé zprávy. Když jej navrhoval, chtěl pochopit, zda by bylo možné použít čistě mechanické metody k provedení jakéhokoli matematického procesu. Jeho odpověď - důrazně ne - přišla jako rána kladivem pro ty, kdo strávili desítky let v pokusech položit matematiku na pevné logické základy. Naše snaha vybudovat všeobsahující teorii komplexity může stát na vodě - v přírodě mohou existovat jisté procesy, jejichž složitost přesahuje simulační schopnosti Turingova univerzálního počítače. Tyto procesy budou navždy vzdorovat pokusům o jejich modelování.

Naše víra v matematiku bude podrobena dalším zkouškám. Turing rozhodně nebyl jediným matematikem, který odhalil její vrozená omezení. Uvidíme, že některé z nejjednodušších matematických struktur mohou - hrůza hrůz - obsahovat náhodnost. A aby toho nebylo dost, zjistíme, že občas nelze matematiku použít. Existuje třída problémů,



kteřé by dokázal řešit jen někdo, kdo by měl neomezeně mnoho volného času. Jiné problémy zase vzdorují exaktní analýze: dokonce i sir Isaac Newton soudil, že v některých případech nalezení exaktního řešení jeho pohybových zákonů "přesahuje, nemýlím-li se, možnosti kterékoli lidské mysli". Ve skutečnosti ani pořádně nevíme, co to matematika je a proč v našem světě funguje. To nás přivádí k závažné otázce: čím to, že matematika je tak úspěšná při popisu přírody? Nevíme. Zdá se, že největší motor kulturních proměn - vědecký světový názor - spočívá na matematickém základě, který je v mnoha směrech v podstatě náboženské povahy.<sup>20</sup>

## Brána věd

Už v dávných dobách člověk rozpoznal schopnosti matematiky jako jazyka k popisu světa kolem nás a její používání bylo různorodé a všeobecně rozšířené.<sup>21</sup> Staří Řekové věřili, že matematika byla vynalezena v Egyptě znuděnými kněžskými se spoustou volného času pro intelektuální záliby.<sup>22</sup> Bylo to však staré Řecko, kde poprvé plně povstalo abstraktní matematické myšlení, takže například pojem trojice se osamostatnil od materiálních objektů, jako jsou krávy, prsty nebo oštěpy.

Poznání, že matematika se zabývá abstrakcemi, lze nejspíš přisoudit náboženskému, vědeckému a filozofickému bratrstvu zvanému pythagorovci.<sup>23</sup> Dávný Řek, který propůjčil tomuto řádu své jméno, je poněkud záhadná postava. Narodil se na ostrově Samos mezi lety 585 a

---

<sup>20</sup> J. Barrow, *Pí na nebesích*, Mladá fronta, Praha 2000.

<sup>21</sup> Příklady protomatematických činností jsou velmi četné. V 50. letech 20. století byla v Ishangu v dnešním Zairu vykopána kost, datovaná mezi 9000 až 6500 př. Kr., na níž jsou vyryté početní zářezy sestavené do skupin. U nás, v České republice, byla roku 1937 nalezena 30 000 let stará vlčí kost, která nese padesát pět vrypů seskupených po pěti, snad jako záznam o zabíjení zvířatech, organizovaný podle prstů na lovcově ruce. Viz L. Bunt, P. Jones, and J. Bedient, *The Historical Roots of Elementary Mathematics* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1976), str. 1.

<sup>22</sup> Aristoteles, *Metafyzika*: „Matematická umění mají svůj původ v Egyptě, protože tam bylo kněžské kástě dovoleno zahálet.“ Viz také Proklos, *O Eukleidovi*: „Podle většiny podání byla geometrie objevena nejdříve u Egyptanů a pocházela z měření ploch pozemků.“

<sup>23</sup> Tento řád používal jako svůj symbol pěticípou hvězdu (pentagram). Pythagorovi žáci přiřazovali celá čísla základním pojmům, jako jsou spravedlnost, duše a příležitost. Zkoumali vztah mezi délkou struny a výškou tónu, což představuje jeden z nejstarších příkladů experimentálně objeveného přírodního zákona. M. Kline, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times* (Oxford University Press, New York 1972), str. 29.

560 př.Kr. Jeho jméno přežilo do dneška ve větě o vztahu mezi stranami pravouhlého trojúhelníka, která platí bez ohledu na to, zda je trojúhelník tvořen hedvábnou nití, třemi větvičkami nebo je nakreslen v písku. pythagorovci, kteří si jako první uvědomili, že takový vztah platí zcela obecně, bez ohledu na souvislosti, museli cítit, že zahlédli podstatný aspekt světa.

Také počátky logiky, která je klíčovou součástí matematiky, se dají vystopovat až k Řekům. Aristoteles, narozený roku 384 př. Kr., vyvinul systematické schéma logické argumentace a lidé dlouho předpokládali, že vystihl zákony lidského myšlení. Aristotelův logický systém obsahoval tři principy: zákon identity (neboli, jedna je jedna", „dvě jsou dvě" atd.), zákon sporu (výrok a jeho negace nemohou být zároveň pravdivé) a zákon vyloučeného třetího (každé tvrzení musí být buď pravdivé, nebo nepravdivé - nemůže být zároveň pravdivé a nepravdivé).

Logika je zvláštní obor v tom, že nemá žádnou náplň, neboť se soustředí na studium struktury argumentů, na úvahy o platnosti věcí, která spočívá ve virtuální (logické) formě a ne v obsahu. Od Aristotelových dob až do poloviny 19. století byla logika považována za odvětví filozofie, které zvládnou jen ti, kdo jsou zběhlí v řečtině. Její následné splynutí s matematikou do matematické logiky je do značné míry dílem úžasné osobnosti, Gottfrieda Wilhelma Leibnize (1646-1716), filozofa, matematika, alchymisty, právníka, knihovníka, báňského inženýra, historika, archiváře, průkopníka větrné energie, diplomata a akademika.<sup>24</sup> Byl, jak říkají Němci, Universalgenie - "všestranný génius".<sup>25</sup> V 70. letech 17. století přišel Leibniz s ambiciózním schématem, jak formalizovat veškeré lidské myšlení a matematiku do univerzálního jazyka. Byla to prorocká práce, byla hledáním, které našlo odezvu u těch, kteří se stali o 300 let později průkopníky umělé inteligence.<sup>26</sup>

<sup>24</sup> N. Wiener, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, 2. vydání. (MIT Press and John Wiley & Sons, New York, London 1961), str. 2.

<sup>25</sup> Navzdory svému monumentálnímu přínosu pro lidstvo byl Leibniz v posledních letech svého života předmětem posměchu pro své staromódní a přezdobené šaty, svou obrovskou černou paruku a čím dál potrhlejší nápady. Způsob, jakým byla roku 1716 přijata jeho smrt, se ostře odlišoval od pompy, slavností a soch, které oslavovaly život jeho rivala Newtona. Jedinou osobou, která se přišla s Leibnizem rozloučit, byl jeho sekretář. Očitý svědek napsal: „Byl pohřben spíš jako lupič než jako ten, kým ve skutečnosti byl, ozdoba své vlasti." H. Goldstine, *The Computer: From Pascal to von Neumann* (Princeton University Press 1972), str. 9.

<sup>26</sup> „Kdybychom dokázali nalézt znaky nebo symboly vhodné k tak určitému a tak

Věda, jak ji známe my, se zrodila několik let po Leibnizově vizi univerzálního jazyka, a to 28. dubna 1686, kdy Newton odeslal první část svého latinského rukopisu Principia mathematica londýnské Královské společnosti. Někteří oceňují Principia jako největší vědeckou knihu všech dob, dražokam v koruně vědecké literatury. Je postavena na pevných základech, které položil Galileo, a byla přirovnávána k veliké budově čnicí nad zchátralými a prozatímními stavbami kolem ní. Newton ji považoval za to největší, co kdy vydal. I když kořeny tohoto velkolepého díla vězí ve vzdálené minulosti, i dnes se používá k výpočtu trajektorie různých předmětů vystřelených do nebes, od raketoplánu po balistické střely. Jeho vliv bude nepochybně pokračovat daleko do budoucnosti.

Nikdo, kdo čte předmluvu k prvnímu vydání Principií, nemůže pochybovat o významu matematiky v tomto díle. Bylo napsáno na Trinity College v Cambridgi a začíná slovy: "V tomto pojednání jsem pěstoval matematiku v té míře, jak se vztahuje k filozofii."<sup>27</sup> Tím, že prohlédl jednotu zákonů ovládajících nebesa i zemi, Newton odhalil matematický spodní šat přírody. Za svůj úspěch vděčil novému matematickému nástroji, který pro tento účel vynalezl (současně s Leibnizem, ale nezávisle na něm) a který se dnes nazývá diferenciální a integrální počet. V jeho době byly jádrem matematiky aritmetika, algebra a geometrie, které nakládaly s pevnými a neměnnými objekty. Diferenciální a integrální počet Newtonovi dovolily zabývat se konzistentně a obecně věcmi, které se mění, a tak mohl popisovat padající jablka a obíhající planety jednou a toutéž matematikou. Mohli bychom říci, že naučil matematiku létat.

Od té doby, co vyšla Principia, si matematika udržuje věhlas nejjistější formy vědění. Newtonův úspěšný matematický popis pohybu

---

přesnému vyjádření všech našich myšlenek, jako aritmetika vyjadřuje čísla a geometrická analýza vyjadřuje čáry, dovedli bychom ve všech záležitostech do té míry, do jaké jsou přístupné uvažování, dosáhnout toho, co bylo učiněno v aritmetice a geometrii. ... A pokud by někdo pochyboval o mých výsledcích, řekl bych mu: „Pane, vypočtěme to“ a tak tím, že se uchýlíme k peru a inkoustu, bude otázka brzy vyřešena.“ Ačkoli je to jasnozřivé, zavání to nadutostí některých počítačových expertů 20. století; i ve své době se stal Leibniz terčem satiry ve Swiftově Cestě do Balnibarbi. (Pozn. překl.: Gulliver při své návštěvě v lagadské akademii narazí na učence, sestrojivšího jakýsi počítačový stroj z dřevěných kostek, drátů a klik, s jehož pomocí „může i naprostý nevzdělanec za málo peněz a s nepatrnou tělesnou námahou psát knihy o filosofii, básnictví, státopovědě, právnictví, matematice a theologii, aniž na to potřebuje nadání nebo studia.“ Citováno z překladu A. Skoumala.) Viz G. MacDonald Ross. Leibniz (Oxford University Press, 1984), str. 13.

<sup>27</sup> I. Newton, Philosophiae naturalis principia mathematica, předmluva k prvnímu vydání.

od základu změnil vnímání stavby vesmíru. Galileo, na jehož ramenou Newton stál, poznamenal jednou, že "velká kniha přírody" je napsána jazykem matematiky. Fyzik sir James Jeans zdůraznil totéž v roce 1932, když prohlásil, že: "fyzikální svět je sestaven podle matematického plánu... Je tedy nevyhnutelné, aby obraz vnějšího světa, který moderní věda kreslí, měl matematickou povahu; nemůže tomu být jinak. ... Matematika je tou zbraní, která vyrvala přírodě její tajemství." <sup>28</sup>

## Matematika a skutečnost

Přírodověda zdánlivě potvrdila pozici matematiky jako nejjistější formy vědění. Přesto se dlouho diskutovalo o její podstatě a také o tom, zda a proč lze vesmír popisovat matematickými zákony. Podobně jako pythagorovci přisuzoval matematické velký význam Platón (427-347 př. Kr.). Tvrdil, že svět, který pozorujeme, se nepodobá skutečnému světu. Podle něj by naše modely vesmíru měly být projevem božské dokonalosti.

Matematická odrůda platonismu má za to, že základy samotné matematiky existují nezávisle na našem vesmíru a nestarají se o naši mysl a pomíjivé bytí.<sup>29</sup> Zatímco poučka pojmenovaná po Pythagorovi byla objevena nezávisle několikrát různými mysliteli, jsou Tolkienův Pán prstenů nebo Händelův Mesiáš neopakovatelné výtvořiny pomíjivé lidské námahy. Jinak řečeno, matematika by existovala, i kdyby nebyli matematikové.

Vědcům, zvláště fyzikům, slouží pozorování takového platónského kosmu k formulaci často vysoce komplikovaného popisu reálného světa. Probírají se širokou paletou zboží nabízeného v matematickém supermarketu a vybírají si to, co souhlasí s pozorováním chování reálného světa. Ve světle toho, jak úspěšné jsou takto vzniklé, matematicky podložené teorie přírody, zvláště ve fyzice, hovořil kdysi matematický fyzik Eugene Wigner o "nepochopitelné účinnosti matematiky v přírodních vědách".<sup>30</sup>

Není však žádný důvod, proč by ti, kdo věří v platonismus, měli očekávat, že svět má matematickou strukturu. "Pro platoniky je to velké

<sup>28</sup> J. Jeans, *Philosophy* 7 9 a 12 (1932).

<sup>29</sup> „Aritmetika má velmi vznešený a povznášející účinek, totiž ten, že přitahuje duši k rozvažování o abstraktních číslech a bouří se proti vnášení viditelných nebo hmatatelných objektů do diskuse." Platón, *Ústava*.

<sup>30</sup> E. Wigner: *Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 1 (1960).

tajemství," říká filozof Bili Newton-Smith z univerzity v Oxfordu. "Jestliže se matematika týká oné nezávisle existující reality, jak to, že funguje, když ji aplikujeme na svět kolem nás?" Alternativní Pohled říká, že i když je matematika tím nejdokonalejším intelektuálem výdobytkem, je jen výtvozem lidské mysli. Není skutečně žádný zřejmý důvod oddat se víře, že matematika by měla zobrazovat nezávislou realitu jiného světa. Někteří také namítají, že matematika je empirická věda, jejíž kořeny se dají vystopovat k rudimentárním znalostem, které získali pozorováním naši vzdálení předkové, jako byli egyptští zedníci a babylonští hokynáři.

Filozofka Nancy Cartwrightová popírá, že bychom mohli přímo přiřazovat platónské objekty a procesy tomu, co se vyskytuje ve skutečném světě. Ve své knize Jak fyzikální zákony lžou tvrdí, že jelikož svět je tak složitý, žádný systém zákonů ho nemůže popsat: "Není lepší realita než ta, kterou máme na dosah." Přijímá fenomenologické zákony, které popisují, co se děje ve světě, ale odmítá "fundamentální" teorie, po nichž se žádá, aby poskytovaly hlubší vysvětlení. Myslí si, že to, co mají fyzikové tendenci hledat, jsou zjednodušené modely, poskytující pouze hrubě zjednodušenou reprezentaci reálného světa. "Dosti paradoxně platíme za schopnost vysvětlovat neadekvátností popisu. Skutečně mocné vysvětlující zákony toho typu, jak je nacházíme v teoretické fyzice, nemluví pravdu." Jak nyní začínáme studovat komplexitu, platí tato slova stále více.

Debata o vztahu matematiky a reálného světa bude jistě stále žhavá. Stejně tak bude pokračovat ona šťastná symbióza matematiky a přírodovědy, tak dlouho, dokud bude fungovat. Naše nepřirozená víra v moc matematiky však možná nevypovídá ani tak o jejích skutečných schopnostech vyjadřovat jednoduchými termíny složitost přírody, jako o všeobecné vědecké víře v dogma redukcionismu, jenž vysvětluje komplexní jevy pomocí matematického popisu chování jednoduchých jednotek, jako jsou molekuly a atomy.<sup>31</sup> Pro tak vysoce idealizované pochody, jako jsou stlačování válce s plyným héliem, studium pohybu myši, které kloužou bez tření dolů po kyvadlech, a tak dále, se dají jednoduché matematické výrazy snadno napsat a pak důkladně analyzovat.

---

<sup>31</sup> Ty se pak zase dají úplně vysvětlit pomocí zoologie subatomárních částic, zahrnující elektrony, protony, neutrony a kvarky, ačkoli je zcela nejasné, kde se toto redukování zastaví.

Důvod, proč se studují takové jednoduché systémy, je však právě ten, že připouštějí snadnou analýzu, a tak se dají jednoduše přednášet, učit a předvádět u zkoušky. V posledních dvou desetiletích si však čím dál tím více uvědomujeme, že takové zjednodušené vztahy jsou výjimkou, nikoli pravidlem.<sup>32</sup> Mají tentýž vztah ke skutečnosti jako poezie. Obojí dává elegantní obraz o subtilních stránkách skutečnosti - ale způsobem dosti tajemným a prchavým.

Přírodovědci musejí vzít v potaz meze matematiky, ať už se snaží převést svá pozorování světa na definitivní matematickou "teorii všeho" nebo ne. Nic na tom nemění skutečnost, že ti, kdo tráví čas hledáním takových konečných teorií, zřídka kdy považují tento problém za aktuální.

## Srpen 1900: Hilbert v Paříži

Trhliny v budově matematiky se poprvé objevily v prvních letech dvacátého století, když se matematikové snažili vypořádat s řadou komplikovaných problémů v rozličných a přitom (tenkrát) čistě abstraktních oborech, jako jsou logika, teorie množin a studium transfinitních čísel (volně řečeno nekonečen).<sup>33</sup> Horké pařížské léto roku 1900 bylo svědkem jednoho z nejvýznamnějších pokusů, jak postavit matematiku na pevné logické základy. Ironií osudu to vedlo k pravému opaku.<sup>34</sup> Stalo se to na druhém Mezinárodním matematickém kongresu a hrdinou byl představitel Deutsche Mathematiker Vereinigung, David

---

<sup>32</sup> Jedna z nejjevidentnějších obtíží atomistického redukcionismu plyne z druhé věty termodynamické, která tvrdí, že makroskopické jevy jsou nevratné, oproti mikroskopickým pohybovým rovnicím, které jsou samy o sobě symetrické vůči obrácení času. Tento problém byl hlavním tématem rozvíjeným v naší předešlé knize *Šíp času*. Některé novější práce, které pomáhají řešit tento problém, lze nalézt v O. Penrose and P. V. Coveney, *Proc. R. Soc. London A* 447 631 (1994); P. V. Coveney and A. K. Evans, *J. Stat. Phys.* 11 229 (1994); A. K. Evans and P. V. Coveney, *Proc. R. Soc. London A* 448 293 (1995).

<sup>33</sup> Všimněme si však, že Němec Georg Cantor (1845-1918) zavedl do matematiky nekonečná čísla dokonale konzistentně na základě úvah o nekonečných množinách.

<sup>34</sup> Shodou okolností se podobný návrh zrodil, když Bertrand Russel navštívil v roce 1900 Mezinárodní filozofický kongres v Paříži, kde přednesl příspěvek. (B. Russell, *L'Idée d'ordre et la position absolue dans l'espace et le temps*, Congrès International de philosophie, logique, et histoire des sciences, vol. III, Paris 1901, str. 241). Tam se seznámil s prací Giuseppe Peana, což byl rozhodující obrat v jeho životě. Russel spojil síly se svým bývalým učitelem matematiky v Cambridgi, Alfredem Northern Whiteheadem a vytvořili spolu své vrcholné dílo, *Principia Mathematica*, jehož cílem bylo ukázat, že veškerá čistá matematika se dá redukovat na elementární logiku - logický atomismus. Kniha však měla malý vliv na tehdejší matematiku.

Hilbert (1862-1943), Němec, který byl od roku 1895 profesorem matematiky v Göttingenu a jedním z největších matematiků všech dob.

Parného rána 8.srpna přišel Hilbert k řečnickému pultu v aule Sorbonny. Pomalu a rozvážně, s ohledem na ty, kdo nerozuměli dobře německy, začal svou řeč. "Kdo z nás by nechtěl odhalit závoj, za nímž je skryta budoucnost; kdo by nechtěl zahlédnout budoucí pokrok naší vědy, odhalit tajemství jejího vývoje v budoucích staletích?" Na uvítanou v novém století Hilbert vyjmenoval třiatdvacet problémů, které by měly inspirovat významné matematiky.<sup>35</sup> Druhým problémem v Hilbertově seznamu byla výzva prokázat konzistentnost matematických axiomů. Stručně řečeno Hilbert chtěl, aby matematika byla redukována na čistou logiku.

K posluchačům se neslo Hilbertovo bojové heslo: "Přesvědčení o řešitelnosti každého matematického problému je mocnou pobídkou v práci. Náš vnitřní hlas na nás neustále volá: Tady je problém. Hleďte jeho řešení. Můžete ho najít čistým rozumem, neboť v matematice neexistuje žádné ignorabimus."<sup>36</sup> Hilbertův velký cíl sestehovat matematickou výšivku z veliké textilie propletených logických vztahů vešel ve známost jako formalismus. Do zimy 1920-21 se stala formalizace základů matematiky Hilbertovým hlavním cílem.

Čerstvé podněty mu poskytly tři články, které mají dohromady necelých sedmáct stran a které napsal mladý Holanďan Luitzen Brouwer. Brouwer byl takzvaný intuicionista a napadl víru formalistů, že zákony klasické logiky mají absolutní platnost nezávisle na obsahu, na něž se aplikují. Hilbert byl znepokojen tím, jak si Brouwerova matematická koncepce získává mladé matematiky. Zdrojem jeho obav byla Brouwerova kacířská myšlenka, že bychom měli opustit Aristotelův logický zákon vyloučeného třetího.<sup>37</sup>

---

<sup>35</sup> D. Hilbert, *Bulletin of the American Mathematica/Society* VIII, 437 (1901-2).

<sup>36</sup> D. Hilbert, *Bulletin of the American Mathematical Society* VIII, 445 (Macmillan, Lancaster, Pa., and New York 1901-2). Oponoval tím názoru Emila duBois Reymonda, fyziologa, který se stal filosofem. Když osmnáctiletý Hilbert přišel na universitu v rodném Královci, často se citovala Reymondova slova, zvláště „Ignoramus et ignorabimus” - nevíme a nebudeme vědět.

<sup>37</sup> Ve 20. století si logikové jako Jan Lukasiewicz, Emil Post a Alfred Tarski uvědomili, že skutečně dovedou formulovat logické systémy odlišné od Aristotelova tak, že odmítnou platnost zákona vyloučeného třetího. Jak napsal Alonzo Church: „Nepochybně existuje více než jeden formální systém, jehož použití jako logiky je schůdné, a z těchto systémů může být jeden příjemnější nebo vhodnější než druhý, ale nedá se říct, že jeden je správný a jiný špatný.” Viz také diskusi o fuz-zý logice v kapitole 3.

Brouwer nahloďával dŕležitŕ typ dŕkazu, uŕivanŕ Hilbertem: *reductio ad absurdum*<sup>□</sup> Mŕsto aby zkonstruoval platnŕ dŕkaz logicky krok za krokem, Hilbertova metoda pŕedpoklŕdala, ŕe se ukŕže logickŕ spor, pokud alespoŕn jeden z clŕnkŕ dŕkazu se ukŕže jako nepravdivŕ. To pochopitelnŕ pŕedpoklŕdŕ, ŕe vŕroky jsou buď pravdivŕ, nebo nepravdivŕ. Tŕm, ŕe se pŕipustŕ, aby nŕkterŕ vŕroky nebyly ani jedno, ani druhŕ, Brouwerova koncepce propagovala pŕmŕ dŕkaz. Mnoho vŕt klasickŕ matematiky lze odvodit Brouwerovou metodou, ale sloŕitŕji a pracnŕji, neŕ bylo obvyklŕ. Avŕak vŕechny čistŕ existenční dŕkazy a značná část analŕzy by se musely opustit. "Kdybychom nŕsledovali takovou reformu, jakou navrhuŕji," řŕkal Hilbert, "podstupovali bychom riziko ztrŕty velkŕ části naŕich nejvŕcennŕjŕch pokladŕ." Stŕŕoval si, ŕe zakŕzat matematikovi pouŕivat princip vyloučenŕho tŕetŕho, je jako zakŕzat astronomovi jeho dalekohled nebo boxerovi pouŕivat pŕsti".

Hilbert Brouwerovi oponoval tŕm, ŕe se snaŕil ukŕzat, ŕe matematickŕ metody, kterŕ jsou konečné, neobsahujŕ protŕŕeční. Poŕadoval omezenŕ soubor axiomŕ a odvozovacŕch pravidel, z nichŕ by generoval veŕkerou matematickou pravdu. Tato procedura by mŕla bŕt mechanickŕ - jinŕmi slovy natolik jasnŕ formulovanŕ, ŕe by se nijak neuplatnila interpretace. Jejŕm pouŕitŕm by bylo nemoŕnŕ dokŕzat nŕco nepravdivŕho a byla by ŕplnŕ v tom smyslu, ŕe ŕŕdnŕ pravda by neleŕela mimo jejŕ dosah.<sup>38</sup> Postupŕm, jak krok za krokem provŕdŕt nŕjakŕ operace slepou aplikacŕ pŕedepsanŕch pravidel, se řŕkŕ algoritmy. Nazŕvajŕ se podle velkŕho učence jménem Abŕ Dŕa'far Muhammad Ibn Mŕsŕ al-Chŕrezmŕ.<sup>39</sup> Vŕtŕinou majŕ dobŕe znŕmou podobu počŕtačovŕch programŕ. Hilbertova metoda byla tedy ekvivalentnŕ pokusu najŕt rozhodovacŕ algoritmus pro veŕkerou matematiku, proces, kterŕ by rozhodoval, zda kterŕkoli danŕ matematickŕ vŕrok je pravdivŕ, nebo nepravdivŕ. Hilbertŕv ŕivotnŕ ŕkol poloŕil zŕklady toho, co je dnes znŕmo jako teorie vŕčŕslitelnosti - studium ŕčinnosti algorŕtmŕ a jejich omezenŕ. Jejŕ dŕsledky jsou ŕivotnŕ dŕležitŕ pro vŕdeckŕ zkoumŕnŕ

---

□ Typ nepŕmŕho dŕkazu, matematiky zvanŕ tŕŕ dŕkaz *sporem*, (pozn. pŕekl.)

<sup>38</sup> Jedna mechanickŕ metoda, jak prozkoumat nesmŕrnŕ a rozrŕstajŕcŕ se inventŕř moŕnŕch dŕkazŕ je pouŕit to, co se ŕertem nazŕvŕ „algoritmus Britskŕho muzea". Algoritmus se probŕrŕ vŕemi moŕnŕmi dŕkazy v pořadŕ podle velikosti a vyloučuje nesmysly, vŕe co nesplŕňuje pravidla, a ponechŕvŕ zbytek platnŕch dŕkazŕ. G. Chaitin, interview s Rogerem Highfieldem, prosinec 1994.

<sup>39</sup> To znamenŕ muž z Chŕrezmŕ, stŕedovŕchodnŕ řŕŕe. Jeho dŕlo pŕeŕilo v latinskŕmpŕekladu *Algorŕlmi de numero indorum*.



komplexity, neboť osvětlují, nakolik jsme schopni modelovat a chápat komplexní chování přírody pomocí počítačů.

Hilbert pokračoval ve svém křížovém tažení, dokud roku 1930 ve věku šedesáti osmi let neodešel do důchodu. Město Královec, jeho rodiště, tehdy odhlasovalo, že mu udělí čestné občanství, k čemuž došlo na podzim téhož roku na sjezdu Společnosti německých přírodovědců a fyziků. Hilbert během úvodní ceremonie zaujal své místo u řečnického pultu a vypadal, jak kdosi řekl, docela jako Lenin. Opět spílal "pošetilému ignorabimus", když pronášel do mikrofonu svá poslední slova: "Wir müssen wissen. Wir werden wissen." (Musíme vědět. Budeme vědět.) Avšak téměř ve stejné chvíli byla dokončena práce, která měla pohrbit to nejdůležitější, o co Hilbert usiloval.

## Neúplnost a nerozhodnutelnost

Dne 17. listopadu 1930 obdržel časopis jménem Monatshefte für Mathematik und Physik pětadvacetistránkový článek, který napsal jeden logik z Vídně. Autorem byl brněnský rodák, pětadvacetiletý Kurt Gödel (1906-78), a článek vůbec poprvé ukazoval, že jisté matematické výroky nelze ani dokázat, ani vyvrátit. Vždy musejí existovat výroky, o nichž se nedá rozhodnout, zda jsou pravdivé, nebo nepravdivé. Existují tedy matematické výroky, dokonce i v aritmetice, jejichž platnost nemůže být rozhodnuta bez použití metod mimo uvažovaný logický systém<sup>40</sup> Ve skutečnosti Gödel ukázal, že v aritmetice nevyhnutelně narážíme na logické paradoxy srovnatelné s výrokem "tato věta je nepravdivá".<sup>41</sup>

<sup>40</sup> K. Gödel, Monatshefte für Mathematik und Physik 38, 173 (1931). Vyjádřeno techničtěji tvrdí Gödelova věta to, že v axiomatickém formálním kalkulu přinejmenším tak složitým, jako je teorie čísel, není možné dokázat konzistenci bez použití metod, které leží vně systému. K důkazu své věty o neúplnosti zkonstruoval Gödel čísla, která dnes nesou jeho jméno, vytvořená tak, že jsou jednoznačně přiřazena každému symbolu kalkulu a tudíž každé jejich posloupnosti. Platné tvrzení v kalkulu pak odpovídá určité vlastnosti Gödelových čísel. Gödel zkonstruoval číslo pro tvrzení, že formule spojená s ním je nedokazatelná - podobá se to dokazování výroku tvrdícího „jsem nedokazatelný“.

<sup>41</sup> Zdroj této překvapivé obtíže se týká dobře známých paradoxů sebevtažnosti, studovaných na přelomu 19. a 20. století Bertrendem Russellem. Ty povstaly z práce matematika ruského původu Georga Cantora (1845-1918), který vyvinul způsoby, jak nakládat s nekonečny. Když se Russel snažil jeho práci rozšířit, dostal se do úzkých. Výsledkem byly logické paradoxy zdánlivě triviální povahy, které však měly zničující dopad na Russelovu metodu. Zděšený Russel napsal 16. června 1902 logikovi, který mu poskytl prvotní inspiraci, Gottlobu Fregemu, a vyjevil mu rozpor, který objevil o rok dříve, s podezřívající formulací: „Je tu jen jeden bod, kde jsem narazil na obtíže.“ Když Russelův dopis dorazil, připravoval Frege druhý díl svého klasického díla o logických základech aritmetiky Grundgesetze der Arith-metik. Frege odpověděl 22. června 1902: „Váš objev

A aby toho nebylo dost, ukázal, že není nikdy možné dokázat, že matematický systém je sám o sobě logicky bezesporný. Aby se mohla zjistit platnost formálního matematického kalkulu, je vždy třeba vystoupit z něho ven. Jedním rázem se Hilbertův cíl navrhnout rozhodovací algoritmus pro celou matematiku ukázal být chimérou. A nejen to, ukázalo se, že logistická doktrína, podle níž se dá veškerá matematika odvodit z axiomů logiky, je chybná. Gödelův výsledek byl "jedinečný a monumentální - je to dokonce více než monument, je to orientační bod, který zůstane z daleka viditelný v prostoru i čase," jak řekl von Neumann, který byl tímto objevem otřesen. Dodal k tomu: "Logika už nikdy nebude taková jako předtím." John Barrow napsal: "Pokud definujeme náboženství jako myšlenkový systém, který obsahuje nedokazatelné výroky, takže je v něm prvek viry, pak Gödel nás naučil, nejenže matematika je náboženství, ale že je to jediné náboženství schopné dokázat o sobě, že náboženstvím je."<sup>42</sup>

Zdá se, že Gödelova víra v platónské světy matematiky odrážela jistým způsobem jeho neschopnost zabývat se naší přechodnou fyzickou existencí. Ačkoli byl jedním z největších logiků, byl Gödel hypochondr. Na sklonku života se z něj stal téměř nepřičetný paranoik. Mučil se hladu, protože byl přesvědčen, že se proti němu spikli, aby ho otrávil. 14. ledna 1978 v jednu hodinu odpoledne zemřel v princetonské nemocnici v New Jersey. Podle úmrtního listu byla příčinou "podvýživa a vyčerpání", způsobené "poruchou osobnosti".

## Univerzální počítač

Ačkoli byl Hilbertův ambiciózní plán Gödelem vyvrácen, poskytl nám klíčovou myšlenku vyčíslování a pojem vyčísitelnosti, původně abstraktní pojmy, které vedly k dnešním počítačům a informatice a také k soustavnému studiu komplexity. Klíčový aspekt Hilbertova systému, na nějž jsme již dříve narazili, se dá stručně shrnout z hlediska takzvaného problému rozhodnutelnosti (Entscheidungsproblem), který byl plně formulován až v roce 1928 na mezinárodním kongresu v

---

protimluvu mi připravil veliké překvapení a musím téměř říci úžas ... Die Arithmetik ist ins Schwanken geraten" (aritmetika se zapotácela).

<sup>42</sup> J. Barrow, Pí na nebesích, Mladá fronta, Praha 2000.

Bologni, kde Hilbert zopakoval svou výzvu postavit matematiku na pevnější základy.<sup>43</sup>

Za prvé chtěl Hilbert ukázat, že matematika je úplná v tom smyslu, že o jakémkoli výroku se dá říci, zdaje pravdivý, nebo nepravdivý. Za druhé chtěl dokázat, že matematika je konzistentní, jinými slovy, že k výroku typu  $1 + 1 = 3$  se nedá nikdy dospět posloupností platných kroků. A za třetí chtěl zjistit, zdaje matematika rozhodnutelná, tedy zda existuje určitá metoda (mechanický proces či algoritmus), která by, principiálně, mohla být použita na jakékoli tvrzení a přitom by bylo jisté, že povede k rozhodnutí o tom, zda je toto tvrzení pravdivé.

Kdyby matematika byla konzistentní a úplná, existoval by způsob, jak mechanicky provést všechny možné důkazy. Ale Gödel ukázal, že formalizovaná aritmetika musí být buď nekonzistentní, nebo neúplná, čímž tuto možnost vyloučil. To ponechalo otevřenou základní otázku třetího problému rozhodnutelnosti neboli Entscheidungsproblem: existuje nějaká mechanická procedura, která dokáže vyřešit všechny matematické problémy? Máme-li formální definici algoritmu jako rekurzivní procedury na řešení daného problému v konečném počtu mechanických kroků, mohou ji v principu provést i "nemyslicí" stroje. Hilbertův Entscheidungsproblem nebyl ničím méně než pokusem dokázat, že veškerou matematiku lze dostat mechanickou činností algoritmů, pracujících s řetězci matematických symbolů. Jeden matematik o tomto záměru pobouřeně prohlásil, že by to znamenalo vyřadit matematiky ze hry.

Ve 30. letech učinil první krok k rozřešení třetího Hilbertova problému Alan Turing, jedna z největších postav matematiky a, z pohledu komplexity, též přírodovědy 20. století. Turingova práce na problému rozhodnutelnosti byla inspirována podstatou mysli a jejím vztahem k fyzikálnímu světu, který jej fascinoval od školních let v Sherbornu. Už jako desetiletému se před jeho očima otevřela možnost inteligence strojů při četbě knihy *Divy přírody*, které má každé dítě znát od Edwina Tenney Brewstera. Je v ní například tato překvapivá věta: "Neboť, jak jinak, tělo je stroj. Je to ohromně složitý stroj, mnohem, mnohem komplikovanější než jakýkoli stroj, který kdy vyrobila lidská ruka; přesto je to koneckonců stroj."

Matematikové mluvili o mechanickém používání pravidel ke zdolání problému. To právě bude dělat Turing, i když nadobycěj obecně a

---

<sup>43</sup> D. Hilbert, *Problème der Grundlegung der Mathematik*, *Atti del Congresso internazionale dei matematici*, Bologna 3-10 Settembre 1928, 1, str. 135.

idealizované. Dal se do navrhování abstraktního stroje, schopného zvládnout Hilbertův problém, rozhodnout o pravdivosti jakéhokoli matematického tvrzení. Aby pojem vyčíslování rozložil na kroky, přišel s čímsi na způsob starobylého psacího stroje, zařízením, o jehož vynalezení jako kluk snil. Právě tak jako by psací stroj dokázal napsat Shakespearova díla, Turingův abstraktní stroj by mohl napsat veškerou matematiku.

Turing dokázal, že jeho zařízení má tytéž schopnosti, jako kterékoli zařízení navržené k vyčíslování určitého algoritmu. Co se bude skutečně vykonávat, bude záviset na seznamu elementárních operací, zapsaném na pásce - jinými slovy na specifikaci daného stroje. Vyjádřeno dnešním jazykem, Turingův stroj bude ekvivalentní počítačovému programu, například takovému, jenž bude sčítat dvě čísla, nebo jinému, který bude určovat jejich největšího společného dělitele. Takových Turingových strojů může být nekonečně mnoho, tak jako je neomezené množství počítačových programů (softwaru).

Turing uvažoval tak, že zjišťování, jak se bude chovat určitý Turingův stroj, je samo mechanickým procesem čili algoritmem, který může být vykonáván jiným Turingovým strojem. Jinými slovy je možné vytvořit jeden Turingův stroj, který prochází instrukce jiného a provádí je. To vedlo k pojmu univerzálního Turingova stroje. Může provádět jakýkoli algoritmus zpracovávaný Turingovým strojem ve stejném smyslu, jako na moderním počítači může běžet jakýkoli program.<sup>44</sup> Všechno to spočívá v prozření, že programy a čísla se jedny od druhých neliší," komentoval to Andrew Hodges.

Turingova práce měla pozoruhodné důsledky. Za prvé byl univerzální Turingův stroj teoretickým projektem počítače. Za druhé poskytl nástroj pro měření komplexity. Za třetí Turing viděl, že jeho krok za krokem prováděná analýza toho, co to je logická operace a co to znamená provádět výpočet, by se hodila stejně dobře k popisu činnosti mozku, čímž se Turing stává průkopníkem umělé inteligence. Ve svém slavném článku o vypočitatelných číslech Turing přednesl smělou ideu, že jeho hypotetický stroj by mohl reprezentovat "stavy mysli" lidské bytosti. Jak říká Andrew Hodges: "Smysl jeho argumentace byl zřejmý; každý stav mysli lidského počítače bude reprezentován stavem odpovídajícího stroje." Pro Turinga však bylo nejbezprostřednějším důsledkem to, že univerzální stroj mu umožnil vypořádat se s

---

<sup>44</sup> A. Turing, Proceedings of the London Mathematical Society (ser. 2) 42, 230, a oprava v 43, 544 (1937).

Hilbertovým Entscheidungsproblem, který znepokojoval řadu matematiků po pět let, od té doby, co Gödel vyřešil první Hilbertovy otázky.

## Ne zcela univerzální počítač

V univerzálním Turingově stroji máme k dispozici nádherné abstraktní zařízení k výzkumu teoretických mezí matematiky. Turing pokračoval v úvahách z Gödelovy práce a ukázal, že je nemožné rozhodnout, zda se jeho stroj zastaví v konečném čase poté, co se mu předloží daný řetězec symbolů, což je zásadní otázka při zdolávání matematických problémů.<sup>45</sup> Abychom si tento "problém zastavení"<sup>□</sup> ilustrovali, představme si seznam všech možných čísel, napsaných jedno po druhém ve tvaru desetinných rozvoju. Tento seznam bude nekonečně dlouhý a bude obsahovat všechna čísla, která se dají vyjádřit konečným či nekonečným (tedy ukončeným či neukončeným) desetinným zlomkem. Každé číslo může být vypočteno nějakým jednotlivým Turingovým strojem, a lze ho tedy nazvat vypočitatelným číslem.

Turing použil seznam k vytvoření nového čísla sestaveného tak, že první číslice byla vzata z prvního čísla a pak změněna, potom druhá číslice vzata z druhého čísla a změněna a tak dále. Výsledné číslo se nemohlo nacházet v původním seznamu. Jelikož seznam obsahoval všechna vypočitatelná čísla, nové číslo musí být nevypočitatelné. Z toho plynulo, k Hilbertově velké lítosti, že nemůže existovat žádná "přesně vymezená" metoda na řešení všech matematických otázek. Kvůli existenci nevypočitatelných čísel (ve skutečnosti je nevypočitatelných čísel mnohem více než vypočitatelných) není obecně možné mechanickými prostředky rozhodnout, zda se Turingův stroj zastaví v konečném čase.

Nezávisle na Turingovi došel k podobným závěrům americký logik Alonzo Church, když v letech 1936-1937 pracoval v Princetonu, a stejně tak Američan polského původu Emil Post.<sup>46</sup> Brzy se ukázalo, že všechny tyto přístupy jsou rovnocenné: matematiku nelze uchopit žádným konečným systémem axiomů. Matematický svět se skládá ze dvou částí:

---

<sup>45</sup> Rozpor se objevuje, pokud univerzální Turingův stroj operuje na sobě samém. Zde, v klíčovém bodě jeho objevu, se ukazuje hluboká souvislost s Gödelovou prací.

<sup>□</sup> Halting problém (pozn. překl.)

<sup>46</sup> Church použil svůj elegantní lambda-kalkul.

vyčíslitelné a nevyčíslitelné, z konečná a nekonečna. Jak budeme probírat níže v této i v dalších kapitolách, je otázkou, zda nevyčíslitelné, superkomplexní části matematiky mají nějakou roli v přírodních vědách. I vyčíslitelné části matematiky však stavějí přírodní vědy před obrovské problémy, zabýváme-li se naukou o komplexitě. Většina této knihy se týká studia vyčíslitelné komplexity; jen zřídka se budeme setkávat s nevyčíslitelným.

Dne 4. září 1939 nastoupil Alan Turing do Government Code and Cipher School, kde za války jeho hluboké znalosti matematické logiky sehrály rozhodující úlohu při luštění kódů, na němž se pracovalo v Bletchley Parku v Buckinghamshire. Metody analýzy šifer a stroje, které tam navrhl, zvláště ve spojitosti s rozluštěním německých námořních kódů zasílaných z Enigmy, mu poskytly ideální, i když naprosto tajné zázemí, z něhož se po válce vynořil plně vybaven ke stavbě fyzického Turingova stroje - aby logické proměnil ve fyzické. K jeho životnímu poslání se vrátíme v příští kapitole, až ještě více probádáme meze matematiky.

## Diofantické rovnice

Práce na demolici Hilbertova projektu, započatá Gödelem a Turingem, pokračuje.<sup>47</sup> Během 80. let Gregory Chaitin, který pracuje na východním pobřeží Ameriky u IBM, ve Výzkumné laboratoři Thomase J. Watsona v Yorktown Heights ve státě New York, rozšířil Turingovu práci o problému zastavení tím, že odhalil, že dokonce i nejjednodušší verze aritmetiky, která užívá jen celých čísel, má v sobě zabudovanu náhodnost. "Objevil jsem extrémní situaci, v níž nemáte nic pravidelného, skutečně naprostý chaos," řekl.

Ironií osudu Chaitinova inspirace pocházela z desátého problému na Hilbertově seznamu: existuje systematický způsob, jak rozhodnout, zda daná diofantická rovnice má řešení v oboru celých čísel, jako jsou 1, 2 a 3?<sup>48</sup> Diofantické rovnice, pojmenované podle řeckého matematika,

---

<sup>47</sup> G. J. Chaitin, *The limits of Mathematics* (1994, přístupné na internetu na adrese <http://xyz.lanl.gov/abs/chao-dyn/9407010>).

<sup>48</sup>D. Hilbert. *Bulletin of the American Mathematical Society VIII* (Macmillan, Lancaster, PA., and New York, 1900-2) str. 439. Mezi tyto rovnice patří „velká Fermatova věta“, jeden z nejslavnějších matematických problémů (neexistuje žádná třetí mocnina, která by se dala vyjádřit jako součet dvou třetích mocnin, žádná čtvrtá mocnina, která je součtem dvou čtvrtých mocnin a tak dále).

jsou takové, v nichž se vyskytují pouze celočíselné veličiny. Toto omezení má velmi vážné důsledky.<sup>49</sup> Hledáme-li řešení rovnice, v níž veličina A na druhou plus veličina B na druhou rovná se jedné, dostaneme nekonečný počet řešení. Pokud však omezíme A a B pouze na celá kladná čísla, najdeme jen dvě: A je 1 a B je 0, nebo naopak.

Roku 1970 dal odpověď na Hilbertův problém Jurij Matijasevič ze Steklovova institutu v tehdejšímu Leningradě. Ve dvoustránkovém článku, který byl špičkou ledovce matematické dřiny, Matijasevič ukázal, že neexistuje žádná metoda pro nalezení celočíselného řešení algebraické rovnice. Ve skutečnosti dokázal, že desátý Hilbertův problém je, skrytým způsobem, přímo ekvivalentní problému zastavení pro Turingův stroj.

Chaitin tento hluboký vztah zužitkoval tak, že k řešení jedné z variant desátého Hilbertova problému použil podobného přístupu, jakého užíval Turing. Místo aby se ptal, zda algebraická rovnice má řešení v oboru celých čísel, kladl si otázku, zda má v oboru celých čísel konečný nebo nekonečný počet řešení. K tomu účelu nejdříve popsal univerzální Turingův stroj schopný nakládat s celými čísly. Výsledkem byla "univerzální diofantická rovnice", i když přívlastek elefantická by mohl být trefnější: obsahuje 17 000 proměnných a zabere 200 stránek textu. Rovnice ve skutečnosti představovala počítač, který by, pokud by měl nekonečně mnoho času, mohl vypočítat, zda se program zastaví.

Místo aby zkoumal problém zastavení pro každý program zvlášť, Chaitin uvažoval soubor všech počítačových programů a studoval pravděpodobnost, že se jeden z těchto programů zastaví, pro skupinu univerzálních diofantických rovnic, z nichž každá je vytvořena změnou jediného parametru. Tato pravděpodobnost je vyjádřena nekonečně dlouhým dvojkovým číslem, nazývaným omega. Každá rovnice bude mít konečně mnoho řešení, pokud určitý bit (dvojková číslice) čísla omega je nula, a nekonečně mnoho, je-li jedna. "Všechny rovnice ve skupině jsou sestaveny naprosto zvrhle. Mezi tím, má-li konečně, nebo nekonečně řešení, je tak jemná rovnováha, že není žádný důvod, proč by to mělo dopadnout tak či onak," poznamenal Chaitin. Zatímco Turing zjistil, že problém zastavení se dá řešit jedině v nekonečném čase

---

<sup>49</sup> Řecký matematik ze 3. stolení po Kr. Diofantos byl poněkud záhadná postava. Vše, co je známo o jeho životě, je jeho věk, když se oženil, když se narodil jeho syn a když zemřel, což se vyvozuje z matematické hádanky nacházející se v jeho epitafu („Tato hrobka vědecky vyjadřuje míru jeho života“). Pouze šest z předpokládaných třinácti knih jeho Aritmetiky se dochovalo, ty však popisují nejstarší známou algebraickou notaci a zabývají se širokým spektrem problémů z teorie čísel a z geometrie.

(jinými slovy, je nerozhodnutelný konečnými prostředky), Chaitin zjistil, že problém zastavení je algoritmicky náhodný: Vyjádříme-li jej jako dvojkové číslo, bude jeho posloupnost jedniček a nul nerozlišitelná od posloupnosti hlav a orlů, získané házením mincí. To znamená, že také odpovědi na otázky o diofantických rovnicích musejí být náhodné.

Chaitin se rozepsal o analogii s házením mincí, aby zdůraznil právě to, jak nevyzpytatelná a náhodná může být "Jednoduchá" celočíselná matematika. "Tehle problém zastavení je maximálně nepoznatelný," řekl. "Žádný výsledek hodu mincí vám nic neřekne o žádném z příštích nebo minulých výsledků. A naprosto stejně je to s otázkou, zda kterákoli z mých rovnic má konečně, nebo nekonečně mnoho řešení. Odpověď je neredukovatelným matematickým faktem, nesouvisejícím s žádným jiným matematickým faktem." Kupodivu i aritmetika má v sobě prvek náhodnosti. Jak říká Chaitin: "Bůh nehraje v kostky jen v kvantové mechanice, ale i s celými čísly!" Toto zjištění hluboce souvisí i s objevy vědy o deterministickém chaosu, což je zdánlivý protimluv, k němuž se vrátíme později. Plyne z něj také důsledek, který děsí čisté matematiky: někdy je jedinou cestou, jak bádát v matematice, experiment, pokus a omyl.

## Zvládnutelnost

Dosud jsme sledovali díry v samotném tkanivu matematiky. Jsou tu však jiné, praktičtější nedostatky. Možná, že dokážeme problém v principu vyřešit, ale ani s počítačem to není možné udělat v reálném čase. Nejde tady o vyčíslitelnost, ale o algoritmickou "složitost", která se týká času nezbytného k řešení problému s použitím Turingova stroje. Zatímco práce Gödela, Turinga, Churcha a Chaitina zdůrazňovaly problém vyčíslitelnosti, algoritmická složitost je záležitost každodenní praxe. Je to tak, že mezi vyčíslitelnými problémy jsou některé mnohem obtížněji řešitelné než jiné. Množství výpočtů, popisované termíny jako jsou "operace s reálnými čísly"<sup>50</sup> (počet operací vykonaných algoritmem), vyjadřuje objem práce nutné k řešení daného problému.

---

□ Floating point operation (pozn. prekl.)

<sup>50</sup> V počítačích jsou obvykle implementovány dva typy čísel: celá (integer) a reálná (float). Z praktického hlediska se liší tím, že operace s celými čísly jsou matematicky přesné, jsou ale omezeny maximální možnou velikostí čísla. Reálná čísla mohou být v principu libovolně velká (mají plovoucí desetinnou čárku), ale jejich přesnost je omezená. Operace s reálnými čísly jsou tedy vždy zatíženy zaokrouhlovací chybou.



Algoritmy používané k popisu vyčíslitelných problémů se dají rozdělit do dvou tříd podle toho, kolik času zabere nalezení řešení problému v závislosti na čísle  $N$ , které je mírou velikosti problému. Dobře jsme na tom s problémy, které jsou polynomiální (a chovají se tedy jako mocnina  $N$ , například  $N$  na druhou,  $N$  na třetí atd.). Tehdy říkáme, že jsou zvládnutelné: čas, který si vyžádá jejich řešení, neroste neomezeně se vzrůstající velikostí<sup>51</sup>. Říkáme, že problémy řešitelné v polynomiálním čase patří do třídy  $P$ . Noční můrou matematiků a informatiků je případ, kdy čas nutný k řešení problému roste exponenciálně (něco umocněno na  $ix$ -tou). Tyto problémy se nazývají nezvládnutelné, neboť čas nutný k jejich řešení se rychle vymkne kontrole. Ani hrubá síla počítače mnoho nepomůže. O těchto problémech, které nejsou řešitelné v polynomiálním čase, říkáme, že patří do třídy  $NP$ .<sup>52</sup>

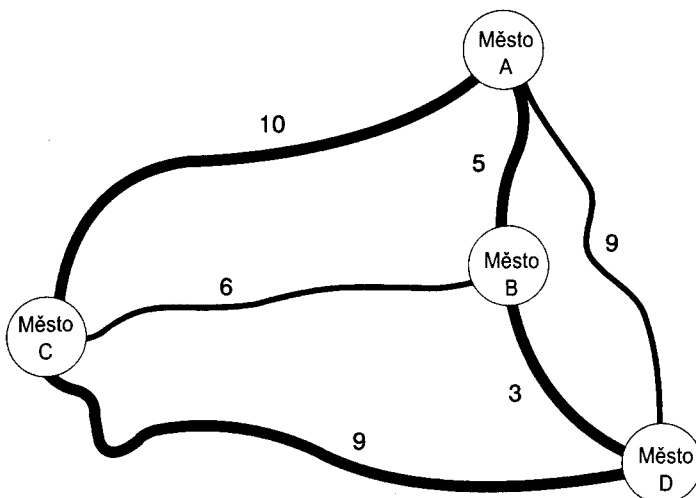
Pravděpodobně nejslavnějším příkladem  $NP$  problému je problém obchodního cestujícího.<sup>53</sup> Je to matematické vyjádření dilematu, před nímž stojí obchodní zástupce, který musí navštívit  $N$  měst, každé jen jednou, tak aby celková ujetá vzdálenost byla minimální: má šéfa lakomce a musí utratit co nejméně za benzin (viz obr. 2.1).

---

<sup>51</sup> Ve skutečnosti je dnes v  $P$  mnoho problémů, nemluvě ani o  $NP$ , které se nedají zvládat, protože čas potřebný k získání řešení roste jako vysoká mocnina velikosti  $N$ . Tato situace nastává například při výpočtu turbulentního proudění tekutin a u ab initio kvantových výpočtů molekulárních klastrů.

<sup>52</sup> Přísně vzato musíme zde být trochu opatrnější: třída  $NP$  ve skutečnosti popisuje třídu problémů, jejichž řešení se dá ověřit (nikoli skutečně najít) v polynomiálním čase nedeterministickým algoritmem. Jsou tedy definovány pomocí rozhodovacího algoritmu. Skutečné deterministické nalezení řešení problémů z  $NP$  je možné jen v exponenciálním čase. Rozdíl mezi deterministickými a nedeterministickými algoritmy pro práci s nezvládnutelnými - komplexními - problémy je velmi hluboký. Genetické algoritmy, simulované žíhání a neuronové sítě jsou obecně nedeterministické a to vysvětluje jejich efektivnost při řešení „nezvládnutelných“ problémů; pro další diskusi viz následující kapitoly.

<sup>53</sup> Jiné příklady viz v M. Garey and D. S. Johnson. Computers and Intractability. Přísně vzato problém obchodního cestujícího spadá do třídy  $NP$ -úplných problémů, těch nejtěžších ze všech  $NP$  problémů, pro které je možné najít řešení v polynomiálním čase pouze pokud třída  $P$  je indentická s  $NP$ . Plyne z toho, že pokud jen jediný problém z množiny  $NP$ -úplných se dá řešit v polynomiálním čase, půjde to také pro všechny ostatní  $NP$  problémy.



Cesta délky 27 je v tomto případě nejkratší.

Obrázek 2.1 / Problém obchodního cestujícího pro případ čtyř měst.

Je snadné tento problém formulovat, ale ať to zkusíte jakkoli, žádný z informatiků nebo matematiků nepřišel s dobře fungujícím deterministickým algoritmem (tedy takovým, který není náhodný a vede jen k jednomu řešení pro každý soubor vstupních dat), který dokáže najít řešení na počítači v polynomiálním čase. Pro pár měst a silnic může být snadné určit obchodníkové řešení, protože možností není tak mnoho. Pokud je počet měst řekněme pět, počítač snadno propočte dvanáct odpovídajících možností. S deseti městy je možností 181 440. Avšak i s výpočetní kapacitou toho nejrychlejšího dostupného stroje se čas nutný k řešení problému rychle vymyká kontrole. Pro pouhých dvacet pět měst je počet možných itinerářů tak nesmírný, že počítači vyhodnocujícímu milion možností za sekundu by trvalo 9,8 miliardy let, tedy zhruba dvě třetiny stáří vesmíru, než by je všechny prohledal.

Je známo velké množství dalších problémů ze života, které spadají do této kategorie, přičemž mnohé z nich se týkají podobných optimalizačních úloh. Například pro majitele továrny na tištěné spoje je funkcí, kterou je potřeba maximalizovat, efektivnost výroby. Pro farmaceutickou firmu je funkcí, kterou musíme maximalizovat, příléhavost, s níž sedí molekula léčiva na cílovém proteinu nacházejícím se v těle. Elegantní analytická matematika často není schopna

poskytnout nám jednoduchý způsob, jak nalézt tato optima, protože těžké optimalizační úlohy jsou nezávládnutelné (NP) problémy.

Jak si ale můžeme být jisti, že daný problém patří do třídy NP? Právě tak jako školní děti budou o řadě matematických problémů vždycky tvrdit, že se nedají vyřešit, když matematik označí problém za NP, říká tím spíš něco o svých schopnostech než o problému samotném. Ve skutečnosti je tato otázka jedním z prominentních otevřených problémů současné matematiky a informatiky. V dokazování hypotézy, že NP problémy nemají žádné řešení dosažitelné konvenčními - deterministickými - algoritmy v polynomiálním čase, se dosáhlo jen malého pokroku. Avšak i bez takového důkazu plyne z víry (podepřené pokusy s algoritmy), že problém je ve skupině NP, přinejmenším to, že k jeho řešení bude nutný nějaký zásadně nový objev.

Pro ty, kdo chtějí stvořit ještě jednu kopii světa uvnitř počítače, jsou tyto NP problémy na první pohled značně deprimující. Je však pozoruhodné, že, jak uvidíme v dalších kapitolách, příroda nás vybavila prostředky, jak je zvládat.

## Vyčíslitelná matematika

Více než dvě století po Newtonovi se myslelo, že plného teoretického pochopení jakéhokoli mechanického procesu je možné dosáhnout použitím dostatečného matematického důvtipu při analytickém řešení rovnic, které tyto procesy popisují. Metody založené na myšlenkách, tužce a papíru se považují za nejvyšší formu matematického myšlení.

Šok přišel, když Henri Poincaré roku 1889 dokázal, že naše zásoby důvtipu narážejí na tvrdou hranici, a to i pro matematické problémy, které jsou v Turingově smyslu vyčíslitelné, například když se pokoušíme analyzovat pohyb pouhých tří těles, jako jsou Slunce, Měsíc a Země. Matematikové jim říkají podstatně neintegabilní systémy, což je vědecký termín, který znamená, že přesné řešení nelze nalézt analytickými metodami. A popis pohybu více než tří těles, natožpak milionů milionů molekul tvořících míč naplněný plynem nebo sklenici piva, bude ještě mnohem obtížnější. Toto omezení je vážným varováním, jak nebezpečné jsou redukcionistické pokusy zjednodušit všechno na nejvyšší možnou míru. Tím, že se soustředili na příliš zjednodušené modely, jako je profesor klouzající se bez tření dolů po

zábradlí, které se poddávají svůdné moci analytické matematiky, matematikové snadno mýjeli celé bohatství a složitost skutečného světa.

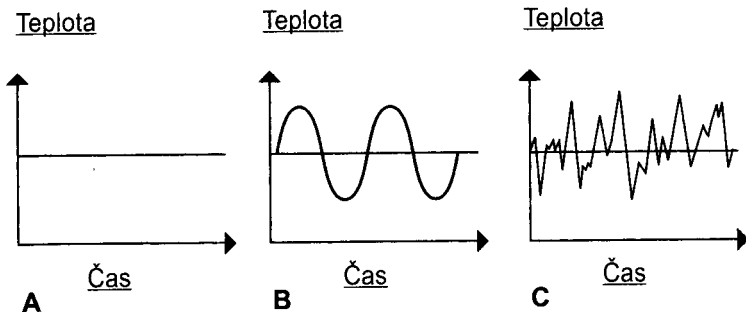
Nebezpečí, že by se to stalo dnes, je naštěstí malé. Díky současným počítačům je možné zkoumat chování nelineárních systémů, jako je pohyb Poincarého tří těles, kde se začíná vynořovat komplexní chování. Ale jakmile opustíme říši kompaktních matematických formulí a obrátíme se k počítačům, vyvstávají nové otázky. Jak složitý musí být algoritmus (a tedy počítačový program), aby poskytoval numerické řešení problému? Samozřejmě, že k řešení každého problému budou existovat algoritmy chytré i hloupější; nejlepší (optimalizovaný) program povede k nalezení řešení v nejkratším počítačovém čase. Předpokládejme však, alespoň teoreticky, že se omezíme u každého problému na ten nejefektivnější algoritmus. Jelikož už něco víme o zvládnutelnosti, nemusíme dlouho uvažovat, abychom si uvědomili, že různé problémy budou na počítači běžet různě dlouho. To je jeden z nejučinnějších a nejméně sporných způsobů, jak měřit komplexitu.

Komplexita algoritmických výrazů se také dá přímo vztáhnout k přírodovědě: do jaké míry se chování pozorované v experimentu dá algoritmicky "komprimovat"? Komprese, pojem, s nímž přišel Gregory Chaitin, když mu bylo patnáct, nám poskytuje užitečný nástroj k měření toho, jak snadno dokážeme reprodukovat přírodní jevy, a v principu poskytuje nejsolidnější definici komplexity. Chaitin říká: "Komplexita něčeho je velikost nejmenšího programu, který to vypočte nebo jeho úplného popisu. Jednodušší věci vyžadují kratší programy."

V každodenním životě najdeme spoustu analogií. Nežádoucím návštěvám můžeme říci, že jsme unaveni, máme moc práce, nebo jim třeba připomenout, že jinde je příjem lépe. Nebo můžeme křiknout "Vypadněte," což je efektivní komprese, která dosáhne žádoucího účinku. Komprese však nemusí být na místě u složitějších příkladů. Nejzajímavější a krajní příklad je nekomprimovatelnost. "Chlapec se seznámí s dívkou, zamíchá se do toho rodina, oba umírají" je komprese, která při popisu Shakespeareova Romea a Julie zašla příliš daleko. Jediný způsob, jakž oné hry něco mít, je jít se na ni podívat, nikoli číst přehledný článek nebo výtah. Podobně existují matematické objekty, které jsou algoritmicky nekomprimovatelné. Jedním dobrým příkladem je číslo omega Gregoryho Chaitina, algoritmicky náhodná veličina, na niž jsme narazili již dříve, v souvislosti s diofantickými rovnicemi.

Kompresibilitu můžeme formulovat způsobem, kterému přírodovědci či matematikové více přivykli, když totiž položíme důraz

spíše na čas než na informaci nebo velikost programu, který si řešení problému vyžaduje. Pár jednoduchých fyzikálních příkladů vidíme na obrázku 2.2, který znázorňuje hodnoty nějaké pozorovatelné veličiny - řekněme, jak se mění teplota s časem ve třech různých situacích.



Obrázek 2.2 / Zvyšování kompresibility. Tři příklady časových řad znázorňujících změny teploty s časem. A je konstantní, B periodická a C chaotická.

Neměnná hodnota, kterou vidíme v (A), se dá komprimovat do velmi přímočarého algoritmu: je-li  $N$  celková délka časové řady, algoritmus říká prostě "opakuj počáteční hodnotu  $N$ -krát". V případě (B) se dá pravidelně se opakující posloupnost komprimovat do algoritmu říkajícího "opakuj posloupnost od 0 do  $N/2$  dvakrát", což je o něco zdouhavější než v případě (A). Jsou však případy jevů, které vypadají náhodně, ale ve skutečnosti jsou "chaotické" (C). Ve vědeckém jazyce má tento termín zcela specifický význam, který později detailněji prozkoumáme. Pro tentokrát poznamenejme, že ačkoli se posloupnost možná zdá úplně náhodná, uspořádání, na němž je založená, je v její struktuře skrytě přítomné. Pro chaotický systém je možné dosáhnout určitého stupně algoritmické komprese. To je úleva pro každého vědce, sklíčeného složitostí skutečného světa: některé velmi složité jevy se dají zachytit malým souborem deterministických rovnic. Chaotické systémy dramaticky závisejí na počátečních podmínkách a jejich budoucí chování se dá spolehlivě předpovědět jen na krátké časové období. Kromě toho, čím chaotičtější je systém, tím méně komprimovatelná je algoritmická reprezentace.<sup>54</sup> Konečně pokud nějaká vlastnost reálného světa je algoritmicky nekomprimovatelná, nejúspěšnější způsob, jak simulovat jeho chování, je pozorovat samotný proces. □

<sup>54</sup> Např. G. Chaitin, *Algorithmic Information Theory* (Cambridge University Press 1987).

□ Je to situace jako u šifrování. Nejdokonalejší kód je takový, jehož klíč má stejné

# Teorie nikoli všeho

Bezpochyby to byla všudypřítomnost počítačů, co podnítilo v některých kruzích módu tvrdit, že pohled na přírodní zákony jako matematické v abstraktním platónském smyslu je potřeba nahradit takovým, který se zakládá na přírodních procesech provádějících výpočty. Tato perspektiva se dívá na přírodní zákony jako na druh softwaru, běžícího na hardwaru hmoty a energie. Jak zdůrazňuje Barrow, moderní definice vědy by se pak dala formulovat jako hledání komprese; konečná "teorie všeho" by byla zákonem představujícím nejzazší možnou kompresi.<sup>55</sup>

Fyzik Steven Weinberg, jenž se zabývá elementárními částicemi a je laureátem Nobelovy ceny, je jedním z vědců, kteří sní o konečné kompresi. Zůstává optimistou, i když připouští, že (redukcionistická) fyzika uvázla v zaběhaných kolejkách. Disponuje teoriemi s omezenou platností, které jsou předběžné a neúplné, "ale sem a tam někde za nimi letmo zahlédneme konečnou teorii, takovou, která by měla neomezenou platnost a byla by zcela uspokojivá ve své úplnosti a bezespornosti. Hledáme univerzální pravdy o přírodě, a když je najdeme, snažíme se je vysvětlit tak, že ukážeme, jak se dají odvodit z jednodušších pravd."<sup>56</sup>

Toto klamné pachtění je založeno na názoru, že by mělo být možné zhutnit veškeré přírodní jevy v nanejvýš několik málo matematických rovnic. Všechno, co je přístupné vědeckému rozboru, má být vysvětlitelné z těchto klíčových zákonů. A přece nepůjde v praxi všechno vypočítat: pokusy vědecky popsat mytí brambor pod tekoucí vodou nebo hod kostkami narážejí na problém výpočetní složitosti. Weinberg výmluvně připouští, že "nádherné jevy, od turbulence po myšlení, budou stále potřebovat vysvětlení, ať bude objevena jakákoli konečná teorie".

Turing, jehož práce Weinberg odbyl s tím, že patří "spíše do matematiky a techniky než do obvyklého rámce přírodních věd", předkládá ještě hlubší problém. Obtížné otázky povstávají, jelikož v platónské říši abstraktní matematiky existují problémy, které nejsou

---

množství znaků, tedy stejné množství informace jako samotná zpráva. K rozluštění zprávy tedy potřebujeme tolik informace, kolik jí zpráva nese, tedy „abychom zprávu rozluštili, musíme ji nejprve celou znát“. Představíme-li si jako šifrované poselství soubor údajů získaných experimentem, máme situaci, kterou popisuje teorie komplexity, (pozn. překl.)

<sup>55</sup> J. Barrow, *Pí na nebesích*, Mladá fronta, Praha 2000.

<sup>56</sup> S. Weinberg, *Snění o finální teorii*, Hynek, Praha 1996.

vyčíslitelné. To nás přinejmenším zavazuje položit si tuto otázku: I kdybychom měli správnou konečnou vědeckou teorii světa, vyjádřenou matematickými termíny, dokázali bychom z této teorie vypočítat vše, co nás zajímá?

## Turingova kletba

Nakolik je naše úsilí porozumět komplexitě ochromeno mezemi matematiky, objevenými Gödelem, Turingem a Chaitinem? Bylo by hluboce sklíčující, kdyby nevyčíslitelnost hrála důležitou roli v procesech reálného světa, zvláště u těch nejsložitějších jevů, jako jsou ty, které jsou spojeny s životem a inteligencí, tou inteligencí, jež umožňuje lidem zabývat se matematikou. Mohou opravdu počítače simulovat okamžik, kdy mechanický proces ožije? Může opravdu počítač simulovat "stavy lidské mysli"? Je možné navrhnout počítače, které jsou, podle nějaké rozumné definice tohoto termínu, živé? Je možné vyrábět počítače, nadané inteligentními rysy včetně vědomí? Jestliže život a vědomí opravdu představují víc, než je schopen dokázat jakýkoli jednotlivý algoritmus, je přesto možné, že by vlastnosti dostatečně složitého počítacího stroje mohly mít tyto atributy?

Velmi málo jsme pokročili při zjišťování, jak teoretické meze matematiky, které jsme v této kapitole nastínili, omezují naši schopnost popisovat komplexitu reálného světa. Snad nejvýznamnější náznak, že opravdu představují nezanedbatelný problém, pochází z práce Mariana Pour-El a Iana Richardse z Minnesotské univerzity. Ukázali, že existují nevyčíslitelná řešení jistých dobře známých rovnic matematické fyziky včetně vlnové rovnice, která popisuje, jak se šíří elektromagnetické vlny, jako jsou světlo, ultrafialové, infračervené a rentgenové záření a rádiové vlny.<sup>57</sup>

Přesto je těžké si představit, jak by toto zjištění mohlo omezit studium komplexity. (Vyčíslitelné) počáteční podmínky nezbytné k tomu, abychom dostali nevyčíslitelné řešení, jsou poněkud neobvyklé. Avšak, jak zdůrazňují tito matematikové, experimentátor bude pozorovat vyčíslitelnou posloupnost událostí a neuvidí, že by se dělo

---

<sup>57</sup> Pour-El a Richards dokázali, že parciální diferenciální rovnice hyperbolického typu, jako je vlnová rovnice, mohou z vyčíslitelných počátečních podmínek vést k nevyčíslitelnému řešení. Naproti tomu eliptické a parabolické rovnice, například rovnice pro vedení tepla, takový výsledek dát nemohou. M. Pour-El and I. Richards, *Computability in Analysis and Physics* (Springer Verlag 1989)

něco neobvyklého. Protože věda je o tom, co pozorujeme, i tyto zvláštní matematické výsledky nekladou počítači a jeho uplatnění ve vědě podstatná omezení. I když čistá logika ukázala omezenost matematického myšlení, je příznačné, že sám Turing nebral tato omezení příliš vážně, když psal o umělé inteligenci. I Chaitin věří, že aritmetická náhodnost, kterou objevil, je rysem platónského světa, nikoli toho, který obýváme.

Problémy matematiky se vždycky rodí z napětí mezi nekonečným a konečným či mezi diskrétním a spojitým. Turingovo pojetí počítače je založeno na diskrétním, číslicovém zařízení s konečným počtem vnitřních stavů; jeho univerzální stroj definuje meze toho, co je matematicky vyčíslitelné, možná s výjimkou kvantových počítačů (viz 3. kapitolu). Nicméně fyzikální systémy, které jsou řízeny "klasickými", tj. Newtonovými zákony, jsou spíše spojité než diskrétní. Mají tedy v principu přístup k nekonečnému počtu vnitřních stavů. Dalo by se tedy čekat, že takové analogové počítače mohou předstihnout univerzální Turingovy stroje a že by mohly vypočítat takové věci, jaké digitální počítače vypočítat nemohou. Mezi takové rozšířené schopnosti by spadalo řešení problému zastavení a generování nevypočitatelných čísel.

Navzdory teoretickým omezením, jež matematikové objevili u digitální techniky, došlo u nich k hluboké proměně v postoji k počítačům. Věří nyní čím dál více počítačovým důkazům, které není možno zkontrolovat a prohlédnout ručně. Nejslavnější problém, s nímž se takto vypořádali, byl předložen roku 1852 studentem Francisem Guthriem, který pokusem zjistil, že k vybarvení jakékoli mapy, mají-li se odlišit sousední země, stačí, jak se zdá, čtyři barvy. Roku 1976 Kenneth Appel a Wolfgang Haken z univerzity v Illinois vyřešili tento "problém čtyř barev" s pomocí počítače a potvrdili, že čtyři barvy opravdu stačí. Počítač nejenže posloužil k pojednání velice zdouhavých a únavných aspektů tohoto problému, ale pro některé části problému našel také důmyslnější způsoby řešení než cokoliv, co by dokázal navrhnout člověk-matematik.

V té době bylo takovéto užití počítače v matematickém důkazu bezprecedentní. Zahájilo mezi matematiky vzrušenou debatu, protože o důkazech se předpokládá, že nejsou zatíženy zkušeností: jak víme, že stroj neudělal chybu? Je důkaz skutečně důkazem, nemůže-li ho žádný člověk zkontrolovat s papírem a tužkou? Důkaz věty o čtyřech barvách obstál při přezkoumání navzdory pověstem, že je chybný.



Tím nechceme říci, že počítačové důkazy neobsahují chyby. Například Clement Lam spolu s Larrym Thielem a Stanleyem Swierczem z Concordia Univerzity v Montrealu předvedli superpočítačový "důkaz" jednoho problému, který vyžadoval prověření 1014 případů. Bylo odhadnuto, že počítač produkuje neodhalené chyby s četností přibližně jednou za 1000 hodin. "Jelikož jsme spotřebovali několik tisíc hodin počítačového času, očekáváme několik chyb," řekl Lam. "Snažím se vyhýbat používání slova ‚důkaz‘ a raději místo toho používám spojení ‚počítačový výsledek‘. Avšak mnoho matematiků by rádo přijalo tento výsledek jako důkaz!" I sami matematikové dělají často chyby, jak dosti výmluvně dokazuje nedávný případ oznámení, následného stažení a opětovného potvrzení důkazu velké Fermatovy věty. Nakonec budou některé druhy důkazů přijaty jako nezvratné, teprve budou-li prověřeny počítačem.

Objev hlubokých vnitřních omezení matematiky ve skutečnosti víru v počítače posílil. Tato omezení vůbec neznamenají, že matematika je zkrachovalý podnik, ale jen to, že matematika se podobá fyzice více, než by kterýkoli matematik byl býval ochoten připustit. Jak říká Chaitin: "Matematici nemají přímou linku k absolutní pravdě." Zastává velezrádný názor, že matematikové musejí čím dál více provádět experimenty, aby ve světle své zkušenosti našli ty nejvhodnější principy a axiomy.<sup>58</sup> Fyzikové si už na to zvykli: Newtonovy zákony dobře fungují v podmínkách každodenního života, řekněme při řízení auta, víme ale, že Einsteinovy rovnice se ujímají vlády při rychlostech blízkých rychlosti světla a že kvantová mechanika se uplatňuje v měřítku atomů a molekul.

Tím, že čistí matematikové používají počítač k rozšíření svých obzorů, akceptují jeho spolehlivost. To dostatečně uklidňuje všechny, kteří jsou znepokojeni důsledky Turingovy práce pro naši usilovnou snahu pochopit komplexitu světa kolem nás. Badatelé platónské říše budou čím dále tím více záviset na jednom předmětu fyzického světa, budou-li chtít dosáhnout nových objevů na nejzazších mezích matematiky. A právě k tomuto předmětu, číslicovému počítači, se nyní musíme obrátit jako k jedinému nástroji schopnému plně odkrýt komplikovanou nádheru přírody.

---

<sup>58</sup> G. Chaitin, in *Nature s Imagination*, J. Cornwell (ed.) (Oxford University Press, Oxford 1995).

# 3 Umělcova paleta

Toto je věk strojů,  
ve všech zjevných i skrytých významech tohoto slova.

THOMAS CARLYLE

"Velká vlna od Kanagawy" je nejnámější z mnoha tisíc ilustrací a tisků, které vytvořil Kacušika Hokusai, slavný japonský malířský mistr a grafik (obr. 3.1). Vlna byla jedním ze série dřevořezů publikovaných na začátku 19. století, které představovaly vrchol jeho díla v rámci školy *Ukiyo-e* (obrazy prchavého světa). Tato grafika svěžím způsobem zobrazuje neuspořádanou směsici mnoha malých i rozměrných struktur kapaliny v tříštícím se vodním hřebenu.



Obrázek 3.1 / Klasická turbulence. Hokusaiova tříštící se vlna.

Hokusai svým vlastním způsobem strávil celý život usilovnou snahou ovládnout tajné umění komplexity. Patnáct let před svou smrtí, v květnu 1849, napsal: "Od šesti let věku jsem byl posedlý skicováním tvarů věcí. Zhruba od padesáti jsem vytvořil množství kreseb, přesto ze všeho, co jsem nakreslil před sedmdesátkou, není opravdu nic, co by za mnoho stálo. Ve věku sedmdesáti tři jsem konečně pochopil něco ze skutečných vlastností ptáků, zvířat, hmyzu, ryb a z živoucí povahy trav a stromů. A tak v osmdesáti budu mít za sebou jakýsi pokrok, v devadesáti ještě hlouběji proniknu do významu věcí, ve stovce už budu opravdu skvělý a ve sto desíti bude jistě každá tečka, každá linie nadána svým vlastním životem."

Studium dynamiky kapalin, snaha porozumět "skutečným vlastnostem" toku kapalin a šíření rázových vln uchvacovaly také Johna von Neumanna. Na začátku války byl jedním z hlavních pyrotechnických expertů a pokoušel se porozumět každé tečce a každé linii rázové vlny, která vznikala během explozí a implozí.<sup>59</sup> Chtěl-li vykreslit, co se děje, když tříštící se vlna výbušné energie stlačuje kritickou hmotnost ve středu jaderné zbraně, potřeboval von Neumann bohatou paletu technik k zobrazení nesmírně složitých dějů, k nimž při tom dochází. Potřeboval zkrátka číslicový počítač. Dnes je jeho jméno téměř synonymem zrození počítače.

Jak jsme již viděli, komplexita přírody staví matematiku, která se opírá jen o tužku a papír, na vedlejší kolej. Chceme-li bádát nad všeobecnými matematickými principy, o něž se opírají komplexní jevy, je číslicový počítač nenahraditelný. S použitím těchto logických strojů můžeme simulovat, tvořit a řídit ohromné množství komplexních procesů, jak přirozených, tak umělých. Uvidíme, jak šel vývoj číslicového počítače ruku v ruce se zkoumáním komplexity a jak nám stále vzrůstající rychlost a výkon těchto strojů umožnily objasňovat postupně stále obtížnější jevy.

I když teprve v poslední čtvrtině 20. století je vliv počítačů všudypřítomný, historické kořeny tohoto neobyčejného nástroje se dají vysledovat mnoho století nazpátek. Jeho obrovský potenciál předpovídali takoví průkopníci, jako byli lady Lovelaceová a Charles

---

<sup>59</sup> Jedním problémem bylo, jak použít tvarované náboje k soustředění výbušné energie protitankové zbraně známé jako bazuka. Jiné vznikly při vývoji první jaderné zbraně: například umístění konvenčních výbušnin tak, aby se vytvořilo kritické množství štěpného materiálu, jako je plutonium, které by explodovalo silou jaderné nálože a ne pouze vyšumělo. R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster, New York 1986), str. 480.

Babbage, a svádí to dokonce k domněnce, že uvažovali o nejexotičtější aplikaci moderních počítačů v oboru zvaném umělý život. Je však nepravděpodobné, že by si dokázali představit i jenom to, jak odlišná bude poslední generace výpočetní techniky od jejich původních mechanických strojů. Tím, jak se nové architektury počítačů zakládají na blikajících svazcích laserového světla a opírají se o naši nejúspěšnější fyzikální teorii - kvantovou mechaniku - a jak využívají exotické typy logiky, jako je fuzzy logika, otevírají se našim schopnostem chápat komplexitu nové skvělé obzory.

## Počátky

První primitivní výpočetní pomůcky se objevily při každodenních činnostech už v dávných dobách. Nejstaršími byly vrypy a jiné značky na dřevě či kameni a známky jako žetony, obláčky, zauzlené provázky a tyčinky se zářezy.<sup>60</sup> Tyto jednoduché počátky se dají zahlédnout ve slově "calculus", což znamená latinsky kamínek na počtenici. Poté přišel abacus, odvozený od řeckého slova pro destičku či tabulku abax. Původně jej tvořily čáry vyryté v podlaze s kamínky představujícími počty jednotek, desítek, stovek a tak dále. Středověk přinesl abakus s dráty a korálky, jako jsou čínský suan-pan, japonský soroban a ruský sčot. Později, roku 1614, vyvinul výkonnou metodu k usnadnění těžkých výpočtů John Napier (1550-1617), baron z Merchistonu ve Skotsku. Přišel na to, jak převést aritmetické operace násobení a dělení na jednodušší sčítání a odčítání. Jeho tajemstvím byl logaritmus (často označovaný log). Čísla se dají násobit tak, že se nejprve sečtou jejich logaritmy a pak se převede výsledný logaritmus zpátky, čímž dostaneme výsledek. Dělení představovalo odčítání logaritmů. V roce 1620 bylo venkovským duchovním Williamem Oughtredem uvedeno do praxe logaritmické pravítko, které se stalo pro generace školáků synonymem bezútešných hodin matematiky.

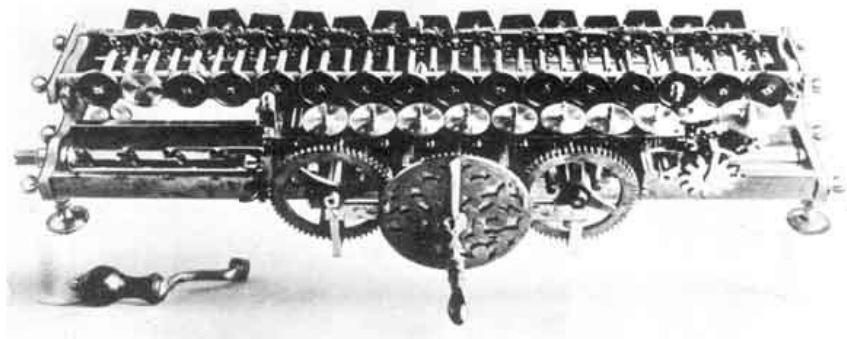
Sedmnácté století se stalo svědkem několika pokusů zmechanizovat výpočty. Byli to zejména Wilhelm Schickard,<sup>61</sup> který roku 1623

---

<sup>60</sup> D. S. Wade, Companion Encyclopaedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences, Vol. 1, I. Grattan-Guinness (ed.) (Routledge, London and New York 1994) str. 694.

<sup>61</sup> V září 1623 Schickard napsal velkému astronomovi a matematikovi Johannu Keplerovi: „Zkonstruoval jsem stroj skládající se z jedenácti úplných a šesti neúplných řetězových

vyprojektoval své počítací hodiny, Blaise Pascal, který téhož roku postavil stroj, provádějící sčítání, a Gottfried Leibniz, který roku 1672 najal řemeslníka, aby postavil zařízení schopné mechanicky násobit. Leibniz, který se zabýval astronomií a brzy poznal, jak pracné je počítat tabulky astronomických dat ručně, zdůvodnil tyto pokusy slovy: "Není hodno výtečných mužů, aby mařili celé hodiny jako otroci výpočetní dřinou, která by mohla být bezpečně svěřena komukoli jinému, kdyby se používaly stroje." Na svůj vynález byl tak hrdý, že zamýšlel na jeho památku nechat razit medaili s nápisem "Lepší než člověk".



Obrázek 3.2 / Jeden z prvních počítacích strojů navržený Leibnizem.

Tito dávní průkopníci mechanizovaných výpočtů naráželi na zásadnější omezení, než je spolehlivost. Žádný z dosud popsaných počítačů nebyl automatický. Každý vyžadoval zkušenou obsluhu, která zasahovala do průběhu procesu mechanického zpracování čísel. První stroj, který byl skutečně automatický, vypořádal se s problémem přenosu dat, a dokonce tiskl výsledky, vymyslel roku 1821 jeden brilantní polyhistor, který se pustil do konstrukce zařízení svou podstatou překvapivě podobného tomu, které si o sto let později představoval Alan Turing.

## Počítač parou poháněný

Charles Babbage (1791-1871) je často oslavován jako otec moderní výpočetní techniky. Nikoli jen jednou, ale znovu a znovu se pokoušel

kol, který dokáže kalkulovat. Neudržel byste se smíchy, kdybyste viděl, jak samostatně přenášejí přes desítku z jednoho sloupce do druhého nebo z nich při odčítání odebírají." Převzato z: S. Augarten, Bit by Bit (George Allen & Unwin, London 1985), str. 15.

postavit "motory", které by, jak doufal, počítaly a tiskly tabulky k uspokojení narůstajících požadavků vědců, bankéřů, pojišťovacích agentů, inženýrů a mořeplavců, přičemž ti poslední byli pro Británii, zemi s největším námořnictvem, obzvlášť důležití.

Počítářstvím jeho zájmy nezačínaly a nekončily. Babbage vynalezl zařízení proti kravám překážejícím v jízdě vlaku, spočívající v "pevné kožené zástěře, připevněné k pevné ocelové žerdi",<sup>62</sup> blikající maják, tachometr, obuv pro chůzi na vodě a navrhl techniky operačního výzkumu, objektové analýzy a metody pro vylepšování chování komplexních systémů a organizací. Byl také vynikajícím odborníkem na šifrování, zakladatelem Královské statistické a Královské astronomické společnosti a nadmíru horlivým bojovníkem proti tomu, aby se v Londýně hrálo na žestě, dudy a jiné "mučící nástroje", které obviňoval z toho, že ho připravily o čtvrtinu jeho intelektuálních schopností.

Charles Babbage se narodil 26. prosince 1791 v otcovském domě ve Walworthu v Surrey, 500 yardů od slavného hostince U slona a hradu. V těch dobách slynilo toto místo na jih od Temže venkovskou atmosférou, která měla ještě daleko do bezbarvého betonu a asfaltu nepravidelně se táhnoucích ulic v místech, která jsou nyní součástí centrálního Londýna. V průběhu života měl Babbage zažít proměnu Anglie od venkovského národa po zdaleka nejvíce industrializovanou zemi, jaká kdy byla.

Roku 1810 se Babbage dostal na Trinity College v Cambridgi. Začal tam působit v několika studentských skupinách: ve Společnosti nedělní snídaně, v Duchařském klubu, u Vytahovačů (ti se věnovali vytahování svých členů z blázince, kdyby měli tu smůlu a dostali se tam), ve veslařském klubu, posměšně nazývaném Baggageovi Troubové, a v matematické společnosti, původně zamýšlené jako parodie vážně se tvářících náboženských skupin, která znamenala počátek Babbageova zájmu o výpočetní techniku.

Babbageova autobiografie nám odhaluje, že už jako dítě byl okouzlen stroji. Čteme tam, jak ho na jakési výstavě uvedly do vytržení dva stříbrné automaty.<sup>63</sup> Tato fascinace se někdy v letech 1812 nebo

---

<sup>62</sup> C. Babbage, *Passages from the Life of a Philosopher* (Longman, Green, Longman, Roberts & Green 1864) str. 318.

<sup>63</sup> „Jedna z nich kráčela či spíše klouzala prostranstvím asi o čtyřech stopách, pak se uklonila a vrátila se na své původní místo. Občas používala brýlí a často se ukláně-la, jako by zdravila své známé. Pohyby jejích údů byly neobyčejně půvabné. Další stříbrná figurka byla obdivuhodná balerína, s ptáčkem na ukazováčku pravé ruky, který kýval ocasem, mával křídly a otevíral zobák.“ C. Babbage, *Passages from the Life of a Philosopher* (Longman, Green, Longman, Roberts & Green 1864) str. 17. Roku 1834 koupil Babbage

1813 proměnila ve vizi mechanizace matematiky: "Jednoho večera jsem seděl v prostorách Analytické společnosti v Cambridgi, hlavu skloněnou nad tabulkami v jakési zasněné náladě, logaritmické tabulky ležící otevřené přede mnou. Jiný člen, vchází do místnosti a vida mě zpola spícího, zvolal „Hele, Babbage, o čem se ti zdá?“, na což jsem odvětil: „Myslím na to, že celé tyto tabulky (ukázal jsem na logaritmy) by se mohly vypočíst pomocí strojů.“<sup>64</sup> Skutečný "okamžik zrodu" se odehrál roku 1821 během setkání s astronomem Herschelem: "Když mě přišel navštívit můj přítel Herschel, přinesl s sebou kalkulace počtářů a započali jsme klopotný prověřovací pochod. Po čase se vyjevily mnohé neshody a v určitém místě byly tyto nesoulady tak četné, že jsem zvolal: „Proboha, kéž by byl býval tyto kalkulace provedl parastroj!"

Babbage však na svých strojích nezačal pracovat dřív než roku 1823. Věděl o jednodušších kalkulátorech pocházejících z dřívějška, ale jeho první stroj byl mnohem pokročilejší než cokoli, co mu předcházelo, a dal nový smysl mechanickému zpracování čísel. Čísla byla ve stroji uchovávána ve sloupcích ozubených kol, která byla uváděna do chodu tak, že se točilo klikou. Dostal název Diferenční stroj, <sup>□</sup> jelikož byl určen k výpočtu a následnému tisku tabulek matematickou metodou "konečných diferencí". Babbage užíval k označení svého výtvoru slovo "stroj", protože ho plánoval spojit s jiným zázrakem té doby: párou.

Babbage si myslel, že projekt na postavení diferenčního stroje č. 1 mu zabere dva či tři roky. Jeho snaha ztroskotala roku 1833, poté, co se pohádal se svým hlavním inženýrem Josephem elementem, jehož Babbage podezíral, že nadsazuje své výlohy. Projekt byl definitivně opuštěn roku 1842. Neúspěch při stavbě Diferenčního stroje, v té době zdaleka největšího soukromého výzkumného programu sponzorovaného vládou, měl sám o sobě značný dopad. Kdyby byl býval stroj dokončen, mohly následovat další projekty podporované státem.

Byly tu však vedlejší výsledky. Projekt urychlil rozvoj pokročilých obráběcích strojů a strojírenských technik. Vedl také k sestrojení prvního známého automatického kalkulátoru. Roku 1832 Babbage pověřil Clementa sestavením části stroje s použitím zhruba 2000 ze

malou tanečnici v aukci.

<sup>64</sup> Nepřesnosti v tehdejších matematických a námořnických tabulkách byly legendární. Dionysius Lardner, jeden z průkopníků popularizace vědy - a Babbageových myšlenek - napsal, že ve čtyřiceti náhodně vybraných svazcích matematických tabulek se vyskytuje 3700 známých tiskových oprav, z nichž některé samy obsahují chyby. D. Swade, Sci. Amer. 268, 62 (1993).

<sup>□</sup> DifFERENCE Engine (pozn. překl.)

zamýšlených zhruba 25 000 součástí. Tato dokončená část nedokončeného stroje je inženýrským triumfem, jedním z nejskvělejších příkladů přesné techniky té doby, který dosud funguje. Je k vidění v londýnském Muzeu vědy.

Na podzim roku 1834 měl Babbage vizi počítače, která jej neopustila až do konce života. Mělo to být Babbageovo vrcholné dílo, i když čistě intelektuální: byl to projekt Analytického stroje<sup>□</sup> Na rozdíl od Diferenčního stroje, který zvládal omezenou třídu výpočtů, byl Analytický stroj programovatelný počítačový stroj pro jakékoli použití. Tak jako první moderní počítače měl oddělený prostor pro uchovávání čísel a centrální výpočetní jednotku - "mlýn" -, která čísla zpracovávala.<sup>765</sup> Dále měl sekci pro řízení a operace a používal dokonce děrných štítků pro program a vstup dat a tisk pro výstup. Babbage si myslel, že bude možné přeskakovat nebo opakovat štítky podle výsledků, které stroj vypočítá. Tato idea "podmíněného větvení" - jestliže je podmínka splněna, počítej takto, pokud ne, pokračuj jako dosud - umožňovala jeho stroji vracet výsledky zpátky do výpočtů, a tedy vlastnosti univerzálního počítače toho typu, jaký předvídal Turing. Sám Babbage v předtuše řekl, že, jakmile bude existovat analytický stroj, bude nutně řídit budoucí postup vědy".

Babbage se nechal inspirovat automatickým stavem, vynalezeným roku 1801 Francouzem Josephem-Marie Jacquardem, který byl tak úspěšný, že jen ve Francii jich bylo do roku 1812 vyrobeno 11 000. Jak řekl Babbage, stav „je schopen tkát jakýkoli vzorek, který si může lidská představivost vymyslet". Zruční tkalci byli nahrazeni pruhem kartónových štítků s proraženými dírkami, připojeným k válci otáčejícímu se nad stavy. Tam, kde se objeví dírky, naběrou háčky barevná vlákna, aby je vetkaly do libovolně navržených vzorů.

"Můžeme velice trefně říci, že Analytický stroj tká algebraické obrazce stejně jako Jacquardův stav tká květy a listy," poznamenala Augusta Ada Byronová, lady Lovelaceová. Tato okouzující, temperamentní a aristokratická hostitelka, která kolem sebe šířila všechen romantický půvab očekávaný od legitimní dcery básníka lorda Byrona, přirovnávala činnost stroje ke skládání hudby a tvrdila, že

---

□ Analytical Engine (pozn. překl.)

<sup>65</sup> Babbageovými slovy: „Analytický stroj se skládá ze dvou částí: 1) Úložný prostor, kde jsou umístěny všechny proměnné, s nimiž se má pracovat, a stejně tak všechny veličiny, které se objevily v důsledku jiných operací. 2) Mlýn, kam se vždy přivádějí veličiny, které se mají právě zpracovávat."



"může komponovat propracované a vědecké hudební kusy libovolného stupně složitosti".

Ada byla podle měřítek a hodnot své doby neobyčejnou ženou a snažila se pracovat spíše společně s Babbagem než pro něj. Když se poprvé potkali na jednom z jeho večírků v červnu 1833, měla za sebou studium matematiky u Augusta de Morgana a věděla již něco o jeho diferenčních strojích. Objížděla britské továrny ve střední Anglii a navštěvovala přednášky popularizátora vědy Dionysia Lardnera, aby strojům lépe porozuměla. Časem se s Babbagem sprátelili.

Obrat v jejich vztahu nastal roku 1840, když Babbage přednášel v Turíně o analytickém stroji. Italský vojenský inženýr Luigi Menabrea (pozdější předseda vlády sjednocené Itálie) se ujal úkolu napsat o stroji článek, který byl následujícího roku publikován v Ženevě.<sup>866</sup> Na popud Charlese Wheatstona přeložila Ada Menabreuův článek z francouzštiny do angličtiny. Nebyl to ani tak článek jako její komentáře, co na Babbage zapůsobilo. Adiny postřehy byly dvaapůlkrát delší než původní článek a podle Babbageova názoru byly dost dobré na samostatnou publikaci, nejen jako poznámky pod čarou k článku v Taylor s Scientific Memoirs.<sup>967</sup>

Z jeho návrhu je jasné, že si uvědomil, že Ada zasluhuje za své příspěvky většího uznání. Skutečně se jí přisuzují úvahy o abstraktní struktuře instrukcí, které měly stroj řídit, o rozlišení podmíněného větvení, na něž jsme narazili dříve, a o cyklu, který se používá pro opakování instrukcí. Jiní současně konstatovali, že naproti tomu u Babbage neexistují známky, že by uvažoval o programování jako o praktické metodě pro použití svých strojů.

Kdyby měla Ada nezávislý příspěvek k výpočetní technice, bylo by snazší posoudit význam jejích poznámek. Ale nemělo tomu tak být. Po jistém čase stráveném v ústraní začala Ada hledat rozptýlení mimo své manželství. Stala se milenkou Andrewa Crosse, vynálezce a hazardního hráče, který byl jedním z širšího okruhu Babbageových vědeckých

---

<sup>66</sup> L. Menabrea, Bibliothèque Universeille de Geneva str. xli (1842). Viz Martin Camp-bell-Kelly (ed.), The Works of Charles Babbage (Pickering & Charto, London 1989).

<sup>67</sup> A. Hyman, Charles Babbage, Pioneer of the Computer (Oxford University Press 1982), str. 196. Adu tento návrh rozzlobil; neměla vůbec v úmyslu, aby její první práce byla přerušena za pět minut dvanáct a aby tak riskovala zdržení. 14. srpna 1843 odeslala Babbageovi šestnáctistránkový protestní dopis, který obsahuje výmluvnou zmínku o jejich odlišné motivaci: „Můj vlastní nekompromisní princip je usilovat o lásku k pravdě a k Bohu více než o slávu a chválu. ... Váš je milovat pravdu a Boha (jistě, hluboce a pevně); a milovat slávu a chválu ještě více.“ Podle Babbageova životopisce Anthonyho Hymana její „mírně exaltovaný projev se dá přisoudit vlivu opia, alkoholu nebo obojího.“

přátel. V den epsomského derby roku 1851 její dluhy činily 3200 liber a byla nucena zastavit rodinné diamanty. Kromě toho byla smrtelně nemocná; rok předtím jí zjistili rakovinu dělohy. Její matka, lady Noel Byronová, jednala se zarážejícím nedostatkem soucitu a snažila se Adě zabránit v užívání opia proti bolesti. Propustila Adino služebnictvo a zakázala Babbageovi vstup do domu. Donutila dokonce svou drogou omámenou, umírající a bezmocnou dceru změnit svou poslední vůli.

Ada Lovelaceová zemřela na konci listopadu 1852, avšak to, čím přispěla, žije dále. Vděčíme jí za mnohé z toho, co víme o analytickém stroji, včetně jediného jasného svědectví, které máme o tom, jaké byly Babbageovy názory na možnosti použití jeho strojů. Dnes je po ní pojmenován jeden počítačový jazyk<sup>68</sup> a slovy laureáta Nobelovy ceny Arno Penziase, "dá se říci, že hraběnka byla první programátorkou na světě".

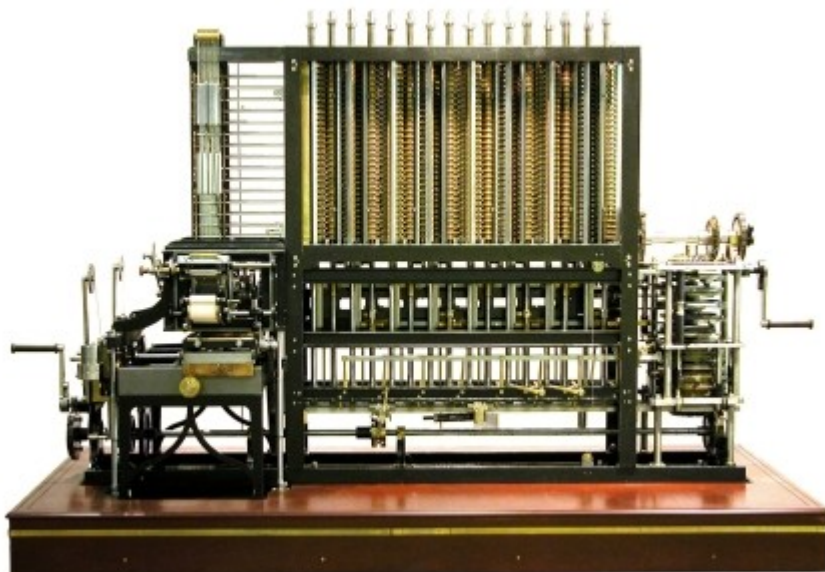
Naneštěstí pro Babbage se následující předsedové vlád k jeho projektu obrátili zády. Často bývá líčen jako oběť "britské nemoci" 19. století - chronické neschopnosti národa zužitkovat své myšlenky. Babbage byl však možná také obětí své příliš plodné mysli. Pár let před jeho smrtí v roce 1871 k němu přišel na návštěvu matematik z Cambridge John Moulton (pozdější lord Moulton) a viděl části původního počítačového stroje. "Nedodělal jsem to, protože když jsem na tom pracoval, přišel jsem na myšlenku analytického stroje, který by dokázal všechno co tenhle a ještě mnohem více," řekl Babbage Moultonovi. "Po pár minutách rozhovoru jsme přešli do další pracovny, kde mi ukázal a vysvětlil funkci prvků analytického stroje," vzpomíná Moulton. "Zeptal jsem se, zda ho můžu vidět. 'Nikdy jsem ho nedokončil,' řekl, 'protože jsem dostal nápad, jak tutéž věc udělat jiným a daleko efektivnějším způsobem, a postupovat starou cestou se stalo zbytečným.' Pak jsme šli do třetí místnosti. Válely se tam kusy mechanismu, ale neviděl jsem ani stopu po nějakém fungujícím stroji. Opatrně jsem nakouzl toto téma a dostal jsem odpověď, jíž jsem se obával: 'Ještě není postavený, ale pracuji na tom a dohromady mi to bude trvat méně, než by mi zabralo dokončení analytického stroje z toho stadia, kdy jsem ho zanechal.' Opouštěl jsem starého muže s těžkým srdcem."

Dvousté výročí Babbageova narození v roce 1991 přineslo konference, výstavy, divadelní hry a pamětní známky. Muzeum vědy v

---

<sup>68</sup> ADA, vyšší programovací jazyk, vyvinutý z iniciativy amerického ministerstva obrany a používaný hlavně pro vojenské účely.

Londýně dokončilo část Babbageova životního poslání - postavení jeho Diferenčního stroje č. 2 po šestiletém úsilí, které přišlo na 300 000 liber. Šéf projektu Doron Swade byl uchvácen výzvou, kterou Babbageův návrh představoval: předběhl schopnosti viktoriánského strojního inženýrství? "Naše úsilí konečně přineslo plody v listopadu 1991, měsíc před dvoustým výročím Babbageova narození. Tehdy toto zařízení - známé jako Diferenční stroj č. 2 - bezchybně dokončilo svůj první větší výpočet. Úspěch našeho podniku potvrdil, že Babbageovy neúspěchy byly věcí praktického provedení, nikoli projektu."



Obrázek 3.3 / Drtič čísel. Babbageův Diferenční stroj č. 2.

Teoretické ideje, na nichž stojí analytický stroj, zajistily Babbageovi místo v historii výpočetní techniky. Diferenční stroj č. 2, který se nyní nachází v Muzeu vědy, je triumfálním výkonem techniky, pomníkem přísné logiky používané jeho vynálezcem. Babbage navrhl dokonce procesorovou sestavu na souběžné provádění mnoha výpočtů a vynalezl symbolický jazyk pro popis struktury stroje a jeho chování.<sup>69</sup> To založilo

<sup>69</sup> C. Babbage, *Passages from the Life of a Philosopher* (Longman, Green, Longman, Roberts & Green 1864) str. 142. „Bylo brzy zřejmé, že můj pokrok bude vážně zbrzděn, pokud nedokážu vymyslet rychlejší prostředek porozumění a vybavení si interpretace svých vlastních schémat.“ (str. 143). „Nazval jsem tento systém znaků mechanická notace. Jeho aplikací k geometrickým náčrtům jsme dostali novou vědu o důkazech, totiž o dokazování, že jakýkoli daný stroj může či nemůže existovat, a pokud může existovat,

a dalo jasný směr vynálezu symbolické logiky čili aplikaci logických pravidel na manipulaci se symboly, která probíhá v každém počítači. Mezi matematiky 19. století, kteří razili cestu tomuto oboru, se nyní budeme věnovat dalšímu Angličanovi.

## Booleovy zákony myšlení

Bertrand Russell kdysi tvrdil, že George Boole objevil čistou matematiku. Boole je známější kvůli algebrám, které jsou po něm pojmenovány, a jako jeden z průkopníků moderní logiky. Jeho slavné, ačkoli neohrabaně nazvané pojednání Zkoumání zákonů myšlení, na nichž jsou založeny matematické teorie logiky a pravděpodobnosti otevřelo nové možnosti nejen pro matematickou logiku, ale také pro ještě nenarozenou výpočetní techniku.

Boole se narodil v anglickém Lincolnu roku 1815 jako syn ševce a jakmile vychodil školu, stal se učitelem, aby finančně vypomáhal rodičům. Podle toho, co uvedl v pozdějších letech, to bylo počátkem roku 1833, kdy poprvé uvažoval o myšlenkách, které měly vyrůst v jeho veliké matematické dílo - vyjádření logických vztahů v symbolické či algebraické formě.

Ačkoli měl jen rudimentární matematické vzdělání, prokousával se ve věku osmnácti let pokročilými pojednáními a učil se matematiku stejným způsobem, jakým zvládl řečtinu a většinu své latiny - jako samouk. Publikování v matematických časopisech mu pomohlo zvýšit si reputaci. Jeho článek z roku 1844 "O obecné metodě v matematické analýze" získal první zlatou medaili Královské společnosti za nejvýznamnější matematickou zprávu z let 1841 až 1844. Booleův úspěch byl o to působivější, že Rada Královské společnosti článek nejprve chtěla odmítnout, dokud jeden z členů, Thomas Davies, nezačal protestovat, že fakt, že autor je chudý a neznámý, není důvodem pro zamítnutí jeho práce.

Časně zjara roku 1847 byl Booleův dlouho dřimající zájem o souvislosti mezi matematikou a logikou probuzen a inspirován sporem mezi velkými logiky sirem Williamem Hamiltonem a Augustem de Morganem poté, co Hamilton obvinil de Morgana z plagiátorství. Boole jejich přístupy syntetizoval ve své knize Matematická analýza logiky, to jest pokus směřující ke kalkulaci deduktivního myšlení. I když to byla poněkud uspěchaná práce, znamenala počátek symbolické logiky v

že dokáže dělat to, co se po něm žádá."

moderním smyslu. V Booleově pojetí se matematika nesoustředí jen na tvary a čísla, ale rozšiřuje pole své působnosti tím, že symboly interpretuje jako třídy či množiny objektů, což jsou pojmy, které, jak jsme viděli v 2. kapitole, nakonec otráslы základy matematiky.

Úsilí započaté Matematickou analýzou logiky vyvrcholilo knihou Zkoumání zákonů myšlení, publikovanou roku 1854. Řečeno jeho vlastními slovy chtěl Boole "prozkoumat základní zákony těch operací myšlení, jimiž se vykonává myšlení; dát jim výraz v symbolickém jazyku kalkulu a na tomto podkladě založit vědeckou logiku a zkonstruovat její metodu ... a konečně sebrat z různých částečných pravd, které se vynoří v průběhu těchto výzkumů, nějaké pravděpodobné náznaky toho, jaká je povaha a skladba lidské mysli."

Boole podal následující návrhy. Za prvé, logické výroky či věty se mají vyjadřovat formou rovnic. Dále, se symboly vyskytujícími se v těchto rovnicích se manipuluje podobně jako v algebře, která je spolehlivou metodou logické dedukce. Přemýšlení se tedy odehrává pomocí výpočtu nebo, jinak řečeno, logika je redukována na algebru. Například jestliže symbol  $x$  představuje třídu všech bílých předmětů a  $y$  třídu všech kulatých předmětů, Boole používal  $xy$  k označení třídy předmětů, které byly jak bílé, tak kulaté. Podobně, je-li  $m$  třída všech mužů a  $z$  třída všech žen, pak  $(m + z)$  je třída všech lidí.<sup>70</sup> Pokud  $e$  reprezentuje třídu všech Evropanů, vidíme, že třída všech evropských mužů a žen je tatáž jako třída evropských mužů a evropských žen, to jest  $e(m + z) = em + ez$ . Booleovská algebra tvoří základ analýzy pravdivosti logických vět, neboť uchopila binární neboli dvouhodnotový charakter výroků, které mohou být buď pravdivé, nebo nepravdivé.<sup>71</sup> Ať už vědomě či nevědomě, Boole objevil nový druh matematiky, její odrůdu ideálně vhodnou pro manipulaci s informacemi v počítačích.

Boole zemřel roku 1864. Byl to předčasný konec,<sup>72</sup> možná uspišený důvěrou jeho ženy v homeopatii, a širší význam jeho práce zůstal nepovšimnut desítky let. I když roku 1867 americký logik Charles

---

<sup>70</sup> Znak „+“ zde reprezentuje booleovskou operaci sjednocení. Technicky řečeno je Booleova algebra algebrou množin či tříd, na níž jsou definovány operace sjednocení, průniku a doplňku.

<sup>71</sup> Booleovská algebra je izomorfní s výrokovým počtem, který se zabývá logickými vztahy mezi větami.

<sup>72</sup> Boole zemřel na vrcholu své matematické dráhy, avšak nikdy se netěšil pevnému zdraví. Krátce po svatbě mu dokonce jeho žena zakázala psát poezii, protože byl přepracovaný a ona jej chtěla uchránit zbytečného přepínání. (D. MacHale, George Boole. His Life nad Work, Boole Press, Dublin 1985, str. 240).

Peirce poznamenal, že Booleova dvouhodnotová logika se hodí k popisu elektrických obvodů se spínači, teprve roku 1937 americký matematik Claude Shannon, pracující na MIT, John Atanasoff na Iowa State College a německý inženýr Konrád Zuse nezávisle na sobě ukázali, že dvojková čísla (0 a 1) spolu s booleovskou algebrou mohou být velmi účinně použity při analýze elektrických spínacích obvodů, a tedy při návrhu elektronických počítačů. Spínací obvody jsou sítě reléových spojů, které se vyskytují v dnes již zastaralé elektronice, jako jsou telefonní ústředny nebo železniční signalizace a u úplně prvních číslicových elektronických počítačů. Booleova algebra je přirozeným jazykem pro popis spínání, na němž je založena práce počítače.

Spínače jsou buď zapnuté, nebo vypnuté. Stačí uvažovat jen tyto dvě hodnoty - mezi nimi není nic. V případě relé ve staromódních obvodech to znamenalo například rozdíl mezi přítomností a nepřítomností proudu či napětí, obvykle reprezentovanými dvojkovými symboly 1 a 0. Funkce spínacího obvodu se dá plně určit, když zadáme, jak stavy jistého počtu výstupních spínačů závisejí na stavech vstupních spínačů. Je tedy možné reprezentovat obvod a jeho fungování booleovskou algebrou, stejně jako při analýze logických struktur. Na spínače a obvody se lze dívat jako na vrátka, která se otevírají a zavírají, v reakci na různé úseky dat podle jednoduché logiky. Říká se jim proto logická hradla. <sup>□</sup> Propojením logických hradel tak, že výstup jedněch ovládá vstup jiných, lze provádět komplikované úlohy.

Georgi Stibitzovi a Samuelu Williamsovi se v Bellových laboratořích podařilo sestavit tímto způsobem logická hradla, která mohla sčítat, odčítat, násobit a dělit dvojková čísla. Podobně v obývacím pokoji v berlínském bytě svých rodičů používal Konrád Zuse dvojkovou matematiku, aby se vyhnul Babbageovým ozubeným kolům s deseti zuby, když vyvíjel svůj jednodušší mechanický kalkulátor Z1, po němž následovaly další elektromechanické varianty používané při konstrukci raket V2. Dnešní číslicové počítače a elektronické obvody jsou navrženy tak, že používají tuto dvojkovou aritmetiku. Za všemi těmito rozličnými aplikacemi je jednoduchá matematická teorie: symbolický kalkul funkcí dvojkových proměnných vytvořený Boolem.

---

<sup>□</sup> Logical gates. V angličtině je využit význam gate = brána, hradlo, (pozn. překl.).

# Babbage a Boole v pravém světle

Ohlížíme-li se zpátky do minulosti, je lákavé představit si, jak by probíhal vývoj počítačů - a studium komplexity -, kdyby se hardware Babbageova analytického stroje zasnoubil se softwarem vycházejícím z Booleovy algebry. Zůstává záhadou, proč si tito dva muži aspoň nevyměnili názory na matematiku, kde toho měli tolik společného.

Babbage uvažoval už kolem roku 1820 o stejném typu symbolické algebry, jakou nakonec vyvinul Boole. Oceňoval také Booleovu práci: roku 1847, když vyšel Booleův článek *Matematická analýza logiky*, načmáral na okraj svého výtisku: "Tohle je dílo skutečného myslitele."<sup>73</sup> I osobní vazby by je bývaly mohly sblížit: Booleova manželka tvrdila, že Babbage byl přítelem jejího otce, a dalšími společnými známými byli Augustus de Morgan a sir Edward Bromhead. Na podzim 1862 Boole dokonce navštívil Babbagea, aby se podíval na Diferenční stroj.

To, že Babbage a Boole nedokázali vzájemně podnitit své myšlenky, není jedinou hádankou ve vývoji moderního počítače. Ačkoli Babbage pochopil hlavní principy výpočetní techniky již ve 40. letech

století, první elektronický počítač se objevil až o sto let později. Průkopníci těchto počítačů sotva něco z Babbageovy práce použili; mnozí o ní vůbec nevěděli. To, že tady chybí přímá vývojová linie od Babbage až k nám, vedlo některé k tvrzení, že Babbage nemá být považován za otce či dědečka moderní výpočetní techniky - je spíš něčím jako prastrýcem. Přece však Babbage několik stop na počítači

století zanechal. Jeho práce byla známa Alanu Turingovi a Howard Aiken, který pomáhal při vývoji amerického počítače Mark I pro tvorbu válečných balistických tabulek, byl Babbageovými stroji zvláště nadšen. Vůdčí osobnost při zrození elektronického počítače, John von Neumann, byl obeznámen se zařízením, které inspirovalo analytický stroj: jeho otec, jako ředitel jedné z největších maďarských bank, Magyar Jelzalog Hitelbanka, financoval zavedení Jacquardových stavů v zemi.

## Von Neumannova inspirace

Na konci třicátých let byl von Neumann uznáván jako jeden z vůdčích světových matematiků a matematických fyziků, neměl však

---

<sup>73</sup> A. Hyman, *Charles Babbage, Pioneer of the Computer* (Oxford University Press 1982), str. 244.

významný kontakt s výpočetní technikou. Zato potom byl jeho vliv tak velký, že o počítačích se dnes říká, že mají "von Neumannovu architekturu", jako výraz respektu k jeho průzračné a mistrovské analýze jejich struktury a fungování.<sup>74</sup> Jistě, byli tu i jiní, kteří se účastnili vývoje prvních strojů, ale při definování struktury číslicových počítačů, které dnes vládou v továrně, pilotní kabině či videoherně, byl vedle Alana Turinga dominantní osobností von Neumann.

Von Neumann čerpal inspiraci pro přechod od matematiky k výpočetní technice z několika významných zdrojů. Prvním byl Alan Turing, který na něj zapůsobil, když se setkali v dubnu 1935 během návštěvy v Cambridgi.<sup>75</sup> Jinou inspirací byla mezi lety 1939 a 1941 korespondence s jeho přítelem Rudolfem Ortwayem, ředitelem Ústavu teoretické fyziky budapeštské univerzity, který poukazoval na paralely mezi mozkiem a elektronickým počítačím zařízením. A konečně na von Neumanna hluboce zapůsobil článek, který si kladl za cíl popsat logický základ fungování mozku a který byl inspirován Turingovým článkem o vypočitatelných číslech. Napsali jej neurolog Warren McCulloch a matematik Walter Pitts<sup>76</sup> a učinil na něj dojem tím, že sliboval vnést matematický řád do komplexních a málo známých jevů v mozku.

## Turbulentní bomba

Destrukce: tímto směrem se měl ubírat jeho zájem o výpočetní techniku od té doby, co se von Neumann připojil k dalším vědcům, zaměstnaným obrovským úsilím vyvinout první jadernou zbraň. Krátce poté přidělil svému příteli Stanu Ulamovi úkol vypracovat hydrodynamiku (to je mechaniku tekutin) imploze, potřebnou při konstrukci výbušných čoček pro stlačení plutonia do centra bomby.<sup>77</sup> "Hydrodynamický problém bylo snadné zformulovat," říkal Ulam, "byl

---

<sup>74</sup> Jsou to sériové číslicové počítače. Jinou architekturu naproti tomu mají jednak analogové počítače, jednak paralelní číslicové počítače.

<sup>75</sup> Polský matematik Stan Ulam, von Neumannův blízký přítel, říkal, že von Neumann si hrál s Turingovými popisy vypočitatelných čísel během svých cest po Evropě v létě 1938 a následujícího roku Turingovu práci několikrát vychvaloval. Po válce udělal von Neumann z Turingova článku z roku 1937 povinnou četbu pro pracovníky ve svém počítačovém projektu. První publikovaný von Neumannův odkaz na Turingův univerzální stroj je v jeho přednášce „Obecná a logická teorie automatů“, přednesené 20. září 1948. Lze ji najít ve von Neumannových Sehraných spisech (Pergamon Press, Oxford 1963).

<sup>76</sup> W. McCulloch a W. Pitts, *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 115 (1943).

<sup>77</sup> R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster, New York 1986)



však velmi obtížně řešitelný - nejen detailně, ale i pokud jde o řádově přesné určení velikosti."

Von Neumann původně používal pro zjišťování hydrodynamických vlastností tradiční metodu "shora dolů", která se zabývá spíše celkovým chováním tekutiny než všemi možnými detaily molekul, z nichž se skládá. Na přímo pozorovatelných škálách času a délky se tekutina (čímž myslíme kapalinu či plyn) zdá být spojitá - její časové a prostorové vlastnosti se mění zvolna a většina fyzikálních vlastností, jako jsou její rychlost a lokální hustota, mohou nabývat jakékoli konečné hodnoty. Diferenciální rovnice jsou standardním nástrojem, který matematikové a fyzikové od dob Newtona a Leibnize používají k popisu toho, jak se tekutina - nebo vlastně i cokoli jiného - vyvíjí v čase. Von Neumann používal soustavu diferenciálních rovnic, které popisují vlastnosti proudící tekutiny, včetně známých Navierových-Stokesových rovnic. Místo aby se pozornost věnovala detailnímu chování nepřeborného množství molekul, předpokládá se, že tekutina je spojitě prostředí, a pak jsou tyto rovnice odvozeny aplikováním přímočarých zákonů vyjadřujících zachování hmoty, hybnosti a energie, které pocházejí z dob Isaaca Newtona.<sup>78</sup> Přestože jsou jen přibližné, diferenciální rovnice dosti přesně popisují rychlostní profil v proudící tekutině či výbuch s veškerými složitostmi, které jsou s ním spojeny.

Von Neumanna na sklonku třicátých let zcela pohltil nadlidsky obtížný úkol tyto rovnice proudění tekutiny vyřešit. Avšak podobně jako Ulam a jini zjistil, že je těžké najít matematické řešení, protože mnohé rovnice dynamiky tekutin jsou nelineární. Lineární vztah mezi dvěma veličinami znamená přímou úměrnost: deset pomerančů stojí desetkrát více než jeden pomeranč. Ale nelinearita znamená odchylku od úměrnosti: když například nakupujete ve velkém, pak když si koupíte devět beden pomerančů, jednu můžete dostat zdarma, čtyři zdarma dostanete za každých koupených šestnáct a tak dále. Průvodním jevem této nelinearity je zpětná vazba - výsledek nějakého jevu odstartuje další větší změny. V tomto případě velikost slevy ovlivňuje počet beden, které se možná rozhodnete koupit.

Tato zpětná vazba mezi jednotlivými prvky procesu - zde mezi cenou a nakupující osobou - často vede ke zcela neočekávanému

---

<sup>78</sup> Navierovy-Stokesovy rovnice se dají odvodit také z mikroskopické fyziky. Jejich odvození začíná Boltzmannovou rovnicí pro jednočásticovou distribuční funkci tekutiny. Řešení této rovnice Chapmanovou-Enskogovou metodou vede k Navierovým-Stokesovým rovnicím pro jednočásticovou distribuční funkci. Problém však spočívá v tom, že samotná Boltzmannova rovnice je pouze přiblížením k přesné kinetické rovnici.

chování. Je-li například sleva velmi vysoká, můžete se rozhodnout, že si založíte marmeládovou živnost. Zpětná vazba se vyskytuje ve dvou variantách. Zesilující účinek má pozitivní zpětná vazba: zesilující smyčka od mikrofonu k reproduktoru proměňuje šepot v ohlušující vytí. Dále je tu tlumící efekt negativní zpětné vazby. Králičí kolonie se může tak rychle množit, že vyčerpá všechnu dostupnou potravu, což povede k prudkému poklesu populace. V tekutině se kombinace účinků pozitivní a negativní zpětné vazby prolíná a vzájemně ovlivňuje, čímž se tvoří turbulentní zákruty, malé i velké víry.

Zatímco studovat lineární rovnice je docela jednoduché a často je lze řešit s použitím papíru, pera a současných matematických metod, pro nelineární rovnice to neplatí. Před příchodem počítačů mnoho lidí z nedostatku jiných prostředků hledalo popis nelineárních procesů cestou přibližného řešení - linearizovali je.<sup>79</sup> Taková lineární přiblížení jsou neudrživá, chybí jim to, co je pro nelineární systémy opravdu typické, to, co umožňuje, aby nastaly tak fascinující procesy, jako je turbulence. Abychom pojednali nelinearitu, musíme zdánlivě místo mozku napnout svaly: přímo dosazovat čísla do rovnic a výsledky získávat hrubou silou pro každou situaci zvlášť.

Von Neumann rozpoznal, že počítač se může stát v dynamice tekutin neocenitelným nástrojem pro výzkum komplexity. Kromě toho, že hrál klíčovou roli při zrození počítače, byl také průkopníkem a propagátorem jeho použití k numerickému řešení problémů, přičemž výsledky pak používal jako "heuristické" vodítko pro hlubší matematické bádání. Vymyslel hypotézu o rovnici, kterou zkoumal, pokusil se vyhmátnout některé rozhodující speciální situace, na řešení těchto případů použil počítač, porovnal hypotézu s výsledky, vytvořil novou hypotézu a začal znova dokola. Použití výpočetní techniky na podporu experimentálního přístupu odhalilo fyzikální a matematický řád ve zmatku dynamiky tekutin. Jak poznamenal: "Opravdu výkonné, velmi rychlé výpočetní prostředky nám mohou v oboru nelineárních parciálních diferenciálních rovnic, stejně jako v mnoha jiných oblastech, které jsou dnes náročné či zcela nedostupné, poskytnout heuristická vodítka, která jsou ve všech odvětvích matematiky potřebná k opravdovému pokroku."<sup>80</sup> Měl pravdu jako obvykle: lidé, kteří dnes pracují ve všech oblastech komplexity,

---

<sup>79</sup> Existují některé nelineární systémy, jako je Korteweg-deVriesova rovnice, popisující solitony, které dovolují přesné analytické řešení.

<sup>80</sup> J. von Neumann, *Theory of Self Reproducing Automata*, A. Burks (ed.) (University of Illinois Press, Urbana and London 1966), str. 4.

používají počítač jako experimentální nástroj k proniknutí do problému tam, kde neexistují žádné jiné schůdné cesty.

Ze byl von Neumann nakonec vtažen do vývoje ještě nedospělého elektronického počítače, bylo důsledkem náhodného setkání s matematikem Hermanem Goldstinem, armádním důstojníkem v Laboratoři balistických výzkumů,<sup>□</sup> k němuž došlo na konci léta 1944. Von Neumann se dozvěděl o existenci Elektronického Číslicového Integrátoru a Počítače<sup>□□</sup> neboli ENIACu, když čekal na vlak do Philadelphie. "Hovor se brzy stočil na mou práci," vzpomíná Goldstine. "Když se ukázalo, že se zabývám vývojem elektronického počítače schopného provést 333 násobení za sekundu, příjemně uvolněná atmosféra hovoru se změnila na cosi podobného ústní zkoušce na doktorát z matematiky." Goldstine rychle zařídil návštěvu na Moorově škole na Pensylvánské univerzitě na 7. srpna, takže von Neumann mohl pozorovat, jak postupuje práce na ENIACu, předmětu podkovovitého tvaru, který nakonec sestával z 17 468 elektronek, 70 000 odporů, 10 000 kondenzátorů, 1 500 relé a 6 000 přepínačů.<sup>81</sup>

ENIAC byl dokončen v listopadu 1945, téměř tři měsíce po japonské kapitulaci, která následovala po prvním použití jaderných zbraní. Rozpočet byl překročen o 200 procent a ENIAC se stal hvězdou reklamní kampaně americké armády, která nešetřila superlativy: "Měli byste vidět, jaké problémy ENIAC řeší! Hlavolamy, které by na papíře popsaly celou tuto stranu a ještě jednu stopu navíc ... sčítání, odčítání, násobení, dělení. Druhá odmocnina, třetí odmocnina, libovolná odmocnina. Tak se činí neuvěřitelně složitý systém obvodů, v němž pracuje 18 000 elektronek a který váží 30 tun!"<sup>82</sup>

Vážným nedostatkem jinak úspěšného ENIACu bylo to, že pro každý nový problém musel být "předráťován", což se dalo dělat jen velice pomalu. Von Neumann pomohl týmu z Moorovy školy vylepšit jejich nápady použité pro následníka ENIACu, Elektronický Počítač s Diskrétními Proměnnými,<sup>□</sup> a na jaře 1945 se nabídl, že sepiše analýzu jeho logického schématu.

---

<sup>□</sup> Ballistic Research Laboratory (pozn. překl.)

<sup>□□</sup> Electronic Numerical Integrator and Computer (pozn. překl.)

<sup>81</sup> ENIAC používal desítková, nikoli dvojková čísla. Přesto byl docela úspěšný. Jeho prvním úkolem bylo ve skutečnosti provést simulaci prvních návrhů vodíkové bomby.

<sup>82</sup> S. Augarten, Bit by Bit (George Allen & Unwin, London 1985), str. 129.

<sup>□</sup> Electronic Discrete Variable Computer (pozn. překl.)

Von Neumannův popis počátečního návrhu funkčního počítače, nazvaný "První náčrt zprávy o EDVACu", měl tak obrovský ohlas, že ovlivnil strukturu počítačů na další půl století.<sup>83</sup> Goldstine jej nazval nejdůležitějším dokumentem výpočetní techniky, neboť to byl první psaný náčrt ideje programu uchovávaného v paměti.

Říkalo se tam: "Zatímco se zdálo, že různé části této paměti musejí vykonávat funkce, které se poněkud liší svou povahou a značně svým účelem, je nicméně lákavé zabývat se pamětí jako jediným orgánem." Těmito slovy von Neumann zdůraznil myšlenku, že jak data, tak i strojové instrukce (počítačový program) by se měly ukládat v centrální paměti.

Nelze snad ani dostatečně ocenit význam umístění dat a instrukcí do téhož média. Umožňuje to rychle měnit funkce prováděné počítačem, a to tak, že se přepíší jeho strojové instrukce (software). Tato idea vyžadovala veliký myšlenkový skok, protože počítačovní vědci té doby považovali instrukce a data za věci odlišné povahy. Namísto obsluhy pomocí tlačítek, přepínačů a páček nebo dokonce prostřednictvím spojitě se měnících elektrických signálů, jak tomu bylo u tehdy již dostupných analogových počítačů, von Neumannův stroj jednoduše poslouchal strojové instrukce umístěné v paměti.

Stejně jako se na matematický algoritmus obvykle díváme tak, že probíhá postupně krok za krokem, von Neumann měl na mysli operace prováděné spíše postupně než souběžně.<sup>84</sup> Jeho počítač zpracovával dávky digitální informace jednu po druhé. Von Neumannova metoda programování ukládáním do paměti tedy vůbec není elektronickou analogií lidského mozku, kde (jak uvidíme později) probíhá spousta různých výpočetních úkolů najednou. Nicméně většina dnešních výpočetních zařízení sdílí společnou architekturu, odvozenou z práce von Neumanna.

---

<sup>83</sup> Tato zpráva se stala ohniskem sporu o to, kdo si zaslouží být považován za vynálezce. Na jedné straně byli Goldstine a von Neumann, na druhé Eckert a Mauchly.

Ve hře byla patentová práva na ideje použité v EDVACu. Federální soud rozhodl, že rozšířením náčrtu zprávy roku 1945 se to stalo veřejně přístupným objevem, což diskvalifikuje patentovou přihlášku podanou Eckertem a Mauchlym v roce 1947. (ff. Goldstine, *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton University Press 1972), Eckert a Mauchly rezignovali 31. března 1946 a projekt EDVAC byl postupně zastaven.

<sup>84</sup> Od paralelní architektury jej odvrátila špatná zkušenost s tehdejšími stroji firmy IBM (W. Aspray, *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*, MIT Press, Cambridge, MA 1990, str. 20).

Když se válka chýlila ke konci, Spojené státy pozvaly britské vědce, aby se podívali na ENIAC. Prvním příchozím byl J. R. Womersley, superintendant Matematického oddělení v Národní fyzikální laboratoři (NPL) patřící britské vládě. Vzápětí po brífinku a poté, co dostal von Neumannovu zprávu, se dal do organizování počítačového projektu. První vědec, kterého získal, byl Alan Turing, který znal lépe než kdokoli jiný všechny možnosti počítače. Univerzální stroj, který deset let předtím předpověděl, se dal programovat, takže bylo možné vyhovět jakémukoli nároku bez nutnosti měnit hardware. V tomto rozhodujícím ohledu byl Turing o několik let napřed před všemi ostatními. Roku 1945 napsal: "Rozhodně nebude třeba dělat žádné vnitřní změny, když si budeme náhle přát přejít od výpočtu energetických hladin atomu neonu k výčtu všech grup řádu 720."

Alan Turing prostudoval von Neumannův článek o EDVACu a pak napsal svůj vlastní. Do konce roku 1945 pak vyhotovil obsažný plán velkého počítače zvaného Automatický počítač <sup>□</sup> (ACE). Jméno, vytvořené Womersleyem, bylo poklonou Babbageovi. Neobyčejné důsledky tohoto projektu formuloval o tři roky později Turing v jiné zprávě pro NPL s působivým názvem Inteligentní mechanismy. <sup>□□85</sup> V tomto článku a v přednášce pro Londýnskou matematickou společnost pronesené 20. února 1947 bylo ústřední Turingovou tezí to, že na samotný mozek je třeba se dívat jako na počítač. I když během těchto raných stadií vývoje se počítač samozřejmě musel spoléhat na člověka, že jej naprogramuje, aby prováděl instrukce. Turing předvídal možnost, že se jeho stroj bude učit nějakou formou výcviku pod vedením trenéra, podobně jako se ve škole žáci učí od svého učitele. Viděl dopředu, jak se počítače mohou poučit ze zkušenosti, a pomocí darwinovské analogie ukazoval, jak stroje mohou probádat řešení problémů tím, že budou napodobovat způsob, jakým příroda kombinuje geny, aby zvýšila šanci na přežití. Zdůraznil, že "lidský matematik vždy podstupuje masivní školení. Na toto školení se můžeme dívat jako na něco ne nepodobného vkládání tabulek instrukcí (programů) do stroje. Nedá se tedy očekávat, že by si stroj sestavil mnoho svých vlastních instrukčních tabulek. Žádný člověk nepřidává příliš mnoho k objemu

---

<sup>□</sup> Automatic Computing Engine (pozn. překl.)

<sup>□□</sup> Intelligent Machinery (pozn. překl.)

<sup>85</sup> Na Turingovu práci sedal prach v archivech NPL. Nakonec byla publikována až roku 1969. Podobně jako Turingova přednáška v podobném duchu v Londýnské matematické společnosti 20. února 1947, byla přijata s rozpačitou nedůvěrou.

znalostí. Proč bychom měli čekat více od stroje? Máme-li to říci jinak, stroji se musí povolit kontakt s lidskými bytostmi, aby se mohl přizpůsobit jejich standardům."

Turing neviděl žádný důvod, proč by nakonec stroj nemohl získat inteligenci. Argumentoval tím, že Gödelovy věty a jeho vlastní odpověď na Hilbertův Entscheidungsproblem byly pro tento problém irelevantní, protože inteligentní stroje prokazující "iniciativu" by neprováděly otrocky a neomylně předem naprogramované instrukce. Jeho oddanost konečnému cíli umělé inteligence se projevila v dopise, který napsal jednomu neurofyziologovi: "Při práci na ACE se zajímám více o možnost vytvořit modely fungování mozku než o praktické aplikace výpočetní techniky."

Bohužel ACE měl malou naději, že vyplní Turingovu původní vizi, natožpak sen, který načrtl v Intelligentních mechanismech. K dosažení čehokoli, co by stálo za řeč, byl nezbytný silný tým, v němž by matematikové spolupracovali s elektroinženýry. Jelikož už pominuly naléhavé válečné potřeby, které poháněly Turingovu práci na dešifrování, projekt ACE uvízl na byrokratické netečnosti a nepochopení. Byla postavena zmenšená verze, ale než byl "pilot ACE" uveden do chodu, odešel Turing na univerzitu v Manchesteru, kde se zabýval slibnějšími věcmi pod vedením svého bývalého učitele a kolegy z Cambridge Maxe Newmana.

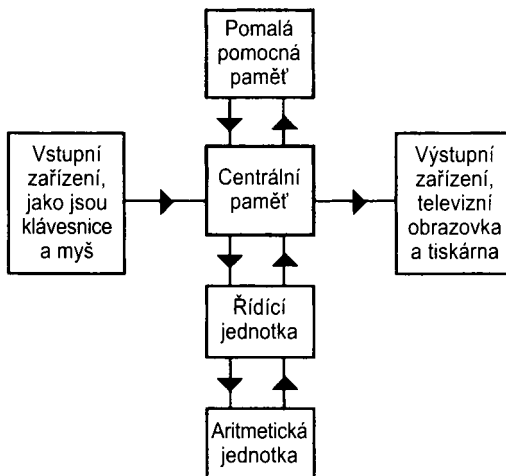
Von Neumann svou zprávou o EDVACu ukázal, kudy je třeba se vydat, stavba stroje však trvala do roku 1952. Největší překážkou bylo ukládání programových instrukcí. Na základě myšlenky svého hlavního inženýra Freddieho Williamse se skupina na univerzitě v Manchesteru rozhodla použít pro ukládání informace ve formě bodů tři katodové trubice, podobné oněm lahvicovitým elektronkám v obrazovkách radarů nebo v dnešních televizorech. Tím se obešli bez nákladného zařízení vyrobeného na zakázku. 21.června 1948 manchesterská skupina připravila a nechala proběhnout zkušební program, což znamenalo zrození prvního elektronického stroje s číslicově uloženým programem, manchesterského Mark 1. V květnu příštího roku jiný z bývalých Turingových kolegů z Cambridge, Maurice Wilkes, vedoucí Univerzitní matematické laboratoře v Cambridge, spustil Elektronický Automatický Kalkulátor se Zadržanou Pamětí,<sup>□</sup> první stroj s programem uloženým v paměti, který byl schopen provádět užitečnou práci. Kolem něj vybudoval Wilkes první výpočetní středisko.

---

<sup>□</sup> Electronic Delay Storage Automatic Calculator (pozn. překl.)

# Von Neumannův odkaz

Většina lidí používajících počítače má sotva čas starat se o to, jak fungují. Jejich detailní architektura se může měnit od výrobce k výrobci, ačkoli většinou jsou v jádru von Neumannovými stroji (viz obr. 3.4).



Obrázek 3.4 / Von Neumannova architektura počítače - schéma sériového stroje.

Tyto počítače dostávají své instrukce a data ze vstupního zařízení, jako jsou klávesnice nebo magnetický disk. Tato data se pak ukládají v paměti počítače. Jednotka informace se nazývá bit, tj. binární číslice,<sup>□</sup> tedy buď 0, nebo 1, zapnuto nebo vypnuto (odtud termín "číslicový"); jeden byte je definován jako osm bitů informace.

Veškerá informace je uložena na určitých adresách v paměti, jakoby ve schránkách na poštovním úřadě. Přemístování dat a aritmetické operace s čísly provádí centrální výpočetní jednotka<sup>□□</sup> (CPU), která v rytmu hodin provádí instrukce ve svých podjednotkách, aritmetické a logické. Když počítačový program požaduje nějaká data, CPU je postupně najde, vybere a zpracuje a až potom sáhne po další dávce. Poštovní zřízenec CPU poslušně provádí jeden úkon za druhým neboli sériově; proto se tomu říká "sériové" zpracování. Funguje to na výbornou pro "bezduché" numerické úlohy, ale kdyby tak pracoval von

□ Binary digit. Zkrácením vzniklo slovo bit (pozn. překl.)

□□ Central Processing Unit (pozn. překl.)

Neumannův mozek, nikdy by nebyl navrhl počítačovou architekturu nesoucí jeho jméno.

Počítačový programátor píše program tak, že nejprve sestaví algoritmus, který představuje postup řešení problému, o nějž jde, jak jsme se o tom zmínili v 2. kapitole. Algoritmus je pak zakódován do vhodného programovacího jazyka, který počítači umožní porozumět instrukcím a úspěšně je vykonat. Obvykle to vyžaduje některý z "vyšších" programovacích jazyků, nazývaných tak proto, že jsou dostatečně blízké lidskému jazyku a nevyžadují vysoce specializované programátory.<sup>86</sup>

Jelikož CPU se skládá ze souboru booleovských logických obvodů, dokáže provádět jen základní aritmetické operace, jako jsou sčítání, odčítání, násobení atd. Nejprve tedy musíme pomocí "kompilátoru" přeložit původní program vkládaný do počítače z programovacího jazyka do stroji srozumitelného jazyka assembleru,<sup>□</sup> který užívá základní řetězce bitů a aritmetické operace, kterým počítač rozumí.<sup>87</sup>

---

<sup>86</sup> Prvním populárním jazykem byl Fortran (FORmula TRANslator), navržený u IBM týmem vedeným matematikem Johnem Backusem. Objevilo se pak mnoho dalších, jako Basic (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Co-de) a Algol (ALGOrithmic Language). Většina lidí programujících počítače používá takzvané vyšší programovací jazyky, například Fortran, C nebo Pascal. V nich se píše poměrně snadno, pouze s použitím ASCII znaků. Tyto programy však nemohou běžet, dokud nejsou převedeny do strojového kódu kompilátorem; strojový kód je přímo interpretován centrální výpočetní jednotkou počítače. Strojový kód lze kompilovat z assembleru: skutečně zapálení hackeři píšou své programy v assembleru, protože pak běží mnohem rychleji než kód napsaný v kterémkoli vyšším programovacím jazyce. Jedním příkladem programu napsaného v assembleru, o němž budeme mluvit později, je Tierra Torna Raye (viz kapitolu 8).

Pozn. překl.: Dnes se čím dál více rozšiřuje tzv. vizuální programování, které představuje téměř stejně velké usnadnění práce jako kdysi zavedení Fortranu. Jde o to, že programátor značnou část programu ve skutečnosti nepíše, ale tvoří jej klikáním myši a přenášením jednotlivých prvků aplikace myší z menu na pracovní plochu. (Příklady jsou Visual Basic, Visual C++ nebo Delphi.)

□ Česky se mu většinou říká jednoduše „assembler“, i když přísně vzato assembler je systémový program, který slouží ke zpracování uživatelských programů napsaných v jazyce assembleru, (pozn. překl.)

<sup>87</sup> Vývoj kompilátoru sestaveného Backusem a jeho kolegy trval tři a půl roku, skládal se z 25 000 řádků assembleru a, jako každý průkopnický čin, obsahoval mnoho chyb. S. Augarten, Bit by Bit (George Allen London 1985), str. 216.





Obrázek 3.5 / Průchozí počítač. Jednou z možností, jak se seznámit s detaily toho, co se děje uvnitř počítačů, je navštívit Průchozí počítač, expozici v bývalém skladišti na nábřeží v Bostonu, kde sídlí jediné muzeum na světě plně věnované počítačům. Průchozí počítač stál kolem 1,2 milionu dolarů, má výšku dvoupatrové budovy, a je tedy padesátkrát větší než běžný stolní počítač. Je v něm také největší mikročip na světě, s rozměry čtverce o straně dva a čtvrt metru. Je to dítko Olivera Strimpela, výkonného ředitele, a byl otevřen v červnu 1990. Ukazuje návštěvníkům funkci počítače způsobem, který nikoho neodradí. Zatímco chodíte vnitřkem počítače, kolem visících pásů kabelů, vidíte, jak zpomaleně funguje, od vrčení obrovského rotujícího disku, při načítání uložených dat, po zběsilou elektrickou aktivitu v řadách čipů. Když se podíváte skrz okénko v čipu, uvidíte zvětšený obrázek skutečného elektronického obvodu vyleptaného v křemíku. Obrázek se vytratí a jeho místo zaujme počítačová grafika, ukazující krok za krokem, jak čip pracuje, od vyvolání dat uložených v paměti po jejich promítnutí na monitor.

## Od flopů k teraflopům

Během posledního půlstoletí vzrostla rychlost počítačů více než bilionkrát. Počínaje obdobím přibližně mezi lety 1940 až 1955 byly elektronickými přepínači, které manipulovaly a zpracovávaly data v počítačích, skleněné vakuové lampy, elektronky,<sup>□</sup> které vypadaly trochu jako žárovky, a se svými pány komunikovaly prostřednictvím děrných

<sup>□</sup> Úplně první elektronické číslicové počítače ve skutečnosti používaly relé. Použil je Konrád Zuse v Německu, Howard Aiken v USA i Antonín Svoboda v prvním československém počítači SAPO 1. (pozn. překl.)

štítků a papírové pásky. Dalších pět let bylo svědkem zavedení jednak tranzistorů, které byly vyvinuty v Bellových laboratořích, měly velikost hrášku a nahradily elektronky, jednak feritové operační paměti, a dále nových způsobů ukládání informace, jako jsou magnetické bubny<sup>□□</sup> a disky. Roku 1959 Jack St.Clair Kilby z firmy Texas Instruments vynalezl integrovaný obvod (IO).<sup>□□□</sup> Ve své patentové přihlášce prohlásil, že nyní je možné "dosáhnout hustoty elektronických prvků vyšší než třicet milionů na kubickou stopu, ve srovnání s pěti sty tisíci na kubickou stopu, což je nejvyšší hustota prvků dosažená před tímto vynálezem". První počítače s IO se začaly objevovat v polovině 60.let 20. století. Marcian Hoff z firmy Intel se stal na začátku dalšího desetiletí průkopníkem myšlenky umístit počítač na jeden čip. Zrodil se mikroprocesor, zařízení, které se stalo univerzálním motorem elektroniky, ať jsou to počítače, váhy nebo domovní zvonky.

Výsledkem Hoffova instinktu byl intelovský čip 4004, obsahující 2 250 tranzistorů schopných zpracovat současně čtyři bity informace rychlostí 60 000 operací za vteřinu. Pak následoval čip 8008 a roku 1973 první populární mikroprocesor Intel 8080, který prováděl osmibitové operace s použitím prvků směstnaných na plochu 0,1×0,2 palce. To vytvořilo základ pro revoluci, kterou bylo zavedení osobních počítačů. Trend umísťovat na čip více prvků pokračoval technologií velmi vysoké integrace<sup>□</sup> neboli VLSI, kde máme na jediném čipu 10 000 i více logických hradel. Tato integrace urychlila rozvoj pokročilého materiálového výzkumu a elektroinženýrských technik, zaměřených na řízenou depozici elektronických obvodů v miniaturních měřících.<sup>88</sup>

Zhruba asi tak každých osmnáct měsíců se objevují mikroprocesory, které pracují dvakrát rychleji než jejich předchůdci. Pro většinu vědeckých výpočtů byly tradiční těžkopádné sálové počítače vytlačeny stolními pracovními stanicemi. Dnes je možné, abyste měli na pracovním stole počítač mnohem výkonnější než sálové počítače ze 70.

---

□□ Magnetická bubnová paměť pracovala na zcela stejném principu jako dnešní disky a diskety, jen místo tvaru plochého disku měla tvar válce otáčejícího se kolem své osy. Viz H. L. Schrader, Osmý den stvoření. Odeon, Praha, 1967. (pozn. překl.)

□□□ Za vynález integrovaného obvodu dostal v roce 2000 Nobelovu cenu. (pozn. překl.)

□ Very Large Scale Integration (pozn. překl.)

<sup>88</sup> Jednou z nejdůležitějších technik je molekulární epitaxe (molecular-beam epitaxy, MBE). V komoře s velmi vysokým vakuem se deponují atomové vrstvy o tloušťce pouhých dvou angstrómů na polovodičový podklad pomocí proudění z připojených odpařovacích komůrek.

a začátku 80. let, o které se museli dělit zaměstnanci celé firmy nebo vědci ve výzkumné laboratoři. Průkopníkem tohoto nového trendu byla společnost Sun Microsystems a starší firmy, jako IBM, DEC a Hewlett-Packard, se musely přidat. Kromě toho se vývoj ubíral ještě jinou cestou, totiž ke konstrukci "superpočítačů", navržených tak, aby byly podstatně větší a rychlejší než obvyklé sálové počítače. Vstoupili jsme nyní do éry "teraflopových" strojů, takových, které dokážou provést bilion operací s reálnými čísly za vteřinu. □

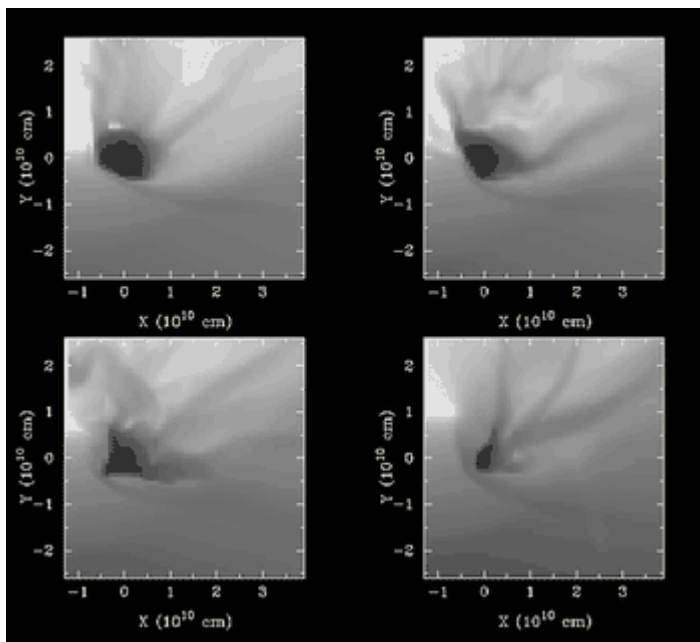
## Čas turbulence

Navzdory ohromujícímu pokroku během padesáti let, která uplynula od von Neumannova vizionářského díla, realistická simulace turbulentního proudění tekutin pořád značně přesahuje možnosti dnešních počítačů. Zdokonalení našeho chápání turbulence zůstává význačným fundamentálním problémem moderní vědy. Principiální překážka, kterou musíme překonat, je modelování nesmírné komplexity turbulentních struktur, kde chování tekutiny na těch nejmenších délkových měřítkách má dramatický dopad na velkých vzdálenostech. Jak jsme již viděli, Navierovy-Stokesovy rovnice popisují proudění spojité tekutiny. Číslicové počítače jsou však svou podstatou nespojitě, takže vždy řeší tyto rovnice jen přibližně, a to tak, že rozparcelují prostor a čas do jakési mřížky a berou v úvahu jen chování tekutiny v bodech této mřížky. Vědce zabývajícího se výpočtem dynamiky tekutin to staví před následující dilema: pokud rozdělí prostor příliš jemně, bude čas potřebný k získání výsledků přesahovat dané možnosti, neboť je třeba brát v úvahu velmi mnoho bodů. Pokud ale nastaví příliš hrubé měřítko, pak přehlédne důležité detaily, které ovlivňují chování tekutiny, například různé vírové struktury. Čas, který zabere simulace tekutiny, totiž roste s vysokou mocninou Reynoldsova čísla, které měří tendenci kapaliny k divokým projevům turbulence. Při dostatečně vysokých hodnotách Reynoldsova čísla se proudění stává turbulentním a řešení Navierových-Stokesových rovnic bude pořádný oříšek.<sup>89</sup> I když

□ Dnes se prosazuje ještě jiný trend: místo speciálního superpočítače se nakoupí několik desítek nebo i stovek běžných stolních počítačů, které se zapojí paralelně tak, že mohou společně počítat jednu velkou úlohu. (pozn. překl.)

<sup>89</sup> Bezrozměrné Reynoldsovo číslo je definováno jako poměr inerciálních sil k vazkosti: čím slabší viskozita, tím větší je sklon k turbulenci. Při hodnotách Reynoldsova čísla řádově 100 je tok obvykle laminární; při hodnotách řádu 1 000 000 je v toku plně vyvinutá turbulence; hodnoty mezi těmito krajnostmi znamenají přechodný režim mezi těmito

se technicky řečeno nejedná o nezládnutelný (NP) problém, pro žádnou úlohu rozumné velikosti nelze na žádném stávajícím počítači uvažovat Reynoldsovo číslo větší než kolem 10 000, což je hodnota odpovídající jen počátečnímu stadiu turbulence a k její rozvinuté podobě nedosahuje.



Obrázek 3.6 / Kosmická srážka.  
Počítačová simulace účinku srážky komety Shoemaker Levy s Jupiterem.

Pokrok v řešení tohoto problému, ať už prostřednictvím důmyslnější analýzy nebo, což je pravděpodobnější, pomocí výkonnějších počítačů, přinese bezprostřední a velmi praktický užitek, protože o dynamiku tekutin se opírá velká část moderního inženýrství a technologie. Používáme ji při modelování proudění vzduchu kolem auta, tekutého sodíku žhavým srdcem jaderného reaktoru a vody kolem plížíci se ponorky. Opírá se o ni meteorologie, když předpovídá počasí, a to nejen na zeměkouli.

Skupina vědců z MIT předpověděla vznik vln v atmosféře Jupiteru v důsledku srážky s kometou Shoemaker Levy 9 tři měsíce předtím, než v červnu 1994 skutečně došlo k dopadu. Kruh šířící se rychlostí kolem

---

dvěma stavy - počátek turbulentního pohybu.

454 metrů za sekundu (plus minus 20 metrů) byl opravdu pozorován v okolí míst nejsilnějších nárazů. Předpovězená rychlost byla 400 metrů za sekundu. Jiný počítačový model lépe vysvětlil ostrou strukturu pozorovaných kruhů, udával ale špatnou rychlost. Srovnáním předpovědí se skutečností můžeme získat cenné poznatky o struktuře atmosféry Jupitera.

Turbulence se považuje za jednu z "velkých výzev" současné výpočetní techniky vysokého výkonu, vedle takových ezoterických problémů, jako jsou globální struktura vesmíru a ve fyzice elementárních částic kalibrační teorie na mřížce. Snaha vyrovnat se s takovými problémy je mocnou pobídkou pokroku. "Rychlost a hustota elektronických komponent se za poslední půlstoletí znásobila více než 105 krát," říkají odborníci na počítačovou dynamiku tekutin Karniadakis a Orszag. "Tento vývoj nemá obdoby v jiných oblastech lidské činnosti. Kdyby se podobně vylepšily automobily, prodával by se dnes cadillac za méně než jeden cent nebo by jeho nejvyšší dosažitelná rychlost o 1 % přesahovala rychlost světla nebo by jeden galon benzínu stačil asi tak na deset výletů na Měsíc. Navzdory těmto pozoruhodným úspěchům počítačové elektroniky existují (a velmi pravděpodobně budou existovat i nadále) aplikace představující velké výzvy."<sup>90</sup>

Jak těžkým problémem je dynamika tekutin, můžeme snadno ilustrovat použitím základních jednotek strojové rychlosti zvaných flopy (počet operací s reálnými čísly za sekundu).<sup>□</sup> Výpočet středního rozsahu, který dnes trvá pět hodin na Crayi YMP běžícím rychlostí 200 milionů flopů (200 megaflopů), by vyžadoval osmadvacet let na osobním počítači Apple Macintosh o rychlosti 0,004 megaflopů, kdežto na teraflopovém (milion milionů flopů) stroji by trval méně než čtyři sekundy. Podobně řešení problému aerodynamického proudění, o němž se předpokládá, že zabere kolem dvou týdnů na teraflopovém počítači, by na Crayi YMP trvalo několik staletí a na Apple Macintosh tisíciletí.

Rozvoj počítačové architektury, návrhu čipů, počítačové logiky a dokonce i proměny základní fyzikální podstaty a prostředí výpočetní techniky výrazně urychlí postup výzkumu, poněvadž umožní detailněji zvládat rozsáhlejší numerické problémy. Dnes naše nejvýkonnější počítače běžně zpracovávají data a provádějí simulace rychlostí miliardy flopů. Během příštích pěti let budeme svědky zavádění mnoha teraflopových počítačů. Mezi mnoha jinými úkoly budou schopné řešit

<sup>90</sup> G. Karniadakis a S. A. Orszag, Physics Today, březen 1993, str. 42.

<sup>□</sup> Floating point operations. Zkrácením vzniklo flop. (pozn. překl.)

Navierovy-Stokesovy rovnice pro proudění vzduchu podél celého letadla při mírných i vysokých hodnotách Reynoldsova čísla, kde začíná turbulence. Tímto způsobem bude možné poslat prototyp osobního letounu na cestu v počítači, aniž bychom potřebovali testování v aerodynamickém tunelu.<sup>91</sup>

## Architektury

Spojte pár tisíc elektronických obvodů na plátku křemíku a máte mikroprocesor - čip, který je dnes srdcem každého konvenčního von Neumannova počítače. Protože každý jednotlivý procesor dokáže provádět jen jednu činnost v jednom okamžiku, má jeho pracovní rychlost nepřekročitelné fyzikální meze. Takzvané skalární zpracování vyžaduje, aby počítač dokončil jeden úkol, než může přejít k následujícímu. Zatímco jedna operace postupuje aritmetickými funkčními jednotkami v CPU, většina jeho elektronických obvodů nečinně čeká. To vede k von Neumannově "úzkému profilu", k omezení, které téměř od počátku povzbuzovalo hledání alternativních počítačových architektur.

Jeden z prvních zásadních kroků vpřed vzešel z práce Seymoura Craye, který roku 1971 založil firmu Cray Research. Na svém superpočítači Cray-1, uvedeném roku 1976, byl schopen dosáhnout podstatně vyššího výkonu tím, že částečně opustil dlouhou uctívanou von Neumannovu architekturu. Cray-1 používal zřetězené vektorové zpracování<sup>□</sup> které umožňuje, aby následná aritmetická operace mohla být započata bezprostředně po předcházející, aniž by se čekalo, až provádění prvního výpočtu skončí.<sup>□□</sup> Takto se dosáhne dramatického zvýšení rychlosti.

Jiná inovace v architektuře počítačů spatřila světlo světa na univerzitě v Illinois, kde od roku 1949 působil tým, který zkonstruoval

---

<sup>91</sup> Odhady založené na Kolmogorovově škálovacím argumentu naznačují, že přímá numerická simulace proudění vzduchu kolem celého letounu by vyžadovalo počítač s rychlostí nejméně exaflopu (1018, tedy miliónkrát více než nejrychlejší dnešní stroje). Je tedy před námi ještě dlouhá cesta.

<sup>□</sup> Zřetězení (pipeline) a vektorové zpracování (vector processing) jsou ve skutečnosti dvě zcela rozdílné a na sobě nezávislé techniky pro urychlení výpočtu. Některé architektury mohou používat jen zřetězení a zůstat přitom skalární, jiné mohou být vektorové bez zřetězení. Cray používá obě dvě. (pozn. překl.)

<sup>□□</sup> Takto funguje zřetězení. Naproti tomu vektorové zpracování spočívá v provedení téže operace současně s celým souborem (vektorem) čísel. (pozn. překl.)

ILLIAC I, počítač založený na von Neumannově EDVACu. Dvě desítky let poté zkonstruoval tým vedený Danem Slotnickem ILLIAC IV, který se stal prvním masivně paralelním počítačem. Na rozdíl od jediné vektorové jednotky počítače Cray-1, ILLIAC IV obsahoval čtyřiašedesát identických skalárních počítačů, které pracovaly souběžně, každý se svým vlastním procesorem a pamětí. To, co je na paralelismu nejpřitažlivější, odzbrojuje svou jednoduchostí: dva procesory by měly udělat práci dvakrát rychleji než jeden. Počet procesorů, které může obsahovat jeden počítač, není nijak omezený, takže se na první pohled zdá, že rychlost, kterou může jednotlivý počítač pracovat, není ničím omezená.

Paralelní výpočty fascinovaly konstruktéry počítačů už od von Neumannových dob. Předtím však nemělo smysl stavět paralelní počítač, poněvadž jediný procesor se dovedl s problémem vypořádat se stejnými náklady či ještě levněji. Mezi lety 1950 a 1965 se elektronika vylepšovala tak rychle, že výrobci počítačů dokázali vybičovat výkon svého zboží na více než tisícinásobek, aniž by paralelní zpracování dat vůbec potřebovali. ILLIAC IV zřejmě předstihl svou dobu a stál víc než 100 milionů dolarů v cenách roku 1990. Ale od začátku 80. let začínalo paralelní zpracování vypadat technicky i ekonomicky přitažlivě. Do roku 1986 vyráběly paralelní superpočítače dva tucty společností, ve snaze vyhovět potřebám malého, ale lukrativního trhu vysoce výkonné výpočetní techniky. Rychlík počítačové módy se dal do pohybu.

Pravděpodobně nejnáročnější úlohou při konstrukci paralelního počítače je zajistit, aby pracoval synchronně, tedy aby všechny procesory spolu ladily. Toho lze dosáhnout tím, že se jeden procesor vybere jakožto "dirigent" orchestru procesorů, a tím se zabezpečí, že budou provádět souběžně tentýž úkon na různých datech ve svých lokálních pamětech. Počítačovní odborníci nazývají tento přístup SIMD (jedna instrukce, mnohonásobná data).<sup>□</sup> Například jestliže počítač s paralelními daty má vypočítat číslo  $d = (x_2 + y_2 + z_2) / 2$  pro mnoho různých objektů, může si uložit souřadnice (x,y,z) každého objektu v jiném procesoru. Každý procesor pak bude umocňovat na druhou, sčítat a počítat druhou odmocninu se svými vlastními hodnotami. Počítač typu SIMD tak produkuje tolik výsledků, kolik má procesorů, za stejnou dobu, kterou obyčejnému počítači zabere získání jediného výsledku.

Jedním příkladem takového počítače byla první Connection Machine firmy Thinking Machine Corporation, černá krychle o straně jeden a půl

---

<sup>□</sup> Single instruction, multiple data (pozn. překl.)

metru posetá mrkajícími červenými světýlky. Cílem zakladatele firmy Dannyho Hillise bylo vytvořit tak dokonalý počítač, "aby na mě mohl být hrdý". Aby zdůraznil schopnosti 65 536 poměrně jednoduchých procesorů obsažených v Connection Machine, Hillis uváděl jako příklad mozek, který dokáže překonat výkon superpočítače, přestože používá neurony, jež jsou mnohem pomalejší než tranzistory. Tajemstvím je paralelismus. Když například počítač tvoří obrázek z mřížky 256 krát 256 bodů, pak jediná operace zpracování obrazu trvá na konvenčním stroji 65 536 kroků. "Naproti tomu Connection Machine přiřadí jeden procesor každému bodu obrázku. Jelikož každá operace se dá provést na všech bodech současně, výpočet zahrnující celý obrázek je stejně rychlý jako výpočet zahrnující jen jediný bod."<sup>92</sup>

Alternativní přístup, známý jako MIMD (mnohonásobné instrukce, mnohonásobná data),<sup>□</sup> dovoluje různým procesorům zaútočit v tentýž okamžik na různé části celého úkolu. Program jednoho procesoru může být docela jiný než ty, které vykonávají jeho sousedi. V architektuře MIMD se velká část předávání signálů odehrává mezi procesory kvůli zabezpečení výměny dat a instrukcí týkajících se toho, jak daleko každý z procesorů postoupil, což je nutné kvůli zajištění synchronizace. Tuto architekturu mají masivně paralelní stroje od Intelu a nCube.

Obě architektury, SIMD i MIMD, mají své výhody a nevýhody. Například u SIMD je často možné najít mnoho procesorů, které nečinně zahálejí, a jenom několik z nich provádí instrukce, což zpomaluje celkový výkon programu. U MIMD musíme programovat každý procesor zvlášť, čímž potenciálně nesmírně zvyšujeme složitost programování, když používáme velké množství procesorů.<sup>93</sup> Oba přístupy čelí zásadnějšímu problému. Uvažme pro srovnání následující dva příklady. Předpokládejme, že jednomu samostatně pracujícímu člověku trvá měsíc postavit jeden dům; bude mu tedy trvat rok, než postaví tucet domů. Dvanáctičlenná skupina však dosáhne téhož výsledku za měsíc. Naproti tomu, když jedné ženě trvá devět měsíců donosit a porodit dítě, neplyne z toho, že devět žen dokáže

---

<sup>92</sup> D. Hillis, Scientific American 256, 108 (1987).

<sup>□</sup> Multiple instructions, multiple data (pozn. překl.)

<sup>93</sup> Poslední verze Connection Machine, postavená u firmy Thinking Machines Corporation, nesoucí označení CM-5, dosáhla sblížení mezi architekturami SIMD a MIMD a používala speciální „datově paralelní“ programovací jazyk, takzvaný CM-Fortran, který byl vysoce optimalizován k urychlení práce tohoto stroje. Poskytuje velice přirozené prostředí pro běh simulací s celulárními automaty (viz kapitolu 4).



vyprodukovat jedno dítě za měsíc: morfologický rozvoj a růst jsou svou podstatou sekvenční procesy. Paradox těhotenství ukazuje, že některé úlohy nelze urychlit rozdělením práce, na což už přišli i konstruktéři paralelních počítačů.

Paralelní stroj může být teoreticky schopný vypořádat se s tisíci rozdílnými úlohami, ale skutečnost může přinést zklamání. Vše závisí na vnitřní komunikaci mezi procesory. "V našich Connection Machines máme doslova miliardy aktivních součástí," říká Danny Hillis. "Všechny musejí správně spolupracovat, jinak stroj nebude fungovat." Když jeden procesor potřebuje výsledek druhého, musí hovořit se svými kolegy, aby zjistil, kdy bude výsledek hotov a kde ho najde. Dialog procesorů je součástí jejich výpočtů. Máme-li na starost jen hrstku procesorů, je dost snadné rozdělit mezi ně práci, takže byrokratické tlachání je minimální. Avšak jak počet procesorů vzrůstá, klábosení se mění v rámus, jak procesory tráví více času tím, že si sdělují, jak jsou daleko s daným úkolem, než jeho řešením. Kromě problému s kakofonií mají paralelní stroje problémy s pamětí. Když je k nějakému úkolu potřeba informace, procesor si ji vyžádá. Když se tisíce procesorů dožadují pozornosti, stroj běží neuvěřitelně pomalu.

Všechny tyto problémy jsou aspekty tzv. Amdahlova zákona. Byl pojmenován po Genu Amdahlovi, který v roce 1967 tvrdil, že pokrok dosažený přidáváním dalších procesorů je limitován tím, že se nakonec vytvoří "úzká hrdla". Jestliže nasazujeme více a více procesorů na problém fixní velikosti, skutečně to tak nevyhnutelně dopadne. Tento princip se však ukázal jako nepřesný, pokud měníme počet procesorů úměrně velikosti pracovní zátěže, protože potom rychlost vzrůstá téměř tolik, kolik činí teoretický limit. To vedlo k pojmu škálovatelnosti. Škálování spočívá v tom, že zvětšujeme počet jednoduchých procesorů, například propojením několika stolních pracovních stanic, jen tehdy a takovým způsobem, jak si to problém vyžaduje, přičemž samotný software se nijak nemění. Tento pojem je potenciálně velmi praktický, protože se dá použít k dynamické a nepřiliš nákladné tvorbě superpočítačových zařízení šitých na míru s použitím souboru stolních počítačů.

## Odhad RISCu

Výpočetní technika v posledních letech zažila i jinou revoluci, která od základu změnila návrh čipů. Od vynálezu mikroprocesoru fungovaly

jako mozky stále výkonnějších počítačů přebujelé čipy. Složitost obvyklých čipů soutěží se složitostí infrastruktury většího města a nabízí programátorům pro sestavování jejich softwaru mnoho tisíc různých instrukcí.

Soubor instrukcí je podstatnou složkou operačního systému počítače. Je formulován v assembleru a posílá příkazy přímo do mikroprocesoru počítače. Některé instrukce provádějí tak jednoduché úkoly, jako je přesun informace z paměti do registru, kde se dá použít k matematickým výpočtům. Zkušenost však říká, že asi 10 procent instrukcí čipu vykoná nejméně 90 procent práce. Již v šedesátých letech začali výrobci přemýšlet o tom, že věnují více výkonu křemíkového plátku numericky intenzivním úlohám a roku 1971 si tým IBM vedený Johnem Cockem uvědomil, že do hardwaru se musí zabudovat jen malá část úplné sady instrukcí: nablýskané příslušenství, které snižuje výkon, se dá přenést do softwaru. Tak se zrodil počítač s redukovanou sadou instrukcí<sup>□</sup> (RISC).

Debatu mezi počítačovými architekturami, která následovala, brzdil nedostatek opravdového srovnání mezi RISCy a konvenčními CISCy (počítači s úplnou sadou instrukcí).<sup>□</sup> Během posledního desetiletí se však RISCy postupně ujaly v pracovních stanicích vyvinutých u IBM, zejména v rodině RS/6000, a v počítačích firem Hewlett-Packard a Sun Microsystems. Redukováním zbytečných příkras a zkrácením času potřebného k překladu komplikovaných instrukcí na jednodušší se staly RISCové stroje mnohokrát rychlejšími než konvenční počítače. Jednoduchost skýtá i další výhody. Vystačí se s méně obvody, takže RISCový procesor je snazší navrhnout a jeho komponenty mohou být blíž u sebe, což ještě více zvyšuje rychlost. Také vnitřní hodiny, které udržují různé části čipu v unisonu, mohou na RISCových strojích běžet rychleji.

Jsou tu ale i nevýhody. Pro uživatele počítačů je nejdůležitější, zda na stroji může běžet jejich software, neboť dodatečné náklady měřené časem nezbytným k napsání programu jsou vysoké. Musí tedy RISCový čip vypadat ve stávajícím softwaru tak jako jeho baroknější protějšek. Z toho plyne, že RISCové stroje musejí být schopné napodobit konvenční procesory, aniž by tím obětovaly veledůležitý zisk rychlosti. Někteří výrobci počítačů se vyhnuli problémům s kompatibilitou tím, že omezili použití RISCových čipů na podpůrné role. Jiní, včetně IBM, tvrdě sledují tuto RISCantní dráhu v naději, že když bude k dispozici ten

<sup>□</sup> Reduced-instruction-set computer (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Complete-instruction-set computer (pozn. překl.)

správný software, dokážou poskytnout větší početní výkon na jeden dolar nákladů. Zdá se, že problém se točí v kruhu, ale řada softwarových společností již píše vhodné programy. A dnes už je k dispozici mnoho RISCových strojů od společností jako DEC, Bull a Apple stejně jako od IBM.

## Fuzzy<sup>□□</sup> logika

Tak jako byly modernizovány, revidovány a změněny architektura a komponenty von Neumannova počítače, dochází dnes k pohybu v dalším bezesporu zásadním prvku. Jak jsme viděli, je počítačová logika tradičně omezena na ano/ne a jednička/nula nebo pravda/lež a černá/bílá, jak nás to naučil dvojkový systém. Konvenční počítače se při řešení problémů a při numerických výpočtech opírají o binární Booleovu algebru. Avšak naše mozky operují často s neurčitými tvrzeními, s nejistotou a s hodnotovými soudy. A nyní dochází k pokusu sestrojit logický model lidského uvažování, který by odrážel jeho přibližnou a kvalitativní povahu.

Až ve 20.století si logikové jako Jan Lukasiewicz, Emil Post a Alfred Tarski uvědomili, že mohou formulovat logické systémy odlišné od Aristotelova. Odmítli zákon vyloučeného třetího (který říká, že každé tvrzení je buď pravdivé, nebo nepravdivé) a připustili výroky, které mohou být buď pravdivé, nepravdivé nebo nerozhodnuté. Pozdější vývoj dokonce podporoval ještě více než tři alternativní volby. Nebylo důvodu dávat přednost jednomu logickému systému před jiným - všechny jsou stejně konzistentní. Zda se má při popisu přírodních jevů preferovat jeden před jiným, je třeba rozhodnout empiricky, nikoli abstraktním filozofickým argumentováním. Tato okolnost neunikla Alonzu Churchovi, který si všiml, že je to podobné, jako když Einstein při formulování nové teorie gravitace hledal geometrii reálného světa mezi varietami, které už objevili matematikové.

Předchozí kapitola nám ukázala, jak se počítače rozkročily mezi doménami reálného světa a abstraktního světa zkoumaného matematikou. Po počítačích se chce, aby řešily složité problémy, ale mohou se opřít jen o puristické prostředky klasické logiky. Bylo možná nevyhnutelné, aby nakonec podlehly novým formám logiky. Zvláště jedna nachází řadu aplikací. Nazývá se fuzzy logika a jejím

---

□□ Výraz znamená „rozmazaný, neostrý“, většinou se do češtiny nepřekládá, (pozn. překl.)

průkopníkem byl Lotfi Zadeh z Kalifornské univerzity v Berkeley, který rozmazal ostré kontury klasické logiky svým převratným článkem Fuzzy množiny. V tom smyslu, jak se užívá dnes, je fuzzy logika mnohem širší než tradiční vícedhodnotové logické soustavy.

"Někomu může připadat, že si pojem "fuzzy výpočetní technika" sám sobě odporuje, protože výpočty si obvykle spojujeme s přesně definovanými operacemi na přesně definovaných množinách," napsal Zadeh. "Většina lidského myšlení je však spíše přibližná než přesná. V současnosti dobře nechápeme, jak to dělají, ale lidé mají pozoruhodnou schopnost rozumně se rozhodovat v situacích charakterizovaných nejistotou a nepřesností. Dokážeme rozumět zkomolené řeči, rozluštit lajdácké písmo, zaparkovat v těsném prostoru, rozumět poezii a udělat shrnutí složitých příběhů. Přitom neprovádíme žádné výpočty v běžném smyslu slova. Zpracováváme informaci, což právě dělají počítače, ale objekty našich úvah obecně nejsou čísla, nýbrž rozmazané fuzzy obrazce bez ostře vymezených hranic."

V učebnicích matematiky se mohou čísla seskupovat do množin přesným způsobem, například do množiny prvočísel nebo do množiny sudých čísel. Nalézt takové množiny v reálném světě je těžší. Zkusíte-li rozřadit své přátele podle výšky, zjistíte, že je snadné klasifikovat někoho, kdo měří 190 centimetrů, jako "dlouhána" a někoho, kdo měří 150 centimetrů, jako "skrčka", ale co se dá říci o většině, která se nachází někde mezi? A podobně jako většina jiných pojmů, slovo "vysoký" může mít v běžném životě různé významy: vyšší, než je průměr, vysoký na svůj věk, vyšší než širší a tak dále.

Fuzzy teorie se snaží vzít v úvahu tyto odstíny šedi tak, že členství každého přítele v nějaké množině ohodnotí číslem mezi nulou a jedničkou. V případě výšky se tedy přiřadí číslo nula osobě s výškovým handicapem a číslo jedna dlouhému bidlu, kdežto pro různé velikosti mezi těmito extrémy se použijí jiná čísla z tohoto rozmezí. Fuzzy klasifikace zjevně odporuje Aristotelovu zákonu vyloučeného třetího, podle něhož nějaký objekt do množiny buď patří, nebo nepatří. Ale ve fuzzy logice je vícedhodnotovost pravdy ve skutečnosti výchozím bodem. Klíčovým pojmem fuzzy logiky je lingvistická proměnná čili proměnná, jejíž hodnotou je slovo a nikoli číslo. Nakládáme-li například s věkem jako s lingvistickou proměnnou, jejími hodnotami mohou být mladý, starý, středního věku, velmi mladý, nepříliš starý a tak dále, přičemž každá hodnota se interpretuje jako označení fuzzy množiny.

Tento pojem lingvistické proměnné slouží za základ pro výpočty se slovy. To je podstata nejpraktičtějších aplikací fuzzy logiky.

Kdykoli se do vědy zavádějí nové myšlenky, je běžné, že vznikají spory: lidé musejí investovat tolik času a úsilí do zvládnutí úzkého oboru, že myšlenka, že by měli začít s něčím zcela novým, se jim přičí. A tak se chápou klacků, motivovaní až příliš lidskými důvody. Aby přežila takový výprask, musí myšlenka prokázat svou cenu. Skeptikové tvrdí, že fuzzy logika není nic než jiná formulace existujících technik<sup>94</sup> a že nemá nic společného se strukturou logiky. Avšak tato myšlenka již vedla k plodným aplikacím z běžného života a bylo již uděleno nebo přihlášeno více než 2000 patentů. Jedna z nejstarších aplikací byla vyvinuta u firmy F. L. Smidth & Company, kodaňského výrobce cementářských pecí, což jsou velké komory, v nichž při vysoké teplotě reagují vápenec a jíly a tvoří malé granule "slinku", z nichž se stane cement mletím s práškovou sádrou. Aby vybuodovali bázi odborných znalostí, vyptávali se dánští výzkumníci obsluhy cementářských pecí a pak vyvinuli způsob, jak vyjádřit a používat neurčité (fuzzy) pojmy jako "vysoký obsah vápence" nebo "malý točivý moment pohonu pece". Matematický model toho, co se děje uvnitř cementářské pece, by byl nevládnutelně složitý.

Fuzzy neurčitost se šíří. V roce 1986 existovalo osm komerčních a průmyslových aplikací fuzzy systémů. Do roku 1993 tento počet vzrostl na 1500. Bod obratu této technologie přišel roku 1990, kterému se v Japonsku říká "rok fuzzy logiky". Jak poznamenal Zadeh: "Díváme-li se dozadu, můžeme docela dobře považovat rok 1990 za počátek nového trendu v konstrukci domácích spotřebičů, spotřební elektroniky, fotoaparátů a dalších typů široce užívaných výrobků."

V Ústavu průmyslové kybernetiky v bulharské Sofii používají počítačové fuzzy vidění k řízení obloukové svářečky. V Šanghaji použili meteorologové fuzzy logiku k vytypování nejvhodnějších oblastí Číny pro pěstování kaučukovníků. V Japonsku je všechno fuzzy. Několik fotoaparátů dnes používá fuzzy logiku k automatickému zaostřování. Výzkumníci u Hitachi vyvinuli fuzzy řízení vlaku, které mění cestovní rychlost tak, aby optimalizovalo takové faktory, jako jsou bezpečnost, komfort cestujících a spotřeba energie, a přitom aby jízda byla plynulá. Fuzzy pračka, kterou vyrábí Matsushita Electric, změní množství mastnoty ve vodě a přidá správné množství saponátu. Firma Mitsubishi vyvinula fuzzy vysavač, který mění sací sílu podle toho, kolik proudí

---

<sup>94</sup> Teorie pravděpodobnosti a matematická statistika, aplikovaná na předpovídání

prachu. Jsou také fuzzy čipy, mikroprocesory navržené k uchovávání a používání fuzzy pravidel. Jak poznamenali Bart Kosko a Satoru Isaka: "Příští století může být více fuzzy, než si myslíme."<sup>95</sup>

## Zárné zítřky

V našem povídání o moderních počítačích jsme předpokládali ještě jednu podstatnou věc: že jsou to počítače elektronické. Vědci však nyní vyvíjejí nové médium pro logické manipulace. Je to světlo. Spousta laboratoří po celém světě dnes zkoumá řadu výhod, které počítač založený na světle má. Světelné vlny se mohou křížit, takže různé informační kanály se mohou prostupovat a nezkratují se jako u elektronického počítače. Použití světla při komunikaci s procesory a mezi nimi připravuje cestu ke zcela novým typům počítačových architektur. Představte si ten rozdíl v silničním provozu ve městech, jako jsou Londýn nebo New York, kdyby se všechna auta mohla navzájem prostupovat. Optika se vyhne problému "přeslechů" mezi dráty u signálů s vysokou frekvencí. Neprojeví se u ní útlum signálu při vysokých frekvencích. Nesmírné množství propojení se může zašmodrchat ve složitých topologiích. Tyto výhody převáží i neznámější užitek z použití světla, že totiž fotony cestující ve vakuu se pohybují asi tisíckrát rychleji, než se šíří elektronické signály ve vodičích a v polovodičových materiálech používaných v mikroprocesorech. To znamená, že světelné záblesky se dají zpracovávat rychleji než elektrické signály. Světlo tedy slibuje stroje, které by byly všestrannější než nejvýkonnější počítače, jaké se používají v současnosti.<sup>96</sup> Optická vlákna již dnes přenášejí telekomunikační data přes oceány a kontinenty, lasery nám pomáhají uchovávat informace na kompaktních discích a existují optické obvody, které provádějí výpočty, ačkoli v současnosti vypadá slibněji kříženec zvaný optoelektronika, kde je optika používána na propojování a elektronika obstarává logiku. Ve skutečnosti se žádný počítač neobejde bez důležitého optoelektronického dílu - svého dipleje.

Vlastnosti světla se dají využít k provádění logických operací při výpočtu. Na světlo se můžeme dívat jako na soubor částic (fotonů),

---

<sup>95</sup> B. Kosko a S. Isaka, *Scientific American*, 269, 62 (1993). Existují také kombinace neuronových sítí a fuzzy logiky, zvané neuro-fuzzy učící se systémy.

<sup>96</sup> J. L. Jewell, J. P. Harbison, a A. Scherer, *Scientific American*, 265, 86 (1991).

nebo jako na vlnění. Tato podvojná přirozenost světla se dá popsat kvantovou mechanikou, jak o tom uslyšíme později. Pro tuto chvíli je vhodné vykreslit si světlo čistě jako elektromagnetickou vlnu. Když světelná vlna přechází z jednoho prostředí do jiného, mění svůj směr. Můžeme si představit, že ekvivalent booleovského logického hradla lze získat zalomením tenkého svazku červeného laserového světla pomocí jednoduchého hranolu: "zapnuto" může odpovídat tomu, že svazek se promítne na stěně; "vypnuto" může být reprezentováno svazkem odraženým k podlaze. Operace se světelnými paprsky pomocí hranolů by byla těžkopádná, jsou však k dispozici i propracovanější metody.<sup>97</sup>

První digitální optický procesor na světě, předchůdce počítačů založených na světle, vytvořil tým britských vědců, kteří přesídlili do Spojených států. David Miller, Michael Prise, Nicholas Craft a Frank Tooley dokončili své průkopnické dílo, když byli na Herriotově-Wattově univerzitě v Edinburghu. Roku 1990 tento tým, za podpory dvanácti vědců z Bellových laboratoří AT&T v New Jersey, vyvinul jednoduchý optický čítač, který se dá vylepšit tak, aby vznikl optický sčítač a násobič. Ačkoli byl příliš malý na to, aby se dal jakkoli prakticky použít, podařilo se veškerou vnitřní informační komunikaci založit plně na světelných paprscích.

Podobně jako konvenční elektronika, vyžadují optické procesory jednoduché přepínače. Přepínač používaný v Bellových laboratořích se nazýval S-Seed (zařízení s vlastním symetrickým elektrooptickým efektem<sup>□</sup>) a měnil svůj index lomu a absorpci tak, že vypínal a zapínal laserové paprsky. V prvním optickém procesoru spolu "hovořily" čtyři řady jednotek, každá složená z třiceti dvou S-Seedů, pomocí paprsků laserového světla v blízkém infračerveném pásmu. Čtyři sady S-Seedů byly odděleny čočkami, zrcadly a clonami, které plnily stejnou úlohu jako propojovací vodiče v normálním počítači. Procesor provádí výpočty tak, že mění stav spínačů ze "zapnuto" na "vypnuto" a naopak. Rozsáhlá práce na tomto prvním procesoru, která následovala, vedla k experimentálním procesorům vybaveným světelnou show, která by zahanbila i technicky nejvybavenější diskotéku: 60 000 světelných

---

<sup>97</sup> Přiložením elektrického pole na některé materiály můžeme měnit jejich optické vlastnosti, například index lomu, který se silně mění v opticky „nelineárních materiálech“. Ty umožňují manipulaci s optickými svazky rychlostí jedné biliontiny vteřiny. Kombinací laserů s nelineárními jevy se dá světlo používat ke komunikaci, výpočtům nebo ukládání informací.

<sup>□</sup> Symmetric self electro-optic device (pozn. překl.)

paprsků spojujících 12 000 zařízení pokročilejšího typu, zvaných FET-SEED.<sup>98</sup>

Konvenční polovodičové diodové lasery používané pro optické uchování informace a komunikaci jsou příliš velké, aby se daly použít v optických počítačích. Kromě práce na procesorech bylo již dosaženo dramatického pokroku při výrobě miniaturních laserů. Jednotlivé sousedící lasery na mřížce lze také přimět k tomu, aby vysílaly světlo různých vlnových délek, čímž poskytují technikům možnost posílat po optickém vláknu vícero signálů. Mřížky mikrolaserů se dají rovněž zapínat a vypínat optickými pulzy, což je rys, jehož užitečnost se projeví při konstrukci paralelních optických počítačů.<sup>99</sup> Tyto mřížky, integrovaná optoelektronika a optické procesory budou s velkou pravděpodobností jádrem budoucích počítačů. Podle Davida Millera z AT&T Bellových laboratoří: "Obtíže při návrhu dnešních elektronických počítačů jsou tak skličující a realita výpočetních problémů, které nejsme s to řešit, je tak nabíledni, že bychom byli opravdu pesimisty, kdybychom nevěřili v budoucnost optiky v číslicové výpočetní technice."

## Kvantové počítače

Turingova práce poskytla pevné teoretické zázemí všem současným formám výpočetní techniky. Jeho univerzální stroj je plnoprávným abstraktním matematickým systémem a všechny počítače, které jsme dosud v této kapitole popsali, představují jeho ztělesnění v reálném světě. Jak Turing ukázal, jeho hypotetický stroj se dá naprogramovat tak, že vykonává jakoukoli operaci, která "by se dala přirozeně považovat za vyčíslitelnou". Tento výrok, původní Churchova-Turingova hypotéza, znamená, že všechna reálná ztělesnění univerzálního Turingova stroje - ať jsou to sériové nebo paralelní počítače - by měla být schopna provádět přesně tentýž soubor úkonů.

Avšak Rolf Landauer z IBM byl jeden z prvních, kdo zdůraznili, že reálné ztělesnění Turingova stroje otvírá nové důležité otázky. Poukázal na to, že jisté vlastnosti abstraktních Turingových strojů nejsou zcela splněny ve světě, který obýváme. Turingova představa propojení

---

<sup>98</sup> Technologie FET-SEED integruje tranzistory řízené polem s fotodiodami a modulátory s kvantovou jámou a vytváří systémy pracující při 155 Mb/s.

<sup>99</sup> G. Fox a P. Messina, Scientific American, říjen 1987.



počítání s "mechanickými procesy" v duchu newtonovské fyziky především nebere v úvahu kvantovou teorii. A rozdíl mezi klasickou a kvantovou fyzikou je opravdu zásadní.

Každý skutečný počítač, ať už používá světlo nebo elektrony a ať je jeho konstrukce jakákoli, musí pracovat podle fyzikálních zákonů. Tato zdánlivě samozřejmá věc má dalekosáhlé důsledky, které byly rozpoznány teprve nedávno. V případě Babbageova mechanického zařízení je pohyb jeho ozubených soukolí správně popsán pomocí fyziky, s níž přišel Newton v 17. století. A moderní počítače běží také na základě klasické fyziky. Ale základní mikroelektronické součástky moderních počítačů - nemluvě o optických počítačích zítřka - se zmenšily až tam, kde Newtonova mechanika přestává platit: jejich chování se dá popsat jedině s použitím kvantové teorie ze století dvacátého.

Rovnice kvantové mechaniky jsou navrženy tak, aby popisovaly mikrosvět elektronů; na jeho zákonech tedy stojí celý mikroelektronický průmysl. Kvantová teorie dosáhla skvělých úspěchů při popisu subatomárního světa, nejen elektronů v tranzistorech a pohybu fotonů v kabelech z optických vláken, ale i chemických a jaderných reakcí a spousty dalších věcí. Kvantová teorie byla ve skutečnosti vymyšlena proto, že klasická fyzika nedokáže popsat svět atomů. Podle klasické fyziky by samotné atomy, stavební kameny hmoty, dokonce neměly existovat. Elektron obíhající kolem atomového jádra by měl vyzařovat energii, zpomalovat se a nakonec se po spirále zřítit: atomy by se měly zhroutit. První průkopníci kvantové teorie, včetně Maxe Plancka, Alberta Einsteina a Nielse Bohra, předpokládali -a opravňovalo je k tomu sotva něco víc než jen zdání, že to funguje -že veličiny jako energie nejsou donekonečna dělitelné, ale vyskytují se v kouscích nazývaných kvanta. Zákony kvantové mechaniky, jak je poté formulovali Werner Heisenberg a Erwin Schrodinger, vysvětlily tyto předpoklady matematicky konzistentním způsobem: kvantová pravidla brání obíhajícímu elektronu, aby vyzařoval energii spojitě. Tak se vyhneme nepříjemné vizi hroučících se atomů.

Kvantová teorie je úspěšná při vysvětlování výsledků vědeckých pozorování, ale vážně narušuje naši představu, že za vším stojí nezávislá platónská realita. V našem každodenním světě očekáváme, že každý jev má svou příčinu. Zdá se však, že kvantová mechanika připouští svou podstatou nepředpověditelné změny - "kvantové skoky" - elektronových, atomových a molekulárních stavů. Zdálo by se, že

neexistují žádná omezení na to, jak přesně umíme měřit vlastnosti předmětů, jako je jablko, například jeho váhu nebo rozměry. V kvantové teorii tomu tak není. Princip neurčitosti objevený Wernerem Heisenbergem roku 1927 říká, že měření jistých dvojic veličin, jako jsou poloha a hybnost, se dá provést jen s určitou přesností a ne lépe. Toto omezení je tak malé v rozměrech všedního světa, že se zdá, že neexistuje; v mikroskopickém světě je však zcela zásadní.

Podle této znepokojující a proti intuici jdoucí teorie jsou všechny fyzikální objekty ve své podstatě jakési přízraky. Existují v neurčitém stavu - v "superpozici" - všech možných poloh a rychlostí. Teprve když je na objektu vykonáno pozorování, získáme skutečnou informaci o specifických hodnotách jeho pozorovatelných vlastností.<sup>100</sup> Částice hmoty jsou vlnami energie a vlny jsou částice a my vidíme jedny nebo druhé podle toho, jaký druh měření se provádí v daném experimentu. Ještě podivnější je, že částice pohybující se mezi dvěma body v prostoru cestuje zároveň všemi možnými dráhami, jež tyto body spojují. Ve skutečnosti se podle kvantové nauky nedá popsat odděleně chování částic, které jsou na opačných koncích vesmíru.

Aniž bychom se pouštěli do matematických podrobností, můžeme říci, že hlavní rozdíl mezi kvantovou a klasickou fyzikou spočívá v tom, že klasická pracuje přímo s pozorovatelnými veličinami, jako je poloha míče, jeho rychlost a zrychlení. Když ale zmenšíme míč na rozměry atomu, kvantová mechanika nahrazuje takovéto spojitě proměnné vlastnosti nespojitými - kvanty energie. Musíme pak přejít na hlubší úroveň popisu, založenou na takzvaných vlnových funkcích, které udávají pravděpodobnosti, jak dopadnou pozorování těchto vlastností v určitých časech a místech. Vlnová funkce obsahuje informaci o všech možnostech, které mohou v systému nastat. Používá se například k výpočtu pravděpodobnosti, že z excitovaného atomu vyletí v okamžiku měření foton světla. Ačkoli vlnová funkce obsahuje informaci o všech takových pozorovatelných vlastnostech, sama není pozorovatelná. To, co se děje při skutečném měření, se popisuje tak, že vlnová funkce nám poskytne určitou hodnotu měřené veličiny a sama přitom podléhá "kolapsu".

---

<sup>100</sup> Pro další podrobnosti rozepří obklopujících interpretaci kvantové mechaniky a s ní spojeného problému měření viz P. Coveney a R. Highfield, Šíp času, kapitoly 4 a 8. Zda například je tento kolaps reálnou fyzikální událostí neboje důsledkem toho, že paralelní kopie pozorovatele si všimnou různých pozorovatelných hodnot na měřeném objektu, to je předmětem sporů.

Jelikož všechny dnešní počítače jsou ztělesněním klasických Turingových strojů, můžeme se tázat, zda vůbec bizarní kvantové efekty nějak ovlivňují informatiku. I když kvantovou teorii i moderní matematickou teorii výpočetní techniky máme více než půl století, teprve nedávno lidé začali studovat, co znamená jedna pro druhou.<sup>101</sup> Podél cesty vedoucí k rozšíření Turingovy průkopnické práce do kvantové oblasti byla vytyčena řada milníků. V roce 1982 popsal Paul Benioff klasické počítače sestavené z kvantových komponent, zatímco Richard Feynman přišel s myšlenkou "univerzálního kvantového simulátoru". O dva roky později popsal David Albert "sebeměřící kvantový automat", který dokázal provádět výpočetní úlohy, které nemají žádné klasické analogie.<sup>102</sup> Ke klíčovému obratu došlo roku 1985, kdy David Deutsch z univerzity v Oxfordu poprvé popsal "univerzální kvantový počítač".

Deutsch nově interpretoval dobře známou Churchovu-Turingovu hypotézu jako nový fyzikální princip - "Churchovův-Turingův princip". Tento princip tvrdí, že "existuje [nebo se dá postavit] univerzální počítač, který se dá naprogramovat tak, aby provedl jakýkoli výpočetní úkon, který může být proveden kterýmkoli fyzikálním objektem". Atomy a molekuly jsou fyzikální objekty; z tohoto nového principu tedy plyne, že musí být možné postavit kvantový počítač - ačkoli si i Deutsch uvědomoval, že by to kladlo extrémní nároky na dnešní techniku.

Vyvstává pak otázka, jaký existuje rozdíl, pokud tu nějaký je, mezi výpočty s kvantovým zařízením a klasickým Turingovým strojem. Kvantový počítač stále čeká na svou realizaci, ale je docela jasné, že by měl vlastnosti dosti odlišné od současných strojů. Základní ingrediencí, díky níž kvantový počítač dovede dělat věci, které klasické Turingovy stroje nedokážou, je kvantová vlastnost známá jako "koherence". Je to důsledek skutečnosti, že kvantová teorie používá k popisu dynamických procesů vlnové funkce namísto pozorovatelných, jak to činí klasická fyzika. Následující příklad výpočtu ilustruje, co máme na mysli: klasický počítač má informaci uloženou jako "bity" v paměti. Tyto bity jsou buď 0, nebo 1, jak to zavedl Boole. Kvantový počítač se může nacházet i v koherentním (superponovaném) stavu 0 a zároveň 1 čili v

---

<sup>101</sup> Řečeno poněkud abstraktněji pohanějí tuto práci dvě otázky: (1) Existují jiné axiomatické systémy, které se dají využít k počítání, v nichž se základní pojmy podstatně liší od Turingových? (2) Jak snadné je vtělit tyto odlišné axiomatické systémy do reálného hardwaru? Kvantová mechanika je spojována se svou vlastní sortou fuzzy logiky, neboť koherentní superpozice představují „zahnuté“ oproti vyloučenému třetímu.

<sup>102</sup> Pro přehled viz D. Deutsch, *Physics World* 5, 57 (1992).

balíku vzájemně provázaných veličin. Tato novinka se objevuje proto, že výpočetní logika pracuje s těmito balíky, a nikoli s jednotlivými veličinami, což znamená kvalitativně nový výpočetní stav. Výsledkem je velmi mocný paralelismus. Jak vysvětluje Deutsch: "Činnost kvantového počítače je manipulace s těmito balíky spíše jako ve velkoobchodě než jako v drobném prodeji. Jediný bit kvantového počítače může obsahovat celý balík hodnot pravda/nepravda, které se k sobě složitým způsobem vztahují prostřednictvím vlnové funkce." Deutsch dále dokázal, že veškeré výpočetní schopnosti jakéhokoli konečného stroje podléhajícího zákonům kvantové mechaniky jsou obsaženy v univerzálním kvantovém počítači.

Jaké problémy kvantový počítač zvládne, na které klasický nestačí? Toto téma je natolik nové, že mnoho otázek zůstává stále nedořešeno. Něco však porovnávat můžeme. Jak jsme poznamenali v 2. kapitole, v klasické fyzice přísně vzato nelze vytvořit číslicové počítače, ale pouze analogové. "V analogovém stroji může malá chyba exponenciálně narůstat, což má za následek absolutní omezení přesnosti," říká Deutsch. Naproti tomu u kvantových počítačů zůstanou chyby stejné. Kromě toho by měly kvantové počítače dokázat řešit rychleji některé z těch problémů, které dovedou řešit i počítače klasické. Pro některé třídy problémů budou kvantové počítače mnohem rychlejší: superpozice stavů jim fakticky umožňuje provádět mnoho výpočtů najednou. Díky pravděpodobnostní povaze kvantové mechaniky by měly být kvantové počítače schopny generovat pravá náhodná čísla, a nejen pseudonáhodná čísla, která jsou tím nejlepším, co může poskytnout konvenční (klasický) počítač. Každé číslo vytvořené konvenčním počítačem je konečným výsledkem matematických manipulací zapsaných v algoritmu. Každé číslo generované takovým algoritmem je tedy v principu předpověditelné.

Protože kvantové počítače nespĺňujú klasickú dvouhodnotovú logiku, vyžadujú také nové typy logických hradel.<sup>103</sup> Kromě toho připravují cestu k nové formě kvantové kryptografie, která by poskytovala lepší a jistější způsob šifrování dat než ten, o němž uvažoval Turing.<sup>104</sup> Šifrování se opírá o matematickou operaci, kterou je snadné se zprávou provést, je ale velmi obtížné - nezvládnutelné - ji

---

<sup>103</sup> Příkladem je hradlo „odmocnina z NOT“. Dvě za sebou dají klasické hradlo NOT.

<sup>104</sup> Vyvinul jej Charles Bennett z IBM a jeho kolegové. Je založen na technice zvané kvantová distribuce veřejného klíče, která se popisuje v článku: C. Bennett, G. Brassard a A. Ekert, Scientific American 267, 26 (1992).

obrátit. Klasickým případem je faktorizování velkého čísla: vynásobit dvě prvočísla a získat výsledek je triviální, ale extrémně obtížné je násobení obrátit a najít součinitele. Peter Shor z AT&T Bellových laboratoří zjistil, že kvantové počítače by měly být schopny faktorizovat čísla mnohem rychleji než dosud. Když byl tento výsledek zveřejněn, varoval Deutsch, že tento pokrok, "největší událost v dějinách výpočetní techniky", pošle nejjistější klasický šifrovací systém, systém RSA, do starého železa. "To problematizuje celou kryptografii, kromě kvantové kryptografie, a kvantová kryptografie má vážná omezení."<sup>□</sup>

## Kvantový paralelismus

Pokud má univerzální kvantový počítač pracovat efektivně, musí se vypořádat s jedním veledůležitým problémem. Musí zachovávat koherenci oněch kvantových superponovaných stavů ze země stínů. Balíky provázaných logických veličin se nesmějí rozpadnout během komplikovaných procesů, k nimž dochází při typickém výpočtu. Zhruba řečeno musí být spíše vnější svět odizolován od kvantového počítače než naopak. Koherence se ztrácí, když interakce s okolím efektivně "měří" neboli získává informaci o stavu počítače, protože to vede ke kolapsu vlnové funkce. Bohužel, tady je právě nejslabší místo kvantové teorie, protože žádná uznávaná teorie tento kolaps nevysvětluje.

Potřeba kvantové koherence je důsledkem role, kterou hraje vlnová funkce v kvantových počítačích: důležité je, aby tyto vlnové funkce nepodlehly kolapsu při žádném procesu podobném měření. Ale abychom toho dosáhli pro jakýkoli makroskopický objekt, to je příliš tvrdý oříšek. Citujme zesnulého Johna Bella, jednoho z vůdčích myslitelů v oboru základů kvantové teorie: "Jestliže chceme teorii použít i jinde než pro idealizované laboratorní operace, nenutí nás to připustit, že procesy víceméně podobné měření se odehrávají víceméně pořád víceméně všude?"<sup>105</sup> Otázkou je, zda je v principu možné uchovat kvantový systém tak, aby nedošlo ke kolapsu.<sup>106</sup>

---

<sup>□</sup> V prosinci 2001 byl ohlášen první praktický výpočet: kvantový počítač založený na jaderné magnetické rezonanci rozložil číslo 15 na součin 5 krát 3. (pozn. překl.)

<sup>105</sup> J. S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press 1987), str. 117.

<sup>106</sup> Jak jsme rozebírali v kapitole 8 Šípu času, náš názor je ten, že nevratnost je neoddělitelně svázána s kolapsem vlnové funkce, což je pohled, který sdílí Ilya Prigogine, Oliver Penrose, Roger Penrose a mnoho dalších (ne všichni z těchto technických

Podle Deutsche nabízí východisko z nesnázi "mnohosvětová" interpretace kvantové teorie, i když pro mnoho lidí to nezní dosti přesvědčivě. Deutsch, původně astrofyzik a kosmolog, je zastáncem této interpretace, podobně jako mnoho dalších, kteří v těchto oborech pracují. Podle konvenční představy mnoha světů<sup>107</sup> nastává žádný kolaps vlnové funkce: při každém procesu měření celý vesmír vyraší v nespočetné množství nových a zcela nespojitých vesmírů - "mnoho světů" -, přičemž každý z nich představuje jiný možný výsledek měření. Místo kolapsu vlnové funkce dochází k nekonečnému množení a šíření zcela oddělených nových větví se vesmírů. Je zde jistá podobnost s naukou učených islámských teologů před tisíci lety, která tvrdila, že s každou událostí je svět zrozen znovu. Mnohosvětová interpretace byla doopravdy použita jako součást odvážně redukcionistické spekulace, nazývané teorie bodu Omega, která tvrdí, že fyzika pohltila teologii, aby vysvětlila Boha, posmrtný život a vzkříšení.<sup>108</sup>

I když mnoho lidí se tomu zdráhá uvěřit, Deutsch tvrdí, že existence kvantového počítače poskytne pevný důkaz, že mnoho světů je jediná správná interpretace teorie. Avšak místo aby podržel interpretaci v termínech větví se vesmírů, představuje si, že se kalkulace prováděné kvantovým počítačem provádějí souběžně v mnoha vesmírech. Každý počítač v každém vesmíru začíná se stejným programem. Jednotlivé počítače se vyvíjejí tak, jak provádějí oddělené výpočty, které navzájem interagují, dokud nedokonvergují k téže odpovědi. To je "kvantový paralelismus".

Takový paralelismus je velmi odlišný od toho, který jsme probírali dříve a který vyrůstal z klasických výpočtů. Zatímco soubor  $N$  procesorů pracujících paralelně na klasickém počítači může zrychlit výpočty až  $N$ -krát, kvantový paralelismus může být libovolněkrát rychlejší, v závislosti na vlnové funkci. Existují ale hranice: kvantová mechanika dovolí vytáhnout pouze část informace, kdežto klasická paralelní výpočetní technika žádné takové omezení nemá. Jak jsme dříve uvedli, toto dramatické zvýšení rychlosti se dá očekávat pouze pro jisté typy problémů běžících na vhodném hardwaru.

---

důvodů). To, že kvantové pohybové rovnice jsou symetrické v čase, je důvodem, proč teorie nedokáže vysvětlit kolaps. Zdá se tedy docela pravděpodobné, že „koherence“ je velmi speciální vlastností některých forem dynamické evoluce, ale neplatí to obecně.

<sup>107</sup> B. de Witt a N. Graham, *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton 1973).

<sup>108</sup> F. Tipler, *The Physics of Immortality* (Macmillan, London 1995), str. 169.

# Stavba kvantového stroje

Stojí určitě za to pokusit se sestrojít kvantový počítač a prozkoumat fyzikální meze výpočetní techniky. Je to ale d'ábelsky obtížný technický úkol, který zahrnuje i problémy principiálního rázu, týkající se kolapsu vlnové funkce. Nedávno však Seth Lloyd, který pracuje v Los Alamos National Laboratory v Novém Mexiku, publikoval článek, v němž načrtl hrubé obrysy projektu takového počítače.<sup>109</sup> Jeho článek byl prvním návrhem počítače, který pracuje plně na kvantově mechanickém základě a který má naději, že bude někdy postaven. V článku se diskutovalo, jak by taková zařízení mohla pracovat, z jakých materiálů by byla vytvořena a jaké postupy můžeme použít k jejich ovládní s použitím dnešní technologie.

Podobně pragmatický přístup se musí zvolit při volbě kvantového systému. Jednou z možností je "jaderný počítač", kde jádra atomů v krystalu jsou řízena mikrovlnami. Je však mnohem jednodušší použít viditelné laserové světlo a manipulovat se stavy elektronů v atomech. Kvantová teorie ukazuje, že elektrony v atomu mohou existovat v různých energetických stavech. Viditelné světlo o správné frekvenci může způsobit přeskok elektronu z jednoho energetického stavu do jiného. Můžeme si myslet, že tyto dva stavy odpovídají Booleově logické abecedě zapnuto-vypnuto, která ovládá konvenční číslicový počítač. Poslední vývoj laserové techniky poskytuje prostředky pro řízení takových kvantově mechanických stavů elektronů v mřížce atomů. Specifické "rezonanční" frekvence světla tlačí elektron do horního nebo spodního energetického stavu. Definováním a aplikováním správné posloupnosti světelných pulzů o různých frekvencích lze nastavit jakýkoli požadovaný energetický stav mřížky atomů. Druhá posloupnost pulzů transformuje tyto binární stavy podle logických pravidel, takže mřížka může provádět výpočty. Třetí posloupnost pulzů nám dovolí z mřížky vytáhnout informaci.

Lloyd tvrdí, že jeho schéma může používat jakékoli materiály sestavené z opakujících se skupin atomových jednotek. Mezi nimi jsou polymery, velmi dlouhé, v podstatě jednorozměrné molekuly složené z mnoha tisíc opakujících se sekvencí atomů, dále kvantové tečky, shluky atomů nebo poruchy, z nichž každá obsahuje jeden elektron a chová se v

---

<sup>109</sup> S. Lloyd, Science 261, 1569 (1993).

podstatě jako jeden obrovský atom,<sup>110</sup> a pak také vhodné krystalické materiály, jejichž trojrozměrná struktura obsahuje nesmírné množství pravidelně se opakujících atomových jednotek.

Pravdou je, že kvantové počítače stojí před problémem náhodného šumu, způsobeného neodstranitelnými fluktuacemi všudypřítomného elektromagnetického pole, které hrozí, že zničí požadovanou kvantovou koherenci. Nicméně v době, kdy byl článek publikován, tedy v září 1993, Lloyd zkoumal vhodné materiály pro stavbu svého kvantového počítače. I jiné skupiny se připojily k pokusům sestavit kvantová hradla, obvody a celé stroje. Na univerzitě v Oxfordu předložili David Deutsch a Artur Ekert schéma "Kvantového faktorizačního stroje", založeného na práci Petera Shora. Deutschova idea spočívala v mřížce kvantových teček na krystalu křemíku. Mřížka sama o sobě není kvantovým počítačem. Tím, co z ní dělá mikroprocesor, je světlo: je poháněná pulzy 60 000 různých frekvencí světla, které se mění každou pikosekundu (biliontinu vteřiny).

"Je to velice, velice komplikovaný ždibec světla a právě toto světlo dělá z přístroje počítač," říká Deutsch. Každá tečka bude ležet na jednom z průsečíků pravouhlé sítě drátků. Napětí přiložené ke každé z teček způsobí, že elektrony se směstnají k jedné straně tečky, a tím vytvoří potenciál, pomocí něhož interagují s elektronem v sousední tečce. Jakákoli interakce způsobí změnu absorpce laserového světla každým z elektronů. "Může se vám podařit vyvolat přechod, který nastává jen tehdy, když je sousední elektron v excitovaném stavu. To umožňuje stavbu logických obvodů, ve skutečnosti to umožňuje kvantové logické obvody." Dát dohromady světlo a kvantovou mřížku bude nesmírně náročný úkol, slibujeme si však od toho vznik zařízení stejně významného, jako byl Babbageův analytický stroj. Podle Deutsche "by dokázal faktorizovat číslo řekněme o 250 cifrách, což je s klasickým počítačem naprosto nemožné".

Kvantové výpočty by se mohly ideálně hodit pro modelování komplexního chování tekutin, což je úkol, který jako první inspiroval von Neumanna k rozvíjení zájmu o výpočetní techniku a jenž, jak jsme viděli, stále představuje jeden z největších otevřených problémů výpočetní techniky. Jedním z počítačových fyziků, kteří se zajímají, kam až je možné se dostat s počítačovou technikou, a to zejména při řešení problémů kvantové mechaniky, je Bruce Boghosian, působící nyní na univerzitě v Bostonu. Zabývá se představou, že by v budoucnu

---

<sup>110</sup> M. Reed, Scientific American 268, 98 (1993).



každý elektron v obrovské mřížce kvantových teček mohl být pověřen rolí jedné individuální molekuly v tekutině. Sprška skutečné vody by byla simulována podobnou sprškou aktivity v této kvantové mřížce elektronů. "V takovém případě," říká, "fyzika a výpočetní technika začínají splývat."

Jestli tyto pokusy někdy povedou k realizaci kvantového počítače či bude-li dokonce možné dosahovat výsledků přesahujících možnosti konvenčních počítačů, vynaložené úsilí nebylo marné. Z hlediska teorie má již nyní pojem kvantového počítání dopad na fundamentální otázky fyziky, matematiky, informatiky a filozofie. Připomíná nám, že výpočet je fyzikální proces, který se dá použít k simulování jiných fyzikálních jevů. Z hlediska praxe pokrok v kvantové kryptografii opět poukázal na neustálou symbiózu čisté vědy s technikou. Jak jsme poznamenali výše, slibujeme si od toho nový efektivní způsob, jak posílat citlivé informace mezi počítači bez sebemenšího rizika odposlechu.

## Budoucnost výpočetní techniky

Vrypy a jiné značky, které se v pradávných dobách používaly ke sčítání dobytka a válečníků, se rozvinuly do nového matematického jazyka, díky němuž vznikla v lidské společnosti stále komplikovanější organizace. Matematické znalosti znamenaly moc: na kamenné hlavě obřadního žezla egyptského krále Meniho, zakladatele první dynastie faraónů, z roku asi 3000 př. Kr. můžete spočítat jeho majetek: 400 000 dobytčat, 1 422 000 koz a 120 000 zajatců.

Dnešní rozšiřování globální informační sítě bude mít stejně hluboký dopad, protože vytvoří elektronickou metaspolečnost. Informace všeho druhu přeskakují v této digitální éře z jednoho mozku do druhého nejrůznějšími cestami. Kaskáda elektronických pulzů proplouvající počítači od dob manchesterského Mark 1 byla centrem komunikační revoluce, která dnes umožňuje, aby se vlnění nových myšlenek šířilo planetou rychleji než mžiknutí oka.

Číslicový počítač dodal lidské mysli sílu tím, že umožnil dosáhnout hlubšího porozumění jistým omezeným aspektům komplexních záhad přírody. Navzdory kolosálním změnám, které počítače přivodily, a zdánlivě nadlidským činům, kterých jsou schopny, jsou stále jako malé děti, a, jak rozpoznal Turing, závisejí na lidských bytostech, které je programují. Dnes začíná dramaticky vzrůstat schopnost počítačů

modelovat komplexitu reálného světa, a to nejen díky pokroku, který jsme před chvílí v této kapitole popisovali.

Existence skupiny nezládnutelných problémů, na něž jsme narazili v předcházející kapitole, které zůstávají nepokořené tváří v tvář konvenčním výpočetním metodám, vybízí k opuštění zkosnatělého přístupu systematického programování metodou "krok za krokem" a znovu klade důraz na to, jak řeší problémy příroda, na původní inspiraci Boolea, Turinga a von Neumanna. Zatímco konvenční "deterministický" přístup nutí počítač provádět otrocky každý krok algoritmu, informatikové zjistili, že se dokážou vypořádat s nezládnutelnými problémy napodobováním biologické evoluce.<sup>111</sup>

Než se obrátíme k tomuto zdroji inspirace, můžeme hloubat nad tím, že v oněch opojných dnech parou poháněných výpočtů Charlese Babbage možná někde probleskla myšlenka ještě hlubšího propojení výpočetní techniky s přírodou. Když debatoval o svých strojích s některými přáteli, Babbage fantazíroval o tom, co by se stalo, kdyby jedna sada výpočtů odstartovala další sadu, řízenou jiným algoritmem, a tak dále do nekonečna. Nebyl si jist, zda by výsledky měly valné použití, ale dodal, že takové výpočty "nabízejí překvapivou podobnost s postupným utvářením animálního života, jak se vyvíjel v nesmírných epochách geologického času, i když je od něho dělí nesmírná vzdálenost. Záblesk intelektuálního světla, které ozářilo obličej méch tří přátel při tomto neočekávaném srovnání, byl mou největší odměnou." Dnes je tato prorocká intuice základem oboru zvaného umělý život. □ Vrátime se k němu v 8. kapitole.

---

<sup>111</sup> Greg Chaitin také poznamenal: „Pokud se dá Darwin matematizovat, pak to bude znamenat, že jsme přispěli něčím zásadním k matematice; kdežto pokud to nejde, pak se musel Darwin mýlit a život zůstává vědecky nevysvětleným zázrakem.“ G. Chaitin, Association for Computing Machinery SIGACTNews 4, 12(1970).

□ Artificial life (pozn. překl.)

# 4 Přírodní inspirace

Svět je šachovnice; figurky jsou přírodní jevy;  
pravidla hry jsou tím, čemu říkáme přírodní zákony.

T. H. HUXLEY<sup>112</sup>

Když byl postaven první počítač, postarali se jeho architekti o to, aby řešil problémy podle přísně logických pravidel klasické matematiky. Když dnes chtějí vědci rozšířit schopnosti a výkon počítačů, nahlíží do dříve málo známých základů přírody a nechávají se inspirovat mezi jiným růstem krystalů, magnetickými vlastnostmi exotických slitin a žíháním kovů. Používání počítačů k získávání poznatků o těchto procesech a vlastnostech nám zase naopak umožňuje dozvědět se toho o komplexitě přírody více než kdy předtím. Společný základní motiv spojující komplexitu přírody s komplexitou výpočetní techniky spočívá v podstatě v tom, že komplexní organizované chování povstává z mnoha jednodušších spolupracujících i konfliktních interakcí mezi uvažovanými mikroskopickými součástkami, ať jsou to atomy, logické bity nebo rotující elektrony. Účinným způsobem, jak tuto součinnost odhalovat, je konstrukce metafor reálného světa, v nichž jsou nepřehledné mikroskopické detaily obětovány zachycení širší perspektivy. Musíme zkrátka vymyslet způsob, jak skrze stromy vidět les. Přesněji řečeno mohou tyto metafory odhalit, jak komplexita lesa povstává ze spleti stromů, křovin a podrostu. Řada procesů, které vytvářejí přírodní komplexitu, poskytuje účinný prostředek, jak porozumět komplexitě obecně. Když je vědci vtělí do návrhu počítačových programů, jsou schopni simulovat ještě více z komplexity přírodních procesů, a zvláště těch, které probíhají v živých, dýchajících bytostech.

První krok směrem k reprodukování komplexity života v počítači učinil John von Neumann, když přišel s myšlenkou definovat život jako logický proces, blízký tomu, co by se mohlo odehrávat ve stroji. Učinil to ve své přednášce "Obecná logická teorie automatů", kterou měl roku

---

<sup>112</sup> T. H. Huxley, Lay Sermons. Ec, iii, 2, A Liberal Education.

1948 na Hixonově sympoziu v Pasadeně.<sup>113</sup> Jeho přednáška čerpala z "pozoruhodných teorémů" Warrena McCullocha a Waltera Pittse o teorii neuronových sítí a z pojmů vypočítatelných čísel a univerzálních počítačích strojů Alana Turinga. Výsledkem byla precizní matematická teorie, která umožnila srovnání komplexity počítačů a biologických systémů pro zpracování informace, zvláště pak mozku. Von Neumann zdůrazňoval, že "přirozené organismy jsou zpravidla mnohem komplikovanější a neproniknutelnější, a tudíž jim rozumíme méně detailně než umělým automatům". Zastával nicméně názor, že některé pravidelně se vyskytující rysy, které pozorujeme v uspořádání automatů, mohou být dosti poučné, když přemýšlíme o přírodních organismech a když plánujeme, jak je využít.

Jeho cílem bylo vytvořit stroj dostatečně komplikovaný na to, aby se dokázal rozmnožovat. K tomu účelu navrhl "samoreprodukcující se automat", množícího se robota plovoucího v moři svých vlastních součástek. Tím spojil zdánlivě rozcházející se světy nervové tkáně a elektronek prostřednictvím matematické logiky. Von Neumannovi se zdála schopnost živých věcí se množit téměř paradoxní. Rozpoznal však, že klíč k pochopení tohoto paradoxu spočívá v tom, jaké množství komplexity je přítomno. Na své nejnižší úrovni komplexita vede k degeneraci: každý automat, který vyrábí jiné automaty, bude umět dělat jen jednodušší, než je sám. Avšak nad jistou minimální úrovní tento degenerativní rys přestává platit všeobecně a automaty, které reprodukcují sebe samé, už nejsou nemožné. "Tento fakt," píše von Neumann, "že komplikovanost, stejně jako uspořádanost, pod jistou minimální úrovní vede k degeneraci, a nad touto úrovní dokáže sebe sama udržovat a dokonce zesilovat, bude jistě hrát významnou roli v každé příští teorii těchto jevů." i Tím, že vytvořil logický rámec pro vysvětlení sebeprodukcce, udělal von Neumann skok vpřed a odhalil hlubokou pravdu. Uvědomil si, že existuje spojitost mezi komplexitou a

---

<sup>113</sup> Viz W. Aspray and A. Burks (eds.), *Papers of John von Neumann on Computers and Computer Theory* (MIT Press, Cambridge, MA, 1987), str. 391. Von Neumannovo pojetí automatů bylo blízké Wienerovu pojetí kybernetiky a oba se navzájem ovlivňovali. Von Neumannova teorie automatů ale více zdůrazňovala logiku a číslicové počítače, zatímco Wienerova kybernetika byla orientovaná více na fyziologii a techniku řízení. Další postavou v příběhu je německý inženýr Konrád Zuse. Ke konci druhé světové války se skrýval před nacisty na odlehle hoře v Rakousku a uvažoval tam o digitalizovaných mechanických systémech, které se vyvíjejí v nespojitých časových krocích a nikoli spojitě. To jej vedlo k tomu, že uvažoval o umělých pravidlech řídících obnovování stavu takového systému v čase; tak se zrodily jeho „výpočetní prostory“. Dobrým obecným úvodem do tohoto oboru je kniha T. Toffoli and N. Margolus, *Cellular Automata Machines* (MIT Press, Cambridge, MA, 1987).

samotným životem. Rozšířil Turingovu práci tím, že ukázal, že teoreticky existuje univerzální automat čili stroj s jistou definovanou mírou komplexity, který bude dělat vše, co může dělat jakýkoli jiný stroj, je-li vybaven správnými instrukcemi. Za jistou hranicí nemusíte už váš stroj dále zesložitovat, abyste z něj dostali komplikovanější práci: stačí mu dát složitější instrukce. Díky nevyhnutelným mutacím, které pocházejí z logických chyb uvnitř automatu, bude jeho reprodukce příběhem s otevřeným koncem a umožní v průběhu času vznik složitějších a složitějších organismů. V prostředí s omezenými zdroji dojde k selekčnímu tlaku, který povede k čemusi na způsob darwinovské evoluce.

## Celulární automaty

Na to, aby se o robota zajímala široká veřejnost, byly jeho uváděné schopnosti příliš vzdálené od chemie, fyziky a mechaniky. Matematik Stanislaw Ulam poradil von Neumannovi, jak dát sebereprodukujícímu se automatu abstraktnější, jednodušší a elegantnější formu.<sup>114</sup> Ulam se narodil v ukrajinském Lvově, v tehdejší rakousko-uherské monarchii, a vzpomínal, jak přemítal o možnosti umělých automatů, když dvacet let před von Neumannovou přednáškou sedával ve Lvovské kavárně.<sup>115</sup> Když se obeznámil s tím, co dělá von Neumann, navrhl nahradit plovoucího robota "mozaikovým robotem". Tento kuriózní pojem naznačuje, jak byl Ulam inspirován růstem krystalů, který probíhá skládáním jednotkových bloků jako kostiček mozaiky.

To, co Ulam navrhl, byl celulární automat,<sup>116</sup> abstraktní pravidelné seskupení buněk naprogramovaných tak, že hromadně provádějí činnost podle pravidel. Tento soubor buněk provádějících v unisonu výpočty můžeme chápat jako organismus poháněný čistou logikou. Ulam si představoval novou strukturu automatu, která sestává z mřížky či pravidelné sítě uzlů, přičemž pro jednoduchost uvažujeme čtvercovou mřížku, kde čtvercům říkáme buňky a uzlům mřížové body. Čas u

---

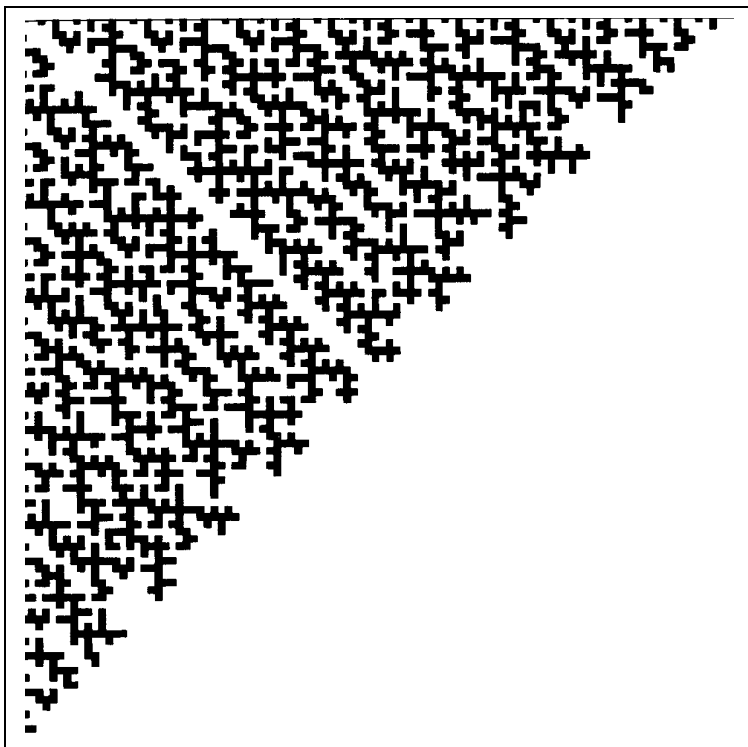
<sup>114</sup> S. Ulam, Proc. Int. Cong. Mathem. 2, 264 (1952).

<sup>115</sup> Brzy poté, co se sedmnáctiletý Ulam zapsal na Lvovskou polytechniku, zjistil, že skutečně důležitá matematika se neučí v posluchárnách, ale nachází se naopak v prostředí podobném Babbageově Analytické společnosti. V jedné z velkých městských kaváren, ve Skotské kavárně, Lvovští matematikové denně tlachali a debatovali.

<sup>116</sup> Termín pochází od Arthura Burkse.

□ Někdy se používá také název buněčný automat, (pozn. překl.)

tohoto automatu není spojitý, ale diskrétní, takže postupuje vpřed skokem při každém tiknutí hodin. Stav automatu je v každém okamžiku dán stavem všech jeho mřížových bodů. Automat se vyvíjí podle sady jednoduchých pravidel, která určují, jak se každá buňka mění od jednoho okamžiku k druhému. Tato pravidla nezávisí jen na stavu daného mřížového bodu v určitém okamžiku, ale i na stavu jeho sousedů. V každém okamžiku diskrétního času mřížový bod vezme v úvahu tuto lokální informaci a rozhodnutí, co má dělat příště, si vyhledá v předem definované tabulce založené na těchto pravidlech.



Obrázek 4.1 / Ulamův automat.

Obrázek jednorozměrného celulárního automatu, který "ukazuje, jak je stav každého bodu obnovován od jednoho časového okamžiku k druhému. Stav v daném časovém kroku je znázorněn pixely na jedné řádce.

Cellulární automat, fungující takovýmto způsobem, provádí logické operace, a to von Neumann právě chtěl. Viděl, že všechno, čeho se v jeho původním automatu dosahovalo pohybem, může provádět v U

lámově buněčném systému díky přenosu informace od buňky k buňce. Von Neumanna Ulamův návrh obzvláště zaujal, protože se v té době zajímal o zvýšení rychlosti počítačových výpočtů prostřednictvím paralelního zpracování. Protože vývoj celulárního automatu je založen na lokálních pravidlech, informace, kterou každý mřížový bod potřebuje k rozhodnutí, co bude dělat příště, závisí jen na malém počtu dalších mřížových bodů v okolí. To znamená, že celulární automaty jsou svou podstatou paralelní, neboť můžeme rozdělit mřížku na oddělené oblasti, v nichž může výpočet probíhat souběžně, a problém nastává jedině na hranici mezi dvěma takovými oblastmi. Tak se na celulární automaty můžeme dívat jako na paradigma paralelních výpočtů, podobně jako je univerzální Turingův stroj paradigmatickým pro sériové výpočty.

Von Neumannův celulární automat byl představen veřejnosti na univerzitě v Princetonu v New Jersey v rámci Vanuxemových přednášek konaných od 2. do 5. března 1953. Posluchači spatřili nepříliš elegantní strukturu složenou ze základního obdélníka tvořeného 80 krát 400 čtverci, stavebního ramene a ocasu obsahujícího dalších 150 000 čtverců. Sebereprodukující se objekt se dohromady skládal z přibližně 200 000 buněk, z nichž každá mohla být v jednom z 29 stavů. K reprodukci užíval stroj souhry svalů a mozku: neurony zajišťovaly logické řízení, přenosové buňky přenášely zprávy z řídicích center a svaly měnily okolní buňky. Ozdobou stroje byl Turingův chvost, dlouhý pás obsahující zakódované instrukce. Řízené pravidly celulárního automatu stroj vysune rameno do panenské části prostoru, pak pomalu prochází sem a tam, přičemž posloupností logických manipulací vytváří svou vlastní kopii. Kopie pak může vytvořit další kopii atd. Později se podařilo jeho automat podstatně zjednodušit. Von Neumannovi se nicméně povedlo předvést, jaký druh komplexity sebereprodukce vyžaduje. Tyto automaty se pak mohou vyvíjet darwinovským způsobem: jak náhodné mutace mění "genetickou výbavu" těchto počítačových "tvorů", ti lepší jsou selektováni v soutěži o omezené počítačové zdroje, paměť a strojový čas. Nenašel se "žádný nezvratný důkaz, že mezi člověkem a strojem je zásadní propast".<sup>117</sup>

---

<sup>117</sup> J. Kemeny, Scientific American 192, 67 (1955).

## Pád a vzestup automatů

Po von Neumannově předčasné smrti nesl pochodeň celulárních automatů Arthur Burks, který pracoval jako elektroinženýr v Moore School ve Philadelphii. Přitom pracoval na vývoji ENIACu a redigoval von Neumannovy posmrtně vydané rukopisy o teorii automatů.<sup>118</sup> V roce 1949 byl Burks jmenován vedoucím skupiny počítačové logiky na Michiganské univerzitě. Od té doby začal s finanční podporou společnosti Burroughs Company systematicky zkoumat vztahy mezi výpočty a biologickými procesy.

Burks aktivně povzbuzoval ostatní, aby se zabývali celulárními automaty, a brzy je začal používat jeho student John Holland. V roce 1960 Holland navrhl "počítač s iterativními obvody" příbuzný celulárním automatům, který mohl napodobovat genetické procesy: programy libovolné délky byly uloženy v souboru sousedících buněk. Takové programy se mohou hýbat, štěpit se, spojovat se, řídit nebo konstruovat jiné programy a dělat své vlastní kopie. Několik let nato načrtl představu automatů, které se dokážou přizpůsobit svému prostředí a dají se použít k řešení optimalizačních úloh. Mezitím Ulam a Robert Schrandt ukázali, že simulace celulárních automatů mohou z velmi jednoduchých zákonitostí vyprodukovat pozoruhodně komplexní rozsáhlé struktury, které dokonce vypadají jako živé.<sup>119</sup> Vytvořili bizarní a nepřehledné prostorové struktury z barevných cihliček a s použitím počítačů v Los Alamos dokonce režírovali "rvačky" mezi automaty. Navzdory těmto náznakům začínající nové vědy o komplexitě tento obor většinou živořil, částečně kvůli nedostatečnému výkonu počítačů a částečně proto, že dobře nezapadal do obvyklých demarkačních čar vymezujících akademické disciplíny.

Protože však jsou celulární automaty skutečně cosi jako matematické hry, začali o ně na konci 60. let projevovat jistý zájem matematikové, kteří se o nich doslechli. Nejznámější příklad celulárního automatu, který měl na tento obor v roce 1970 veliký osvěžující účinek, byl tak populární právě díky tomu, že vypadá jako zábavná hra. John Conway na Gonville and Caius College v Cambridgi tehdy vymyslel hru "Life". □

<sup>118</sup> J. von Neumann, *Theory of Self Reproducing Automata*, A. Burks (ed.) (University of Illinois Press, Urbana and London 1966).

<sup>119</sup> A. Burks (ed), *Essays on Cellular Automata* (University of Illinois Press, Urbana and Chicago 1970), str. 219.

□ „Game of Life”. John H. Conway nevymyslel jen tuto hru, ale řadu dalších, viz knihu J.



Dřívější práce Ulama a Schrandta, kteří experimentovali s různými okolími, počty stavů a pravidly, mu byla dobře známa. Conway zvolil svá pravidla velice pečlivě, tak aby vystihl jemnou rovnováhu mezi dvěma krajnostmi: příliš mnoho obrazců, které rychle a neomezeně rostou, a příliš mnoho těch, které rychle vymizí.

Působivý název hry odrážel Conwayovo okouzlení tím, jak jeho kombinace několika málo pravidel může produkovat komplexní globální obrazce, které se rozpínají, mění tvar a nebo nečekaně vymírají. Conwayovo intelektuální dítko představil veřejnosti Martin Gardner v časopise *Scientific American* jako "fantastickou zábavu pro samotáře".<sup>120</sup> Tento článek předložil čtenářům návod, jak reprodukovat chování skutečného života, a nebylo přitom potřeba nic víc než "notně veliká šachovnice a vydatná zásoba plochých žetonů dvou barev". Chvilí se těšila popularitě hraničící s kultem a udělala z celulárních automatů běžný pojem v jedné generaci vědců.

Někteří jí říkají "hra na Boha" a myslí tím to, že hráči je dán k dispozici vesmír jako dětská hračka. Je snadné se zúčastnit, nevyžaduje to zázraky, zástup oddaných věřících ani svaté knihy. Představte si šachovnici s žetony v několika čtvercích. Pak jeďte podle následujících pravidel: pokud má prázdný čtverec tři obsazené sousedy (jak po diagonále, tak po stranách), také on obdrží žeton. Buňka "ožije", živená svými sousedy. Pokud má čtverec dva obsazené sousedy, zůstává beze změny. Konečně má-li obsazený čtverec jakýkoli jiný počet obsazených sousedů, ztrácí svůj žeton - máme-li to antropomorfizovat, buňka umírá touhou po sousedské lásce, neboje udušena přelidněním.

Pravidla této šachovnice představují zákony fyziky (nebo života) a obrazce představují materiální objekty. Na konci 60. let byla matematická katedra univerzity v Cambridgi několik měsíců zcela pohlcena Conwayovými ranými pokusy s hraním této hry. Z malého stolu se rozrůstaly sestavy žetonů a mušlíček, označujících spousty "živých" čtverců, po celé podlaze společné místnosti, jak byla pravidla uváděna do chodu při čajových přestávkách. V té době Conway používal ke studiu zvlášť dlouho žijících populací také počítač PDP-7.

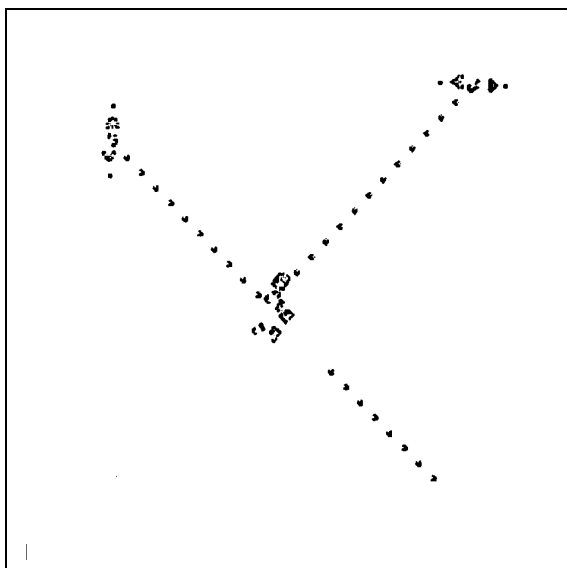
Skupinka lidí, kteří se hry účastnili, zjistila, že aplikováním základních pravidel na každý čtverec může z jednoduchého startovního uspořádání povstat velmi komplexní chování. Objevilo se několik obrazců, které dostaly tak působivá jména jako úl, bochník, rybník,

---

Conway, *Numbers and Games*, Academic Press, New York 1976. (pozn. překl.)

<sup>120</sup> M. Gardner, *Scientific American* 223 120 (1970).

vana, had, loď, dlouhá loď, včelín, pulzar a také kluzák,<sup>□</sup> což, jak jméno napovídá, byla skupina žetonů, která se posouvala po šachovnici. Conway odhadoval, že žádná na začátku konečná populace nemůže neomezeně růst, a nabídl padesát dolarů tomu, kdo to jako první dokáže, nebo vyvrátí. Cenu získala v listopadu 1970 jedna skupina pracující na projektu umělé inteligence na MIT, která objevila "kluzákové dělo",<sup>□</sup> tj. obrazec, který každých třicet kroků vypustí jeden kluzák. Jelikož každý kluzák přidá do hry pět dalších žetonů, populace bude neomezeně růst. Ukázalo se, že křížící se proudy kluzáků produkují fantastické výsledky, plodí zvláštní obrazce, které samy vypouštějí kluzáky.



Obrázek 4.2 / Hra Life. Kluzákové dělo.

Někdy se srážkové konfigurace rozšířily tak, že spolklly všechna děla. V jiných případech srážející se hmota zlikvidovala děla tím, že "odpověděla palbou". Gardner o tom píše: "Posledním výkřikem virtuozity této skupiny [na MIT] je způsob, jak umístit děla tak, že protínající se proudy kluzáků sestaví továrnu, která poskládá a vypustí každých 300 kroků lehký kosmický koráb." Obrazce, které Life vytváří, mohou být neobyčejně složité. Ve skutečnosti se dá ukázat, že tento

<sup>□</sup> Glider (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Glider gun (pozn. překl.)

celulární automat je ekvivalentní univerzálnímu Turingovu stroji - jakýkoli výpočet, který se dá provést na jakémkoli myslitelném Turingově počítačím stroji, se dá uskutečnit také pomocí hry Life.

S použitím počítačů se ještě dnes hrají nekonečné variace hry Life. Byly použity k simulaci komplexních jevů, jako jsou biologický vývoj, chemické reakce, růst krystalů, struktura sněhových vloček a říční meandry. Celulární automaty vykázaly úspěchy v reprodukování mnoha aspektů komplexity pozorovatelného světa, jako jsou růst, shlukování, rozmnožování a evoluce. V dalších kapitolách se setkáme s celulárními automaty, používanými ke zkoumání některých z těchto procesů.

Přitažlivost celulárních automatů pro studium komplexních a emergentních jevů elegantně shrnuli Tommaso Toffoli a Norman Margolus z MIT: "Celulární automaty jsou stylizované syntetické vesmíry, definované jednoduchými pravidly, dosti podobné deskovým hrám. Mají svou vlastní formu hmoty, která se složitě pohybuje ve svém vlastním prostoru a čase. Lze jich vymyslet ohromné množství. Lze je skutečně realizovat a pozorovat, jak se vyvíjejí."

## Turbulentní automaty

Ve světle von Neumannova hlubokého zaujetí dynamikou tekutin, o němž jsme mluvili v předešlé kapitole, je ironií osudu, že studium celulárních automatů se v posledních asi tak deseti letech pohnulo kupředu hlavně díky opožděnému objevu, že se dají použít k modelování komplexního proudění tekutin. Takzvané automaty s mřížovým plynem<sup>□</sup> dokážou modelovat proudění ropy a vody porézní horninou a víření mořské vody kolem překážek, například kolem lodních šroubů.

Dřívější metody modelování toku kapalin užívaly přístup "shora dolů", založený na Navierových-Stokesových rovnicích, jak jsme uvedli v 3.kapitole. Když byla na přelomu 20. století dokázána existence atomů a molekul, začalo být teoreticky možné modelovat proudění tekutin pomocí přístupu "zdola nahoru", zvaného molekulární dynamika. V molekulární dynamice se používá atomární popis a ke zjištění, co se děje, když se všechny atomy v tekutině šťouchají a srážejí, se používají Newtonovy pohybové rovnice. Zní to jednoduše, ale je to beznadějně nepraktické při studiu proudění tekutiny. Uvážíme-li nesmírné množství

---

<sup>□</sup> Lattice-gas automata (pozn. překl.)

molekul v jakémkoli makroskopickém vzorku tekutiny - řádově je jich 100 000 000 000 000 000 000 000 - je molekulární dynamika výpočetně neprůstředná.

Třída celulárních automatů nazývaných mřížové plyny umožňuje výpočet laminárního proudění, turbulence a dalších jevů v proudící tekutině ve velkých prostorových a časových škálách, aniž by se musela uvažovat veškerá mikroskopická informace nezbytná v molekulární dynamice. Celulární automaty s mřížovým plynem tedy nabízejí výhodnou pozici na půli cesty. Říká se jim mezoskopické modely, protože nabízejí zrnitý obraz tekutiny, který leží někde mezi makroskopickým Navierovým-Stokesovým obrazem a mikroskopickým obrazem molekulární dynamiky. Modelují soubory částic, pohybujících se na symetrické mřížce ve dvou nebo třech dimenzích, s několika směry pohybu. Tento vesmír umělých částic se obvykle řídí dvěma fyzikálními zákony: při srážkách s jinými částicemi se zachovává energie i hybnost.

Může se zdát, že modely s mřížovým plynem mají daleko k Navierovým-Stokesovým rovnicím, užívaným v klasickém přístupu "shora dolů". Avšak Uriel Frisch, Brosl Hasslacher a Yves Pomeau ukázali, že chování takových automatů v tzv. přiblížení středního pole je opravdu aproximací Navierových-Stokesových rovnic.<sup>121</sup> Lze také argumentovat, že model s mřížovým plynem je realističtější výchozím bodem pro modelování tekutin než samotné Navierovy-Stokesovy rovnice. Jak jsme zdůraznili dříve, všechny tekutiny se skutečně skládají z oddělených částic, a nedají se tedy považovat za spojité. Pro některé typy komplexních tekutin (například takových, které obsahují velké molekuly polymerů) opravdu nemusí existovat žádný známý hydrodynamický popis.

Celulární automaty však přece mají některé nevýhody a pro některé jednoduché problémy mohou být metody s mřížovým plynem pomalejší než metody založené na Navierových-Stokesových rovnicích. Panuje nicméně obecná shoda, že metody používající celulární automaty jsou to

---

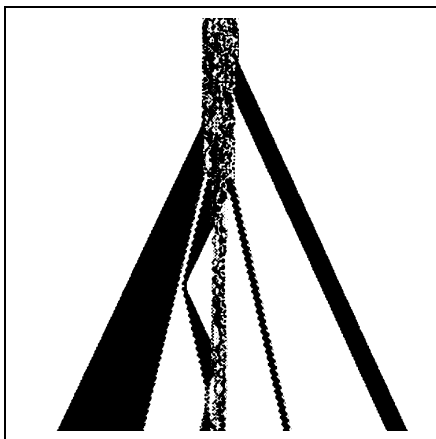
<sup>121</sup> U. Frisch, B. Hasslacher, and Y. Pomeau, Phys. Rev. Lett. 56, 1505 (1986). Tito autoři ukázali, že třída deterministických mřížových plynů s diskrétními booleovskými prvky simuluje Navier-Stokesovy rovnice a dá se použít ke konstrukci jednoduchých, masivně paralelních počítačích strojů. Víceméně současně publikoval Stephen Wolfram, tehdy na Institutu pro pokročilá studia v Princetonu, článek, v němž odvodil spojité rovnice pro modely celulárních automatů s mřížovým plynem; S. Wolfram, / Stal. Phys. 45, 471 (1986).

pravé pro popis komplexních situací včetně směsí ropy s vodou, proudění doprovázené chemickými reakcemi a stékání po drsných a náhodných povrchích. Jednou aplikací, v níž celulární automaty vynikají, je studium prosakování vápencovými a pískovcovými horninami, v nichž se nachází ropa, díky čemuž dokážeme ropu dokonaleji vytěžit.

Uvědomíme-li si dvoustranný von Neumannův zájem jak o výpočet dynamiky tekutin, tak o celulární automaty, může to vypadat jako ironie, že nepoužil druhé k prvnímu, ale není na tom nic překvapivého. Celulární automaty byly přílišnými žrouty počítačového výkonu a pro sériové stroje, které tehdy převládaly, se moc nehodily. K odhalení komplikovaných makroskopických vzorů, které často vznikají, potřebujeme velké množství mřížových bodů; aby se vyvinula taková struktura, musíme programu dovolit, aby běžel velmi dlouho. Typický výpočet může vyžadovat uskutečnění mnoha miliard událostí (odpovídajících nastavení nového stavu jednotlivých mřížových bodů), z nichž každá zabere nějakých třicet strojových operací, z nichž každá zase představuje několik strojových taktů (což může být na rychlém stroji deset mikrosekund). Trvalo by roky, než by se na strojích, které měl k dispozici von Neumann, spočítalo něco, co by stálo za řeč.

## Wolframovy třídy

Dejte vědcům vesmír a budou si hrát na Boha. Jak říká náš citát z Toffoliho a Margoluse, lze definovat nekonečné vesmíry celulárních automatů tím, že se zvolí různá pravidla, která řídí jejich evoluci. Tím se dostáváme k obecnější otázce: plyne z toho, že obecné chování celulárních automatů je stejnou měrou různorodé, nebo se objeví nějaké všeobecně platné rysy? Pokud existují univerzální rysy, umožnily by nám říci něco o typech chování, které je možné v jakémkoli komplexním systému simulovaném tímto způsobem.



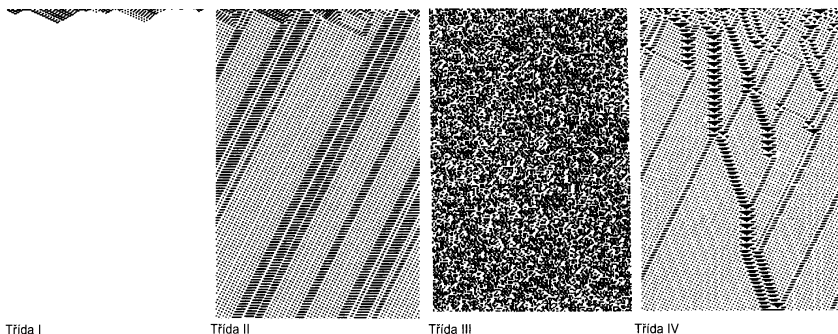
Obrázek 4.3 / Nejjednodušší vesmír.  
Typické chování jednorozměrného celulárního automatu.  
Nový stav každého bodu se ukazuje vždy o řádek níže.

Tuto otázku si položil Stephen Wolfram,<sup>□</sup> který v té době působil na Institutu pro pokročilá studia v Princetonu a který se zajímal o to, jak souvisejí lokální pravidla s globálním chováním. Krása celulárních automatů spočívá v tom, že poskytly Wolframovi nepřekonatelně jednoduché počítačové prostředí pro studium otázky, odkud se bere komplexita. Wolfram studoval nejjednodušší "vesmír", jednorozměrné automaty, kde všechny body jsou uspořádány na přímce. Počáteční stav celulárního automatu, definovaný stavy všech jeho buněk, byl nastaven náhodně a zobrazen nahoře na obrazovce počítače.

Výsledek použití lokálních pravidel - která mohou změnit stav každého mřížového bodu - se dá vhodně zobrazit v další řadě pixelů. Tato procedura se dá opakovat donekonečna. Stačí jeden pohled na obrazovku počítače a hned vidíme všechny pravidelnosti a vznikající obrazce. Na obrázku 4.3 máme příklad toho, co může nastat.

Wolfram dospěl k závěru, že bez ohledu na to, jaká specifická lokální pravidla se použijí, dlouhodobé chování celulárních automatů se dá roztrždit do čtyř typů (viz obr. 4.4). První skupinou je třída I, v níž obrazce časem zmizí a změní se na pevný, statický, homogenní stav; následuje třída II, v níž se vyvinou obrazce se stálou konečnou dobou trvání a tvoří struktury, které se donekonečna opakují.

<sup>□</sup> S.Wolfram je daleko známější (zejména mezi studenty) jako autor počítačového programu Mathematica, který nejen upravuje algebraické výrazy, postrach to středoškoláků, ale také derivuje, integruje a řeší algebraické i diferenciální rovnice, (pozn. překl.)



Obrázek 4.4 / Příklady celulárních automatů tříd I, II, III a IV.

(S laskavým svolením Andrewa Wuensche; obrázky byly vytvořeny s použitím jeho softwaru pro osobní počítač "Discrete Dynamics Lab", který je k dispozici jako shareware na internetu po stažení souboru ddlab.zip pomocí anonymního ftp z adresáře pub/alife/ddlab na uzlu ftp.cogs.susx.ac.uk nebo z webu na adrese <http://alife.santafe.edu/alife/software/ddlab.html>.)

Celulární automaty z třídy III dávají takzvané chaotické stavy (tedy struktury, které se nikdy neopakují), nepodobající se ničemu pravidelnému; a nakonec je tu třída IV, v níž nepravidelně vyrůstají a zase mizejí komplexní obrazce.<sup>122</sup> Tak mohou z nekonečné množiny možných jednoduchých lokálních pravidel povstávat čtyři kvalitativně odlišné typy globální dynamiky. Wolframovo klasifikační schéma je nicméně čistě fenomenologické a nevysvětluje, jak tyto třídy vznikají a jaké jsou vztahy mezi nimi.

Třída IV je nejzáhadnější a automaty, které do ní patří, mají nejkomplexnější chování. Jedním příkladem je Conwayova hra Life. Takovéto automaty vykazují značnou lokální organizaci, avšak málo dalekodosahového uspořádání. Když si Wolfram uvědomil, že o hře Life se již dříve vědělo, že může být základem univerzálních výpočtů, přišel s hypotézou, že celulární automaty třídy IV budou obecně schopny provádět výpočetní úkony, možná včetně univerzálních

<sup>122</sup> S. Wolfram, *Reviews of Modern Physics* 55, 601 (1983). Celulární automaty (CA) třídy I mají atraktory jako fixní body; třída II se vyvine do limitních cyklů; třída III se spojuje s podivnými čili chaotickými atraktory. Automaty třídy IV nemají žádnou analogii mezi dynamickými systémy se spojitým časem (viz kapitolu 6): CA třídy IV jsou spojeny s existencí velmi dlouho žijících přechodových stavů. V kontextu studií umělého života se však hodně zdůrazňuje důležitost komplexní dynamiky odpovídající chování třídy IV. Takzvaná „hrana chaosu“, kterou budeme rozebírat dále, odpovídá dynamickému chování třídy IV, vložené mezi třídu II a třídu III (kapitola 8).

výpočtů. Později se ukázalo, že tato třída tvoří hranici mezi periodickým (třída II) a chaotickým (třída III) chováním.

Na základě skutečnosti, že se celulární automaty používají jako modely živých systémů v celé jejich komplexitě, dospěli někteří badatelé k závěru, že mezi biologickým životem a umělými systémy schopnými provádět univerzální výpočty jsou nápadné paralely. Toto velice zajímavé tvrzení, které se opírá o argument, že živý systém musí být schopen provádět při svém boji o přežití výkony libovolně velké složitosti, podrobněji prozkoumáme v 8. kapitole.

## Programovatelná hmota

Celulární automaty nejenže představují přirozený způsob, jak modelovat přírodní procesy, ale poskytují také motivaci pro návrh nového počítačového hardwaru, na němž by modely mohly běžet efektivněji. V konvenčních sériových počítačích je trvání každého výpočetního cyklu omezeno rychlostí signálů v elektronických obvodech - a tedy nakonec rychlostí světla. Jak se systém zvětšuje, prodlužují se dráhy, jimiž se signály musejí šířit, a tak roste doba jednoho cyklu. V hardwarové realizaci celulárního automatu dochází ke komunikaci pouze mezi sousedními částmi hardwaru, takže délka dráhy už nezávisí na velikosti stroje. Přidávání dalších mřížových buněk tedy v principu nemá vliv na čas potřebný k nastavení nového stavu velkého celulárního automatu.

První pokusy o vývoj hardwarových realizací celulárních automatů přišly na počátku 50.let, když britští vědci zkoumali, jak zkombinovat televizní obrazovku s počítačem k analýze spadových částic. Do poloviny téhož desetiletí se používaly k počítání mikroskopických objektů jednoduché logické obvody interagující s okolím. Výsledky tohoto výzkumu nám dnes pomáhají v nemocnicích, kde na základě těchto technik fungují přístroje, které prohlížejí a analyzují snímky krvinek. Stále však pokračuje práce na vývoji čím dál rychlejších strojů s celulárními automaty pro obecné využití. V Laboratoři informatiky na Massachusettském technologickém institutu mají jednu nevábnou bednu elektroniky, velkou asi jako truhla. Je to poslední ze série specializovaných hardwarových zařízení, navržených tak, aby v plné míře zužitkovala nezkrotnou sílu celulárních automatů. Při plném výkonu dokáže pár desek s obvodou ve stroji zvaném *Cellular Automata Machine 8* předstihnout superpočítač a generovat obrazce, které



modelují tak rozličné jevy, jako jsou vypařování kapky kapaliny, šíření lesního požáru nebo šíření zvukových vln. Podle jeho architektů je to syntezátor vesmírů: "Stejně jako varhany je vybaven klávesami a rejstříky, jimiž se možnosti nástroje povolávají k činnosti, kombinují se a představují. Jeho barevná obrazovka je oknem, jímž můžeme pozorovat vesmír, který se ,hraje!."<sup>123</sup>

Stroj, dokončený roku 1993, je dítětem Normana Margoluse, vědce, který na jeho konstrukci téměř deset let usilovně pracoval spolu se svým kolegou Tommasem Toffolim. Původně to byl Toffoli, kdo chtěl realizovat úplně novou počítačovou architekturu, vhodnou k provádění simulací s celulárními automaty. Jako fyzikové se zajímali o to, jak věrně se dá výpočet mapovat na chování reálného světa. Do práce je zprvu poháněla frustrace z omezených možností tehdejších pracovních stanic, které dokázaly nastavovat nový stav "vesmíru" o milionu buněk pouze jednou za minutu, což byl dosti bídný výkon. Toffoli zjistil, že by dokázal tento proces urychlit přidáním jednoho kusu jednoduchého hardwaru v ceně několika dolarů. Ten procházel buňkami ve stroji a byl optimalizován na to, aby aplikoval jednoduchá pravidla na okolí buněk.

Tak přišel na svět CAM-1. Rok za rokem přibývalo vylepšení, od CAM-2 po CAM-6, jak si Toffoli a Margolus hráli s hardwarem a s programy. Logickým extrémem jejich práce by byla konstrukce stroje, který by obsahoval jeden procesor pro každou buňku. To se však nevyplácí. "Čím usilovněji se snažíte nacpat procesory na čip, tím horší problémy vám nastanou při spojování těchto čipů," poznamenal Margolus. Poslední generace, CAM-8, pokračuje v trendu sdílení jednoho procesoru mnoha buňkami, přidává však nový trik: Margolus opustil tradiční pohled na buňku, podle nějž každá z buněk interaguje se všemi buňkami - a tudíž se všemi daty - v daném okolí. Místo toho CAM-8 posouvá obrovské listy s daty sem a tam ve třech či více rozměrech a každý bit dat interaguje pouze na tom místě, kde právě přistál.

"Pohybujeme s daty tak, aby všechna přistála na místě, které potřebujeme," říká Margolus. "Je to jako fyzická srážka dat: data mohou interagovat jen tehdy, když přistanou na totéž místo. Toto schéma je ideální pro simulace s mřížovým plynem, kde se částice pohybují a srážejí. ... Teď to vypadá zcela jasně, byli jsme však tak hloupí, že nám to trvalo deset let - a ostatní lidé si ničeho nevšimli." Výsledkem je

---

<sup>123</sup> T. Toffoli and N. Margolus, *Cellular Automata Machines* (MIT Press, Cambridge, 1987).

CAM-8, počítačové prostředí mající několik rozměrů, tak jako skutečný svět, a ušité na míru neklidnému zástupu buněk. Toffoli rád hovoří o svém milionu milionů buněk jako o "programovatelné hmotě".

Jejich představa je taková, že čím víc se sám počítač bude podobat světu, tím lépe bude modelovat jeho komplexní rysy. Proto se pokoušejí navrhnout stroje schopné nakládat s ještě větším počtem automatů a reprodukovat vesmír tak, jak je složen z atomů a molekul. Řečeno Margolusovými slovy: "Pokud postavíte počítač, který má tutéž strukturu jako svět, pak malý kousek světa může odpovídat malému kousku počítače a dvě části světa, které spolu sousedí, mohou odpovídat dvěma sousedním částem počítače. A tak se dá nahromaděním hardwaru udělat tak velký počítačový svět, jak je komu libo."

Tato práce měla mnoho aplikací při modelování krystalizace, složitého proudění tekutin a chemických reakcí. Má také praktické použití pro vytváření speciálních filmových efektů a na počítačové generování hologramů v reálném čase. Jeden z nejpůsobivějších vedlejších produktů je osm let trvající výzkumný projekt, který probíhá od roku 1993 v ATR Laboratořích pro výzkum zpracování informací člověkem<sup>□</sup> v japonském Kjótu. Hugo de Garis doufá, že v prostředí CAM-8 ponechá obrovské síť výpočetních prvků vyvíjet se k čemusi, co optimisticky nazývá umělý mozek. První etapu na cestě k úspěchu zdolal v létě roku 1994, kdy bylo vyvinuto přes 1100 pravidel, podle nichž se propojí dvojrozměrná síť v projektu "CAM-mozku" (viz obr. 4.5). Dnes se simulují trojrozměrné síť a de Garis doufá, že do konce tisíciletí dokáže vyvinout síť tvořenou miliardou "neuronů", skládající se z bilionu buněk, a potrvá mu to devatenáct měsíců. Tato síť se použije na řízení automatu s omezeným repertoárem chování, jakéhosi "mláďete robota".<sup>124</sup> Podobnou práci provádějí dnes také Rodd Kaloudis na MIT a Eduardo Sanchez na Švýcarské federální technice v Lausanne.

## Cement: tvrdý oříšek

Celulární automaty mohou příležitostnému čtenáři stále připadat jako cosi odtažitě ezoterického. Používají se však k řešení čím dál většího počtu zcela praktických problémů. Mezi mnoha jejich aplikacemi je

---

<sup>□</sup> Human Information Processing Research Laboratories (pozn. překl.)

<sup>124</sup> H. de Oaris, Brain Building: The Evolutionary Engineering of Artificial Nervous Systems (Wiley, 1995).

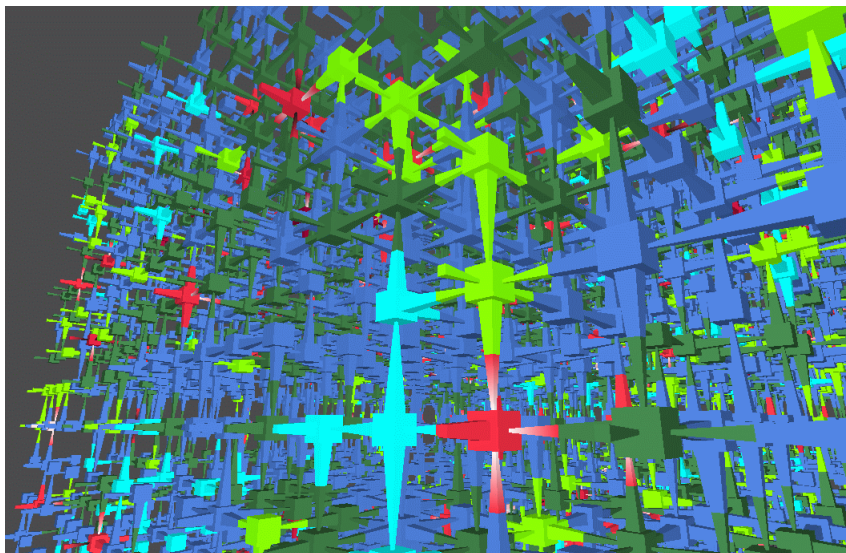
jedna, která pomáhá odhalit tajemství starého a tradičně důvěryhodného materiálu, který je široce využíván přinejmenším od doby římské říše. Jde o cement, všudypřítomný a nepříliš efektní materiál, který však zůstává jednou z nejkompexnějších a nejméně pochopených látek, které používáme. Dnes se nám hroubí mosty, silnice a další betonové stavby postavené před několika desítkami let, a to proto, že nerozumíme jeho vlastnostem. Není však těžké pochopit, proč je fyzika a chemie cementu a betonu tak tajemná.

Cementový prášek je extrémně komplexní. Skládá se z částíček mnoha minerálů různých velikostí a nepravidelných tvarů, jejichž rozměry sahají od méně než jednoho mikronu (milióntiny metru) do sta mikronů (jedné desetitisíciny metru). Když se tento prášek smíchá s vodou, dojde k celé plejádě chemických reakcí, které nakonec změní původní kaši na nosný, porézni materiál.

Právě tak jako směs na koláče v prášku během pečení tuhne, aby pak pevně držela ovoce a oříšky v ovocném moučniku, tuhne také cement a tvoří "matrici" pro beton, kompozit složený z cementu, šterku a písku. Proces tuhnutí je neuvěřitelně složitý. Různé chemické složky v cementovém prášku reagují s vodou různě rychle a vzájemně na sebe působí, čímž vznikají nové hydratační produkty. Některé z nich se ukládají na povrchu zbývajících částic cementu; z jiných se tvoří krystalky ve vodou naplněných skulinách mezi cementovými zrnky.

Mikroskopické interakce ovlivňují mikroskopickou strukturu; ta zase určuje, zdaje cement dosti pevný, aby unesl věž nebo most. Některé z produktů hydratace obsahují póry, které jsou velké řádově miliardtinu metru. Naproti tomu nalezneme v betonu kameny měřící několik centimetrů, takže významné jevy se odehrávají na délkových škálách sahajících od jedničky do deseti milionů. Kolem cementu se točí spousta peněz, takže úsilí o pochopení souvislostí mezi jeho konečnými vlastnostmi a způsobem jeho výroby je značné.

Při simulaci hydratace cementu jsou celulární automaty velice užitečné. Zde se stává z nouze ctnost. Zdůrazňovali jsme, že programovatelná hmota v celulárním automatu se nachází na délkových škálách někde mezi molekulární představou hmoty složené z jednotlivých částic a spojitými makroskopickými modely, jako jsou například Navierovy-Stokesovy rovnice používané v mechanice tekutin. Rozmezí, v němž nacházíme složky cementu, od pórů po shluky kamení, je podobné.



Obrázek 4.5 / Trojrozměrný mozek.  
Jedna ze sítí, vyvinutých v projektu CAM-mozku.

Ačkoli přesné chemické složení cementu není do detailu známo, dokáže celulární automat alespoň pracovat s velkou škálou složek nepravidelných tvarů a velikostí. Šachovnicová či šestiboká mřížka celulárních automatů se dá "vybarvit" podle reálných údajů. Digitální obrázky získané z elektronového mikroskopu a chemické analýzy se dají použít jako startovní bod pro dvojrozměrné simulace. Počáteční stavy se dají odvodit také z jiných počítačových simulací idealizovaných materiálů, dávajících počítačem generované obrázky tvořené polem "pixelů" či "voxelů" (což jsou zkratky z anglických výrazů "picture element" čili obrazový prvek - ve dvou dimenzích - a "volume picture element" čili prostorový obrazový prvek - ve třech dimenzích); viz obrázek 2 barevné přílohy.

Máme-li takovýto detailní popis rozmístění jednotlivých složek, můžeme nechat celulární automat modelovat, co se stane, když stavební dělník přilije do cementu vodu. Z digitálního obrazu počátečních podmínek a s použitím známých chemických procesů dokážeme krok za krokem nalézt nový chemický stav, tak jak hydratace působí na různé přítomné materiály. Díky počítačové grafice dokáže operátor sledovat, co se s cementem děje na všech úrovních, od zrnka písku po kámen.

Takový model dokáže odhalit míru vzájemného propojení pevných zrn po přidání vody k cementu, protože nám umožňuje sledovat vývoj mikroskopické struktury. To skutečně vědcům umožnilo, aby si uvědomili, že okamžikem ztuhnutí bude dobře definovaný perko lační práh, což je okamžik, kdy se izolované shluky rozptýleného materiálu spojí a vytvoří tuhou síť, která se rozprostírá přes celý systém, ať cement ucpává vrt nebo drží pohromadě mrakodrap. Za perkolačním prahem se zbývající izolované shluky postupně připojují k této kostře. Když cement prochází perkolačním prahem, jeho vlastnosti se náhle prudce změjí. Tato práce nám poprvé umožnila přesně definovat, co se mívá tuhnutím cementu. A naopak, pojem perkolačního prahu vědcům dovolil identifikovat měřitelnou změnu, ke které dochází současně s tuhnutím: za perkolačním prahem by měly být příčné ultrazvukové vlny - zvuk o vysoké frekvenci, převyšující možnosti lidského ucha - schopné projít cementovou kaší, kdežto před perkolačním prahem nikoli. Tato hypotéza, poprvé zformulovaná na základě modelu s celulárním automatem, byla následně potvrzena experimentálně. Při betonování stojí čas spousty peněz, takže ultrazvuková měření by se mohla stát široce používanou metodou detekce přesného okamžiku, kdy cement ztuhne, a může se tedy pokračovat v práci.<sup>125</sup>

Virtuální cement v počítači má i jiná použití. Pomáhá určovat rychlost koroze ocelových lan zalitých v napjatém stavu do betonových konstrukcí kvůli větší pevnosti. Ztuhlý cement je porézní, proto ionty, zvláště pak běžný chloridový iont vyskytující se v kuchyňské soli a podzemních vodách, pronikají dovnitř do materiálu, kde pak mohou korodovat a zeslabit ocelová lana. Model s celulárním automatem nám dovoluje spočítat rychlost, s jakou tyto ionty difundují materiálem a váží se na komplikovanou porézní strukturu cementu. Dlouhodobé vlastnosti těchto materiálů tak můžeme skutečně spočítat. Pro konstrukční cementy je to obzvláště důležitá technologická otázka: informace tohoto typu potřebujeme, chceme-li vyvíjet lepší typy betonu a lépe znát jejich efektivní životnost, když jsou vystaveny živlům.

---

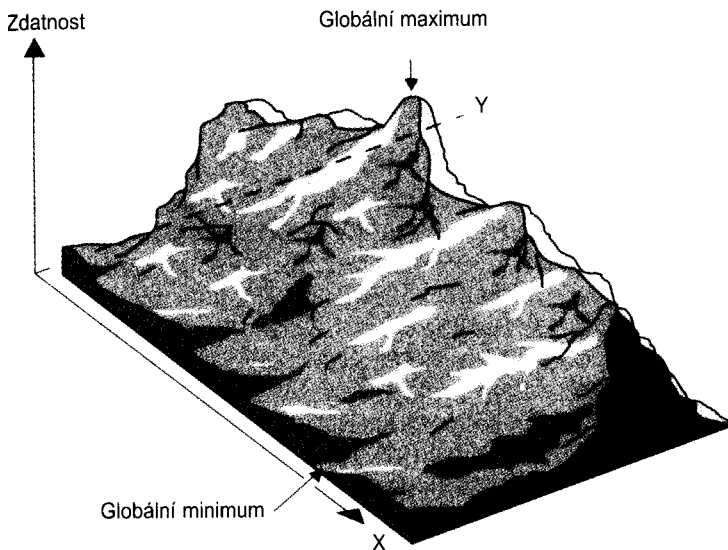
<sup>125</sup> Obzvláště to platí pro práce na ropných polích, kde se používá cement pro vyztužení ropných vrtů. Je třeba mít jistotu, že cement neztuhne předčasně, zatímco je stále ještě pumpován, a naopak že ztuhne, jakmile se naleje do vrtu.

# Žihání

Celulární automaty byly částečně inspirovány růstem krystalů a částečně touhou pochopit biologickou sebereplikaci. Získali jsme díky nim schopnost napodobovat obrovské spektrum obrazců s použitím lokálních pravidel vzájemného působení mezi sousedícími buňkami, jimiž kopírujeme roli mikroskopických sil mezi atomy a molekulami. V přírodě však existují další systémy, které pomáhají vědcům vypořádat se s těžkými problémy, které, ačkoliv jejich formulace je jednoduchá, jsou spleťtité a obtížně řešitelné. Mezi ně patří problémy třídy NP, se kterými jsme se poprvé setkali v 2. kapitole. Jaké je nejúspornější schéma tištěného spoje v počítači? Která je nejkratší trasa balíčkové doručovací služby mezi zadaným souborem měst, z nichž každé má být navštíveno právě jednou? Jaké má být složení cementu, aby ztuhl v předepsaný okamžik?

Příroda nám poskytuje výstižnou metaforu pro vyjádření hledání optimálního řešení těchto typů problémů: hledání nejvyššího vrcholu nebo nejhlubšího údolí ve zvlněné krajině. V první fázi musíme formulovat náš problém matematicky. Často toho můžeme dosáhnout tak, že napíšeme funkci "nákladů" či "zdatnosti", která měří, jak dobré každé jednotlivé řešení je. V případě obchodního cestujícího zadáme vzdálenosti mezi městy. Potom se problém výpočtu nejlepšího řešení převádí na nalezení optimální hodnoty nějaké funkce (tedy její buď minimální, nebo maximální hodnoty, v závislosti na aplikaci). Funkce nákladů se nejlépe znázorní jako krajina potenciálních řešení, kde výška každého krajinného prvku je mírou jeho nákladů. Tato zvlněná krajina se nazývá prostor možností (viz obr. 4.6).

V případě našeho obchodního cestujícího se optimální poloha nachází na dně nejhlubšího údolí v krajině. Jeho nejkratší možná cesta je globálním optimem, což je termín používaný pro odlišení od lokálních optim na dnech mělčích údolí. V případě desky s obvody hledáme nejvýraznější vrcholek, který značí největší efektivnost výroby. Takovéto optimalizační problémy jsou obtížné proto, že matematik či informatik stojí před tímtež problémem jako krátkozraký alpinista hledající Everest v Himalájích: má k dispozici pouze informace o nejbližším okolí. Vyčerpávající prověřování každého vrcholu by nebylo praktické a náš alpinista by brzy spotřeboval všechny zásoby.



Obrázek 4.6 / Představa krajiny. Hornatý terén ukazující polohy globálního maxima (nejvyšší vrchol) a globálního minima (nejhlubší údolí). Výška krajinného profilu je mírou jeho zdatnosti, která je zde znázorněna jako funkce proměnných  $x$  a  $y$ .

Druhá nepřímochařejší strategie, kterou by mohl použít, by bylo vydat se směrem, který se zdá vést nejrychleji vzhůru. Úkolem našeho krátkozrakého alpinisty by bylo sledovat celou dobu směr největšího stoupání, aby šplhal co možná nejrychleji. Tato metoda zaručuje rychlý výstup na vrchol nejbližšího kopce. To však v žádném případě není totéž co najít Everest. Téměř všechny reálné problémy mají lokální optima tohoto typu, a proto je tento jednoduchý přístup neadekvátní.

Efektivnější vyhledávací strategie by využívala schopnost příležitostného pohybu z kopce dolů, abychom neuvízli na některém z vedlejších vrcholů.<sup>126</sup> Tato strategie akceptuje malé krátkodobé tresty výměnou za potenciálně větší dlouhodobé odměny. Analogicky funguje samozřejmě i opačný případ, kdy se hledá globální minimum, tedy

<sup>126</sup> Jinými slovy musí se do hledání řešení zavést trocha náhodnosti. Podobná myšlenka napadla Stanisława Ulama roku 1946, když se potýkal s tím, jak předvídat vý; bušnou sílu atomové bomby ze vznikajících neutronových řetězových reakcí. Zotavoval se z nemoci a hrál pasíans. Poté, co se bezúspěšně pokoušel vypočítat, jak často by měl vyhrávat, napadlo ho udělat pokus: čím více her odehraje, tím blíže bude poměr výher k prohrám hodnotě, kterou by předpověděla složitá analýza. Hra s náhodou může také sledovat historii daného neutronu. Začalo se tomu říkat metoda Monte Carlo, podle slavného doupěte hazardních her. Byla testována roku 1947 na ENIACu a od té doby se jí chopila řada oblastí výzkumu.

nejhlubší údolí v krajině. Právě o to jde v problému nalezení optimálního uspořádání atomů v chladnoucím kovu. Dokonalá konfigurace kovového krystalu - ta, která má nejnižší energii<sup>127</sup> - je ta, v níž jsou všechny atomy čistě seřazeny v mřížce: jako vojáci na přehlídce, jenomže ve třech rozměrech. Žihání (popouštění) je trik, který používají kováři k tomu, aby přesvědčili atomy v kovu, aby zaujaly rozumně uspořádané pozice. Představuje užitečnou metodu k nalezení globálního optima, použitelnou v nejrůznějších situacích. V honbě za optimálními řešeními řady NP problémů aplikovali Scott Kirkpatrick, Charles Gellatt a Mario Vecchi z Výzkumného centra Thomase J. Watsona u firmy IBM tuto analogii k návrhu důmyslné strategie zvané simulované žihání.

Žihání je způsob, jak kov přivést blíže k dokonalé atomové konfiguraci, ačkoli v praxi se zcela dokonalého uspořádání atomů nikdy nedosáhne. Je jasné, že jak kov chladne, atomy se méně pohybují a vyrovnávají se podle svých sousedů. Často se však stane, že v jedné malé oblasti jsou sice atomy seřazeny, ale sama oblast nemusí být jako celek srovnaná vzhledem k sousedním oblastem. Zda kov dosáhne lokálního minima energie, odpovídajícího této situaci, nebo se mu podaří najít globální minimum energie spojené s maximálním dalekodosahovým uspořádáním, to závisí na tom, jak rychle ho zchladíme.

K zajištění rovnováhy mezi krátkodobým trestem a dlouhodobou odměnou při hledání optimálního uspořádání atomů, které se odehrává v chladnoucím kovu, stačí trocha tepla. Teplo dodává náhodnost: při každé teplotě nad absolutní nulou se jednotlivé atomy v mřížce chvějí. Energie jejich pohybu závisí na teplotě kovu - čím větší je teplota, tím intenzivnější jsou jejich pohyby. Při vysokých teplotách je pro atomy snazší přeskocit mezi mřížovými body pravidelné mřížky, i když přitom dočasně zvýší celkovou energii konfigurace atomů.

Teplo umožňuje, aby kov "vyskočil" z lokálního optima, takže například atomy v jedné oblasti se mohou srovnat podle lokálního uspořádání atomů v sousední oblasti. S poklesem teploty je k dispozici méně energie, která dovoluje změny v uspořádání atomů. Jak se teplota snižuje k absolutní nule, polohy všech atomů se zafixují. Čím je chladnutí pozvolnější, tím je pravděpodobnější, že vzniklý krystal se přiblíží k dokonalosti, a tím blíže bude jeho energie energii globálního optima. Zde je důležité zdůraznit slovo "blíže". Dokonalé krystaly se

---

<sup>127</sup> Přesněji máme na mysli volnou energii, jak je definována v termodynamice.



nikde nevyskytují, protože jejich formování by zabralo nekonečné množství času.

Rychle ochlazený kov má mnoho defektů a dislokací na atomární úrovni, které způsobují jeho křehkost. Tyto defekty v jeho krystalové struktuře se dají do určité míry vyspravit žiháním - opětovným zahřátím kovu a pak jeho pomalým chladnutím. Kováři tuto metodu používají k tomu, aby kovy, jako je měď, zkujnili a snížili jejich křehkost. Ve skutečnosti se bude uspořádání atomů získané žiháním nalézat v některém stavu lokálního minima energie, jehož hodnota je pravděpodobně velmi blízká hodnotě v optimu. To není tak špatné. Inženýři a vědci se raději spokojí s dobrými, levnými a rychlými řešeními, než by čekali věčnost, až najdou řešení naprosto dokonalé, které bude nejspíš jen nepatrně lepší. Toto teplotně závislé chování je základem Kirkpatrickovy optimalizační techniky simulovaného žihání, která se dá aplikovat na široké spektrum optimalizačních problémů v informatice, neurofyziologii, biochemii a evoluci, stejně jako k řešení všudypřítomného dilematu obchodního cestujícího.

## Spinová skla

Kirkpatrickovou motivací k vývoji simulovaného žihání byla potřeba pochopit velmi komplexní chování jisté třídy magnetických slitin, zvaných spinová skla. Spinová skla jsou jedním z nejjednodušších neuspořádaných systémů, které známe, a díky jejich studiu, započatému v 70. letech, přestali fyzikové komplexní systémy ignorovat a začali je chápat. Chování spinových skel se bude bezpochyby zdát běžnému čtenáři dosti abstraktní, a přesto procesy, které v nich probíhají, ztělesňují optimalizaci podobnou tomu, co se odehrává při žihání. V některých případech pak dokážeme vypočítat vlastnosti spinových skel přesně, pomocí matematické analýzy. Jsou tudíž velmi cennými prototypy komplexních systémů. Naše znalosti o chování spinových skel vedly k zcela nečekaným a hlubokým pohledům na problémy komplexity. V 5. a 9. kapitole popíšeme, jak tato práce vyústila v zásadní pokroky při pochopení umělých neuronových sítí, stejně jako důležitých aspektů funkce mozku. Rozhodně se tedy vyplatí pokusit se pochopit klíčové rysy a vlastnosti těchto podivných magnetických materiálů.

Chemické složení spinového skla není příliš zajímavé. Může obnášet několik atomů železa, rozptýlených v mřížce atomů mědi. Termín

"sklo" pochází z analogie s obyčejnými skelnými materiály, jako jsou okenní tabulky, které dostaneme, když roztavenou sklovinu zchladíme příliš rychle na to, aby zamrzla v nejnižším energetickém stavu s nejdokonalejším uspořádáním. Místo toho atomy zamrznou v tom místě, kde se právě náhodou pohybovaly, a vytvoří přitom dosti neuspořádanou tuhou látku. Totéž se odehrává ve spinovém skle, kde je však náhodnost způsobena neuspořádaným rozmístěním elektronů rotujících v atomech, které odpovídají za magnetické jevy. Ačkoli spinová skla obvykle mají pravidelné atomové uspořádání krystalové mřížky (na rozdíl od obyčejného skla), malinké atomové magnetky (v tomto případě atomy železa, ale nikoli mědi) nejsou samy o sobě pravidelně srovnané. Spinové sklo je směsice kladných a záporných zpětných vazeb, pocházejících z toho, jak se každý atom snaží srovnat svůj vlastní magnet s těmi v sousedství. Výsledné magnetické vlastnosti jsou nesmírně komplexní a často nepředvídatelné.<sup>128</sup>

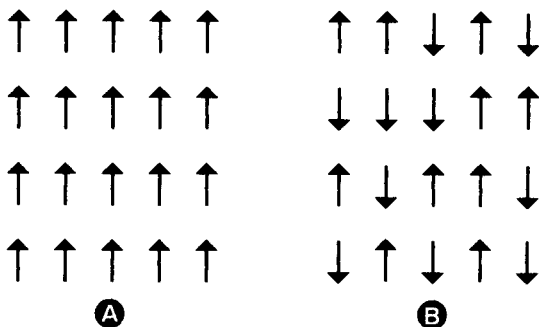
Pro porozumění spinovým sklům fyzikové používají disciplínu zvanou statistická mechanika, což je obor, který spojuje mikroskopický svět atomů a molekul s makroskopickým světem, kterého se můžeme dotýkat, cítit jej a vidět.<sup>129</sup> Statistická mechanika se zajímá o obrovské spektrum problémů včetně popisu toho, jak kostky ledu tají a tvoří louže, jak se voda mění varem v páru a jak určité materiály získávají a ztrácejí své magnetické vlastnosti při změně teploty. Všechno to jsou příklady fázových přechodů, při nichž se makroskopické vlastnosti hmoty náhle mění při určité hodnotě teploty. K fázovým přechodům dochází díky makroskopickému přeuspořádání základních mikroskopických částíček hmoty.

Běžným a dosti důležitým fázovým přechodem je zmagnetování železa. Železo je přirozeným prototypem feromagnetického materiálu. Takový materiál může existovat ve dvou rozdílných fázích: při vysokých teplotách je v nemagnetické fázi, kdežto při nízkých teplotách

---

<sup>128</sup> D. Stein, *Scientific American* 261, 36 (1989).

<sup>129</sup> Průkopníky statisticko-fyzikálního přístupu byli S. F. Edwards a P. W. Anderson, *Journal of Physics F* 5, 965 (1975), kteří vytvořili idealizovaný model spinových skel, jehož vlastnosti byly přístupné výpočtům. David Sherrington se pak pokusil jejich model zjednodušit a Scott Kirkpatrick se pustil do počítačových simulací, v nichž experimentoval s různými metodami, jak zabránit spinovým sklům v tom, aby uvázly v lokálním minimu.



Obrázek 4.7 / Řád a magnetismus.

Dvojměrná ilustrace feromagnetu:

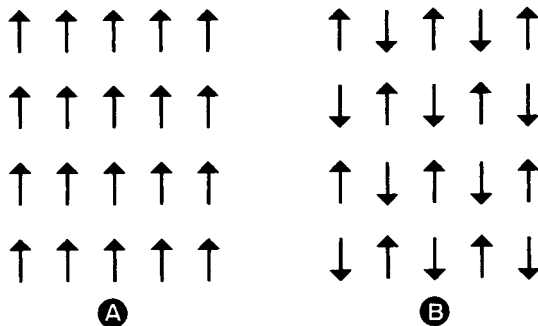
(A) při teplotě pod Curieovým bodem míří všechny magnetické momenty atomů naznačené šipkami tímtež směrem, což vede k magnetizaci;

(B) při teplotě nad Curieovým bodem jsou magnetické momenty orientovány náhodně a magnetizace vymizí.

získává magnetické vlastnosti. Existuje přesná teplota, při níž jedna fáze přechází v druhou, zvaná Curieova teplota. Kousek železa si můžeme znázornit jako uspořádanou mřížku atomů železa (viz obr. 4.7). Každý jednotlivý atom působí jako nepatrný tyčový magnet díky vlastnostem elektronového obláčku, který jej obklopuje. Přítomnost nespárovaných obíhajících a rotujících elektronů<sup>□</sup> vede ke vzniku magnetického momentu - severojižního magnetického dipólu- na každém atomu železa. Pod Curieovou teplotou je každý atomový magnet ve feromagnetu uspořádaný, a čím nižší je teplota, tím je uspořádání dokonalejší. Celková magnetizace krystalu je pak dána součtem všech těchto nepatrných uspořádaných atomových magnetických momentů. Nad Curieovou teplotou způsobují atomové vibrace pocházející od tepelné energie v krystalové mřížce chaos a atomové magnety se uspořádávají náhodně, s nulovou čistou celkovou magnetizací.

Abychom mohli zkoumat chování atomů ve feromagnetu a ve spinových sklech, potřebujeme zkonstruovat model založený na známých zákonech atomové fyziky. Hledání rovnováhy mezi vlivem tepla vnášejícím náhodnost a vlivem mikroskopických magnetických interakcí zajišťujících uspořádanost je ústřední otázkou, která rozhoduje o konečném stavu takových systémů. Je to hlavní cíl rovnovážné

<sup>□</sup> Magnetický moment elektronu má dvě složky: jedna pochází z oběhu elektronu kolem jádra (orbitální moment) a druhou si lze představit tak, že odpovídá jakoby rotaci elektronu kolem své osy (spinový moment), (pozn. překl.)



Obrázek 4.8 / Feromagnety a antiferomagnety.

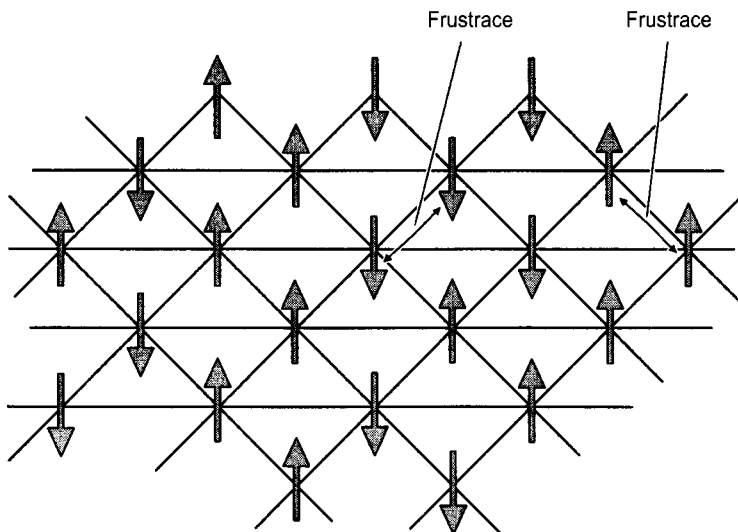
A je feromagnet, kde všechny atomární magnety jsou orientovány stejně a dávají tak vzniknout magnetizaci.

B je antiferomagnet, kde všechny atomární magnetické momenty na sousedních atomech míří opačným směrem, což vede k nulové magnetizaci.

statistické mechaniky. Pomáhá si přitom pojmem volné energie, což je veličina, která vyjadřuje rovnováhu mezi tepelným narušováním pořádku a uspořádávajícími interakcemi a která v rovnováze dosahuje svou nejnižší hodnotu. Minimalizace volné energie poskytuje teoretické vysvětlení existence magnetického fázového přechodu ve feromagnetech: pod Curieovou teplotou je volná energie menší pro uspořádaný (magnetický) stav, kdežto nad tímto bodem je nižší pro neuspořádaný stav.

Uvažme nyní spinové sklo tvořené například zředěnou slitinou antiferomagnetického manganu v nemagnetické mědi. Antiferomagnetický materiál je takový, v němž mřížka spinu dává přednost vzájemně antiparalelnímu uspořádání; to znamená, že přímo sousedící spiny jsou přednostně uspořádány v opačných směrech (viz obr. 4.8). Problémy nastanou, když je lichý počet antiferomagnetických atomů uspořádan do kruhu. Není například možné globálně uspokojit touhu spinu uspořádat se antiparalelně jeden k druhému, pokud jsou rozmístěny na trojúhelníkové mřížce (viz obr. 4.9). Tento jev je ještě umocněn v manganoměděném spinovém skle. Soupeření mezi různými interakcemi, které se snaží spiny srovnat, vede k frustraci. Mohou tu být lokální políčka stability, v nichž jsou všechny atomové magnety uspořádány antiparalelně, ale budou existovat i oblasti, v nichž jsou nejbližší spiny v konfliktu a jsou donuceny k energeticky nevýhodným vzájemným orientacím. Tady se skrývá příčina bolení hlavy každého, kdo se pokouší dopátrat se u spinového skla stavu s nejnižší volnou energií. To proto, že ve spinovém skle je spousta lokálních minim volné

energie, která se od sebe liší jen velmi málo, poněvadž na mřížce lze jednoduše realizovat energeticky blízké spinové konfigurace.<sup>130</sup>



Obrázek 4.9 / Frustrovaný antiferomagnet.

Pokud jsou atomy rozmístěny na trojúhelníkové mřížce a interagují antiferomagneticky, nelze vyhovět touze každého magnetického momentu, aby byl orientován opačně než jeho nejbližší sousedé (jak je znázorněno na dvou případech). Základní symetrie mřížky vede k frustraci. Tentýž efekt nastává ve spinových sklech, ale tam vzniká díky náhodné povaze magnetických interakcí, které mohou být kombinací feromagnetických a antiferomagnetických sil.

Významný pokrok v pochopení komplexity těchto materiálů přišel v roce 1975, kdy David Sherrington, který měl tehdy pracovní volno na Imperiál College v Londýně a pracoval s Kirkpatrickem u IBM, publikoval článek zabývající se statistickou mechanikou modelu spinového skla s nekonečně dalekým dosahem.<sup>131</sup> Jejich model dovoľoval každému atomovému magnetu ve spinovém skle ovlivňovat

<sup>130</sup> Ve skutečnosti jejich exponenciálně mnoho. Všimněme si také, že spinová skla nejsou svou podstatou metastabilní, na rozdíl od křemičitého (okenního) skla. Je možné, že existuje jediný základní stav spinového skla, který bude jeho dokonalým rovnovážným stavem, ale mnoho jiných metastabilních stavů také odpovídá nízko ležícím lokálním minimům, která jsou od něj oddělena velmi vysokými energetickými bariérami (ve srovnání s tepelnou energií). Tyto stavy se jeden od druhého makroskopicky liší. V praxi nemá příliš smyslu soustředit se pouze na jedno z nich - všechna jsou téměř stejně stabilní.

<sup>131</sup> D. Sherrington and S. Kirkpatrick, Physical Review Letters 35, 1972 (1975); podrobnější verze článku vyšla v Physical Review B 17, 4384 (1978). Je dobré si uvědomit obrovský rozdíl, který dělí přístup fyziků a biologů k chápání světa.

všechny ostatní prostřednictvím magnetických interakcí nekonečného dosahu. Žádné reálné magnetické materiály takové interakce sahající nekonečně daleko nemají, ale Sherrington na to vzpomíná se slovy: "Věděl jsem, že to je ten typ modelu, který má naději na exaktní řešení."

132

Na tomto základě byli Sherrington a Kirkpatrick schopni vypočítat vlastnosti těchto zvláštních magnetických materiálů.

Tak jako dříve, i nyní si budeme pomáhat představou prostoru možností. Zkusme si opět vybavit zvládnou krajinu, tentokrát odpovídající volné energii. Výška každého místa v krajině odpovídá jeho volné energii, zatímco poloha určité konfiguraci spinu. Obecně se zabýváme velmi komplikovanou energetickou plochou (viz obr. 4.6). Jak snadno sousední údolí (minima) dokážou "komunikovat", bude záviset na teplotě: výška každé bariéry mezi sousedními minimy je mírou množství tepelné energie potřebné k překlopení stavu materiálu z jednoho globálního spinového stavu do jiného. Travnatý pahorek bude vyžadovat mnohem méně tepla než nějaký Everest.

To, že máme velké množství různých lokálních minim volné energie □, vede k mnoha fascinujícím vlastnostem. Například pokud je několik dílů železa smícháno se 100 díly mědi, pak atomy železa, které obvykle interagují feromagneticky, mohou nyní interagovat také antiferomagneticky. Pokud se však ptáme, který stav je nejnižší a nejstabilnější, je těžké najít odpověď. Jako v případě potulného obchodníka, je to problém typu NP. Pokud se jej pokoušíme řešit jednoduchými deterministickými algoritmy, jako je sestup nejstrmějším svahem, □ je tady vážné riziko, že metoda povede k nejbližšímu údolí - lokálnímu minimu a nikoli k nalezení údolí nejhlubšího neboli globálního minima. Technika simulovaného žíhání, objevená Kirkpatrickem a jeho spolupracovníky, tento problém překonává.<sup>133</sup>

<sup>132</sup> Zatímco fyzikové jsou docela spokojeni, vytvoří-li idealizované modely, které pak analyzují matematicky a pokoušejí se z nich vyvodit obecné závěry, biologové mají sklon trvat na zachování všech detailů za každou cenu.

□ Existenci velkého množství minim objevil a matematicky vypočetl italský fyzik Giorgio Parisi, (pozn. překl.)

□ Gradient descent (pozn. překl.)

<sup>133</sup> Řešení je přesné v přiblížení středního pole. (Pozn. překl.: Původní řešení Sherringtona a Kirkpatricka se později ukázalo jako špatné. Nikoli v tom smyslu, že by obsahovalo chybu, ale z mnoha možných řešení neodpovídalo tomu správnému - technicky řečeno bylo toto řešení termodynamicky nestabilní, tedy fyzikálně nepřípustné. Správné řešení našel Giorgio Parisi roku 1981 a jeho termodynamickou stabilitu poté dokázali Cyrano De Dominicis a Imre Kondor.)

Simulované žíhání, podobně jako žíhání u kováře, doplnilo metodu nejstrmějšího stoupání či klesání trochou náhodnosti. Každý učiněný krok, ať vzhůru či dolů, má předepsanou pravděpodobnost, která závisí na odpovídající změně energie, dělené "teplotou" použitou k žíhání. Pokud je teplota nízká, realizují se pouze kroky, které vedou ke snižování energie, a recept je tedy stejný jako u deterministické metody nejstrmějšího klesání. Čím je teplota vyšší, tím je větší šance, že dokážeme přešplhat energetickou plochu, a tak se vyhneme záchytu v lokálních minimech. Tudíž je větší pravděpodobnost, že spadneme do hlubšího minima někde jinde. S postupem času bude tento algoritmus s rostoucí pravděpodobností táhnout stav systému do hlubších a hlubších minim. Pro dosažení nejnižšího bodu neboli globálního minima se musí "teplota" (která je zdrojem šumu a náhodnosti) postupně vypínat. Zjistilo se, že simulované žíhání je často podstatně lepší než tradiční metody.<sup>134</sup>

Simulované žíhání bylo původně vymyšleno pro studium spinových skel, zdokonalilo však řešení řady velmi praktických optimalizačních problémů, realistických variant dilematu obchodního cestujícího, které sahají mnohem dál než k zdánlivě ezoterickým hranicím fyziky spinových skel. Sahají od vytyčení nejlepších transoceánských cest pro supertankery plné ropy po návrh mikročipů. Simulované žíhání se používá k odhadování atomárního uspořádání v krystalových strukturách na základě toho, jak atomy rozptylují rentgenové paprsky: tyto tzv. difrakční obrazce totiž neposkytují dostatek informace pro určení krystalové struktury. Simulované žíhání pomáhá naftařským společnostem rekonstruovat geologickou informaci a pomocí ní lokalizovat vrstvy bohaté na uhlovodíky pomocí vln šířících se při umělých "minizemětřeseních" vyvolaných výbuchem nálože. Pomáhá také při hledání prostorové struktury molekul proteinů, známe-li jejich

---

S. Kirkpatrick, C. Gelatt, Jr., and M. Vecchi, *Science* 220, 671 (1983). V tomto článku autoři předložili výsledky optimalizace pro problém obchodního cestujícího zahrnující tisíce měst.

<sup>134</sup> Simulované žíhání je ve skutečnosti velmi úzce svázáno s algoritmem Monte Carlo. Metoda Monte Carlo, vymyšlená poprvé Stanislawem Ulamem a dnes běžně implementovaná pomocí tzv. Metropolisova algoritmu, je v podstatě metodou stochastického prohledávání, v níž posuny k nižší energii jsou akceptovány s jednotkovou pravděpodobností, ale posuny k vyšší energii jsou dovoleny pouze s boltzmannovskou vahou závislou na teplotě. Běžně se používá pro modelování rovnovážného chování velkých souborů iontů, atomů či molekul. (Pozn. překl.: Spoluautorem metody Monte Carlo byl také Edward Teller, americký fyzik maďarského původu, označovaný někdy za „otce vodíkové bomby“.)

atomární složení, což je nesmírně těžký problém, který, až bude plně vyřešen, pomůže vyvíjet léčiva systematictěji.<sup>135</sup>

## Hra se skleněnými perlami

Odvážné souboje s makroskopickou komplexitou přírody přinesly pozoruhodné ovoce. V předchozích kapitolách jsme viděli, jak zájem Turinga a von Neumanna o komplexitu mozku pomohl zplodit moderní počítač. Von Neumannova fascinace komplexitou sebereplikace nám dala celulární automaty, novou virtuální laboratoř, v níž zkoumáme emergentní jevy. A práce Sherringtona s Kirkpatrickem na komplexních vlastnostech spinových skel poskytla účinnou techniku, jak se vypořádat s některými z nejtěžších optimalizačních problémů.

V příští kapitole uvidíme, jak tyto myšlenky, společně s jinými, které jsou vypůjčené z biologie, pomáhají pokročit v porozumění neživé komplexity v širokém spektru vědeckých disciplín. Je dosti příznačné, že počátky těchto studií se dají vystopovat k Johnu Hollandovi, studentovi Arthura Burkse, který pomáhal udržet von Neumannovy myšlenky naživu po jeho smrti. Právě John Holland, než se stal v Michiganu Burksovým prvním doktorandem v informatice, postupně ztratil iluze o svém studiu matematiky, které bylo v té době ovládáno krajně puristickým myšlenkovým směrem, předkládaným francouzskou Bourbakiho školou. Holland ukládal své myšlenky o emergenci, adaptaci, učení a řadě dalších témat do složek z konopného papíru, nazvaných *Glasperlenspiel 1*, *Glasperlenspiel 2* atd., podle románu Hermana Hesse *Hra se skleněnými perlami*.<sup>136</sup> Pro Hollanda ztělesňovala v této knize popisovaná futuristická hra intelektuální elity na proplétání a spojování rozličných námětů jeho vlastní bádání. Ze všestranného souboru myšlenek, na něž Holland v té době narazil, byla jednou z nejvýznamnějších kniha o genetice, *Genetická teorie přírodního výběru*, napsaná jedním z předních britských lékařských statistiků, Ronaldem Fisherem. Fisherův matematický přístup k evoluci - a jeho vady - budou Hollanda inspirovat ke zkoumání toho, jak dokáže přirozený výběr řešit komplexní problémy.

---

<sup>135</sup> Jde o problém určení prostorového tvaru molekuly proteinu, známe-li posloupnost aminokyselin, z nichž se skládá.

<sup>136</sup> M. Waldrop, *Complexity* (Penguin, 1994), str. 163.



# 5 Odpovědi ve vývoji

Přírodě se nedá poroučet jinak, než že ji posloucháme.

FRANCIS BACON

Pohádková složitost života byla stvořena přírodním výběrem v procesu evoluce. Tato vlivná idea zakusila od roku 1859, kdy ji Charles Darwin formuloval, notnou dávku špatného zacházení. Jako základní kámen moderní biologie se vývojová teorie vynořuje nepochroumaná z více než sto let trvajícího tvrdého hodnocení vědci a útoků kreacionistů. Nyní rozšířila svůj vliv i na neživý svět, v němž zakořeňují evoluční metafory.

Biologická evoluce představuje mocné paradigma pro zvládání velmi náročných problémů za použití postupů známých jako genetické algoritmy a genetické programování. Tyto metody vystihují proces evoluce prostřednictvím počítače, a tak umožňují "vyšlechtit" lepší lopatku turbíny pro letadlo nebo najít nejefektivnější trasu pro posílání informace rozsáhlou elektronickou komunikační sítí. To jsou neuvěřitelně složité optimalizační problémy, které se dají zobrazit krajinou zdatnosti zvrásněnou jako Himálaj. Digitální darwinismus představuje účinný prostředek, jak je řešit.

Lidský mozek je v jistém smyslu jedním řešením optimalizačního problému, nalezeným biologickou evolucí. Jelikož schopnosti mozku jsou nesmírné, nabízí se sám o sobě jako další zdroj inspirace. Jednou z ironií nedávných pokusů vypořádat se s inteligencí pomocí simulací je to, že všechen vhléd a možnosti, které pochopení evoluce skýtá, byly odloženy stranou ve prospěch přístupu, kterému se posměšně říká "stará dobrá umělá inteligence". Uvidíme, jak se to ukázalo být slepou myšlenkovou uličkou a jak lidé přišli na plodnější přístup, když se pro inspiraci obrátili k přírodě. Tento přístup se již používá v rozsáhlém spektru aplikací, od třídění prasečích pulek na jatkách po předvídaní poklesu a růstu akcií na burze.

# Nejzdatnější přežije

Když se lidé pokoušejí shrnout Darwinovy myšlenky o evoluci, obvykle si vybaví slogan "nejzdatnější přežije".<sup>□</sup> Zdá se, že rostliny, zvířata i hmyz se vyvinuly postupným vylepšováním různých rysů, ať už jsou to křídla včel, bílá kožešina polárního medvěda nebo skvrny na srsti levharta. Tomu všemu se říká adaptace, což je termín užívaný k označení procesu s otevřeným koncem, při němž se struktura vyvíjí prostřednictvím interakce se svým prostředím tak, aby zajistila lepší výkonnost. Tyto struktury sahají od proteinů přes mozky k provázaným ekologiím organismů, jako je divoká příroda Tasmánie. Typy adaptace, které tyto příklady živého umění podstupují, mohou být úžasně specializované.

Květy tořiče *Ophrys apifera* se vyvinuly tak, že vypadají jako samička čmeláka, takže mohou být opyleny sexuálně přilákanými hmyzími samečky. Tyto rostliny neoptimalizovaly svůj vzhled záměrně; jejich životním "cílem" je prostě rozmnožování. Mezi rozkládající se hmotou na dně rybníků si vyvinuly sírné bakterie schopnost vypořádat se s vysokou koncentrací síry prostřednictvím složitého zástupu enzymů, které jim umožňují používat síru namísto kyslíku. V procesu přežívání prostřednictvím reprodukce musí být i ten nejméně pokročilý druh schopen adaptivního vylepšování, protože jinak by byl v biologických závodech ve zbrojení zlikvidován.

Druhy, které se zapojily do tohoto zápasu, se snaží vyřešit komplexní optimalizační problém. Tím vznikají téměř optimální adaptace, které nevyhnutelně berou v úvahu, v jakém prostředí se tvor nachází. Díky tomu vznikl zvláštní tvar květu tořiče, objevily se hydrodynamické vlastnosti velrybích ploutví a zrak sovy. Ačkoli adaptace produkuje organizaci a provázanost, které jsou vysoce vyříbené, výsledek lze vždy ještě vylepšovat a nikdy není doopravdy optimální. Zdá se, že jádrem darwinovského procesu je hledání účinných zlepšení, nikoli optimalizace. Nejobecněji definované adaptační procesy hrají rozhodující roli v tak rozdílných oblastech, jako jsou psychologie, ekonomie, technika řízení a numerická matematika. Zdálo by se tedy, že evoluce je dobrou metaforou pro čerpání inspirace. A právě to během

---

<sup>□</sup> Jelikož zdatnost je definována jako schopnost přežít, je tato fráze vlastně banální tautologií. Dala by se formulovat i takto: „Kdo přežije, přežije.“ Přesto má netriviální obsah, jehož výkladem se zabývá například kniha R. Dawkinse *Sobecký gen* (Mladá fronta, Praha 1998).

posledních zhruba deseti let mnozí dělali, když reprodukovali přírodní evoluční struktury v počítači a s jejich pomocí modelovali rozpoznávání vizuální informace, tvrzení naftařských cementů, učení, paměť, inteligenci a umělou inteligenci a nacházeli přitom vzájemné souvislosti těchto oborů.

Podle měřítek, v nichž jsme dosud uvažovali, je biologická evoluce děsivě komplexním adaptivním procesem. Představme si například jednoduchou mořskou řasu, která je popsána 1000 geny, z nichž každý se vyskytuje ve dvou variantách, které odpovídají charakteristickému proteinu. Ten může být zodpovědný za zelenou nebo naopak hnědou barvu, zvrásněné nebo naopak hladké listy, krátký nebo naopak dlouhý reprodukční cyklus. Pokud každý gen účinkuje nezávisle, existuje 21000 kombinací genů, které mohou být zapnuté, nebo vypnuté. To je enormní krajina možností. Podobně jako simulované žíhání, evoluční optimalizace dobře funguje proto, že efektivní prohledávací strategie, kterou používá, umožňuje pohybovat se v této obrovské krajině občas dolů, a to díky mutacím. Tak lze uniknout z lokálního maxima a nalézt kombinaci s vyšší zdatností.

Evoluce přichází ke slovu všude tam, kde dochází k reprodukci a soutěžení o omezené zdroje. Reprodukující se systém se sice může snažit tvořit přesné kopie sebe sama, ale žádný proces kopírování nefunguje bezchybně. Obvykle chyby naruší schopnost kopie úspěšně se rozmnožovat. Mutant pravděpodobně zahyne, nebo se alespoň budou jeho geny vyskytovat méně často než geny rodiče. Někdy však bude mutant úspěšnější, a v tom případě mohou být jeho geny úspěšnější než geny rodiče, a rozšíří se tedy více. Protože zdroje jsou omezené, dochází obvykle k soutěžení mezi různými organismy a druhy. Vzhledem k velkému množství faktorů, které jsou ve hře, je účelné zavést představu "reprodukční zdatnosti organismů". K této zdatnosti přispívají všechny možné okolnosti. Například u opic při rozhodování, s jakou pravděpodobností jedinec přežije, hrají roli faktory jako ostrost zraku, pohyblivost, přitažlivost pro druhé opice, inteligence a síla.

## Genetický algoritmus

John Holland se snažil přimět počítače, nebo aspoň jejich programy, napodobovat živé tvory v tom, že se při hledání řešení problému

adaptivně vyvíjejí.<sup>137</sup> Poznamenal: "Živé organismy jsou dokonalí řešitelé problémů. Projevují pružnost, která zahanbuje nejlepší počítačové programy."<sup>138</sup> Jeho fascinující pojem genetického algoritmu jako populace počítačových programů, které se vyvíjejí prostřednictvím reprodukce, náhodných změn a soutěžení, evokuje všechny ideje a slovník biologů, od chromozomů, které obsahují genetický plán organismu, k překřížení a mutacím, které jej mohou změnit. První významný text popisující, jak se ve výpočtech používá evoluční metafora, byla kniha *Adaptation in Natural and Artificial Systems*,<sup>139</sup> publikovaná roku 1975, více než deset let po získání prvních výsledků.

"Když byla tato kniha prvně vydána, byl jsem velmi optimistický a očekával jsem rozsáhlé recenze a něco jako bestseller v oboru vědeckých monografií," vzpomíná v pozdějším vydání. "Ouha - nestalo se tak. Po pěti letech jsem opět nabyl optimismu, protože kniha ‚nezahynula‘, jak se to monografiím stává, ale stále se jí prodávalo 100 až 200 výtisků ročně. Stále však se výzkum v této oblasti omezoval téměř výhradně na mé studenty a jejich kolegy a nikomu nezapadal do jeho kategorií. ‚To určitě nepatří do umělé inteligence‘ a ‚Proč by měl někdo studovat učení tak, že bude napodobovat proces, který trvá miliardy let?‘ jsou typické poznámky těch, kdo příliš neinklinují k tomu, aby se na tuto práci podívali."

Počátek 80. let přinesl z mnoha důvodů vlnu zájmu o Hollandovy výzkumy. Jedním z nich bylo poznání, že genetické algoritmy mohou rozlousknout obtížně řešitelné (NP) problémy. Začaly se objevovat studie, které používaly genetické algoritmy v oblastech sahajících od návrhu integrovaných obvodů a komunikačních sítí po sestavování portfolia cenných papírů a konstrukci leteckých turbín. Jiná aplikace se objevila ve výzkumu umělé inteligence, kde se po mnohaletém živoření na okraji zájmu začalo za ústřední problém studia inteligence považovat učení se z okolního prostředí. Ještě novější je použití genetických algoritmů jako obecného teoretického nástroje pro zkoumání

---

<sup>137</sup> Holland byl první člověk, který v USA získal titul Ph.D. v informatice. (S. Levy, *Artificial Life*, Pantheon, New York 1992).

<sup>138</sup> J. Holland, *Scientific American* 267, 66 (1992).

□ **Crossover**. Rozhodli jsme se zde užít českého termínu, na rozdíl od překladu knihy *Sobecký gen*, kde je ponecháno anglické slovo. (pozn. překl.)

<sup>139</sup> Spojení „genetický algoritmus“ se objevilo poprvé roku 1967 v disertaci popisující program hrající hru, založenou na vysoce zjednodušené verzi šachů, zvané „šest pěšců“. Viz J. Bagley, *The Behavior of Adaptive Systems which Employ Genetic and Correlation Algorithms*, doktorská disertace na Michiganské universitě (1967).

"komplexních adaptivních systémů" - což je výraz zastřešující nelineární systémy definované prostřednictvím interakce velkého množství individuálních agentů - včetně ekonomie, politických systémů, ekologii, imunitních systémů, vyvíjejících se embryí a mozků.

Hollandova práce ukázala, že v rozsáhlých a velmi zvrásněných krajinách, o nichž se domníváme, že reprezentují míry zdatnosti nebo funkce nákladů pro obchodní cestující, spinová skla nebo reprodukční schopnost opice, směřují genetické algoritmy pravidelně k vylepšení známých řešení. Zdá se tedy, že poskytují efektivní metodu počítačového řešení "nezvládnutelných" problémů. Podle Hollandova názoru "Pragmatičtí badatelé vidí pozoruhodnou výkonnost evoluce jako něco, co je třeba spíš napodobit než ji závidět. Badatelé, kteří ovládnou evoluční mechanismy, dokážou 'šlechtit' počítačové programy na řešení problémů, i když žádný člověk nedokáže plně porozumět struktuře programu."

V případě biologické evoluce však musíme svůj myšlenkový obraz krajiny představující míru zdatnosti modifikovat. Kopce a údolí nezávisí jen na vlastnostech jednoho druhu, ale také na tom, jak si vedou soupeřící druhy. V darwinovské evoluci se každý druh žene za prospěšnými adaptacemi v komplikovaném a stále se měnícím prostředí. Jinými slovy, krajina se pohybuje a podléhá mutacím, přičemž stoupající vrcholy označují úspěch jednoho druhu, který může současně stáhnout jiný druh do hlubin vyhubení. Evoluční zdatnost králíků uvažovaných izolovaně by teoreticky stoupala z všemožných důvodů, od přebytku mrkve výjimečně citlivému sluchu, který umožňuje včas odhalit predátory. Avšak prudký růst populace lišek může přesto zahnat chudáky králíky do nory smrti.

Pro začátek je jednodušší pominout takové adaptivní, souběžně se vyvíjející krajiny a místo toho se soustředit na ty aspekty biologické evoluce, které využíval Holland k vyhledávání vrcholů a nížin, představujících optimální řešení mnoha jednodušších typů nezvládnutelných problémů. Evoluce má dvě podstatné složky: selekci a reprodukci. Selekcce je filtr, který prostřednictvím soutěže určuje, kteří jedinci v populaci přežijí a rozmnoží se. Reprodukce dovoluje inovaci změnou genetických rysů, a tak představuje cestu k vývoji stále úspěšnějších jedinců. Právě tak jako šlechtění a selekcce nám dovolily "optimalizovat" vzhled růže a kvalitu ovčí vlny, uvědomil si Holland, že by mělo být možné použít směs inovace a filtrování k nalezení optimálního řešení komplexních problémů.

Holland se snažil počítačově uchopit procesy, které mění sestavu chromozomů: mutaci, překřížení a inverzi. Mutace, významný zdroj genetických proměn, mohou být způsobeny vysoce energetickým zářením (typicky ultrafialovým a rentgenovým) v prostředí nebo nepřesným kopírováním genetického materiálu buněčnými mechanismy. Mutace poskytují různorodost v náhodnosti a čas od času vnášejí do chromozomů druhu blahodárný materiál.

Překřížení, probíhající u druhů, které se rozmnožují pohlavně, vyměňuje genetický materiál pocházející ze dvou rodičovských chromozomů a tím dovoluje, aby se prospěšné geny od obou z nich kombinovaly v potomstvu. Inverze občas přeuspořádá geny tak, že ty, které jsou u rodičů daleko od sebe, mohou být umístěny blízko v chromozomech potomků. Někdy všechno tohle přehazování genů nemá velký vliv, někdy může být smrtelné, ale čas od času to může přinést nějakou opravdovou výhodu.

Překřížení je v genetických algoritmech obzvláště významné. Díky němu se během času akumulují užitečné změny v genech populace - jinými slovy vylepšuje se řešení problému. Aby jedinec získal bez překřížení dvě prospěšné a nepravděpodobné mutace, musí jedna z těchto vzácných mutací nastat náhodou u rodiče a druhá nepravděpodobná mutace musí náhodou nastat v potomstvu tohoto rodiče.<sup>140</sup> Druhy, které se rozmnožují bez překřížení, mohou mít populaci obsahující členy s jednou či druhou z těchto dvou mutací, ale členové mající obě budou chybět. Když dojde k překřížení, mohou se prospěšné mutace od obou rodičů zkombinovat okamžitě, jakmile se rozmnoží. Jestliže se nejúspěšnější rodiče rozmnožují častěji než méně úspěšní, je velká pravděpodobnost, že k tomu skutečně dojde. Hollandův algoritmus vystihuje schopnost mnoha jedinců v populaci prozkoumat prostor možností (tedy adaptivní krajinu) paralelně a smísit svá nejlepší řešení prostřednictvím překřížení. Síla genetických algoritmů spočívá právě ve spojení rozmnožování s výměnou informace díky překřížení.

Ale čím to je, že tyto biologii inspirované operace jsou natolik inteligentní, že jim řešení obtížného problému nedokáže vzdorovat? Vždyť přece samotný pojem systematického prohledávání se dost dobře nesnáší s prvky náhodnosti, které tyto operace přinášejí. Odpověď

---

<sup>140</sup> Důležitý bod, který Holland zdůrazňuje, je ten, že efektivnost genetických algoritmů pochází z operace překřížení, spojené s přežitím nejzdatnějšího. Náhodné mutace jsou relativně bezvýznamné.

naznačil již matematik Jacques Hadamard v diskusi o vynalézavosti: "Je zřejmé, že vynález nebo objev, ať je to v matematice nebo kdekoli jinde nastane, spojí-li se myšlenky." Překřížení dovoluje, aby se mnoho pokusných řešení testovalo souběžně. Tento zabudovaný paralelismus dovoluje nalézt zázračné kombinace mezi velkým množstvím alternativ, a to pomocí procesu, který vypadá náhodně, ale ve skutečnosti jej řídí Darwinova ruka.

## Digitální Darwin

Konstrukce Hollandova genetického algoritmu je v principu jasná. Vyjádřit jej ve formě počítačového programu však není tak jednoduché. Brání tomu problémy s "křehkostí" programů: většina mutací nebo náhodných změn provedených v obyčejných počítačových programech vede k jejich zhroucení. I tečka na nesprávném místě je dokáže odrovnat. Aby mohl své evoluční techniky prakticky využít, musel Holland vyvinout robustní způsob, jak reprezentovat řešení problému prostřednictvím "chromozomů", které mohou být modifikovány operacemi překřížení a mutace. Dosáhl toho pomocí systému binární klasifikace. Každý bit odpovídá přítomnosti (1) nebo nepřítomnosti (0) určité vlastnosti, stejně jako chromozom obsahuje geny odpovídající přítomnosti (nebo nepřítomnosti) nějakého znaku, jako je třeba barva vlasů. Klademe-li si například otázku, které zvíře je nejlepším přítelem člověka, mohou být psi zakódováni řetězcem obsahujícím jedničky pro bity odpovídající vlastnostem "chlupatý", "slintá", "štěká", "je věrný" a "běhá pro klacek" a nuly pro bity odpovídající vlastnostem "kovový", "hovoří urdsky", "vlastní kreditní kartu" atd. Převedení do tvaru binárních řetězců je hledání řešení tohoto problému hledáním správného řetězce jedniček a nul.

Jako vždy, dobré řešení odpovídá konkrétním spojením rysů v prostoru možností. Opět si můžeme myslet naši metaforu krajiny, kde poloha odpovídá kombinaci nul a jedniček a výška měří kvalitu řešení. Abychom výšku vypočetli, potřebujeme funkci "zdatnosti", což je totéž jako funkce nákladů, na niž jsme narazili dříve. Pak je na řadě Darwin. Algoritmus (viz obr. 5.1) začíná s "populací" chromozomů - bitových řetězců, z nichž každý představuje jedno potenciální řešení našeho problému. Obvykle jsou to všechno odhady nebo pokusy najít řešení problému naslepo. Pak vypočteme jejich zdatnosti. Můžeme použít volnou analogii s molekulární biologii a individuální bity nebo soubory

bitů na chromozomech nazývat geny. Ty chromozomální řetězce, které leží v krajině nejvýše, jsou pak spárovány s použitím operací překřížení a inverze a výsledné potomstvo nahradí některé z chromozomů ležících v údolí. Kromě toho je malé množství genů (asi jeden na každých 10 000 znaků) náhodně přehozeno z 0 na 1 nebo naopak. To odpovídá mutaci způsobené prostředím, která přidává ještě o něco více rozmanitosti. Tímto způsobem se kombinace inovace (mutace, překřížení a tak dále) a selekce (ponechání pouze zdatnějších chromozomů v populaci) generace po generaci blíží k optimálnímu řešení. Na paralelním počítači mohou jednotliví členové chromozomální populace souběžně testovat, vzorkovat a prozkoumávat velké kusy prostoru možností nezávisle jeden na druhém.

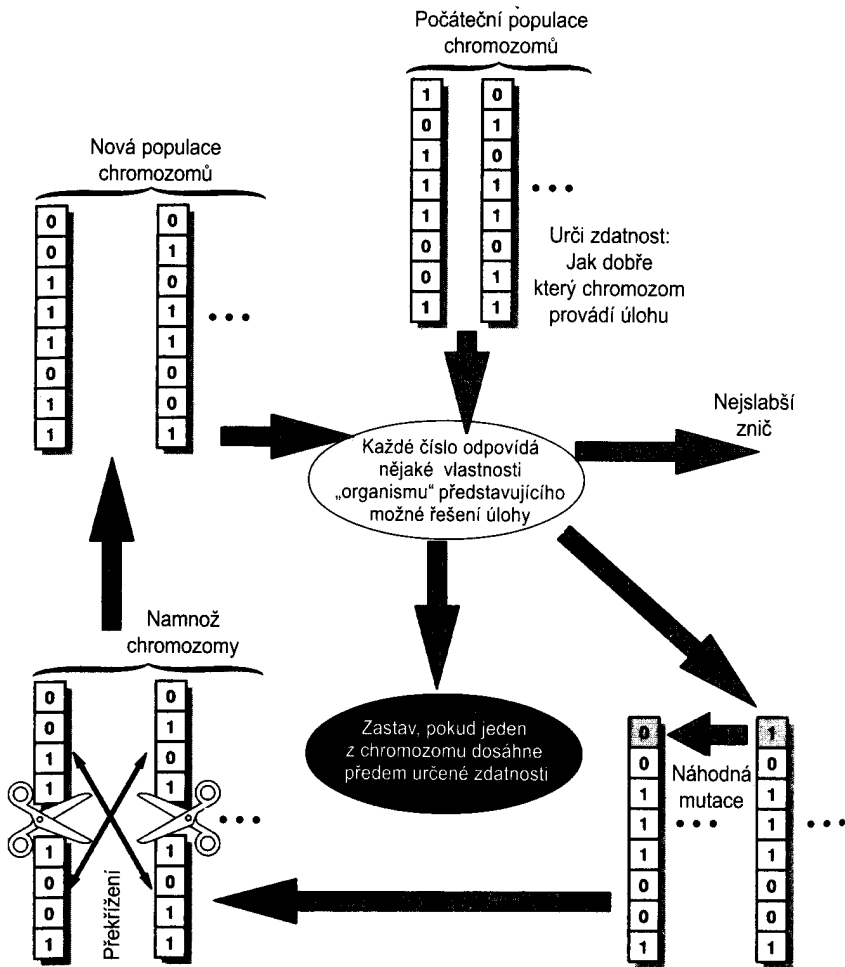
Efektivnost tohoto binárního klasifikačního systému lze ukázat na příkladu hledání optimálního návrhu turbín komerčního proudového motoru, což je problém zahrnující více než 100 proměnných. Prostor možností obsahuje více než 10 387 bodů. Vyhodnocení kvality jednoho jediného návrhu může na typické pracovní stanici trvat kolem třiceti sekund, takže čistě náhodné vyhledávání optimálního návrhu by s velkou pravděpodobností trvalo déle, než činí stáří vesmíru. Zkušenému inženýrovi to trvalo kolem dvou měsíců, než přišel s rozumným návrhem turbíny. Avšak "vyvinout" třikrát účinnější konstrukci s použitím genetického algoritmu trvalo jen pár dnů.

Práce jednoho z Hollandových studentů, Davida Goldberga (nyní působí na univerzitě v Illinois) ukázala, jak mohou genetické algoritmy řídit tok plynu v potrubí tak, aby vyhovoval denním a sezónním výkyvům poptávky. To je příklad toho, čemu se říká problém adaptivního řízení. Genetický algoritmus reaguje na poptávku po plynu v různé době a nastaví podle toho rychlost průtoku plynu v rozvodu. I Holland byl touto aplikací překvapen: "Moje první reakce byla, že to je příliš obtížný problém pro doktoranda - ani pro zjednodušené verze problému neznáme analytické řešení a praktická činnost znamená mimo jiné být dlouho učedníkem, jako když si chcete osvojit řemeslo. Dave vytrval a v překvapivě krátké době přinesl disertaci, která přinesla zase jemu v roce 1985 cenu, kterou mladým vědcům uděluje americká National Science Foundation. Docela dost na mou představu o tom, jak má vypadat slušná disertace."

Rozšířením genetického algoritmu je pojem genetického programování, který razí John Koza ze Stanfordské univerzity. V základním genetickém algoritmu je jen jeden typ řešícího algoritmu,



reprezentovaného chromozomem pevné délky. Avšak v genetickém programování programy proměnlivých forem a velikostí samy podléhají adaptaci.



Obrázek 5.1 / Digitální darwinismus. Genetický algoritmus.

Úkolem je prohledat prostor všech možných programů a nalézt ten, který je pro daný problém nejzpůsobivější. Tak se šlechtí stovky tisíc počítačových programů podle principu přežití nejzdatnějšího spolu s reprodukci a s použitím genetické rekombinace (tedy překřížení). Potomstvo má obecně jinou velikost a formu než rodiče. Jedním

příkladem je genetické šlechtění (evoluce) počítačového programu, který může působením síly řídit pohyb kamionu po silnici tak, aby zastavil na určeném místě za co nejkratší čas, přičemž se vychází ze znalosti Newtonových pohybových zákonů.

Stejně jako u genetických algoritmů není v současné době k dispozici žádný matematický důkaz, který by umožňoval, aby byla tato technika používána všeobecně k řešení problémů. Jediné, co máme v rukou, je "velké množství empirických důkazů podporujících protiintuitivní a překvapivý závěr, že genetické programování se dá použít k řešení velmi mnoha zdánlivě odlišných problémů z mnoha rozličných oblastí".<sup>141</sup>

Přístupy využívající evoluční výpočty však mají i své kritiky. Počítačové programy, o kterých tu mluvíme, se "vyvíjejí" cestou, která připomíná přírodní výběr, a tak často řeší problémy způsobem, kterému ani jejich tvůrci plně nerozumějí. Je to síla i slabost. Z fundamentálního hlediska neexistuje žádná přesná matematická teorie toho, co tyto algoritmy dokážou, takže si nemůžeme být jisti jejich spolehlivostí. Jak pragmaticky podotkl David Goldberg: "Starali jsme se o to, co funguje a proč to funguje ... Příroda se stará jen o to, co funguje. Příroda rozšiřuje to, co přežije. Na intelektuální spekulace nemá moc času a k její oportunistické honbě za zlepšením jsme se přidali i my."

## Umělá inteligence

Genetické algoritmy a genetické programování mohou vyřešit mnoho "nezvládnutelných" problémů a v některých ohledech se na ně můžeme dívat, jako by se chovaly "inteligentně". V úsilí vyřešit komplexní problémy reálného života vědci nejenže napodobují evoluční proces, ale pokoušejí se také simulovat nejvyšší produkt evoluce - lidský mozek - vytvářením neuronových sítí, třídy počítačových programů, které, tak jako genetické algoritmy, používají přírodní strategie v širším kontextu. Jako genetické algoritmy jsou i neuronové sítě schopny řešit těžké problémy, a jelikož hrají ústřední roli v procesu učení a v paměti, mohou vést k vytvoření umělé inteligence (AI).<sup>□</sup>

Hned na začátku bychom měli říci, že AI je jednou z nejkontroverznějších akademických disciplín současnosti, z větší části

---

<sup>141</sup> J. Koza, Genetic Programming (MIT Press, London 1992), str. 4.

□ Artificial intelligence (pozn. překl.)

proto, že se nikdo neshodne na tom, co to vlastně inteligence je.<sup>142</sup> Možnosti neuronových výpočtů byly zpočátku ignorovány většinou členů vědecké obce umělé inteligence, kteří dávali přednost staré dobré AI (GOFAI).<sup>□</sup> Tento přístup "shora dolů" se pokouší rozparcelovat inteligenci do oddělených "modulů", které se zabývají specifickými typy vědomostí a informace, jako jsou vnímání, plánování a provádění různých činností. Každý modul je vybaven jednoznačnými modely vnějšího světa a předpokládá se, že tyto moduly na sebe vzájemně působí prostřednictvím logických pravidel obsažených v "inferenčním stroji", což vede k inteligentnímu chování robota, jako je uchopování nebo vyhýbání se předmětům. Na vrcholu slávy v šedesátých letech byla slyšet spousta smělých tvrzení o schopnostech GOFAI a o možnosti simulovat inteligenci v počítači. Jeden z nejzapálenějších propagátorů GOFAI, Marvin Minsky z MIT, řekl roku 1970, že "za tři až osm let budeme mít stroj (typu GOFAI) s všeobecnou inteligencí lidské bytosti". Tato předpověď při své realizaci žalostně selhala.<sup>143</sup> Útokem na tuto pozici, známou též jako "silná umělá inteligence", a argumenty, které "ukazovaly neudržitelnost hlediska, podle něhož je naše myšlení v podstatě činností nějakého velmi komplikovaného počítače",<sup>144</sup> se proslavil matematický fyzik sir Roger Penrose.

Allen Newell a Herbert Simon z Rand Corporation na konci 50. let ukázali, že bitové řetězce v počítači se dají používat k reprezentaci nejen čísel, ale také obecnějších symbolů,<sup>145</sup> čímž výrazně pomohli GOFAI odlepit se od země. Tyto symboly mohou označovat obecné aspekty světa a logické manipulace s nimi mohou provádět vhodně strukturované programy. Vypadalo to tak, že i lidský mozek manipuluje se symboly, ať jsou to noty, obrázky nebo text, a provádí úvahy nekonečné rozmanitosti a důmyslu, a tak se vznikající vědecké

---

<sup>142</sup> Viz např. *Artificial Intelligence at MIT: Expanding Frontier*, P. Winston and S. A. Shellerd (eds.) (MIT Press, Cambridge, MA, 1990). Předmluva připouští: „Definice inteligence se bohužel v tuto chvíli zdá nemožná, protože inteligence se jeví jako amalgam příliš velkého množství rozličných schopností zpracovávat a reprezentovat informace.“

<sup>□</sup> Good old-fashioned artificial intelligence (pozn. překl.)

<sup>143</sup> I. Aleksander and P. Burnett, *Thinking Machines: The Search for Artificial intelligence* (Oxford University Press, Oxford 1987) str. 195.

<sup>144</sup> R. Penrose, *The Emperor s New Mind* (Vintage, London 1990), str. 578.

<sup>145</sup> Jak Alan Turing, tak Ada Lovelace si dávno předtím uvědomili, že počítače dokážou mnohem více než manipulovat s čísly.

komunitě zabývající se umělou inteligencí zdálo, že je to jen otázka času, než GOFAI zvládne všechno, co dokáže dělat člověk.

Přibývalo dokladů o tom, že úspěšnost práce závisí na rychlém prohledávání velkých depozitářů znalostí, převedených do symbolické podoby. Například AI používaná pro lékařskou diagnostiku by měla napodobit lékaře, který rozpoznává příznaky nemoci, a tím by měla získat přístup k jeho vědomostem o chorobě, léčení a dalších testech. Experimenty naznačovaly, že lidský odborník v jakékoli dané oblasti je schopen rozpoznat 50 000 i více takových příznaků, které dobře zná a používá je, když si potřebuje vybavit nějakou závažnou informaci uloženou v dlouhodobé paměti. GOFAI tedy spoléhá na digitální biflování: tvrdí se, že stroj lze vzdělat tím, že jej nakrmíme tolika pravidly a fakty, kolik jich jen dokážeme vytáhnout z lidských "expertů". Odborná komunita kolem GOFAI postupovala tímto směrem při návrhu počítačových simulací lidské inteligence. Takovéto expertní systémy se skládají ze tří částí. První je uživatelské rozhraní, jímž uživatel komunikuje s počítačem a dodává mu potřebné informace, dále je to báze znalostí, páteř systému, v níž jsou uloženy informace relevantní pro daný problém, získané od expertů, a nakonec inferenční stroj, který poskytuje odpovědi s použitím systematických logických operací prováděných s informacemi vytaženými z báze znalostí a dodanými uživatelem. V případě lékařského expertního systému by inferenční stroj měl být schopen rozpoznat z chřipkových příznaků, ztráty chuti k jídlu, nevolnosti a zežloutnutí pacientovy kůže, že se jedná o žloutenku.

Prvních pokroků dosáhl roku 1956 Edward Feigenbaum, který pracoval na Stanfordské univerzitě s laureátem Nobelovy ceny Joshuou Lederbergem na vývoji DENDRALu. Tento expertní systém dokázal odvodit strukturu molekuly ze záznamu hmotového spektrografu, který analyzuje chemické látky tak, že rozbíjí jejich molekuly a měří hmotnost vznikajících úlomků.

Úspěch expertních systémů ve "znalostním inženýrství" spočívá v jejich omezení na úzkou oblast. Expertní systémy byly opravdu úspěšné, když se zabývaly mnoha různými vysoce specifickými, avšak komplikovanými úkoly, jako jsou problémy ve finančnictví a v průmyslové výrobě, rozpisy letů a pasažérů, lékařské diagnózy a navrhování léčiv. Ačkoli je najdeme v mnoha sférách lidské činnosti, jejich schopnosti jsou ostře vymezeny povahou, kvalitou a soustavností lidských pravidel, na nichž jsou založeny. Vždy je tu nebezpečí, že když

se dostatečně nebere ohled na potřeby uživatelů, stanou se "datovými hrobkami" - obrovskými zásobárnami bezcenných informací.

Nedostatkem expertních systémů je, že vyžadují opatrné zacházení: nemají "zdravý rozum", aby dokázaly popisovat a zpracovávat nedokonalou a nejednoznačnou informaci. Vezměme například úkol přesvědčit počítač, aby rozuměl řeči anebo strojopisu v jazycích, jako jsou angličtina nebo francouzština. V roce 1960 byl vyvinut program zvaný ELIZA, který měl reprodukovat konverzační dovednosti psychoterapeuta. Na první pohled vyhlížel dialog mezi ním a lidským tazatelem imponantně, ale po chvíli bylo zřejmé, že všechna zběhlost ve vtípných odpovědích je naprosto iluzorní: převáděl odpovědi na otázky a byl naprogramován tak, aby agresivně reagoval na každou zmínku o matce, otci nebo snech - bez ohledu na to, v jakém kontextu se vyskytují. Na větu typu "Nelson Mandela je otcem nové Jihoafrické republiky" by reagoval slovy: "Vyprávějte mi o svém otci."

Velkolepé naděje vkládané do GOFAI přístupu se začaly hatit na začátku 70.let, když se ukázalo, že jeho schopnosti nestačí na dětské pohádky. Naprogramovat počítač s dostatkem všeobecných znalostí, aby jeho chápání bylo srovnatelné se čtyřletým dítětem, se ukázalo jako nepřekonatelná překážka. Přirozené jazyky jsou mnohem komplikovanější, než se původně myslelo: kódují obrovské množství znalostí závislých na kontextu, které nám umožňují naplnit slovní vyjádření smyslem. Výrok "Petr viděl ve výkladě obchodu počítač a chtěl ho" by počítačový program ve stylu GOFAI úplně zmátl. Co chtěl: počítač, obchod nebo výklad? Lidé se snažili překonat tuto hádanku zjednodušením problému. Jednou malou úspěšnou historií byl program SHRDLU, vyvinutý Minského studentem Terryem Winogradem, který dokázal používat jazyk bez dvojznačností - pokud jste chtěli mluvit pouze o idealizovaném mikrosvětě, složeném jen z pohyblivých barevných kvádrů.<sup>146</sup>

Dnes většina lidí uznává, že velké ambice tohoto typu nebyly v umělé inteligenci nikdy naplněny. Dávný kritik umělé inteligence, Američan Hubert Dreyfus, se domnívá, že aby "mysl" měla zdravý rozum, potřebuje také tělo k prozkoumávání světa: "Každého, kdo má děti, musí zarážet, kolik let stráví hraním na písku, hrátkami s vodou,

---

<sup>146</sup> SHRDLU je zkratka, která nic nezkracuje - tuto ideu převzal Winograd z Mad Magazine. Minsky o tomto modelu řekl: „Hovoří o pohádkové zemi, kde věci jsou tak zjednodušené, že téměř každý výrok o něm by byl doslova nepravdivý, pokud by jej někdo tvrdil o skutečném světě.“ H. Dreyfus, What Computers Still Can 't Do (MIT Press, Cambridge, MA 1992), str. 9.

šploucháním se, cachtáním, vyléváním, cákáním. Zdá se, že to děti nekonečně fascinuje. Můžeme se ptát, co to dělají? Proč je to nezačne nudit? Jakou to může mít cenu? No, já bych řekl, že se seznamují s 50 000 případy stříkání vody, které potřebují k tomu, aby nalévaly, pily, rozlévaly a přenašely vodu. Atak si zkusí svých 50 000 případů, jak do sebe tělesa vrážejí, odírají se, skládají se na sebe, hroubí se. V tomto případě, myslím si, spočívá zdravý rozum ve znalosti obrovského množství speciálních případů, které si sice nezapamatujeme jako soubor případů, ale které naladí neurony tak, že když nastane něco podobného oněm případům, dostaví se odpovídající akce nebo očekávání. A v tom spočívá moudrost zdravého rozumu."

Opravdovou zhoubou GOFAI jsou úkoly, které my vykonáváme úplně bez námahy: rozeznat něčí tvář v davu lidí, mluvit svým jazykem a překládat z jednoho jazyka do druhého, vyhýbat se létajícím kamenům, šípům a oštěpům. Prvotním důvodem, proč tak snadno zvládáme takové úkoly, které měly životní důležitost pro vývoj a přežití člověka, je struktura a funkce našeho mozku. Dokud nepochopíme, jak se mozek adaptoval na tyto úkoly, nebudeme jej schopni efektivně napodobit, neřkuli ho výhodně použít pro zpracování komplexních systémů obecně. Jak budeme opakovaně zdůrazňovat, jednou z podstatných vlastností mozku je jeho schopnost učit se ze styku s okolím. Další vlastností je zabudovaný paralelismus. Zatímco čtete tuto větu, odehrává se současně mnoho dalších tělesných i myšlenkových pochodů a každý z nich je řízen nervovou soustavou mozku. Některé si uvědomujete, jiné ne. V současnosti vysvitla umělé inteligenci nová naděje v podobě návratu k původním podnětům, které kdysi nadchly Alana Turinga a Johna von Neumanna.

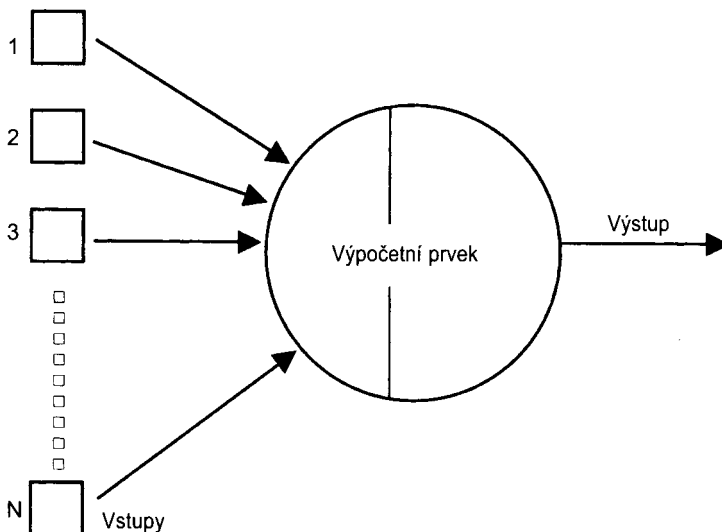
## Neuronové sítě

Jedním z prvních pokusů o návrh počítače, který by byl založen na struktuře mozku, pochází z von Neumannovy zprávy o EDVACu. Tam se můžeme dočíst, jak byl von Neumann fascinován matematickým popisem mozkových buněk, který roku 1943 Warren McCulloch a Walter Pitts z univerzity v Illinois navrhli ve svém článku, nazvaném "Logický kalkul myšlenek zabudovaný v nervové aktivitě".<sup>147</sup> Jejich průkopnická práce naznačovala, že mozkové buňky - neurony -, pomocí

---

<sup>147</sup> W. S. McCulloch and W. Pitts, Bull. Math. Biophysics 5, 115 (1943).

nichž myslíme, lze považovat za logické přepínače, pracující na základě booleovské (binární) aritmetiky. McCulloch a Pitts tvrdili, že sestavením souborů takovýchto elementárních jednotek do "neuronových sítí" dokážou provést libovolnou operaci v rámci výrokového počtu (tj. zákonů logiky).<sup>148</sup>

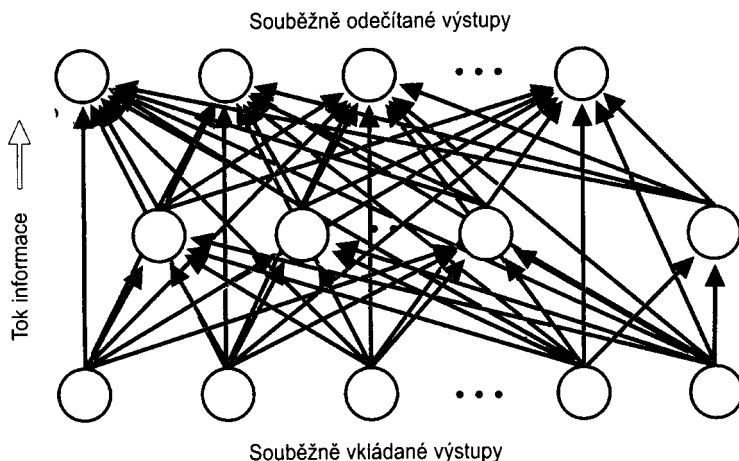


Obrázek 5.2 / Bio-logika.  
Logická struktura biologického neuronu podle McCullocha a Pittse.

McCulloch a Pitts navrhli přístup "zdola nahoru", k umělé inteligenci modelované na masivně paralelních propojeních mozkových neuronů. V mozku dostává neuron signály od ostatních neuronů prostřednictvím sítě jemných spojů, zvaných dendrity. Neuron vysílá impulzy elektrické aktivity tenkým vláknem zvaným axon. Z axonu zase vyrůstá mnoho jemných větví a každá větev je zakončena strukturou nazývanou synapse, která předává signál sousednímu neuronu. K učení dochází, když mezi mozkovými buňkami vyrostou nové spoje, když odumřou nebo se změní jejich síla. Ke konstrukci počítačového modelu potřebujeme abstraktní logickou reprezentaci struktury každého neuronu. Tato reprezentace je znázorněna na obrázku 5.2. McCulloch a Pitts uvažovali pouze o dvouvrstvé síti, v níž první vrstva neuronů

<sup>148</sup> Jejich práce byla návrhem formálních binárních neuronů, které mohly přijímat jen jeden nebo dva vstupy. Rosenblatt je rozšířil na libovolný počet.

přijímá informace z okolního světa; jejich spoje s neurony v druhé vrstvě dávají odpověď, která je výstupem pro vnější svět.



Obrázek 5.3 / Typická architektura umělé neuronové sítě

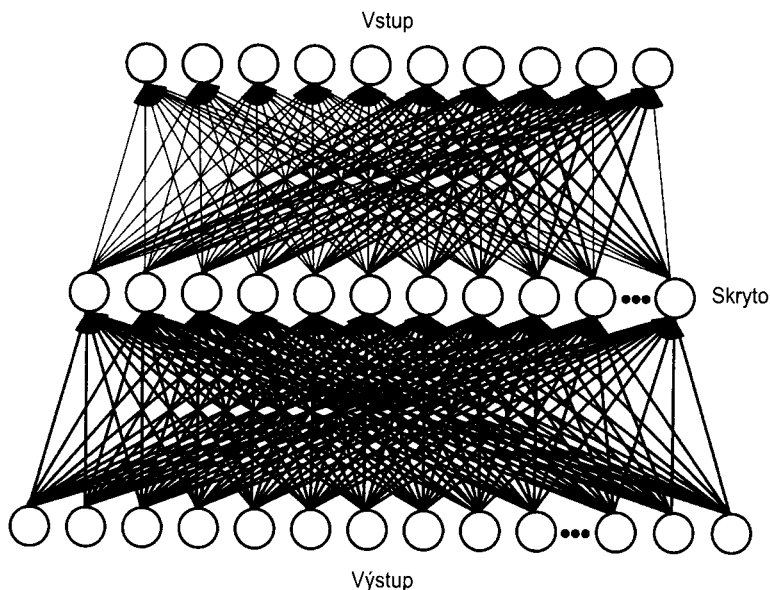
Umělé neuronové sítě jsou vysoce zjednodušenou logickou reprezentací velkých souborů takových jednoduchých a identických McCullochových a Pittsových neuronů, které jsou buď softwarově simulované, nebo skutečně zabudované do křemíkových čipů. Sdílejí některé rysy s celulárními automaty, o nichž jsme mluvili ve 4. kapitole. Každý neuron (informatiky též nazývaný výpočetní element) v takové síti je spojen se spoustou dalších, které mohou být libovolně daleko (obr. 5.3), zatímco buňky v celulárním automatu komunikují pouze se svými nejbližšími sousedy.

Další podnět pro studium umělých neuronových sítí přišel od amerického matematika Norberta Wienera, jehož kniha *Kybernetika* z roku 1947 představila novou vědu, zasvěcenou studiu řídicích mechanismů lidí a strojů.<sup>149</sup> Wiener viděl teoretické paralely mezi zařízeními, která řídí stroje, a biologickými mechanismy, díky nimž mozek ovládá tělo. O něco později psycholog Frank Rosenblatt z Cornellovy univerzity vytvořil zvláštní strukturu neuronové sítě, kterou nazval perceptron. Jeho Perceptron Mark 1, předvedený roku 1960, sestával z 400 fotobuněk, které zhruba reprezentovaly světločivé neurony na sítnici, a ze souboru spojovacích jednotek. Každá jednotka

<sup>149</sup> N. Wiener, *Cybernetics* (MIT Press, Cambridge, MA 1986).



sdužovala signály z několika fotobuněk a tento signál posílala skupině jednotek vytvářejících odezvu. Bylo možné naučit síť rozpoznávat písmena abecedy tím, že byla "trestána", když hádala špatně, a tím, že se měnily její spoje, dokud nedosáhla žádoucího výsledku.



Obrázek 5.4 / Příklad mnohvrstvého perceptronu s jednou skrytou vrstvou. Všimněte si, že spoje jsou vedeny jen mezi neurony v sousedících vrstvách sítě.

Ačkoli Rosenblattova práce vypadala slibně, toto odvětví naneštěstí krátce poté utrpělo těžkou ránu. Roku 1969 vyšla kniha nazvaná Perceptrony, spoluautorů Marvinu Minského a Seymoura Paperta, a přinesla zničující kritiku Rosenblattových neuronových sítí. Tito autoři preferovali GOFAI přístup "shora dolů". "Proč se koneckonců obtěžovat s návrhem a stavbou nových, složitých a velmi pravděpodobně nefunkčních strojů, když číslicový počítač byl již vyzkoušen, testován a zjevně už co nevidět bude inteligentní?" napsal Igor Aleksander z Imperiál College, jeden z badatelů, kteří dokázali přežít i po tomto útoku. "S výhodou zpětného pohledu vidíme, že toto odmítnutí přístupu "zdola nahoru" bylo jak pošetilé, tak neoprávněné."<sup>150</sup>

<sup>150</sup> I. Aleksander and P. Burnett, Thinking Machines: The Search for Artificial Intelligence (Oxford University Press, Oxford 1987) str. 157.

Jádrem knihy Minského a Paperta byla teoretická analýza toho, co dvouvrstvý perceptron dokáže. Ve skutečnosti ukázali, že perceptron ve své nejelementárnější podobě nemá vůbec žádné zajímavé vlastnosti. Po téměř dvou desetiletích vyšlo nové vydání, které trvalo na svém: jeho předmluva prohlášovala, že "od roku 1969, kdy byla kniha poprvé vydána, se změnilo jen málo, co by stálo za řeč". Autoři připustili, že "někteří čtenáři tím mohou být šokováni" a že "byly učiněny objevy, které mohou časem mít zásadní význam", ale tvrdili, že "sotva nastala jasně zřetelná změna v koncepční základně tohoto oboru".

Ti, kteří patří ke "konekcionistické" komunitě, tento názor nesdílejí a symbolisté, jako jsou Minsky a Papert, ochotně přiznávají, že s nimi vedou válku. Nejjednodušší modifikace dvouvrstvého perceptronu vedou k všemožným typům vzrušujících nových možností. "Zásadní" vady, zdůrazněné Minským a Papertem, byly překonány v polovině osmdesátých let Davidem Rumelhartem a Jamesem McClellandem z Kalifornské univerzity v San Diegu, kteří rozšířili schopnosti jednoduchého perceptronu dvěma modifikacemi. Za prvé přidali další neurony do definované třetí vrstvy - skryté vrstvy - vsunuté mezi vstupní a výstupní neurony. Mezi neurony sousedících vrstev je spojen každý s každým, ale v rámci vrstvy nebo ob vrstvy spojeny nejsou. Obrázek 5.4 ukazuje příklad třívrstvé sítě, pouze s jedinou skrytou vrstvou, je však dobře možné (i když se to většinou nedělá) zavést tolik vrstev, kolik si kdo přeje.<sup>151</sup> Výsledkem je mnohvrstvý perceptron □ neboli MLP.

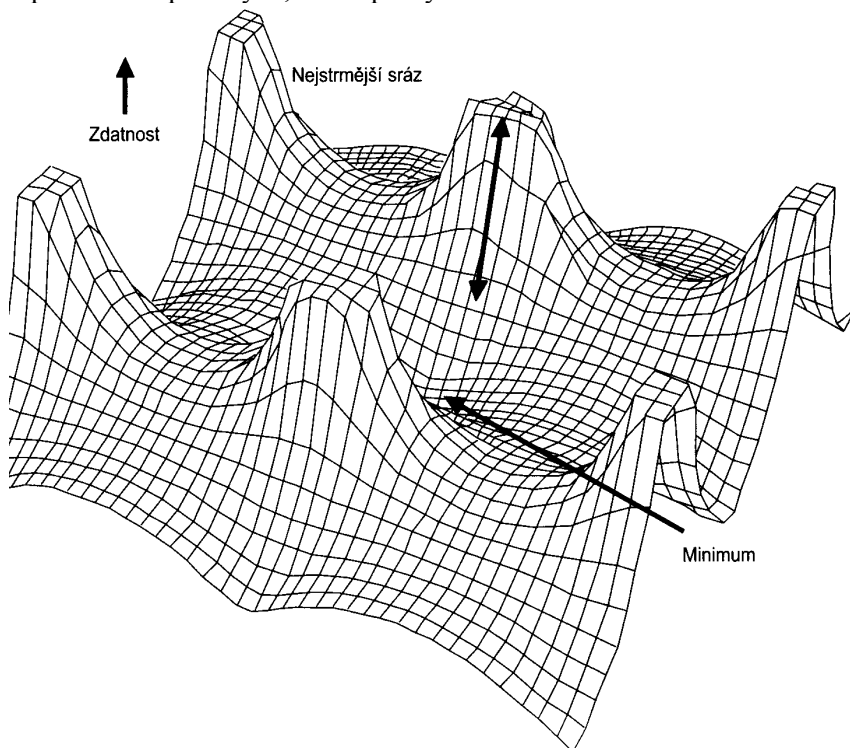
Druhou modifikací byla realizace nového algoritmu, zvaného "zpětné šíření chyb" nebo jednodušeji "zpětné šíření", který síti umožnil efektivní učení. Tato metoda byla poprvé navržena Paulem Werbosem roku 1974, když pracoval na své doktorské práci na Harvardově univerzitě. Síť je doslova cvičena na příkladech problémů, pro něž jsou známa jak vstupní, tak výstupní data. Může to být například snaha rozpoznat písmena abecedy v ručně psaném textu. Síť je na začátku předložena škrabopis, ve kterém se má snažit rozeznat písmena. Její typy se pak srovnávají se skutečnými písmeny a chyby v odhadech se zaznamenávají. V tuto chvíli vstupuje do hry algoritmus zpětného šíření: minimalizuje chyby sítě tím, že je posílá po síti zpět a nastavuje váhy spojů (ty nám říkají, jak silně jsou spojeny jednotlivé neurony), až je v

---

<sup>151</sup> Dnes je známo, že jedna skrytá vrstva jednotek stačí pro univerzální aproximaci. Nezodpovězená otázka je, jak roste počet skrytých jednotek s velikostí problému.

□ Multilayer perceptron (pozn. překl.)

ideálním případě nalezeno globální minimum chyby. Jakmile máme minimum chyby, říkáme, že síť je vycvičena a je ve stavu vhodném pro "zobecňování". Jinými slovy je připravená, aby na požádání rozluštila řadu předtím nespátných, ručně psaných textů.



Obrázek 5.5 / Krajina možností.

Chybová plocha v prostoru vah spojuje, další funkce vytvářející krajinu, podobnou té, kterou jsme viděli na obrázku 4.6

Poněkud podrobnější představu, o čem se jedná, získáme, když si nakreslíme chybovou krajinu, což je pojem podobný mnoha jiným adaptivním krajinám, které jsme popisovali u jiných komplexních problémů. Algoritmus učení mnohovéstvého perceptronu hledá nejnižší polohu (nejmenší chybu) v této krajině. Pro daný vzorek rukopisu, který síť zpracovává, je tato krajina velmi komplikovanou funkcí mnoha vah spojuje v síti. Tak jako u příkladů, na něž jsme narazili dříve, je hledání globálního minima chyby typicky "těžkým" optimalizačním problémem, neboť krajina se nachází v mnohorozměrném prostoru: bude-li mít například dvacet spojuje, chybová plocha se bude nacházet ve

dvacetirozměrném prostoru (viz obr. 5.5). Algoritmus zpětného šíření je navržen tak, aby našel globální minimum. Proti tomuto algoritmu se však zvedla řada kritických hlasů. Algoritmus má sklon zachytit se spíše v lokálním než v globálním minimu; může se také blížit k výsledku velmi pomalu, pokud je krajina komplikovaná. Existují však cesty, jak tyto problémy překonat.

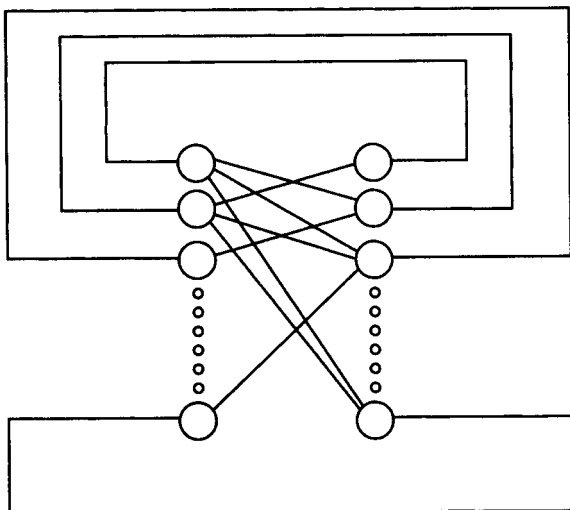
## Od spinových skel k neuronovým sítím

Sherringtona a Kirkpatricka určitě nenapadlo, že jejich model spinového skla z roku 1975 s nekonečně daleko sahající interakcí pomůže vyjasnit některé aspekty fungování neuronových sítí a dokonce do určité míry odpovědět na otázku, jak pracuje mozek. Význam spinových skel pro neuronové sítě nevyplývá z nějaké fyzikální podobnosti (žádná tu není), ale spíše z abstraktnější analogie pojmů. Je to však důležité, neboť to ukazuje, že mezi představami o komplexních systémech v živém a neživém světě může probíhat obousměrná výměna. Souvislost mezi spinovými skly a mozku podobnými soustavami nervových buněk se zakládá na tom, že v každém z těchto modelů se mohou základní jednotky (spiny nebo neurony) vzájemně ovlivňovat na velmi dlouhou vzdálenost. Protože spoje mezi neurony v síti mohou být jak excitační, tak tlumivé - čili mohou buď zesilovat, nebo tlumit signály, které si neurony navzájem předávají - může mezi neurony nastat mnoho "konfliktů zájmů". Tyto konflikty v neuronové síti jsou analogické frustraci ve spinovém skle, popsané ve 4. kapitole, a ztěžují nám předpovídání celkového stavu, do něhož se síť dostane, když bude vystavena nějakému typu vnějších stimulů. Ve skutečnosti se ukazuje, že zjišťování, co takové stimuly udělají s tak velkou a silně popropojovanou sítí, se velmi podobá výpravě za hledáním nejhlubšího údolí v krajíně volné energie spinového skla.

Hlubokou analogii mezi problémem neuronové sítě a magnetickým chováním spinového skla si poprvé uvědomil John Hopfield z Caltechu. Ukázal, že existuje matematické zobrazení Sherringtonova-Kirkpatrickova modelu spinového skla na jednoduchý typ plně pospojovaného modelu neuronové sítě (obr. 5.6), který se dnes nazývá Hopfieldova síť.<sup>152</sup>

---

<sup>152</sup> J. Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 79, 2554 (1982).



Obrázek 5.6 / Hopfieldova síť - plně pospojovaná umělá neuronová síť

Plně pospojovaná síť je taková, v níž je každý neuron spojen se všemi ostatními neurony; u Sherringtonova-Kirkpatrickova spinového skla každý spin cítí přítomnost všech ostatních spinu. Všimněte si, že Hopfieldova síť se podstatně liší od mnohvrstvého perceptronu popsaného výše. Všechny postupy vyvinuté ve statistické fyzice pro analýzu spinových skel se tedy dají se vším všudy přenést na různé problémy vznikající při výzkumu neuronových sítí. Fyzika spinových skel pomohla vyjasnit funkci neuronových sítí ve dvou ohledech. Za prvé spinová skla vysvětlují globální chování sítí s danou architekturou a silami spojů. Za druhé poskytují recept, jak zvolit tyto síly spojů tak, abychom od sítě dostali optimální výkon, ať už při rozpoznávání podpisu nebo SPZ automobilu.

Nová vlna zájmu o studium neuronových sítí na celém světě (a zvláště ve Spojených státech), která následovala po rání uštědřené Minským a Papertem, byla do značné míry vyvolána Hopfieldovým článkem publikovaným roku 1982. Hopfield věřil, že jeho neuronová síť poskytuje základ pro praktickou realizaci ve formě paměti, která je jako stvořená pro velké databáze a které se říká paměť adresovatelná obsahem. Nazývá se také asociativní paměť a vystihuje přinejmenším podstatu toho, jak si lidé zapamatovávají věci a jak si je opět vybavují z paměti.

V konvenčních počítačích jsou data uspořádána strukturovaným způsobem, většinou v pojmenovaných (očíslovaných) souborech. Na jména se můžeme dívat jako na adresy. Aby se uživatelé dostali k některému oddílu dat, musejí zadat správnou adresu, čímž se data vyvolají z paměti. Tato metoda je zranitelná v tom smyslu, že každá chyba v adrese povede k selhání - buď se zhroutí systém, nebo bude vyvolána informace ze špatné adresy. Adresovatelnost obsahem je vymyšlena tak, aby odstranila tuto zranitelnost. Uživatel zadá nějaké klíčové slovo nebo slova vyskytující se v souboru, která mohou být i neúplná nebo nepřesná, a systém by měl být schopen prohledat databázi a vyvolat plný informační záznam, který žádáme. Z úryvku "Z paměti vyrvat vkořeněný žal, co v mozku psáno traplivého smazat"<sup>□</sup> by si literární databáze měla vybavit Shakespearova Macbetha. Tato myšlenka není nová: kolovala mezi inženýry a informatiky, a dokonce již byla realizována. Novost neuronových sítí spočívá v tom, že dokážou pracovat s neúplnými a chybami zatíženými údaji.

Mohli bychom si myslet, že soubor neuronů vysílajících impulz v daném okamžiku v Hopfieldově síti bude zcela náhodný. V aktivní síti se ale obecně objevují obrazce organizované tak, že určité neurony neustále vysílají impulzy a jiné zůstávají v klidu. Obrazec, který se tak vytvoří, závisí na počátečním vstupním "stimulu" sítě: na tom, které neurony na začátku vysílají impulzy a které ne (viz obr. 5.7).

Protože neurony jsou navzájem spojeny mnoha zpětnými vazbami, což vede k silně nelineárním jevům, představuje síť nelineární dynamický systém toho typu, který budeme podrobněji rozebírat v 6. kapitole. Pro zadaný soubor aktivačních úrovní vstupních neuronů (vstupní či počáteční podmínky definované vnějšími stimuly) dospěje síť nakonec ke specifickému obrazci aktivity, který je atraktorem<sup>□</sup> pro tento vstupní soubor. Právě tak jako mnohvrstvý perceptron vhodně vycvičený na rozpoznávání ručně psaného textu dokáže rozpoznat písmeno "a" ve slově "abrakadabra", napsaném různými osobami, tak také několik vstupů může vést k témuž atraktoru v Hopfieldově síti. Soubor vstupních stavů (stimulů), které systém dovedou do téhož daného atraktoru, se nazývá oblast přitažlivosti<sup>□</sup> Neuronové sítě se

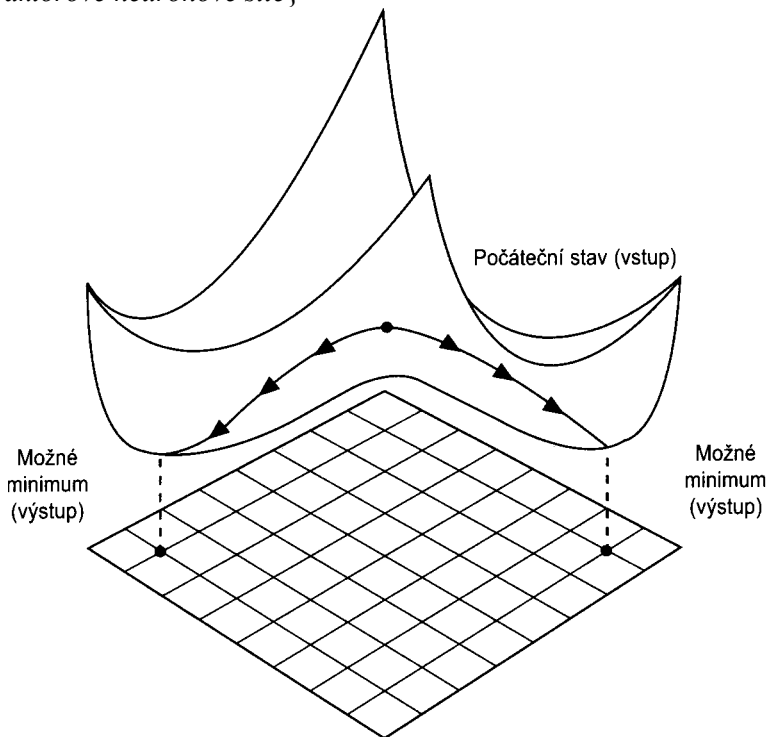
---

<sup>□</sup> Macbeth, V, 3, překlad E. A. Saudek. (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Atraktor u nějakého v čase se vyvíjejícího systému je stav, ke kterému se vždy dostaneme, ať je počáteční stav jakýkoli. Atraktor tedy „přitahuje“, (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Basin of attraction (pozn. překl.)

zpětnou vazbou, jako je ta Hopfieldova, se proto někdy nazývají *atraktorové neuronové sítě*}<sup>153</sup>



Obrázek 5.7 / Atraktorová krajina.

Stabilní vzorce aktivity v atraktorové neuronové síti. Jaký obrazec se objeví na výstupu sítě, závisí na "stimulu" dodaném síti. Bude to jeden z takzvaných "atraktorů" sítě.

Naše paměť pracuje podobně: všechny vstupní stimuly v jedné oblasti přitažlivosti povedou k tomu, že síť neuronů v mozku konverguje do téhož obrazce aktivity neuronů vysílajících impulzy. Můžeme si myslet, že v tomto obrazci je zakódován informační obsah spojený s těmito stimuly. Vstupy mohou být například různé fotografie téže tváře, různě osvětlené, s krátkými a s dlouhými vlasy, s vousy a bez nich a tak dále, a všem bude odpovídat tentýž atraktorový stav "Pepa Vomáčka". Síť tedy může uchovávat tolik různých informací, kolik je v

<sup>153</sup> Důležitou otázkou je povaha samotných atraktorů. Stejně jako u nelineární dynamiky, kde se setkáváme s fixními body, limitními cykly, tory („pneumatikami“) a podivnými atraktory (kapitola 6), mohou v principu tytéž stavy nastat i u atrak-torových neuronových sítí. Nejjednodušší jsou fixní body, což znamená, že síť se usadí do pevného, opakujícího se obrazce aktivity. Ty se dnes studují nejčastěji.

síti atraktoru. Na tyto atraktory se můžeme dívat jako na pozice lokálních minim na chybové ploše, definované podobným způsobem jako u mnohvrstvého perceptronu.<sup>154</sup>

Pro Rumelhartův a McClellandův mnohvrstvý perceptron bylo ústřední otázkou učení, zatímco v Hopfieldových počátečních představách učení nehrálo žádnou jasně vymezenou roli. Informace, kterou bylo možné uchovávat v paměti, byla dána od počátku konstrukcí jeho sítě. Hopfield však přece jen postoupil dále a rozpoznal, že neurobiologický princip učení se dá vyjádřit pravidlem popsáním roku 1949 kanadským psychologem Donaldem Hebbem v jeho knize *Organizace chování*.<sup>□</sup> Hebb vyslovil hypotézu, že během učení se nervové spoje zesilují, pokud neuron vyšle impulzy ve stejném okamžiku, kdy se aktivuje jeden nebo více z jeho synaptických vstupů.<sup>155</sup> Hopfield ukázal, že pokud použijeme hebbovské pravidlo učení pro změnu síly neuronových spojů během aktivity neuronů, vede to ke změnám tvaru chybové krajiny sítě, takže některá údolí se prohloubí, jiná se stanou mělčími a podobně. Opakované vystavení vnějším stimulům, tedy učení či výcviku, skutečně mění obrazce neuronové aktivity v Hopfieldově síti, která používá hebbovská pravidla.

Ve spolupráci s Davidem Tankem pokračoval Hopfield tím, že ukázal, jak se jeho typ sítě dokáže vyrovnat s "těžkými" problémy, tedy problémy typu NP včetně problému obchodního cestujícího. Společně zjistili, že ačkoli hledání řešení takových problémů se může zaseknout v lokálním minimu chybové plochy, síť v praxi často najde řešení blízké žádanému optimu. Nicméně nebezpečí spočívající v tom, že hledání uvázne v lokálním minimu, vrhá jisté pochybnosti na obecné schopnosti sítě. Roku 1984 Geoffrey Hinton, který tehdy působil na univerzitě Carnegie Mellon v Pittsburghu, a Terry Sejnowski, tehdy na Univerzitě Johna Hopkinse v Baltimore, navrhli použít simulované žíhání v tzv. Boltzmannově stroji, což je rozšíření Hopfieldovy sítě, pojmenované po velkém rakouském fyzikovi Ludwigu Boltzmannovi, jednom z průkopníků statistické mechaniky.

Tak jako náhodný tepelný pohyb atomů, k němuž dochází během žíhání, pomáhá krystalu kovu dospět k nejlépe organizovanému uspořádání atomů, dokážeme použít simulovaný náhodný šum

---

<sup>154</sup> Hopfield a další často hovoří o „energetické ploše“ a nikoli o chybové ploše, kvůli analogii mezi chybou sítě a volnou energií modelu spinového skla.

<sup>□</sup> Organisation of Behaviour (pozn. překl.)

<sup>155</sup> D. Hebb, Organization of Behavior (Wiley, New York 1949).



vytvářený počítačem k tomu, abychom vysvobodili neuronovou síť z lokálního minima a vedli ji směrem k nejhlubšímu údolí chybové krajiny. Tak jako dřív je síla šumu postupně snižována, takže se síť vyvíjí ke stále stabilnějšímu a na informaci bohatšímu minimu.<sup>156</sup> Boltzmannův stroj usměrňuje neuronovou síť tak, že pravděpodobnost, že neuronová síť dospěje do nějakého stavu, bude záviset na jeho odpovídající chybě ("energii") neboli na hloubce krajinného profilu. Kromě zdokonalení v řešení NP problémů mají Boltzmannovy sítě nesmírný potenciál pro ukládání velkého množství informací a jejich rychlého vybavování z paměti. S jedním zadaným vstupem dokážou vyvolat velké množství asociované informace, aniž by byla potřeba mít formální vyhledávací procedury zapsané ve formě pravidel. Jejich nevýhodou je to, že jsou ze všech sítí jedny z nejlínějších.

## Šok z novinek

Váš mozek je adaptován na zvládnutí nových nebo nezvyklých situací, například jak se zachovat, když se poblíž vás převrhne vozík s jablky. Jednoduché neuronové sítě, jako je mnohvrstvý perceptron, však může něco nového zmást. Nepatrný přírůstek nové informace může často přeházet váhy spojů v síti. Vede to k tomu, že v krajině (neboli ve vnitřní reprezentaci sítě) vyrostou nové kopce a s nimi nová údolí. To znamená, že síť musí být cvičena znovu a znovu, což je obvykle zdoluhavé. Často bychom dali přednost tomu, aby se síť dokázala učit adaptivně, čímž máme na mysli "učení za chodu". Cítíme, že nová informace přidaná k té staré by nám neměla udělat čáru přes rozpočet. Je jasné, že optimálně vycvičená síť musí být současně stabilní a přístupná nové informaci neboli plastická: musíme se tedy rozhodnout mezi stabilitou a plasticitou. Spousta sítí je příliš nestabilních.

Neuronovou síť, která se neustále učí, společně vyvinuli informatik a matematik Stephen Grossberg a Gail Carpenter. Je to jistý druh

---

<sup>156</sup> Falešné či nelegitimní stavy (minima) se objevují typicky tehdy, když se síť samoorganizuje do souboru atraktorů, do nichž zamýšlíme pomoci například hebovského učení zasadit vzpomínky. Tím se téměř nevyhnutelně vytvářejí dodatečné nelegitimní stavy (lokální minima), které je potřeba vyloučit. Často se dají odstranit přidáním šumu. Oproti úvahám o těchto stavech jako výsledku tvůrčího myšlení fyzik Daniel Amit naznačuje, že by se tento jev mohl spíše považovat za „psychiatrickou metaforu schizofrenie“. D. Amit, *Modelling Brain Function*, kapitola 2 (Cambridge University Press 1989). (Pozn. překl.: D. Amit používal pro řešení modelů neuronových sítí tytéž metody, které pro Sherringtonův-Kirk-patrickův model spinového skla vyvinul G. Parisi - viz pozn. 21 k předchozí kapitole.)

samoorganizované neuronové sítě, to znamená složené ze sítí, které nemusejí být cvičené a nepotřebují dohled. Grossberg a Carpenter je nazývají adaptivní sítě, protože jsou založeny na jistých biologických modelech chování a vnímání. S použitím takzvané teorie adaptivní rezonance<sup>□</sup> (ART) a se zahrnutím pouhých dvou vrstev dokážou tyto sítě velmi rychle zjišťovat a učit se zobecněné poznatky. Pojmenování vychází z analogie s jevem rezonance, v němž malé kmitání o téže frekvenci, jakou mají vlastní kmity mechanického nebo elektrického systému, může vyvolat oscilace o velké amplitudě s devastujícími účinky, jako když operní zpěvák chytí rezonanční frekvenci sklenice. Podobně informace, která se ART sítí šíří, osciluje mezi vrstvami neuronů a během tohoto rezonančního období dochází k adaptivnímu učení. ART nejplněji využívá jednu z podstatných výhod neuronových sítí, o níž jsme již hovořili, totiž masivní paralelismus. Jedna varianta (nazývaná ART-3) využívá rovnice, které modelují dynamiku neurotransmiterů, tj. chemických látek, které přenášejí vzruchy v mozku.

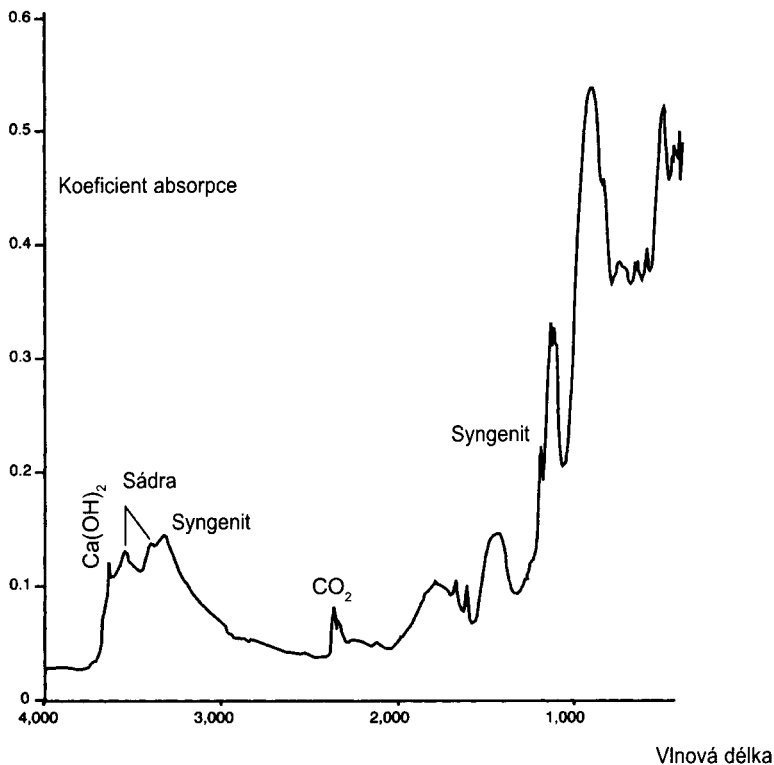
Svědectví o jejich výhodách už podávají i komerční produkty. Podobně jako jiné sítě, ART sítě se používají ve stále větším počtu průmyslových aplikací. Například u Boeingu v Seattlu jsou ART sítě využity k seskupování technických projektů, takže když je databázi předveden nový projekt, všechny podobné drive existující projekty lze najít v klasifikaci, kterou síť vytvořila. Tím, že znovu použijeme již dříve vypracovaný projekt, můžeme ušetřit značné prostředky při plánování procesů a ve výrobě.

## Neuronové sítě pro kutily

V laboratořích po celém světě stavějí počítačovní odborníci neuronové sítě pro obrovské spektrum aplikací. Nejobvyklejším druhem byly mnohvrstvé perceptrony s algoritmem učení pomocí zpětného šíření. Pružnost, která je jim vlastní, znamená, že tyto sítě jsou schopné modelovat libovolný vztah, ať je to vztah mezi tahy perem a písmeny abecedy nebo mezi pohyby cen akcií a kurzem valut. Místo abstraktních úvah raději prozkoumejme konkrétní aplikaci: návrh neuronové sítě schopné předvídat, jak bude tuhnout cementová kaše.

---

<sup>□</sup> Adaptive resonance theory (pozn. překl.)

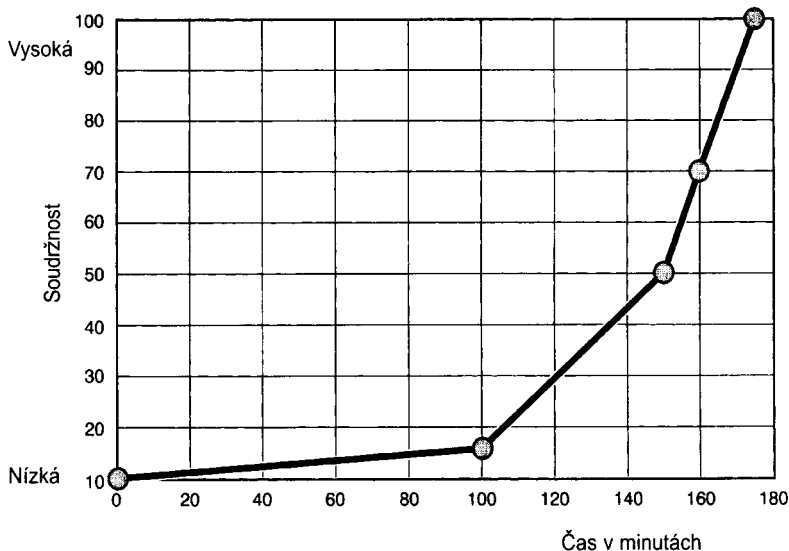


Obrázek 5.8a / Analýza cementu.  
Infračervené spektrum typického naftařského cementu.

Tento problém je dosti důležitý jak v ropném, tak ve stavebním průmyslu, protože je třeba vědět, kolik je k dispozici času pro manipulaci s kaší, než ztverdne.

O cementu toho víme mnohem méně, než bychom chtěli, a to především v souvislosti mezi vlastnostmi prášku před smícháním s vodou s tím, jak po smíchání tuhne. Právě proto nabízejí neuronové sítě výbornou techniku, jak tento materiál dostat pod kontrolu. Jedné skupině ze Schlumbergerovy výzkumné laboratoře v Cambridge se podařilo najít souvislost mezi měřitelnými vlastnostmi prášku - absorpcí infračerveného světla - a tím, jak dlouho potřebuje tvrdnout. Podstata tkví v tom, že se vezme infračervené spektrum prášku jako vstup pro neuronovou síť. To znamená, že se do vstupní vrstvy sítě pošle množství pohlceného záření při každé frekvenci. Obrázek 5.8a ukazuje příklad typického infračerveného spektra cementu. Výsledek vrácený

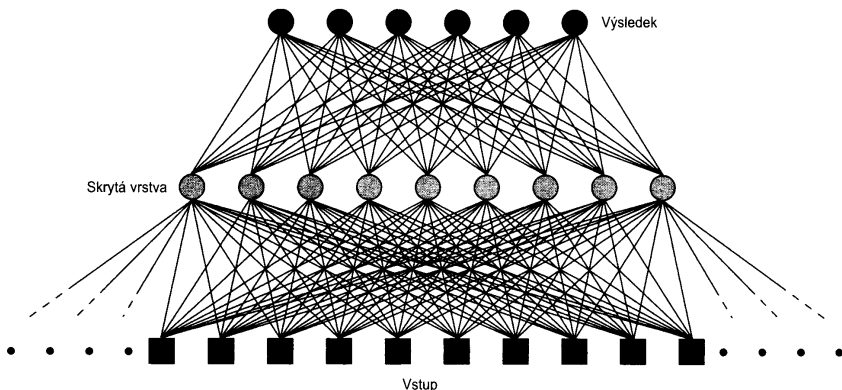
sítí je křivka znázorňující tvrdnutí cementové kaše po smíchání s vodou (viz obr. 5.8b).



Obrázek 5.8b / Tvrdnutí cementu. Křivka ukazuje, jak cement houstne.”

Sít' má pevný počet vstupních a výstupních neuronů, ale nic se neříká o tom, kolik neuronů má být ve skryté vrstvě. Volba celkového množství neuronů v této vrstvě se často podobá magii. Vede nás jen pár základních pravidel a občas nezbyvá nic jiného než vyzkoušet řadu různých možností, pokud jde o počet neuronů ve skryté vrstvě. Obrázek 5.9 ukazuje architekturu jedné z používaných sítí. Objevují se však propracovanější způsoby, jak se s tím vypořádat. Byla již vyvinuta technika, která dovoluje zvolit optimální počet neuronů pomocí genetického algoritmu. S použitím Hollandovy techniky evolučního programování volí algoritmus nejlepší sít' pro daný úkol.

Jakmile jsme sít' pospojovali, musíme ji učit či "trénovat" ve zvládnání problému, o který nám jde. I v tomto případě se jí musí předložit velké množství příkladů infračerveného spektra cementového prášku.



Obrázek 5.9 /

Neuronová síť používaná k předpovídání doby tvrdnutí cementů. Vstupní vrstva dostává údaje z infračerveného spektra, výstupní vrstva poskytuje odhad chování cementu.

Když se každé z nich předkládá síti, je zároveň výstupním uzlům ukázána správná "odpověď" - odpovídající křivka tuhnutí. Zpočátku nevyvíčená síť bere každé spektrum a posílá ho přes spoustu spojů do výstupních neuronů, modifikovaných silami spojů neboli váhami. Tyto váhy jsou na začátku nastaveny náhodně. Avšak jak se proces opakuje, síly spojů se mění podle algoritmu zpětného šíření, takže se síť učí, jak souvisejí spektra s tuhnutím.

Vnitřní fungování sítě je takovéto: každý neuron ve skryté vrstvě obdrží signál od každého neuronu ve vstupní vrstvě. Neurony sčítají signály, které dostávají, a v závislosti na tom, zda součet dosáhne prahové hodnoty, se rozhodnou vypustit impulzy a rozeslat si navzájem signály - jako povodňová stavidla, která se otevrou, když všechny potoky tekoucí do přehrady dosáhnou určité výše. V praxi je každý neuron zřídka zcela vypnutý, nebo zcela zapnutý. Namísto toho se úroveň neuronové aktivity, která předává informaci ze vstupu - spektrum - do skryté a pak do výstupní vrstvy, rychle, ale plynule mění podle zvyšující se intenzity signálu přicházejícího do neuronu.

Výstup získaný zpracováním infračerveného spektra v průběhu učení nejprve vůbec nepřipomíná skutečnou křivku tuhnutí cementu (viz obr. 5.8b). Avšak jak čas běží, těchto omylů ubývá, jak se nastavují síly nesčetných spojů mezi neurony sítě tak, aby se minimalizoval rozdíl mezi vypočtenými a skutečnými hodnotami. Tento proces, který pokračuje, dokud chyba v předpovědi pro tyto známé případy neklesne pod nějakou přijatelně malou hodnotu, je prvním stadiem tréninku. V

tomto případě výcvik mnohvrstvého perceptronu na podkladě zhruba 120 spekter cementu trval dvě až tři hodiny.

Nyní může být síť podrobena své první reálné zkoušce. Můžeme ji seznámit s novým spektrem, tentokrát jí však odepřeme správnou odpověď. Síť nemá na pomoc žádného "učitele" a chce se po ní, aby se snažila co nejlépe "zobecnit" případy, s nimiž se setkala a na nichž byla cvičena. Pokud byl výcvik správně proveden, je rozumné očekávat, že předpovědi sítě budou dobré. Zpočátku mohou být její předpovědi srovnávány se známými hodnotami. Pokud se ukáže, že funguje dobře, může se síť odvázat ze řetězu a vypustit na cementy, pro něž není známa žádná informace o jejich chování. A právě to bylo provedeno v tomto případě: neuronová síť nyní pracuje na malém osobním počítači, který může snímat infračervená spektra cementových prášků a předvídat jejich doby tuhnutí během patnácti minut, místo aby chom čekali šest hodin, než uvidíme, co se bude dít s cementovou kaší.<sup>157</sup> Skoro celých patnáct minut zabere měření - předpověď dodaná sítí je tu prakticky ihned. To představuje nesmírnou úsporu pracovní síly a značně to urychluje proces analýzy širokého spektra vzorků.

Jak už jsme viděli, mnoho vrstvy perceptron je poněkud náchylný k uvíznutí v lokálním minimu. Pro mnoho problémů je efektivnější využít jiný typ neuronové sítě, zvaný síť s radiálními báзовými funkcemi. Tyto sítě mají tutéž vrstevnatou strukturu jako mnohvrstvý perceptron, ale díky tomu, že se na počátku automaticky seskupí vstupní údaje do skupin se společnými vlastnostmi (jako jsou v případě cementu určité zvláštní rysy spektra), mají tyto sítě vhodněji zvolenou skrytou vrstvu. Díky tomu můžeme nyní veškeré učení s dohledem provádět s použitím lineární matematiky. Tím se tento úkol velice zrychluje a máme zaručeno, že vycvičená síť dosáhne globálního minima.

Jak ukazuje tento příklad, na neuronových sítích je fascinující to, že k dosažení výsledku nevyžadují žádné explicitní programování. V případě cementového prášku se síť neřeklo nic o fyzikálních a chemických podrobnostech: je dostatečně chytrá, aby se dopracovala k souvislostem mezi složením, jak je vyjadřují spektra, a průběhem tuhnutí, a to bez jakékoli další informace. To pravděpodobně přesahuje schopnosti kterékoli lidské bytosti. Navzdory této úžasné síle je používání neuronových sítí trnem v oku některým lidem, kteří se obávají, že poznání je obětováno černé magii a uzavřeno do černé

---

<sup>157</sup> Ve skutečnosti se z infračerveného spektra cementového prášku dá získat podstatně více informací, včetně chemického složení a rozdělení velikostí částic.

skříňky. Ve skutečnosti je často možné vyptat se cvičené sítě, co zjistila, a interpretovat tyto výsledky způsobem, který dokážeme pochopit. Nicméně takto vyjádřená obava je jedním z aspektů dvojakosti, která prochází celou touto knihou: je to rozdíl mezi těmi, kdo hledají čisté, pochopitelné matematické odpovědi, a těmi, kteří o to neusilují. Pokud bychom se takovými kritérii řídili při volbě problémů, na nichž se bude pracovat, obrovská většina problémů reálného života by mohla zůstat navždy nevyřešená.

## Neuronová síť

Neuronové sítě se dnes používají k řešení širokého spektra problémů. Jedna z prvních sítí, které se dostaly do prodeje, byl *Wisard*: Wilkieho, Stonhamovo a Aleksandrovo Rozpoznávací Zařízení,<sup>□</sup> které bylo možno naučit rozpoznávat předměty nebo s trochou nadsázky poznávat, zda se jeho britští tvůrci usmívají nebo se mračí.

Existuje řada dalších aplikací na rozpoznávání obrazové informace; například identifikace nepřátelské ponorky ze stopy získané sonarem, analýza skvrn na snímku mozku, zda nepředstavují abnormální nebo rakovinné buňky, a rozpoznávání rukou psaných znaků poštovního směrovacího čísla na obálkách.<sup>158</sup> "Stratég leteckého marketingu" používá mnohvrstvý perceptron k předpovídání poptávky po letenkách, zatímco jinde upozorňují perceptrony na nenormální bušení srdce, předvidají kolísání burzy, pomáhají bankám oceňovat půjčky (tedy rozhodovat, komu se vyplatí půjčit peníze). Jedna z nejúspěšnějších aplikací je v provozu v Evropě, kde byla dánskými počítačovými odborníky navržena neuronová síť na posuzování vepřového masa. Tato metoda, vyvinutá Hansem Thodbergem z Dánského ústavu pro výzkum masa, se nyní používá pro stanovení množství masa a tuku až v dvaceti milionech poražených zvířat ročně. Každá prasečí půlka prochází robotem, kde je umístěno devět optických sond, které rozeznávají bílý tuk od červeného masa. Pomocí těchto senzorů dokáže neuronová síť stanovit obsah masa u přibližně 360 prasat za hodinu, a to s přesností vyšší než 1,5 procenta, což je vyšší přesnost, než jaké dosahují lidští inspektoři. Přesto jí jejích asi tak 200 "neuronů" poskytuje mozkový

---

□ Wilkie, Stonham, and Aleksander's Recognition Device (pozn. překl.)

<sup>158</sup> Podrobnosti o vyhledávání nádorů v mozku pomocí počítačových modelů neuronových sítí jsou uvedeny v práci L. Mango, *Cancer Letters* 11, 155 (1994).

výkon srovnatelný s červem. Podle Thodberga "je to sice jednoduchý mozek, ale je střížen přesně na tento problém".

Významným důsledkem vysoce distribuované a paralelní povahy neuronových sítí je to, že jsou odolné vůči selhání: pokud jeden neuron přestane pracovat (biologicky řečeno, pokud odumře), celý systém může pokračovat v činnosti bez větších chyb. Jak selhává více a více neuronových výpočetních prvků, celkový výkon se pozvolna zhoršuje. Tato robustnost má samozřejmě výhody jak v přírodě, tak v naší technicky orientované společnosti: často je žádoucí použít stroj s mnoha procesory, odolný proti selhání, než se muset spoléhat na dokonalost jednoho jediného, jak je tomu u současných sériových počítačů. Pokud selže tento jediný procesor, selže vše ostatní a výsledkem mohou být pohromy jako letecká nehoda nebo ztráta družice za miliardu dolarů.

Je také možné propojit nápady pocházející z neuronových sítí s Darwinovými idejemi. Shara Amin a José-Luis Fernández z laboratoří Britského Telecomu (BT) v Martlesham Heath v Anglii nasadili evoluci na samoorganizovanou síť uzlů a vyprodukovali efektivní řešení problému obchodního cestujícího pro 35 000 měst. Je to poslední z dlouhé posloupnosti rozsáhlých řešení, která začala roku 1954, kdy matematikové z Rand Corporation v Kalifornii zvládli okružní jízdu po devětačtyřiceti městech. Do roku 1992 zvládl tým z AT&T Bellových laboratoří v New Jersey, Rice University, Rutgers University a z Bellcore jízdu po 3 038 městech a spotřeboval na to osmnáct měsíců strojového času počítače.

Tým z BT začal s náhodným řešením problému, spočívajícím v síti myšlených uzlů odpovídajících místům zastávek a pak pěstoval nová řešení. Program provádí dva kroky: nejprve vypočte, jak blízko je každý uzel k sousednímu městu, fakticky tak, že spočítá gravitační sílu mezi nimi. Program pak posune uzly ve směru sil a zdvojí ty, které jsou taženy dvěma či více různými body. Reprodukční proces se řídí pravidly převzatými z biologie: nově vyrostlé místo zastávky se nemůže okamžitě množit, ale místo toho, jako skutečné dítě, musí čekat, dokud nedospěje do puberty. "Když uzlům dovolím, aby se množily ihned, simulace je o 20 procent horší," poznamenal Amin.

Program doplňuje darwinovský přístup tím, že vymazává ta místa zastávek, která nejsou skoro vůbec nikam tažena. Tento proces množení a umírání se pak opakuje v algoritmu, který dává vždy rozumnou odpověď, ať je zadán jakýkoli počet měst, a to v rozumně dlouhém čase. "Je to dobrý kompromis mezi časem a přesností řešení," říká Amin. Ve



skutečnosti je tato metoda natolik úspěšná, že ji Britský Telecom už používá pro řešení problémů spojených se směrováním hovorů.

## Přírodní lekce

Celá jedna třída problémů, které jsou teoreticky vyčíslitelné, ale v praxi obtížně zvládnutelné, podlehla technikám nastíněným v této kapitole. To, že mnohé z těchto moderních výpočetních metod byly přímo inspirovány přírodou, se ukázalo jako výhoda. Poskytují účinný prostředek k porozumění komplexitě obecně.

V dalších dvou kapitolách uvidíme, jak komplexní procesy podobné těm, které jsme popisovali v této a v předešlé kapitole, mohou vyvstat za těch nejjednodušších okolností. Pro mnoho fyziků by to znamenalo pokusit se vyjádřit komplexitu pomocí nejzákladnějších jednotek hmoty a nej fundamentálnějších sil: marná snaha redukcionismu. Příhodnějším jazykem pro zobrazení komplexity reálného světa je chemie. Celá škála komplexity může vyvstat v jednoduchých chemických podmínkách, což poskytuje účinné nelineární paradigma pro obrazce, které nacházíme v přírodě.

Staneme se svědky toho, jak chemie dokáže řešit matematické problémy. Chcete-li najít nejrychlejší průchod bludištěm nebo poradit robotovi, jak má objíždět řady polic ve skladišti, sledujte cestu "chemické vlny". Je to samovolně se šířící linie chemické reakce, která dokáže prozkoumat labyrint způsobem podobným tomu, jak vlnění chemické aktivity osahává síť v mozku. Opět je tu symbióza mezi výpočetní technikou a komplexitou. Právě tak jako chemie dokáže počítat, dokážou počítače odhalit tajemství chemické komplexity, sahající od vysokého stupně organizace po zcela chaotický stav. Tyto chemické pochody mohou být zase v okolním prostředí přivedeny k dokonalosti darwinovskou evolucí a vyladěny sérií nepředvídatelných a šťastných událostí. Tak vzniká kypící rozmanitost živého světa, od vrtící se bakterie po útočící slony.

# 6 Umění přírody

Nyní znáhla přenáramné stavení  
znikne z země, jako pára<sup>□</sup>

JOHN MILTON

Komplexita se v přírodě objevuje na mnoha úrovních a tvoří obrazce v obrazcích a nekonečné vrstvy vzorů. Výsledkem je stylová rozmanitost, překlenující extrémy stejně rozdílné, jako jsou jeskynní malby, renesance a expresionismus. Podnikneme procházku galerií přírodního umění a prozkoumáme, jak počítač pomáhá získat vhled do "samoorganizované" chemie, která připravila cestu k příchodu živých tvorů, pomáhá chápat procesy, které probíhají v buňkách našich těl, a struktury vznikající ve společenstvech živých tvorů.

Při snaze pochopit vznik komplexity přírody byli lidé mnohokrát vedeni klamnými nadějemi. Slavný anglický teoretický fyzik Paul Dirac roku 1929 tvrdil, že vznikem kvantové mechaniky Jsou úplně poznány základní fyzikální zákony nezbytné pro matematickou teorii velké části fyziky a pro celou chemii".<sup>159</sup> Je-li lidské tělo jedna velkolepá chemická reakce, znamená to, že nespočetné procesy probíhající v našich buňkách, střevech a mozcích mohou být redukovány na kvantovou mechaniku? Naneštěstí po více než půlstoletí zápasů s kvantovou mechanikou ji dokázali chemici aplikovat pouze na skrovné hromádky molekul, což je ještě vzdáleno od složitosti bílkovin v lidském těle.

Základní potíž s tímto přístupem nespočívá v tom, že jednoduše na rozsáhlé problémy potřebujeme velké počítače, ale spíše v tom, že nedokážeme rozpoznat možnosti vzniku fundamentálně nových jevů, ke kterým dochází v důsledku kolektivních interakcí velkého množství částic.<sup>160</sup> Naši snahu pochopit, jak může povstat chemická komplexita, jsme vzali za špatný konec, a tím spíš to platí pro jakékoli pokusy

<sup>□</sup> Přeložil Josef Jungmann. Praha 1811

<sup>159</sup> P. Dirac, Proceedings of the Royal Society A 123, 714 (1929).

<sup>160</sup> Dirac si ve skutečnosti dobře uvědomoval tento nedostatek. Jeho hodnocení kvantové mechaniky se často cituje, zřídka však ve své úplnosti. Varoval také, že „exaktní aplikace těchto zákonů vede k rovnicím, které jsou mnohem složitější, než co dokážeme vyřešit.“

pochopit "samoorganizovanou" chemii. Jak například tyto procesy produkují pravidelné barevné změny v chemických hodinách<sup>□</sup> nebo jak vytvářejí stabilní rozsáhlé prostorové struktury? A jak tytéž procesy vedly před mnoha miliardami let ke vzniku života v prvotní polévce?

Není to tak, že bychom se chtěli hádat s Gödelem; používání kvantové mechaniky k popisu chemických reakcí je spíše jako najmout si letadlo, když chceme přejít přes ulici. Nechat počítač, ať rozběhne celou mašinerii kvantové mechaniky, je přístup muže s železnou palicí. Když ho zkombinujeme s důvtipným matematickým aparátem, typickým představitelem použití aproximací, můžeme trochu pokročit směrem k simulování několika velmi jednoduchých chemických reakcí, i když výsledky mají ještě daleko k popisu chemie reálného světa.<sup>161</sup> Tato metoda je všeobecně stále nezvládnutelná a čas potřebný k provedení výpočtu závisí na velmi vysoké mocnině počtu elektronů ve studovaném systému. Radikálně odlišný a přece mnohem účinnější přístup je zkombinovat počítače s matematickým popisem chemie, který funguje na "vyšší" úrovni.

Vyšší úrovní myslíme popis formulovaný prostřednictvím makroskopických proměnných, jako jsou pravidelné změny barvy (tedy koncentrací) směsi chemických entit, ke kterým dochází v reakci nazývané chemické hodiny, spíše než mikroskopický popis založený na bilionech a bilionech<sup>□</sup> molekul jednotlivých složek. Pokud máme popsat tyto emergentní vlastnosti, potřebujeme pojmy pro nakládání s

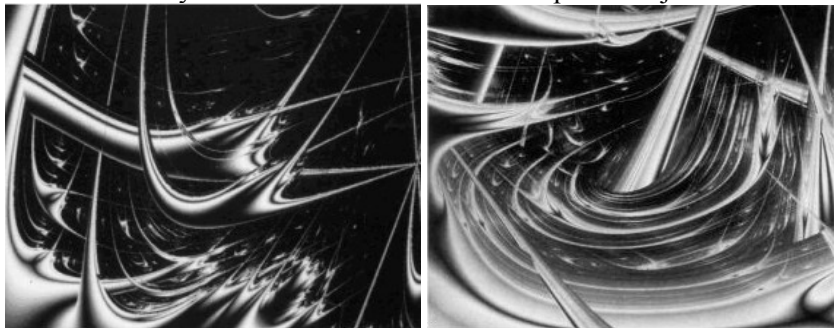
---

<sup>□</sup> Autoři mají na mysli chemickou reakci, v níž se rytmicky mění koncentrace (pozn. překl.)

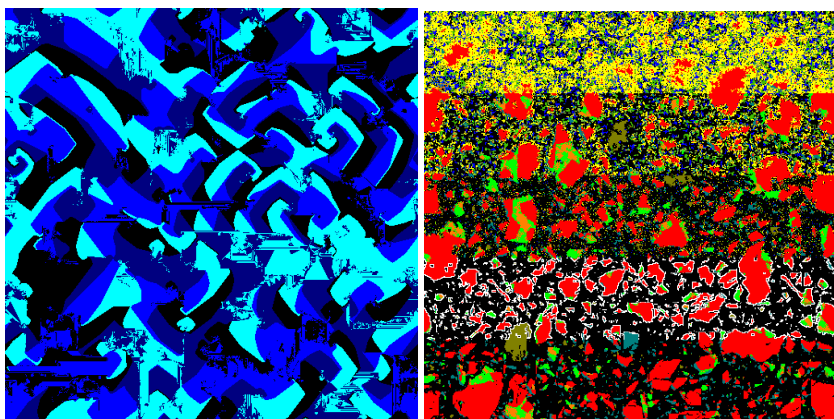
<sup>161</sup> Metoda, která dává v principu „přesné“ výsledky a nevyžaduje použití žádných aproximací, je tzv. kvantová Monte Carlo technika. Tato metoda má jisté podobnosti s konvenční technikou Monte Carlo, o níž jsme se zmínili v 4. kapitole, ačkoli nyní se hledá řešení kvantově-mechanické Schrödingerovy rovnice statistickým vzorkováním samotné vlnové funkce. Tento přístup se používal pro výpočet energie základního stavu dimeru hélia na superpočítači CM-5. Výpočet předpovídá existenci stabilního, vázaného dimeru, který se také experimentálně pozoruje. Opět je zajímavé si všimnout, že stochastická výpočetní metoda se ukázala jako neje-fektivnější metoda k řešení něčeho, co na první pohled vypadá jako jednoduchý problém. (Pozn. překl.: Kvantová metoda Monte Carlo pro tzv. kalibrační teorie na mříži byla úspěšně použita pro teoretický výpočet hmotnosti některých elementárních částic, což dosud, pokud vím, nedokáže žádná jiná metoda. Speciálně k tomuto účelu byl v Itálii postaven superpočítač APE. V konstrukčním týmu pracoval i zástupce Fyzikálního ústavu AV ČR, ing. Jaroslav Pech.) Jak jsme však opakovaně zmiňovali, zůstává tu fundamentální problém, že makroskopické chování komplexních procesů ve velkých měřítcích je časově asymetrické, zatímco mikroskopické rovnice jsou založeny na časově symetrických rovnicích.

<sup>□</sup> Vzhledem ke skutečnému počtu molekul v jakémkoli běžném tělese je bilion směšně malé číslo. Jedním nádechem vsajeme do plic řádově  $10^{24}$  molekul, tedy asi bilion bilionů (pozn. překl.)

globálními vlastnostmi velkých souborů molekul, ať už prostřednictvím změn koncentrací nebo teploty, abychom se vyhnuli tomu, že nás zaplaví nadbytečné detaily. Tím se právě zabývá věda o komplexitě. Vybaveni takovými nástroji, jako jsou nelineární dynamika a nerovnovážná termodynamika, společně s počítači, dokážeme pochopit tikání chemických hodin a mnoho dalších komplexních jevů.



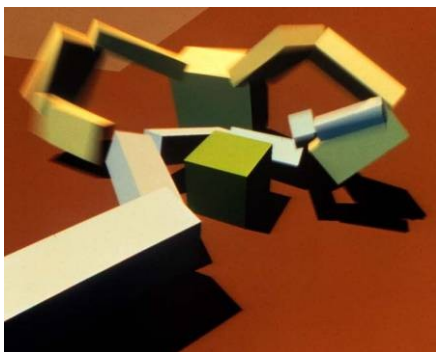
Obrázek 1 / Řešení jednoduché nelineární rovnice, zvané logistická rovnice. Kresba znázorňuje očekávané chování živé populace z generace na generaci jako funkce určitých parametrů modelu. "Figury" v popředí zobrazují pravidelné, periodické změny v populaci organismů, zatímco ty v pozadí odpovídají nepravidelným fluktuacím (známým též jako chaos).



Obrázek 2 / Startovní digitalizované obrázky pro simulace hydratujících cementových kaší pomocí celulárních automatů: (a) dvojrozměrný obrázek získaný z kombinace obrazů z rentgenového záření a zpětně rozptýlených elektronů v řádkovacím elektronovém mikroskopu; (b) počítačově vytvořený trojrozměrný obraz náhodných zrn. Různé barvy odpovídají chemicky odlišným materiálům.



Obrázek 12 / Karl Sims nechal umělecká díla, ať se vyvíjejí sama technikami genetického programování.



Obrázek 13 / Tvorové, kteří se vyvinuli Karlu Simsovi. Místo aby svým tvorům dával úkoly, jako je chůze, nechal je soutěžit. V jedné sérii virtuálních experimentů byli dva tvorové vyprovokováni k boji o ovládnutí zelené krychle mezi nimi. Tvor v popředí se pokouší odtáhnout krychli z dosahu svého protivníka. Sims zjistil, že vyzáblá stvoření s malými kvádrovitými končetinami nemusí být nutně méněcenná ve srovnání s většími tvory s delším dosahem. Jak si vyvíjeli strategie a protistrategie, vykazovali někteří tvorové "mazané" chování, jako odstrčení krychle na jednu stranu a útok na protivníka.

## Globální pohled

Paletu pojmů používaných k namalování obsáhlého obrazu fyziky a chemie nám poskytuje termodynamika, věda o teple a práci, zrozená během 19. století, kdy pára poháněla průmyslovou revoluci. Místo abychom se pokoušeli popsat parní stroj pomocí jeho skrytých vnitřních pochodů (včetně výčtu mnoha pístů, válců a pák), termodynamika buduje popis jeho chování prostřednictvím celkových makroskopických

vlastností, jako jsou pracovní teplota, mechanická práce strojem vykonaná nebo stroji dodaná a teplo vyměněné s okolím.<sup>162</sup>

Podobným způsobem, když dojde k chemické reakci, ignoruje termodynamický popis biliony jednotlivých molekul a rozebírá místo toho jejich globální vlastnosti, jako jsou teplota, tlak a tak dále. V tradiční termodynamice se pozornost soustřeďuje na rovnovážný stav, na tečku na konci chemické reakce. V mnoha ohledech je to ten nejméně zajímavý stav hmoty: pro každý živý organismus to představuje smrt. Ale déle než sto let - od počátků termodynamiky v polovině předminulého století - většina fyziků a chemiků soustředila své úsilí na pochopení hmoty v tomto bezútešném stavu.

Vůdčím principem termodynamiky je druhá věta termodynamická, která vyjadřuje fakt, že když je makroskopický systém ponechán sám sobě, vyvíjí se do stavu, který maximalizuje entropii. Entropii v termodynamice si můžeme představit jako veličinu, která určuje schopnost systému vyvíjet se nevratně v čase. Volně řečeno, můžeme si myslet, že entropie měří stupeň náhodnosti nebo nepořádku v systému. Jak každý ví, věci ponechané samy sobě mají sklon se zašmodrchat do méně uspořádaného stavu, ať se jedná o záhumenek, pracovní stůl nebo něčí finanční záležitosti. Druhou větu termodynamickou můžeme chápat tak, že z tohoto pozorování dělá vědecký princip.

Metafora krajiny nám může pomoci zviditelnit, jak tento princip pracuje. Nyní představují kopce a údolí změny takových závislých termodynamických parametrů, jako jsou koncentrace reagujících chemikálií, v závislosti na nezávislých proměnných, jako jsou teplota a tlak, které určují stav systému. Rovnovážná termodynamika se zabývá jenom jedním bodem v této krajině - koncovým stavem chemické reakce, předpovězeným druhou větou termodynamickou. Nedokáže říci nic o tom, jak reakce došla k tomuto místu, které se ze zřejmých důvodů nazývá bodovým atraktorem.

Avšak skutečný svět nemá mnoho společného s nezáživným rovnovážným stavem. Život spočívá v mnoha vysoce organizovaných biochemických procesech, od takových, které nastávají při dělení buněk a v bušícím srdci až po trávení a myšlení. Všechny z nich mohou vznikat jenom proto, že jsou udržovány daleko od rovnováhy. Pro popis těchto dynamických systémů se musíme obrátit k nerovnovážné

---

<sup>162</sup> Jak jsme rozebírali v 4. kapitole, další oblast zvaná statistická mechanika se pokouší svázat tyto makroskopické vlastnosti s chováním jednotlivých jednotek uvažovaných ve velkém.

termodynamice, která umožňuje studovat i mnoho jiných a složitějších atraktorů.

## Termodynamika reálného světa

Jedna velká síla vychyluje živé společenství naší planety daleko od rovnováhy, a tak zajišťuje, že se Země nezhroutí v holé smetiště. Je to nepředstavitelné množství částic světla (fotonů), které se na nás řine z naší místní hvězdy, ze Slunce. Fotosyntéza, která v rostlinách díky slunečním paprskům provádí přeměnu oxidu uhličitého na jednoduché cukry, je prvotním zdrojem energie živých organismů. Dokud bude na Zemi pražit sluneční světlo, nebude se schylovat k mrtvé, mrazivé rovnováze.

Nerovnovážná termodynamika se přirozeně dělí na dvě části: "lineární" varianta popisuje chování systému blízko k rovnováze, zatímco "nelineární" verze se zabývá chováním daleko od rovnovážného stavu. Ani lineární nerovnovážná termodynamika nám ale neřekne mnoho zajímavého, pokud jde o studium komplexity. Jak roku 1944 ukázal belgický laureát Nobelovy ceny Ilya Prigogine, pro velmi široké spektrum situací je termodynamické chování univerzální a podobá se rovnováze.<sup>163</sup> Daleko od rovnováhy však žádné jednoduché zákony neřikají, k jakému termodynamickému vývoji dojde, až na to, že musí docházet k disipaci energie, přičemž na disipaci se můžeme dívat jako na synonymum pro vzrůst entropie. K disipaci dochází při každém procesu přeměny energie. Platí to stejně pro atleta proměňujícího tělní tuk v kilometry maratónu jako pro rozžhavenou žárovku měnící elektrickou energii na světlo. V důsledku toho, že k této disipaci dochází daleko od rovnováhy, může se objevit ryzí komplexita, ať jsou to chemické hodiny nebo konvektivní obrazce vířící v hrnci. Jak se potýkáme s komplexními jevy reálného světa, zjišťujeme, že potřebujeme bohatší jazyk než termodynamiku, a ten nám poskytuje nelineární dynamika.

Nelineární dynamika, komplexita a počítače

Podobně jako termodynamika, poskytuje nelineární dynamika makroskopický popis procesů, k nimž dochází daleko od rovnováhy. Tyto matematické popisy okamžitých změn chování v průběhu času jsou mnohem kvantitativnější. Dokážou popsat stejně dobře rychlost

---

<sup>163</sup> Je to Prigoginův teorém minimální produkce entropie. Podrobnější obecnou diskusi nerovnovážné termodynamiky lze nalézt v 5. kapitole *Šípu času*.

změny velikosti populací severoamerické bekyně velkohlavé jako změny koncentrací složek chemické reakce. Právě proto, že jsou tyto rovnice nelineární, dovolují obrovské spektrum různých možných chování, od organizovanosti po "chaos", a dovedou vysvětlit mnohé z bohatství světa, který obýváme.

Možnosti disipativní nelineární dynamiky jsme začali využívat v plném rozsahu teprve v posledních dvaceti letech, díky exponenciálnímu nárůstu výkonu počítačů. Programy pro studium nelineární džungle jsou notoricky známými žrouty počítačové paměti.<sup>164</sup> Musíme být schopni zpracovávat a manipulovat s velmi velkým dat, nasbíraných buď z rovnic teoretického modelu nebo z experimentů nebo z kombinace obojího. Kdykoli simulujeme takové chování na počítači, musíme použít maximální možné množství počítačové paměti (RAM). Dříve se vědci museli obracet na velké "sálové" počítače; dnes tyto velké stroje v těchto aplikacích nahradily vysoce výkonné stolní pracovní stanice nebo i osobní počítače. Máme-li k dispozici takové nástroje, můžeme začít modelovat nelineární jevy.

## Vaření komplexity

I něco tak jednoduchého, jako je louže oleje, může předvést jeden z nejvíce fascinujících nelineárních efektů komplexity - samoorga-nizaci, kdy z chaosu samy od sebe začnou vyvstávat prostorové a časové obrazce. Je-li tenká vrstva silikonového oleje opatrně zespona zahřívána, z oné počáteční nerozlišené uniformity kapaliny náhle vystoupí mřížka šestibokých konvektivních buněk, připomínající pláštěv.<sup>165</sup> Těmto obrazcům vyvolaným konvekcí se říká Rayleighovy-Bénardovy buňky. Lze je snadno pozorovat, když do oleje nasypane trochu hliníkového prachu.

Pojmy termodynamiky a nelineární dynamiky dokážou toto chování popsat, ale jen do jisté míry. Termodynamika signalizuje, že mohou nastat zajímavé věci, aniž by popsala, o co půjde. Ukáže, při jakém rozdílu teplot mezi horním a dolním povrchem kapaliny se objeví šestiboké buňky. To je bod bifurkace, který ve skutečnosti říká "tady

---

<sup>164</sup> Důvodem je složitost řešení těchto rovnic. Běžně se například setkáme s rychle oscilujícími řešeními a ty vyžadují obrovskou přesnost a tedy velkou použitou paměť, abychom se vypořádali s velkými objemy numerických dat, která integrátory při řešení produkují.

<sup>165</sup> M. Velarde and C. Normande, Scientific American 243, 92 (1980).



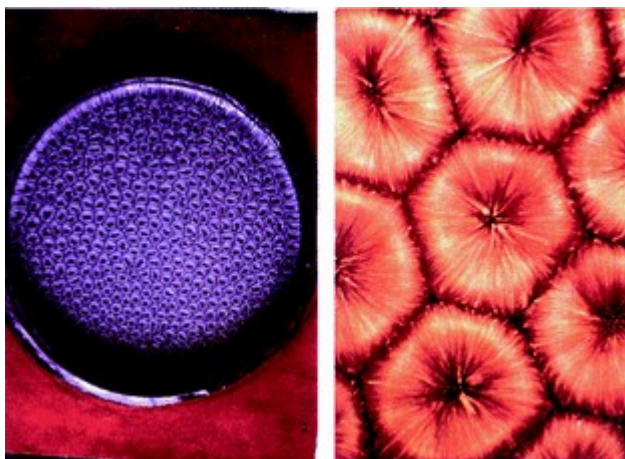
čekejte nové chování". Slovo "bifurkace" znamená, že si kapalina může při překročení kritické hodnoty vybrat jednu ze dvou možností. Toto rozhodování lze odhalit pozorným pohledem na strukturu plástve: ve dvou sousedních buňkách se konvektivní proud otáčí opačným směrem. Ale směry rotace konvektivních proudů v sousedních buňkách mohou být buď po/proti směru hodinových ručiček, nebo proti/po směru. Co se skutečně stane, je důsledkem pozoruhodné spolupráce mezi náhodou a determinismem.

Směr, kterým se točí jednotlivé buňky, závisí na všudypřítomných nepatrných a náhodných fluktuacích způsobovaných pohybem molekul v tekutině. Jsou to nepostradatelná semínka samoorganizace. Blízko rovnováhy jsou konvektivní proudy v tekutině malé a pod kontrolou a jejich účinek je nepatrný. Fluktuace rychle vymizí jako zanikající šepot. Ale daleko od rovnováhy může kladná zpětná vazba tyto fluktuace zesílit a tím vybudovat z mikroskopického konvektivního proudu organizovaný stav, který se rozšíří do celé nádoby a vytvoří z ní tekutou včelí plástev.

Vědci zběhlí v rovnovážné termodynamice budou nejspíš předpokládat, že čím více tepla dodáme, tím více se budou nesčetné molekuly nuceny hemžit po nádobě. Ale olej ve stavu plástve je evidentně organizovanější, než byl před zahřátím. Obrovské soubory molekul se pohybují souběžně ve značně vzdálených místech a tak vytvoří šestiboké "konvektivní buňky". Abychom zdůraznili, jak neočekávané to je, představme si krabici naplněnou stejnorodou směsí bílých a černých kuliček. Situaci podobnou zahřívání kapaliny vytvoříme, když budeme intenzivně krabici třást. Představte si, že by se při takové bouřlivé činnosti vytvořily pravidelné obrazce kuliček, například že by se všechny černé kuličky nacházely na jednom konci a všechny bílé na druhém. □

Plástvový vzor není o nic méně pozoruhodný: znamená to, že existuje kooperativní chování obrovského množství jednotlivých molekul v prostoru i čase. Je to rozhodně ještě neobvyklejší, jelikož organizace molekul sahá v poměru k jejich velikosti do mnohem větší vzdálenosti, než je tomu u kuliček. Síly, které dovolují jedné molekule ovlivňovat jinou, obvykle působí pouze na vzdálenost pouhé stamiliontiny metru.

□ V době psaní této knihy ještě nebylo známo, že právě k tomuto překvapivému jevu skutečně dochází. V experimentech se směsí světlých a tmavých zrněk písku bylo prokázáno, že třesením se jedny oddělí od druhých. Ejhle tajemství pohádkové Popelky! (pozn. překl.)



Obrázek 6.1 / Řád z chaosu.  
Bénardovy buňky v tenké vrstvě zahříváného silikonového oleje.

Ve srovnání s tím dosahuje samoorganizace v disipativním systému do enormní délky celých centimetrů. Systém dostává svůj vlastní život: už se na něj nemůžeme dívat jako na nahodilou směs náhodně se pohybujících molekul. Molekuly tekutiny se spontánně samorganizovaly. Tato organizace se mění s tím, jak je tekutina tlačena dál od rovnováhy: plástev přejde v rotující spirálovité obrazce nebo terče a pak vytvoří rovnoběžné konvektivní válce. Samoorganizace však není žádné mystérium; toto komplexní chování se dá modelovat v počítači s použitím nelineárních rovnic dynamiky tekutin. Je nevyhnutelným důsledkem fyzikálních zákonů, platných daleko od rovnováhy.

## Samoorganizace v chemii

V našich tělech probíhá obrovské množství komplikovaných chemických procesů, které jsou daleko od rovnováhy, právě jako je tomu u zahříváné vrstvy oleje. Udržovat svá těla v takovém stavu můžeme jen díky přijímání potravy a vyměšování. Není to žádná shoda náhod, že i jednoduché chemické reakce dokážou spontánně vytvářet obrazce v čase a prostoru, když jsou přivedeny do tohoto nelineárního režimu. Ať už se přemísťují nebo stojí na místě, jsou vytvořeny provázanými posloupnostmi chemických reakcí - propojenými procesy

zpětné vazby, kdy jedna reakce ovlivňuje jinou - a difúzí zúčastněných chemických látek. Rozměry vzniklého chemického obrazce závisejí jen na složení tohoto chemického koktejlu a na tom, jak daleko je od rovnováhy. Kvantová teorie by poskytla jen málo informací o těchto procesech, pokud vůbec nějaké. Termodynamika dopadne lépe. Dokáže najít body bifurkace, kde nás chemie něčím zajímavým překvapí. Když se však vyzbrojíme nelineární dynamikou, můžeme použít počítač k prozkoumání bohatých možností komplexního chování.

Udržovat směs reagujících chemických látek daleko od rovnováhy je jednoduché - stačí dodávat chemikálie skrze směšovací komoru, jako je průtočný reaktor, který bývá v chemických továrnách. Chemikálie vstupují do reaktoru, zamíchají se, aby se zajistil žádoucí průběh reakce, a produkty se odvádějí výpustí. Nelinearity vznikají, když produkt reakce (řekněme X) katalyzuje svou vlastní produkci. Těto zpětné vazbě se říká autokatalýza. Množství produktu X vytvořeného v každém okamžiku závisí na tom, kolik tam bylo X předtím - což je známka nelinearity, která je analogická zpětné vazbě vyskytující se v zahřívání vrstvě oleje nebo vazbě mezi mikrofonem a reproduktorem. Tak máme bez příliš velkých problémů všechny součásti nezbytné k produkci komplexity prostřednictvím samoorganizace.

Byl to Alan Turing, kdo první předpověděl tyto nelineární obrazce. Svoji myšlenku předložil v pozoruhodném článku publikovaném v *Philosophical Transactions of the Royal Society* (část B) v roce 1952, když mu bylo čtyřicet a pracoval na univerzitě v Manchesteru. Turing se zajímal o to, jaká je chemická podstata vzniku tvaru, struktury a funkce v živých tvorech, což je proces známý v biologii jako morfogeneze.<sup>□166</sup> Snažil se porozumět tomu, jak organismus proměňuje chemickou polévku na biologickou strukturu a po oplodnění mění kulovitý shluk identických buněk na plně vyvinutý organismus. Je to jedna z největších záhad života. Vezměme si proces gastrulace, při němž rané embryo - koule z buněk - ztrácí svou symetrii a z některých buněk se začíná vyvíjet hlava a z jiných ocas. Začneme-li s koulí buněk, dalo by se

---

□ Blíže k tomu Anton Markoš: *Povstávání živého tvaru*, Vesmír, Praha 1997. (pozn. překl.)

<sup>166</sup> Podle jeho vlastních slov pracoval na matematické teorii embryologie, která by, jak věřil, dala „uspokojivé vysvětlení (i) gastrulace (ii) polygonální symetrické struktury, např. u mořské hvězdice nebo květů (iii) rozmístění listů, zejména proč se u nich vyskytuje Fibonacciho posloupnost (0,1,1,2,3,5,8,13,...) (iv) barevné obrazce u zvířat, např. pruhy, tečky a žíhání (v) obrazce na téměř kulovitých strukturách, jako u některých prvků mřížovců (*Radiolaria*), ale to je těžší a pochybnější.“ Citováno v A. Hodges, *Turing: The Enigma* (Vintage, London 1983), str. 436-37.

čekat, že trvalá a nevratná difúze při chemických reakcích řídících vývoj bude udržovat tuto symetrii a že všichni budeme vypadat jako kulovité kapky. Ve svém článku však Turing ukázal, že opravdu může dojít k narušení symetrie, nezbytnému k tomu, aby se z oplodněného vajíčka vyvinulo komplikované tělo. Je to totéž, co jsme již viděli: v rovnováze nebo blízko ní je homogenní stav s nejvyšší symetrií stabilní, ale může se stát nestabilním ve větší vzdálenosti od rovnováhy, a fluktuace pak mohou zrušit jeho symetrii. Turing to ilustroval pomocí mechanické analogie: "Pokud je tyč zavěšena v bodě o něco málo nad svým těžištěm, bude ve stabilní rovnováze. Pokud však po tyči začne šplhat moucha, rovnováha se nakonec stane nestabilní a tyč se začne houpat."

Ve skutečnosti jsou vajíčka zřídka dokonale kulovitá a rozličné faktory, jako je např. gravitace, vždycky narušují tuto symetrii. Turingovy myšlenky však skutečně vedly k některým působivým popisům formování obrazců a tvarů v živém i neživém světě a tvoří hlavní pilíř velké části moderní teoretické biologie.<sup>167</sup> Turing učinil důležitý objev, že totiž nelineární efekty v chemické polévce mohou vést k povstávání prostorových obrazců, pokud v kapalině reaguje několik barevných chemikálií s různými koeficienty difúze. Je to naopak, než bychom intuitivně čekali, protože by se zdálo, že jakýkoli typ nevratných mísících procesů rozmyje dříve existující obrazce nebo struktury, právě tak jako nakonec zmizí šmouhy mléka nalitého do černé kávy.

Turing opět předběhl svou dobu, když formuloval matematický recept na oscilující obrazce, které pozorujeme jako šířící se vlny barev. Přišel také s myšlenkou, že když reagentie difundují rozdílnými rychlostmi, přičemž rychlejší složka potlačuje reakci, kdežto pomalejší složka ji podporuje, mohou tyto proti sobě jdoucí procesy vytvořit stacionární obrazce. Bodu bifurkace, kdy je systém právě tak daleko od rovnováhy, aby se začaly objevovat stacionární obrazce, se dnes říká Turingova nestabilita.

Následujících patnáct až dvacet let si Turingovy práce chemici a biologové prakticky nepovšimli. Toto mlčení mělo několik důvodů. Aby byla příslušná matematika zvládnutelná, musel Turing zkrotit své nelineární rovnice. Přiklonil se k rozumnému předpokladu, že matematika se chová lineárně a předpověditelně v omezené oblasti za bodem bifurkace, v němž dochází k narušení prostorové symetrie. Díky tomu byl Turing schopen zjistit, kdy se obrazec může vytvořit, ale už ne, jak se tento obrazec bude dále měnit, když se bude systém ještě více

---

<sup>167</sup> Viz např. J. Murray, *Mathematical Biology* (Springer, Berlin 1989).

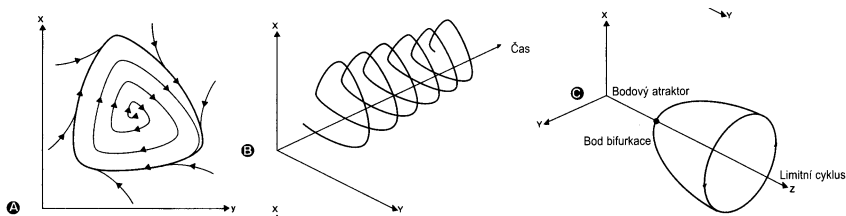
vzdalovat od rovnováhy. Turing si uvědomil, že to, co bude nezbytné k dalšímu pokroku, je rychlý počítač, i když tehdy ještě žádný neexistoval. A v desetiletích, která následovala po jeho průkopnické práci, nedokázal nikdo najít chemickou reakci, která by realizovala jeho stacionární obrazce.

## Bruselátor

K vlně zájmu o samoorganizaci, ve stopách Turingovy průkopnické práce, vedly zvláště dvě události. Jednou bylo sympozium konané v Praze, na němž se západní vědci poprvé dozvěděli o fascinující chemické reakci Bělousova-Žabotinského (kterou krátce popíšeme) a začali ji srovnávat s oscilacemi, které se vyskytují v biologii při glykolýze a fotosyntéze a pomáhají organismům získávat energii. Druhá událost se odehrála rovněž roku 1968 a byla to práce publikovaná René Lefevrem a Ilyou Prigoginem, kteří se seznámili s Turingovou prací poté, co navštívili Manchester v době, kdy Turing dokončil svůj článek o morfogenezi. Autoři v ní citovali Turingův průkopnický článek a formulovali nelineární dynamický model chemicky reagujícího systému, kompatibilní s jejich vlastní nerovnovážnou termodynamikou, který měl některé ze složek nezbytných pro prostorovou samoorganizaci. Tento idealizovaný model byl kvůli svému zeměpisnému původu později v roce 1973 Johnem Tysonem z Virginské polytechniky nazván "bruselátorem".

Bruselátor jasně ukazuje, jak podstatné jsou zpětná vazba a nelinearita pro samoorganizaci, kde se zdá, že enormní množství molekul navzájem "komunikuje" při vytváření komplexity. Bruselátor obsahuje dvě chemické substance, A a B, které jsou přeměňovány na dva produkty, C a D. Aby vznikly zajímavé nelineární jevy, uvažují se čtyři jednoduché kroky, obsahující dvě chemikálie X a F jako meziprodukty. Je to prosté: molekula 4 je nejprve přeměněna na jednu molekulu X, která v druhém kroku reaguje s molekulou B a vytvoří a produkt C; ve třetí reakci se dvě molekuly zkombinují s jednou a vytvoří tři molekuly X. Poslední reakce je přímá změna X na produkt D. Odrazový můstek k samoorganizaci - nelineární zpětná vazba - spočívá ve třetím kroku bruselátoru, kde se ze dvou molekul X tvoří tři reakce s meziproduktem Y. Ke zpětné vazbě dojde proto, že se jedna molekula Zúčastní své vlastní produkce. Je to "autokatalytický" krok. Nelineární povaha tohoto

procesu spočívá v tom, že na každé dvě reagující molekuly X je vytvořena jedna nová, což dává dohromady tři.



Obrázek 6.2 / Chemické hodiny. (A) Dvořozměrná projekce atraktoru: X a Y jsou koncentrace meziproductů chemické reakce (zbarvené řekněme modře a červeně). (B) Trojrozměrný pohled ukazující, jak běží čas v průběhu barevných změn. (C) Limitní cyklus vznikající z bodového atraktoru. Parametr změní vzdálenost systému od chemické rovnováhy. V bodě bifurkace se rozvine limitní cyklus a chemické hodiny se roztikají.

Bruselátor lze udržovat daleko od rovnováhy tak, že se chemikálie doplňují dříve, než jsou spotřebovány. Stačí nechat reakci probíhat v dobře promíchávaném průtočném reaktoru. Tam můžeme udržovat koncentrace složek A a B na správných hodnotách tím, že řídíme rychlost jejich vtékání do reaktoru, a podobně je tomu s produkty C a D, které jsou odváděny. Pouze koncentrace X a Y se mohou měnit s časem. Abychom zjistili jak, musíme napsat a vyřešit matematické rovnice popisující bruselátor - soustavu dvou diferenciálních rovnic popisujících koncentrace X a Y. Když bruselátor spustíme, získáme cit pro spletité chování skrývající se za jeho matematikou. Model je dostatečně jednoduchý, takže nepotřebujeme počítač. Když předpokládáme, že chemická látka X je červená a Y modrá, vidíme výsledky přímo v barvách.

Začneme poněkud zvráceně od konce reakce. Složky jsou promíchány, reagují a reakce se dostane do rovnováhy, v níž veškeré chemické změny ustanou. V rovnováze máme nezajímavou fialovou polévku - směs červených a modrých molekul. Moc se nezmění, pokud se koncentrace A a B udržují blízko těchto rovnovážných hodnot. Zajímavé chování začíná, když přítok chemikálií AaB vychýlíme od rovnovážných koncentrací k hodnotám přesahujícím jistý práh. V chemické reakci se za tímto kritickým bodem objeví oscilace, bez ohledu na to, jaké byly počáteční koncentrace XaY. Reakční směs může zčervenat, pak zmodrat a tak dále v pravidelných intervalech. Tomu se říká Hopfova nestabilita, podle matematika, který ji objevil.

Tyto barevné změny můžeme popsat tak, že se odvoláme na metaforu krajiny, tentokrát umístěnou v tzv. "fázovém prostoru", což je termín odkazující na soubor proměnných chemických koncentrací, které se mění s časem. Průběh chemické reakce si lze představit jako zachycení v kruhovém údolí či hradním příkopu nebo méně obrazně v uzavřené smyčce či cyklu ve fázovém prostoru zvaném limitní cyklus. Stačí, když si budeme pamatovat, že změny z modré na červenou a zpět znamenají pohyb chemické reakce kolem dokola tímto příkopem, tak jako obíhá ocelová kulička v obrubě klobouku. Je to další typ atraktorů. V jednom bodě okruhu má chemická směs modrou barvu, v jiném červenou. Pokud již nejsou dodávány chemikálie, reakce dobehne, přičemž trajektorie ve fázovém prostoru spadne v krajině jakoby do trychtýře, který reprezentuje bodový atraktor odpovídající termodynamické rovnováze.

Bruselátor osvětluje, jak může vzniknout řád z nepravděpodobného zdroje naprostého zmatku prostřednictvím procesu samoorganizace.

Tím, že se systém udržuje dostatečně daleko od rovnováhy - stálým přidáváním chemických přísad - se chemická polévka v reaktoru periodicky mění z modré na červenou a z červené zase na modrou a tak dále do nekonečna, místo aby zůstala navždy bezvýraznou fialovou směsí. Taková oscilující reakce se kvůli pravidelnosti svých chemických cyklů často nazývá chemické hodiny. Barevné proměny ale budou trvat neomezeně dlouho pouze tehdy, je-li udržován neustálý přítok a odtok reagentů do bruselátoru a ven.

Pro každého, kdo nezažil víc než nejjednodušší školskou chemii, je takové chování zářející. Zvláštní je na tom to, že to vypadá, jako by molekuly v bruselátoru dokázaly "komunikovat" jedna s druhou na obrovské vzdálenosti a jako by všechny věděly, kdy mají zmodrat a kdy zčervenat. "Doba kyvu" těchto chemických hodin, jak se valí kolem dokola příkopem limitního cyklu, je funkcí jen některých fyzikálních vlastností bruselátoru. Vůbec nezávisí na tom, jaké původní koncentrace byly použity. Jako Bénardovy buňky, i toto je příklad disipativní struktury, což je termín zavedený Prigoginem, zdůrazňující, že původ takové samoorganizace je v termodynamických procesech daleko od rovnováhy. Tento termín upozorňuje na skutečnost, že disipace, často spojovaná s náchylností izolovaného systému k neuspořádanému stavu, může ve skutečnosti hrát zcela opačnou roli a podporovat vznik

komplexity. Jiné příklady disipativních struktur zahrnují lidské bytosti, ekosystémy<sup>□</sup> a organizované světlo generované laserem.

Pojem disipativních struktur uhodil na správnou strunu v mnoha různých oblastech. Pomohl vzbudit zájem přírodovědců, oproti zájmu čistě matematickému, o nelineární diferenciální rovnice. Začala se studovat chemie oscilujících reakcí, protože to jsou kontrolovatelné a relativně snadno modelovatelné projevy komplexity. Toto úsilí zase vydláždilo cestu pokusům vyvinout matematické modely biologických procesů v jednotlivých buňkách a mnohobuněčných systémech. Ukázalo se přitom, že biochemičtí bratránci oscilujících reakcí, které se také dají popsat limitními cykly, mají veliký význam pro život. Život je koneckonců nejskvělejším příkladem uspořádaného chemického děje v přírodě. To vše dalo studiu komplexity velký impuls vpřed.

## Chemické obrazce a vlny

Chemické hodiny skrývají mnohá tajemství komplexity. Zabývali jsme se již časovými rytmy. A co Turingovy prostorové obrazce? Dosud jsme ignorovali možnou roli dalšího nerovnovážného procesu - difúze. Předpokládali jsme, že chemický koktejl v reaktoru je silně promícháván, takže všechny chemikálie (A, B, C, D, X a Y) jsou stejnoměrně rozděleny. To je ale nerealistické: než se různé chemikálie točící se v reaktoru spolu setkají, chvíli to trvá. Přirozeně, pokud není reaktor míchán, nemůžeme předpokládat, že se meziprodukty X a Y a produkty C a D budou automaticky tvořit ve stejném množství v různých částech nádoby. Musíme tedy promyslet, co se stane, když se budou moci vytvářet malé rezervoáry reagujících chemikálií, které budou muset migrovat do jiných oblastí nádoby, aby se tam zúčastnily reakce se zpětnou vazbou.

Abychom mohli popsat, jak reagující molekuly putují reaktorem, než do sebe narazí, musíme uvážit efekt difúze. Tu do naší analýzy snadno včleníme, když k ní připojíme člen pocházející z Fickova zákona, který říká, jak spolu souvisejí prostorové a časové změny koncentrace látky, pro každou z různých chemikálií v naší směsi. Převodním faktorem ve Fickově zákoně, který tyto dvě veličiny spojuje, je koeficient difúze, což je vlastnost daných chemických sloučenin: odráží skutečnost, že tlusté

---

<sup>□</sup> Známým příkladem jsou oscilace populací lišek a zajíců, (pozn. překl.)



molekuly difundují pomalu, hubené rychle. Bere v úvahu i viskozitu roztoku, jímž se molekuly musejí pohybovat.

Pomocí Fickova zákona dokážeme nalézt těsnou spojitost mezi chováním chemické směsi v čase a vznikem obrazců v prostoru. Tyto jevy kladou mnohem větší nároky na výpočetní metody užívané při popisu a v simulacích rozvoje komplexity. Chemie se tudíž stává mnohem bohatší. Nyní se limitní cyklus pocházející z Hopfovy nestability může otáčet stejně tak v prostoru jako v čase. Jedním dobře známým objektem, který se mění v prostoru a čase, je vlna - představme si vlny na volném moři. A skutečně, měli bychom očekávat, že v oscilující reakci, kde vládne Hopfova nestabilita, uvidíme, jak reaktorem prochází červenomodré vlnění, spíš než že všechen roztok v reaktoru bude současně ve stejném okamžiku měnit barvu na červenou či modrou. Je také možné, že se vyvine pevný prostorový obrazec, který se s časem nebude měnit. V případě bruselátoru se v hypotetické zkumavce mohou objevit kolečka nebo proužky. To je právě Turingova nestabilita, o níž jsme již dříve hovořili.

Jak jsme si s bruselátorem hráli, dokázali jsme popsat různé kombinace komplexního, samoorganizovaného chování. Odnese si z toho poznatek, že jednoduchý nerovnovázný bruselátor se dokáže samoorganizovat v prostoru, v čase nebo v obou zároveň. Chování tohoto matematického modelu však má svá omezení: všechny atraktory jsou dvojrozměrné limitní cykly. Složitější chování by vyžadovalo složitější tvar atraktoru. Místo čistě kruhové dráhy mezi červenou a modrou bychom mohli zvolit klikatou dráhu, která tráví více času produkcí modré barvy než červené. Přesto je tu důležité omezení: trajektorie v krajině se nesmějí protínat, protože to by vedlo k matematickým nesmyslům. Ve dvou dimenzích to silně omezuje spektrum možného dynamického chování. Když však do reakčního schématu kromě X a Y přimícháme třetí proměnnou odpovídající chemické koncentraci, tato omezení padnou a může se zrodit téměř neomezené množství komplexních exotů, z nichž každý bude popsán nějakým atraktorem.

## Cross-katalátor

Ačkoli v přírodě není nic, co by se mu docela podobalo, je cross-katalátor paradigmatickým, které ukazuje, že jednoduchost je matkou

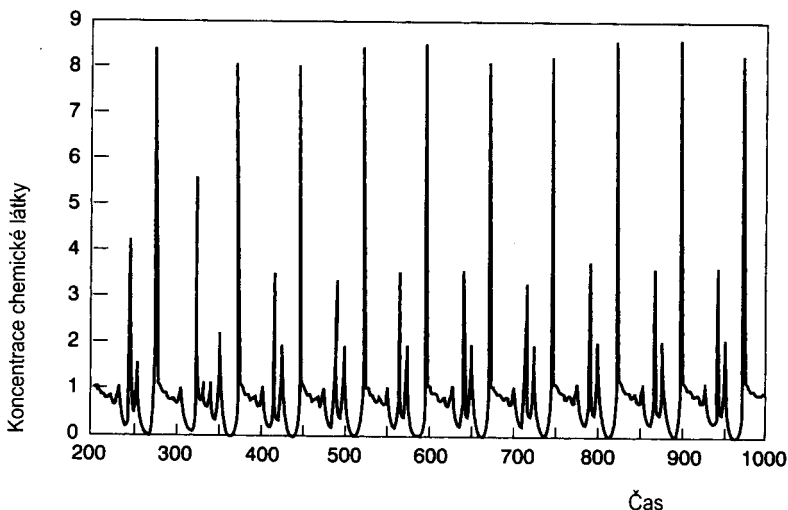
komplexity.<sup>168</sup> K vytvoření cross-katalátoru je ve skutečnosti potřeba jen přidat ještě jeden reakční krok k bruselátoru - řekněme chemickou reakci, v níž je modrá chemikálie přeměňována na zelenou. Tím dostaneme závratné množství možných typů chování. Cross-katalátor byl podrobně studován jedním z autorů této knihy, ve spolupráci s kolegy ve Schlumbergerově laboratoři a na univerzitě v Cambridgi, a co všechno systém dokáže, lze plně ocenit teprve s použitím počítače.

Lze tvrdit, že cross-katalátor je nejjednodušší chemické schéma schopné produkovat vůbec nějakou podstatnou úroveň komplexity a zároveň je pozoruhodným protijedem proti sterilním diskusím o komplexitě. Poskytuje jednoduchý recept pro asi téměř plný repertoár možných typů komplexního chování, které se vyskytují v chemii. Snad ještě překvapivější je to, že když se k pěti stupňům, z nichž se cross-katalátor skládá, přidají nějaké kroky navíc, něco z komplexity může zmizet. Poučení z cross-katalátoru tedy zní, že pouhé přidávání dalších komponent nemusí nutně znamenat více komplexity.

Abychom si cross-katalátor osahali, musíme nejprve vypátrat body bifurkace, tj. "rozcestníky", které se objeví, když je reakce vytlačována z rovnováhy, a které vyznačují kvalitativní změny v chování systému. Potom potřebujeme výkonnou pracovní stanici na podrobné prozkoumání krajiny v okolí těchto oblastí, jež provádíme tak, že měníme jeden parametr, pak druhý a tak dále. Tímto způsobem dospějeme ke stejným typům chování, které jsme viděli u bruselátoru: bodové atraktory, jež reprezentují stacionární chemickou reakci, kde směs červených, modrých a zelených molekul zůstává neměnná, a limitní cykly, kdy barva reakční směsi podléhá rytmickým změnám.

---

<sup>168</sup> Pojem „cross-katalátor“ zavedli A. Chaudry, P. Coveney aj. Billingham, J. Chem. Phys. 100, 1921 (1994). Dnes se v odborné literatuře vyskytuje obrovské množství modelových nelineárních chemických reakcí.



Obrázek 6.3 / Oscilace cross-katalátoru ve smíšeném modu

Dvojměrný limitní cyklus má mnohem větší repertoár chování než jeho jednorozměrný bratránek z bruselátoru. Jedna varianta, odpovídající tomu, čemu se říká oscilace "smíšených modů", vykazuje veliký vzrůst koncentrace jedné složky, poté rychlý pokles následovaný sérií méně výrazných píků koncentrace, a pak se celý proces opakuje (viz obr. 6.3). Při změně poměrné koncentrace reagujících chemikálií je možné pozorovat libovolný počet menších píků, jeden, dva, tři atd. Fascinující na tom je, že tyto oscilace mají skutečnou analogii v přírodě: vysílání signálů jednotlivými mozgovými buňkami v hlavě člověka během vědomé i nevědomé nervové aktivity vytváří obrazce podobného typu. Elektrochemické chování každého neuronu neuronové sítě (jak jsme to rozebírali v 5. kapitole) se podobá cross-katalátoru.

## Oblasti přitažlivosti, stavební kameny paměti

Cross-katalátor má jeden zvláštní rys, který si zaslouží krátkou odbočku. Zdůrazníme podobnost s chováním velkého souboru neuronů, zvláště u umělých neuronových sítí, které jsme poznali v předchozí kapitole. Tyto modely nám mohou zejména pomoci porozumět asociacím, jednomu z nejtypičtějšých rysů našich vzpomínek - jak to, že například vůně parfému vyvolá vzpomínku na polibek.

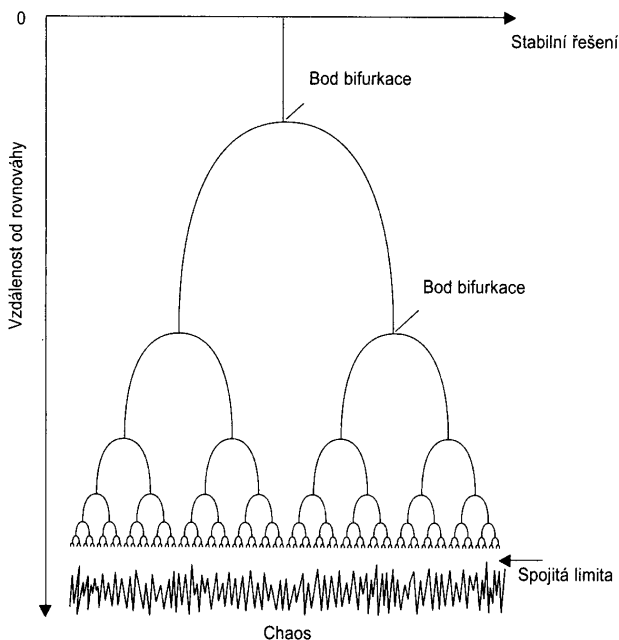
Efektivní metaforu tohoto spojení vůně s pamětí lze najít ve zvrásněné krajině cross-katalátoru. V některých oblastech jeho prostoru parametrů existuje více než jeden vzor dlouhodobého chování hypotetické chemické směsi. V jazyce krajinných metafor to odpovídá situaci, kdy horolezec může spadnout do více než jednoho údolí; které to nakonec bude, to závisí na jeho poloze na horském úbočí.

Současná existence více než jednoho možného atraktoru je přímým důsledkem nelineárních rovnic, které v cross-katalátoru používáme. Vyjádříme-li to matematicky, rovnice popisující systém dovolují více než jedno řešení pro daný soubor podmínek. Pro mnohé z těchto podmínek je stabilní pouze jeden stav. Někdy však bude stabilní více než jedno řešení a cross-katalátor pak může pobývat ve více než jednom atraktoru. V takovém případě se říká, že systém je "multistabilní". Ve kterém atraktoru cross-katalátor skončí, to závisí na jeho počátečním stavu. Můžeme zavést pojem množiny počátečních podmínek, které vedou vždy do daného atraktoru. Ta se nazývá "oblast přitažlivosti". Každý atraktor má svou vlastní oblast přitažlivosti, což znamená, že v průběhu času povedou některé počáteční podmínky k jednomu atraktoru, jiné k jinému atraktoru. Přitažlivé stavy celulárních automatů (třída I až IV, srv. 4. kap.) mají také oblasti přitažlivosti; jejich příklady jsou uvedeny na obrázku 4 barevné přílohy. Tentýž jev se vyskytuje u zpětnovazebních (rekurentních neboli Hopfieldových) neuronových sítí, které se rovněž řídí nelineárními diferenciálními rovnicemi. Jak jsme se již zmínili v 5. kapitole, ukládání informací v atraktorové neuronové síti (jako je Hopfieldova) je spojeno s přítomností souboru lokálních minim energetické (přesněji řečeno chybové) krajiny. Různé výstupní obrazce jsou spojeny s různými oblastmi přitažlivosti, a proto vedou k různým vzpomínkám.

Vzpomínky si často asociujeme - například kdysi populární milostný song se starou láskou. Řečeno jazykem atraktoru, takové asociativní vzpomínky vznikají tehdy, když hudební skladba sdílí oblast přitažlivosti s milovanou bytostí, což je snad způsobeno vzpomínkou na vášnivá objetí prožívaná na tanečním parketu. Přitažlivý stav paměti obsahuje jak představu písně, tak milence. Disipativní struktury vytvořené neuronovými sítěmi jsou stejně tak příkladem samoorganizace, jako jím jsou nespočetné virtuální barevné změny cross-katalátoru.

## Cross-katalátor a chaos

Když bloudíme krajinou cross-katalátoru, je možné spadnout do dalšího atraktorů, v němž reakce vykazuje chaotické chování. Barevné změny se pak budou objevovat zdánlivě naprosto nepravidelně. Avšak to, co je zdánlivě náhodné, vzniká paradoxně z předávkování pořádkem. Abychom mohli tento zarážející aspekt chaosu ilustrovat, potřebujeme nějak zobrazit různorodost možných chování cross-katalátoru, když je nucen jít dál a dál od rovnováhy. Typické chování se dá stručně shrnout s použitím bodů bifurkace, s nimiž jsme se už setkali. Obrázek 6.4 zachycuje každý z těchto milníků chování v diagramu bifurkací.



Obrázek 6.4 / Bifurkační kaskáda mívčí k chaosu v jednoduchém nelineárním systému. Říká se jí také zdvojování periody.

Vzdálenost měřená směrem dolů po svislé ose odpovídá vzdálenosti od rovnováhy. U prvního bodu bifurkace mimo rovnováhu se reakce rozvětjuje a jsou k dispozici dvě možnosti, jak oscilovat v rytmu hodin. Z těchto větví zase raší další a další větve, větvičky a tak dále, což znamená, že více a více rozdílných stavů začíná být stabilních. Nakonec

se však tyto bifurkace objevují tak hustě, že v dolní části diagramu splynou v hustý chuchvalec možností.

V tomto chuchvalci je možná okouzlující šíře samoorganizovaných typů chování, díky nesmírnému množství hustě vedle sebe poskládaných potenciálních stavů. Chemické hodiny už nejsou omezeny konečným počtem větví. Jejich chování vypadá jako chaotické, protože jim nic nebrání vyzkoušet nekonečné množství uspořádaných možností. Měření zaznamenaná v jednom experimentu už nelze nikdy zopakovat. Příště bude docházet ke změnám barvy v jiných zdánlivě náhodných časových intervalech. Je to tentýž typ chování, jaký se vyskytuje v celulárních automatech třídy III. Všimněte si však, že význam slova "chaos" je zde zcela jiný, než jak se běžně užívá: nazývají se tak procesy, které nejsou náhodné, ale vypadají tak.

Mohli bychom si myslet, že čím víc se vzdalujeme od rovnováhy, tím více chaosu v bifurkačním stromu nastane. Ale situace se podobá spíše stromu cedrovému, který má mezi zelenými pásy prázdná místa. Dají se najít "ostrovy" či "okna" pravidelnosti mezi chaotickými režimy a naopak; uvnitř nich jsou okna vsunutá v oknech. Tento typ chování se neomezuje na cross-katalátor, ale je znakem komplexity, jíž příroda oplývá.

## Počítače a chaos

Ačkoli něco málo o chaosu věděl už Poincaré někdy na konci 19. století, první jasnější náznak existence chaosu byl odhalen pomocí počítače během výzkumu prováděného roku 1963 Edwardem Lorenzem, profesorem meteorologie na MIT. Lorenz se snažil pochopit, proč se tak často liší předpověď počasí od toho, co pak skutečně nastane.

Se svým primitivním počítačím strojem a na badatele v jeho oboru neobyčejně silným matematickým zázemím se Lorenz snažil vytvořit tak jednoduchý matematický model proměn počasí v atmosféře, jak to jen bylo možné při zachování všech podstatných fyzikálních vlastností. Lorenzovy rovnice poskytovaly přibližný popis vodorovné vrstvy tekutiny zahříváné zespodu, podobně jako u Rayleighových-Bénardových buněk, na něž jsme narazili na začátku této kapitoly. Teplejší tekutina je řidší, a tak má sklon stoupat a rozvířit konvektivní proudění. Pokud je přívod tepla dosti intenzivní, má výsledná konvekce nepravidelný, turbulentní charakter.

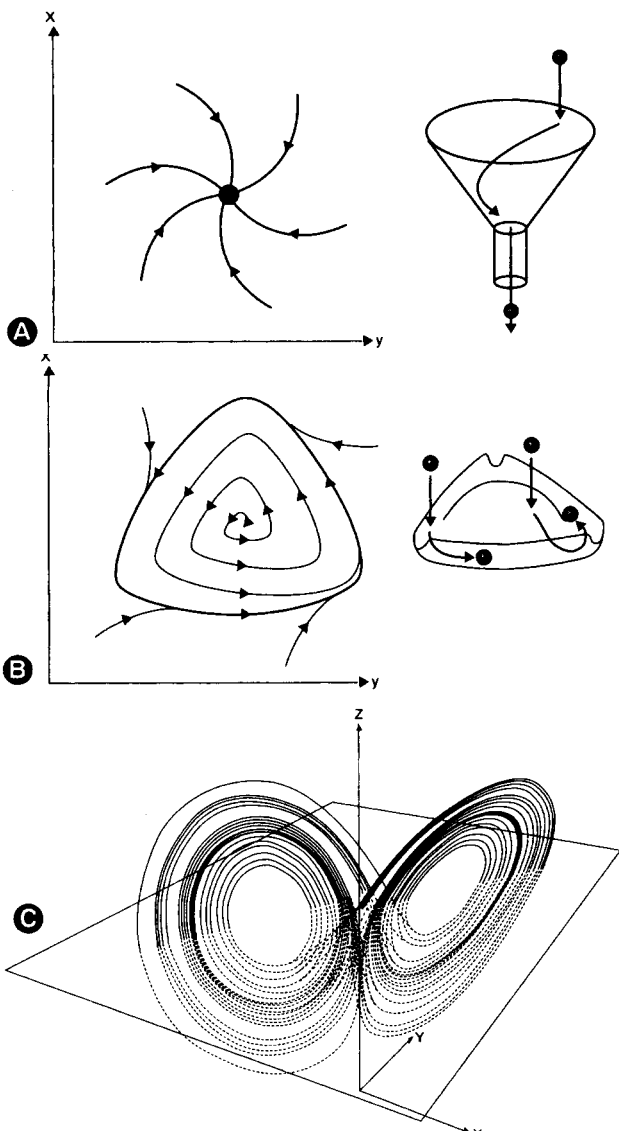
Když Lorenz studoval komplikované Navierovy-Stokesovy rovnice dynamiky tekutin, postupně mu docházelo, že jemné variace počátečních povětrnostních podmínek dosazovaných do počítače mohou mít později dramatický dopad. Když počítač proháněl čísla rovnicemi, výsledná řešení - předpovědi počasí - se často v krátké době naprosto změnila, bez ohledu na to, jak nepatrná byla změna počátečních podmínek. Bylo by svůdné obvinít z takové citlivosti na jeden problém počítač, jak by to určitě udělali jiní, ale bylo to nepochybně Lorenzovo meteorologické vzdělání, které ho přimělo, aby byl k tomuto výsledku tak vnímavý - z tohoto hlediska předběhl dobu o několik let. Uvědomil si, že jeho práce je odsouzena k neúspěchu, pokud nebude schopen zkonstruovat snadno pochopitelnou soustavu rovnic, jejichž řešení se chová chaoticky. Dosáhl toho drasticky zjednodušenou reprezentací Navierových-Stokesových rovnic, skládající se z pouhých tří provázaných nelineárních diferenciálních rovnic. Jak později napsal: "Chaos se najednou stal čímsi vítaným."<sup>169</sup>

Lorenz objevil, že snaha meteorologů po celé planetě dělat ještě přesnější předpovědi počasí s použitím principů mechaniky tekutin a s ještě větším počítačovým výkonem má jeden vážný nedostatek: citlivost rovnic dynamiky tekutin ke vstupním údajům. Jinými slovy nepatrné fluktuace mají za následek enormní změny v povětrnostní situaci. Tato skutečnost vedla Lorenze k zavedení pojmu "efekt motýlího křídla", což je sugestivní obraz vystihující myšlenku, že prostřednictvím chaosu mohou i ty nejmenší události mít ty nejdůležitější následky. S trochou básnické nadsázky se dá říci, že mávnutí motýlích křídel v Brazílii může vyvolat tornádo v Texasu.

Efekt motýlího křídla lze snadno zobrazit atraktorem. Ani zdaleka se však nepodobá bodovému atraktorů nebo limitnímu cyklu. Lorenzův atraktor se skládá ze změti trajektorií, které tvoří cosi jako sovi oči nebo spíš jakéhosi motýla (viz obr. 6.5). Seběmenší posun pozice na atraktorů vede k odlišné trajektorii, a tedy k jinému průběhu počasí. Ve své úplnosti reprezentuje atraktor klima: ačkoli britské počasí je značně proměnlivé, zůstává vždy v rámci určitého repertoáru možností, s vyloučením monzunů nebo několikaměsíčního sucha.

---

<sup>169</sup> E. Lorenz, *The Essence of Chaos* (UCL Press, London 1993), str. ix.



Obrázek 6.5 / Úrovně atraktoru.

- (A) Bodový atraktor a jeho mechanická analogie, kulička kutálející se do trychtýře;  
 (B) limitní cyklus a jeho mechanická analogie, kulička kutálející se okrajem třírohého klobouku;  
 (C) Lorenzův podivný neboli chaotický atraktor.



## Podivné atraktory, chaos a fraktály

Motýlovitý tvar Lorenzova atraktorů na obrázku 6.5 (C) je příkladem toho, čemu se říká podivný atraktor. Zdůrazňujeme tím jeho komplexní povahu, ve srovnání s jeho jednoduchými bratřičky, jako jsou bodové atraktory a limitní cykly. Tuto příšeru poprvé spatřili a pojmenovali roku 1971 David Ruelle, belgický matematický fyzik z Institut des Hautes Etudes Scientifiques v Bures-sur-Yvettes poblíž Paříže, a Floris Takens z univerzity v holandském Groningenu. Studovali turbulenci v tekutinách, ale ukázalo se, že jejich závěry mají mnohem širší dosah.<sup>170</sup>

Komplexní chování je způsobeno dvěma různými vlastnostmi podivného atraktorů. Za prvé, na rozdíl od limitního cyklu vykazuje extrémní citlivost na startovní neboli počáteční podmínky. Lorenzova práce jasně ukázala, že dlouhodobé chování systému zachyceného v podivném atraktorů ovlivňují i ty nejmenší detaily počátečních podmínek.

Za druhé, na rozdíl od limitního cyklu je to fraktální objekt. Před rokem 1975 slovo "fraktál" ještě neexistovalo. Bylo zavedeno Benoitem Mandelbrotem,<sup>□</sup> který v té době pracoval u IBM, k popisu podivné geometrie nepravidelných tvarů, které vypadají stejně na všech délkových škálách. Fraktální objekt představuje v zásadě tutéž strukturu bez ohledu na to, kolikrát je zvětšený. Tato vlastnost, že vidíme do nekonečna ubíhající motivy uvnitř motivů uvnitř dalších motivů, se nazývá soběpodobnost. Tentýž motiv se ukazuje na každé délkové škále: cípy jetelového listu se roztřepí na menší lístky jetelového tvaru, které se dále rozdělí na ještě menší jetelové lístky a tak dále do nekonečna. Blechy Jonathana Swifta patří do stejné kategorie.<sup>171</sup>

Přírodovědci o bleše nám říkají, že na ni se zas malé blešky přísaji a tyhle malé nosí menších ještě víc a tak dál až není vidět nic.

Tvar fraktálu je tentýž, ať si zvolíme k jeho pozorování jakoukoli délkovou škálu. Obrázek 6.6 ukazuje jeden příklad, vytvořený Mariem Marku-sem z Ústavu Maxe Plancka pro molekulární fyziologii v

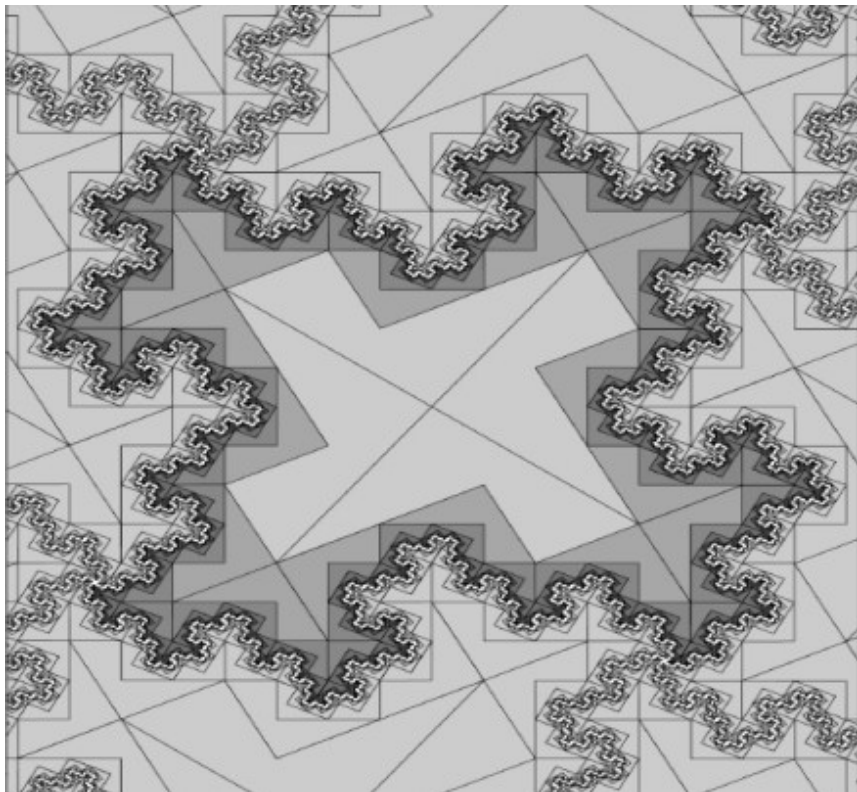
---

<sup>170</sup> Přesněji řečeno zdá se, že podivné atraktory jsou užitečné k popisu nastartování turbulence, nikoli nutně pro plně rozvinutou turbulenci, která zůstává do značné míry záhadou. (Totéž rozlišení dobře platí i v kardiologii, a to mezi fibrilací a jejím nastartováním při tachykardii způsobené rotujícími vlnami.)

<sup>□</sup> Čtenáře možná může zajímat, že B. B. Mandelbrot pochází z Polska, odkud prchnul právě včas, aby neskončil v plynové komoře, (pozn. překl.)

<sup>171</sup> J. Swift, On Poetry (mí).

Dortmundu, společně s Javierem Tamamesem z Universidad Complutense v Madridu.



Obrázek 6.6 / Obrazce v obrazcích. Fraktál se opakuje ve všech délkových škálách.

Mandelbrotova práce otrásla naši představou o počtu rozměrů prostoru. Všichni dobře víme, že čára má jeden rozměr, zatímco oblast uzavřená v obdélníku je dvojrozměrná. To však jsou téměř vždy idealizace: předměty mohou mít rozměrů jeden a kousek. To "a kousek" znamená, že je to zlomková neboli fraktální dimenze.<sup>172</sup> Mandelbrot to

<sup>□</sup> Toto je skutečně správná etymologie pojmu „fraktální dimenze“. Avšak matematická definice je vymyšlena tak, aby fraktální dimenzi měla i přímka nebo kruh, což nejsou fraktály. U přímky bude fraktální dimenze přesně 1 (jak se dalo čekat), podobně kruh má fraktální dimenzi 2 atd. (pozn. překl.)

<sup>172</sup> B. Mandelbrot, Science 156, 636 (1967). Přímochará vzdálenost („jak letí vrána“) mezi sousedními pobřežními městy by dala jeden hrubý odhad. Pokud však podél pobřeží

ilustroval v článku, v němž si položil tuto otázku: "Jak dlouhé je pobřeží Británie?" Krátká úvaha ukazuje, že odpověď závisí na délkové škále zvolené k měření čáry pobřeží. Příroda oplývá fraktálními tvary, od květáku po mraky; dají se najít dokonce v kapajícím kohoutku, kde se tvoří nekonečná kaskáda struktur mezi kohoutkem a padající kapkou.

Chaotická chemická reakce, reprezentovaná kuličkou pohybující se podivným atraktorem, může díky fraktálním vlastnostem atraktorů projít nekonečnou posloupností stavů. Zatímco bodový atraktor a limitní cyklus mají dimenzi nula, jedna, dvě, tři atd., podivný atraktor se dá definovat tak, že má neceločíselnou dimenzi. Skutečnost, že počet rozměrů podivného atraktorů není celé číslo, nám naznačuje, že můžeme očekávat chaos. Atraktor obsahuje nekonečné množství možností, i když je uzavřený v omezené oblasti: systém vzorkuje v průběhu času nekonečné množství rozličných konfigurací a nikdy se neopakuje. Můžeme si představit, že systém donekonečna sleduje obrazce v obrazcích v obrazcích. Na první pohled je to těžké pochopit. Zvykne-li si ale na pojem fraktálních tvarů, bude pro nás snazší pochopit, jak cross-katalátor, i když je omezen v konečné oblasti, na svém vlastním podivném atraktorů, může přesto objevovat neomezené možnosti svého putování. Jakmile se chemie cross-katalátoru přilepí na podivný atraktor, je naprosto nemožné předpovědět jakékoli podrobnosti o jeho chemickém chování ve vzdálené budoucnosti.

Tuto komplexitu můžeme ještě zdůraznit srovnáním s komplexitou chemických hodin běžajících v limitním cyklu. Ať byla kulička představující chemické hodiny vržena do krajiny možností jakkoli, skončí tak, že se bude valit dnem kruhového údolí. Předpokládejme však, že se kulička skulila do podivného atraktorů a vy byste si přáli zopakovat komplikovanou dráhu, kterou sledovala. Zjistíte, že zvolíte-li jakýkoli sousední bod, který bude vždy jiný, ať se jakkoli přiblíží k prvnímu, dostanete v krajině trajektorii, která se bude rychle vzdalovat od té původní a povede k naprosto jinému pohybu po atraktorů, k jiné pouti nekonečnými fraktálními obrazci uvnitř obrazců.

Deterministický chaos povstává z nekonečně komplexní fraktální struktury podivného atraktorů. Jedině kdyby pozorovatel znal s

---

půjdete pěšky, zjistíte, že čáry pobřeží přibýlo, jak jste obcházeli každý výběžek a zářez. Mravenci prodlouží cestu i každý kamínek, zatímco pro vrtící se bakterii délka pobřeží Británie opět značně nabyde. Je jasné, že odpověď závisí na použitém měřítku, protože existují struktury v zásadě na všech délkových škálách. Když bude délková škála nekonečně malá, bude mít pobřeží nekonečně velkou délku. Zdánilivě paradoxní výsledek je, že pobřeží je ve skutečnosti „čára“ nekonečné délky, uzavřená docela pohodlně v konečné oblasti (stačí nakreslit kolem Británie kruh).

nekonečnou přesností, jaké byly počáteční podmínky při experimentálním studiu takového chaotického systému, dokázal by dělat bezpečné předpovědi. Ale i ta nejmenší nejistota - která je tu v reálném světě vždy - to znemožňuje, protože bez ohledu na to, jak malá nepřesnost je, bude exponenciálně znásobena v průběhu času. Přesto je tu přítomen hluboký řád. Proto hovoříme o deterministickém chaosu - je důsledkem deterministických pohybových rovnic. Pojem chaosu je tedy vlastní samotnému systému a je naprosto odlišný od účinku náhodných neboli "stochastických" fluktuací vnějšího prostředí. Typickým zdrojem těchto fluktuací je teplo, což se dá zjistit z nepatrných změn teploty v okolí. Takové stochastické procesy však dokážou generovat náhodné chování vypadající jako chaos v systému, který není zachycen v podivném atraktoru. Odlišení deterministického a stochastického chaosu je jednou z hlavních překážek, s níž se potýkají "chaologové" - vědci zabývající se potenciálně chaotickými systémy.<sup>173</sup>

Deterministický chaos také narušuje naše intuitivní představy o řádu a neuspořádanosti. Zmatená popularizace této myšlenky prosazovala chaos jako vysvětlení všeho komplexního, nejen věcí, které jsou nevypočitatelně nebo nestabilní, ale i situací, kdy by bylo vhodnější mluvit o samoorganizaci. Toto módní slovo by nás však nemělo oslnit. Řád i deterministický chaos pocházejí z téhož zdroje - z disipativních dynamických systémů popisovaných nelineárními rovnicemi.

Ačkoli Ruelle jako první předpověděl chemický chaos už roku 1973, jeho myšlenky, stejně jako mnoha jiných opravdu dobrých myšlenek, si zpočátku nikdo nevšiml. V chemické reakci prozrazuje přítomnost podivného atraktoru absence jakékoli rytmické pravidelnosti v barevných změnách z červené na modrou. Roku 1971 se Ruelle zeptal chemika, který se specializoval na oscilující reakce, zda vůbec někdy dostal chaotickou časovou závislost. Odpověděl, že kdyby nějaký experimentátor dostal při studiu své chemické reakce chaotický záznam, vyhodil by ho s tím, že se experiment nepovedl. To se naštěstí změnilo a nyní již máme několik příkladů neperiodických chemických reakcí. Nejznámějším realizovaným příkladem chemické komplexity, zahrnující nejen chaos, ale i mnoho dalších jevů, je Bělousovova-Žabotinského reakce.

---

<sup>173</sup> Termín „chaologie“ zavedl Mike Berry z university v Bristolu.

# Bělousovova a Žabotinského magie

Před půl stoletím narazil Boris Pavlovic Bělousov na úžasnou chemickou reakci. Byl tehdy vedoucím biofyzikální laboratoře při sovětském ministerstvu zdravotnictví. Při svém výzkumu vymyslel koktejl chemikálií, které měly napodobovat některé aspekty Krebsova cyklu, základní metabolické dráhy, pomocí níž živé buňky rozkládají organickou potravu na energii a oxid uhličitý, a měly tak přispět k jeho hlubšímu pochopení. K jeho překvapení směs oscillovala s hodinovou pravidelností mezi bezbarvým stavem a žlutým zbarvením. Existují náznaky, že v dalších výzkumech pozoroval také vytváření prostorových obrazců. Tak vytvořil Bělousov první příklad reálné chemické reakce, která potvrzovala pojem samoorganizace prostřednictvím procesů reakce a difúze daleko od rovnováhy, jak to ve stejné době předpověděl Turing.

Naneštěstí pro Bělousova byla tato reakce tak zvláštní, že měl velké problémy přesvědčit vědecký establishment, že něco takového opravdu existuje. Roku 1951 byl rukopis jeho práce odmítnut. Redaktor mu sdělil, že jeho "údajný objev" je zhola nemožný. O šest let později zaslal Bělousov k publikaci další analýzu, ale redaktor mu nabídl uveřejnit pouze drasticky zkrácenou verzi, ve formě stručného sdělení. Bělousovova práce nakonec vyšla jako obskurní příspěvek ve sborníku symposia o radiační medicíně. Skládala se ze dvou stránek zařazených před jiný z jeho článků. Nebyl prvním ani posledním z těch, kteří se střetli s přesprávilš horlivým vědeckým skepticismem.<sup>174</sup>

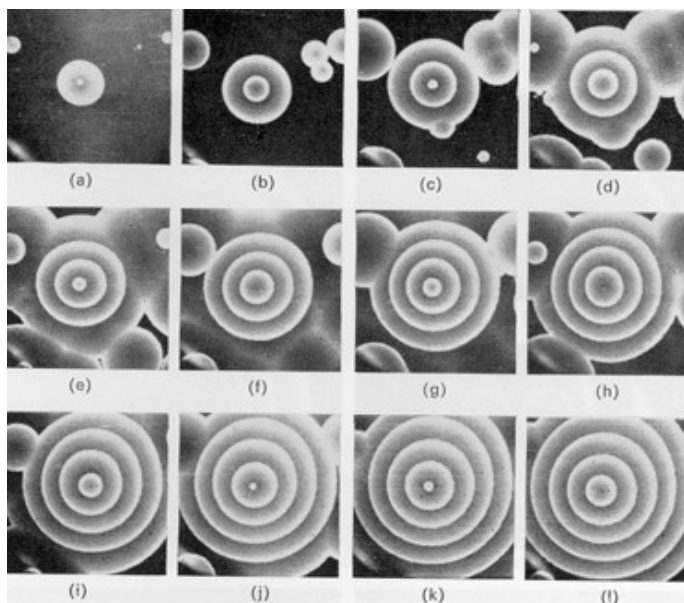
Zájem o tuto reakci začal opravdu ožívat teprve poté, co Bělousovovu oscilující směs začal studovat Anatolij Žabotinskij. Během 60. let, jako aspirant v oboru biochemie na Moskevské státní univerzitě, si hrál s různými variantami Bělousovových přísad; získal například výraznější barevné změny z červené na modrou. Nakonec se mu podařilo upoutat pozornost svých konzervativních kolegů. Do studia jeho úžasného systému se pustili další a od té doby vyrostl výzkum samoorganizovaných chemických reakcí v módní oblast bádání. Roku 1979 podávali vědci po celém světě důkazy důležitosti této práce a roku 1980 obdrželi Bělousov a Žabotinskij Leninovu cenu, společně s

---

<sup>174</sup> Objev oscilující chemické reakce při přeměně peroxidu vodíku na vodu, učiněný Williamem Brayem z kalifornské university v Berkeley roku 1921, byl odmítnut podobným způsobem. Řekli mu, že oscilace byly pravděpodobně artefaktem způsobeným nedokonalým experimentálním postupem.

Valentinem Izraelovičem Krinským, Genrikem Ivanitským a Albertem Zaikinem. Bohužel, Bělousov zemřel roku 1970, dříve než se jeho zakladatelské dílo dočkalo opožděného mezinárodního uznání.

Reakce, kterou původně Bělousov objevil, a mnoho jejích později vyvinutých variant, vešla ve známost pod jménem Bělousovova-Žabotinského (BŽ) reakce. Chemie této pozoruhodné a složité reakce byla důkladně analyzována: soudí se, že se jí účastní asi třicet různých chemických látek včetně krátkodobých meziproductů, které fungují jako klíčová místa různých vzájemně propletených cyklů chemických reakcí, kterými BŽ reakce procházejí. Ty byly zestručněny skupinou z univerzity v Oregonu do zjednodušeného, ale přesto důležitého modelového schématu, zahrnujícího pouze pět různých kroků a šest chemikálií, kterému se od té doby říká "oregonátor". Model dokáže popsat mnoho aspektů chování Bělousovových-Žabotinského směsí, jako například limitní cykly, které vytvářejí chemické oscilace. Obecné poučení z této práce, tak jako jinde, je jasné: často dokážeme vysvětlit komplexitu na základě jednoduché nelineární matematiky.



Obrázek 6.7 / Spirální vlny v Bělousovově-Žabotinského chemické reakci.

Stále zjišťujeme, jak jsou tyto složité reakce komplikované. Dobře známe spirální vlny v BŽ reakci (viz obr. 6.7). Přesvědčivý důkaz o

existenci podivného atraktoru, který je základem chaotických režimů v BŽ reakci, získala jedna z neaktivnějších skupin v této oblasti, vedená Harrym Swinneyem z Texaské univerzity v Austinu. Na základě detailního studia reakční dynamiky bylo toto chaotické chování modelováno s použitím diferenciálních rovnic obsahujících tři proměnné, což je nezbytné minimum. Jiní ukázali, jak ovládat chemický chaos tím, že sledujeme jednu z nestabilních periodických drah obklopených podivným atraktorem, a to posloupností malých změn v toku chemikálií, dodávaných do reaktoru. Tímto způsobem vědci pochopili některé ze zdánlivě náhodných, a přesto uspořádaných obrazců komplexity.

Vědci považují všechny takové změny obrazců nebo barev za změny stavu. Směs chemikálií v BŽ reakci představuje vybuditelné prostředí, to je takové, které mění svůj stav, když je vystaveno stimulu přesahujícímu určitou prahovou hodnotu. Po vybuzení se takové prostředí stává netečným (přestane odpovídat) a vrací se ke svému počátečnímu vnímavému stavu přes posloupnost stavů, které samy mohou být vybuzené. Každodenní příklady se dají najít ve spirálních vlnách produkovaných srdečním svalem, v tom, jak primitivní organismy zvané hlen-ky přijímají potravu, a v elektrické aktivitě našich mozků, kde neurony vykazují podobné typy chování. Analogie mezi BŽ reakcí a chováním srdečního svaluje nyní prokázána nade vší pochybnost.

Ukázalo se však, že najít chemické koktejly, které odpovídají Turingově předpovědi statických obrazců z roku 1952, je mnohem obtížnější. Experimentátoři měli takové těžkosti s přípravou těchto obrazců, že se o jejich skutečné existenci čím dál více pochybovalo. Hrozilo jim, že budou jako tolik jiných odsunuty mezi matematické fantazie. Nedávno však skupina z univerzity v Bordeaux dokázala vytvořit komplexní, ale skutečně statické Turingovy obrazce. Generovali například linii bodů, obrazec podobný tomu, jenž vytváří bruselátor.

Podmínky pro vznik Turingových obrazců jsou velmi svazující a vyžadují nějaký typ pozitivní zpětné vazby, jako je autokatalýza, a přítomnost dvou chemických látek zvaných aktivátor a inhibitor. Francouzská skupina vyvinula vhodnou chemickou směs a jako reaktor použila plochý kus průhledného rosolu, vsazený mezi rezervoáry chemických reagentů. Žluté a modré barevné proměny nahrávali

videokamerou, přičemž odhalili stacionární linie bodů, což byl první experimentální důkaz opravdové Turingovy struktury.

Tuto práci rozvinul Hany Swinney se svými kolegy. Vytvořili statické, avšak nepravidelné obrazce, které vypadaly velmi "živě". Podobají se tomu, čeho dosáhl Turing, když se mořil se svými rovníci na stolním kalkulátoru. Turingova matka kdysi popisovala, jak "mi ukázal některé z nich [obrazců] a ptal se, jestli mi připomínají barevné skvrny na kravách, a to opravdu připomínaly, tak moc, že když vidím krávy, tak si vždycky vzpomenu na jeho matematické obrazce".

Opět s použitím gelu jako reaktoru studovali Swinney a jeho kolegyně, jak obrazce složené z palety modrých a žlutých reagujících chemikálií závisejí na vnějších podmínkách. Když se snížila teplota, vytvořily se šestiúhelníkové obrazce. Dále zjistili, že při změně koncentrace reagujících složek se objeví pruhované vzory, které se dají bez velkých změn udržovat řadu dní. Tyto obrazce však byly Swinneymu, který již předtím něco podobného vytvořil v počítačových simulacích, dobře známy. V dalších výzkumech jeho tým vytvořil reagující systém, v němž modré tečky podléhaly plynulému, životu podobnému procesu, v němž se rodily nové díky rozmnožování a umíraly, když neměly dost prostoru. Alespoň v tomto ohledu jejich chování vykazovalo zarážející podobnost s chováním živých tvorů.

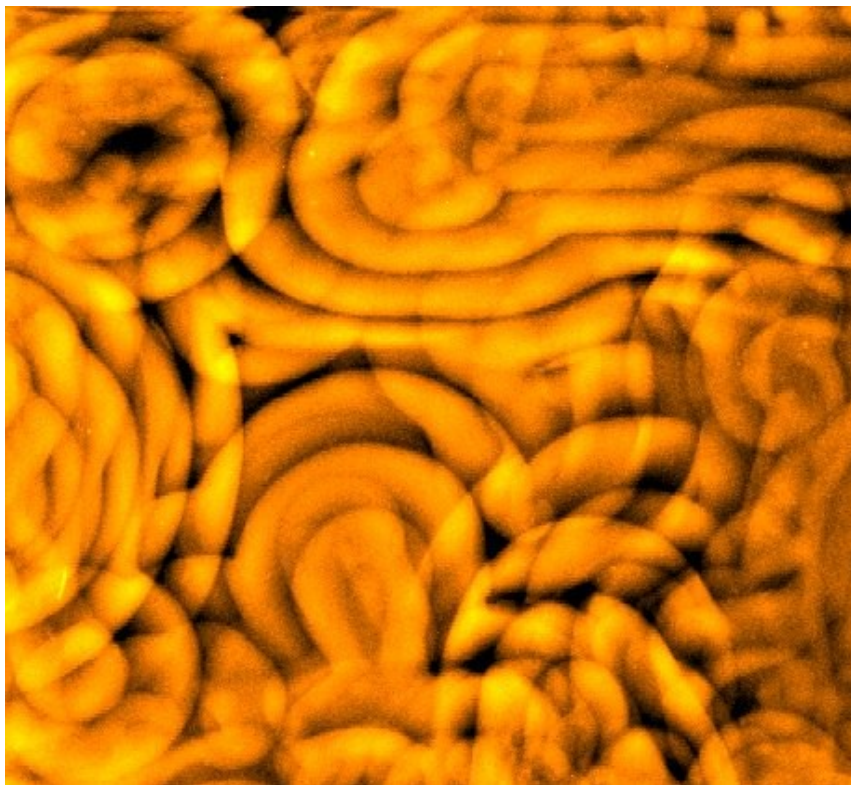
## Chemický počítač

Bělousovova-Žabotinského reakce skrývá další překvapivé možnosti. V elegantním experimentu, který provedli Oliver Steinbock, Agota Tóth a Kenneth Showalter na Západoviržinské univerzitě, byla BZ reakce zapojena do řešení nelehkého matematického problému. Chceme-li nalézt nejkratší cestu bludištěm, sériový počítač typicky vyhledá jednu po druhé všechny možné dráhy a pak vybere tu nejrychlejší. Místo aby se uchyloval k takovéto hrubé síle, západoviržinský tým při hledání nejkratší cesty sledoval stopu chemické vlny. Ve skutečnosti použili paralelní přístup tam, kde by se normálně postupovalo iterativním způsobem.

Vlna - samovolně se šířící reakční fronta - má pro řešení tohoto problému různé užitečné vlastnosti: pohybuje se stálou rychlostí, obchází překážky bez porušení a ztrácí se ve slepých uličkách nebo se srazí s jinou vlnou. Aby vytvořili vlnu v bludišti, vzali polymerní membránu, namočili ji do reakčních složek a pak vytvořili "stěny"



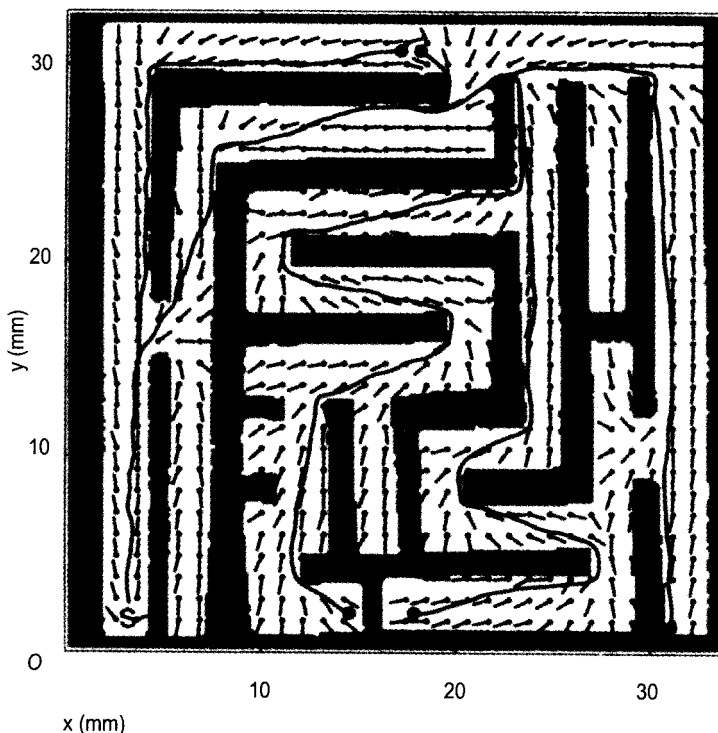
bludiště tím, že vyřizli odpovídající kusy. Snadno vybuditelnou reakci spustili na jednom konci dotykem stříbrného drátku a poté snímali na video obraz čela vlny v pevných časových odstupech. Tak vytvořili složený obrázek ukazující postup šířící se vlny (viz obr. 6.8a).



Obrázek 6.8a / Chemický počítač.

Chemická vlna šířící se membránovým bludištěm. Tento obrázek tvoří posloupnost padesáti přes sebe položených obrázků pořízených v padesátisekundových intervalech.

Z obrázku získali tabulky, které určují délku dráhy z libovolného místa v bludišti do daného cílového bodu. S pomocí počítače dokázali odvodit i mřížku vektorů ukazujících směr lokálních toků (viz obr. 6.8b). Vybereme-li náhodně jakýkoli bod, je možné sledovat tento vektorový tok a najít optimální - nejrychlejší - cestu zpět do výchozího bodu.



Obrázek 6.8b / Rychlostní pole v bludišti, ukazující lokální směr šíření vlny. Malé tečky představují místa vzniku vektorů. Nejrychlejší cesty mezi pěti body a cílem S jsou vyznačeny tmavými plnými čarami.

Je fascinující všimnout si, že podobné procesy musejí být do určité míry zodpovědné za ty pochody v mozku, které řídí vlnění a větvení signálů ve všech neuronových drahách. "Mohla by se optimalizace dráhy v síti neuronů opírat o vlastnosti snadno vybuditelného média, jak to naznačuje naše metoda hledání optimální dráhy?" ptá se Showalter. Jeho tým také úspěšně simuloval čerení chemických vln v počítačovém bludišti. Výsledný algoritmus by mohl mít užitečné aplikace: mohl by například pomoci robotu najít nejrychlejší trasu k určité položce mezi kilometry polic ve skladu.

Pravidelné "tikání" BŽ reakce by mohlo jednou hrát roli hodin v chemickém počítači, tvrdí John Ross ze Stanfordské univerzity. Ve spolupráci s Allenem Hjelmfeltem, Edem Weinbergem a Adamem Arkinem identifikoval základní logické funkce, z nichž se dá zkonstruovat skutečně každý počítač, včetně analogové a fuzzy logiky,

v biochemii glykolýzy, procesu přítomném v živých bytostech, který budeme podrobněji zkoumat v příští kapitole.

Jeho tým také ukázal, že je možné simulovat neuronové sítě s použitím chemických reakcí, které se chovají podobně jako nervové buňky - existuje práh, pod nímž vstupní signál vymizí a nad nímž je zesílen. Postavili již prototyp zařízení, které dokáže rozpoznávat obrazovou informaci. "To, co můžeme zjistit studiem výpočetních funkcí jednoduchých chemických sítí, může vést k lepšímu pochopení sítí důležitých pro biologii," poznamenal Ross.

## Chemie celulárních automatů

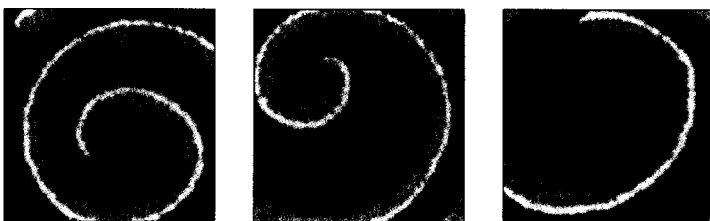
Komplexita Bělousovy-Žabotinského reakce se samozřejmě dá reprodukovat s použitím "programovatelné hmoty" v počítači, pomocí celulárních automatů (CA), na něž jsme narazili dříve, ve 4. kapitole, u modelů turbulentního proudění v tekutinách. Tyto počítačové simulace se neopírají o detailní obraz molekulárního chování, ale o popis na vyšší úrovni: jednoduchá pravidla popisující vybuditelnost, podstatnou vlastnost BŽ reakce, která ji umožňuje spustit, takže se vytvářejí obrazce nebo tikají chemické hodiny tam, kde by jinak bylo klidné médium.

Abychom si představili, jak může CA simulovat tvorbu chemických obrazců, myslíme si rozsáhlou dvojrozměrnou šachovnici, kde čtverce reprezentují jednotlivá reakční místa. Daný čtverec sleduje čtverce ve svém sousedství. Stav, do něhož se daný čtverec vývojem dostane, závisí na stavech v jeho bezprostředním okolí. Místo abychom zabředli do chemie, model bude popisovat stav čtverce - což může být receptivní, netečný nebo vybuzený (excitovaný) stav - celým číslem. Pokud je toto číslo nula, je bod receptivní, což znamená, že může být z klidového stavu vybuzen. V jiném případě je buď vybuzený (horní hranice) nebo netečný (všechna celá čísla ležící mezi nulou a horní hranicí). Netečné stavy samy mohou být vybuzeny do téhož excitovaného stavu.

Abychom mohli hrát tuto "hru" s celulárním automatem a vytvářet komplexitu, musíme zadat soubor transformačních pravidel, která říkají, jak se stav každého čtverce mění od jednoho okamžiku k druhému pod vlivem jeho sousedů. Pokud v daném místě nedojde k žádné excitaci, přiřazené celé číslo se zmenší o jedničku. Tímto způsobem se mohou objevit nádherné obrazce. Pokud každé hodnotě čísla na každém místě

přiřadíme barvu, můžeme přeložit digitální reprezentaci CA do pestrého obrázku na monitoru počítače.

Takové modely vymysleli Mario Markus a Benno Hess z Ústavu Maxe Plancka v Dortmundu. Avšak než mohli dospět k realistickým simulacím, museli překonat jednu odlišnost od skutečnosti, která je zabudovaná v dřívějších celulárních automatech. Molekuly mohou kmitat všemi směry, zatímco na šachovnici CA máme jen směry nahoru, dolů a do stran. Klasické obrazce vytvořené BŽ reakcí - a jinými vybuditelnými prostředními - jsou spirální vlny. Avšak pokud je použita šachovnicová CA mřížka, vznikají pravoúhlé počítačové obrazce. Použijeme-li šestiúhelníkovou mřížku, uvidíme šestiúhelníkové útvary: základní symetrie mřížky prosvitne v simulaci na povrch, právě tak jako domy postavené z cihel mají tendenci k obdélníkovému nebo čtvercovému tvaru.



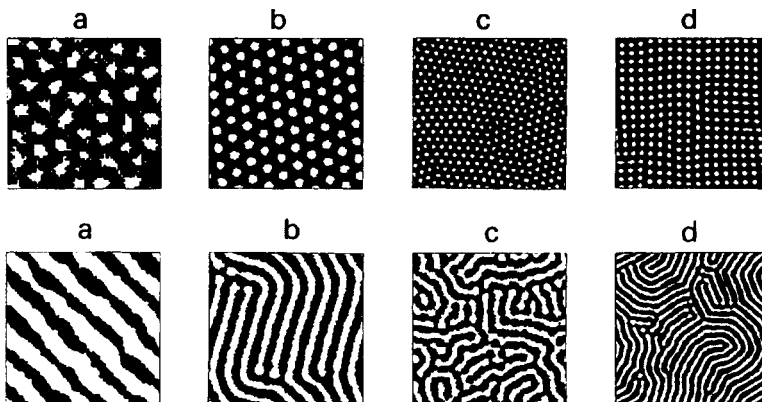
Obrázek 6.9 / Simulace chemických vln.

K simulování spirálních vln v obrázku 6.7 byly použity stochastické celulární automaty.

Řešení, na něž Marcus a Hess přišli, bylo udělat mřížku náhodnou, takže se stala efektivně izotropní; to znamená, že žádný soubor směrů nebyl pro molekulární pohyb preferován. To jim umožnilo simulovat široké spektrum jevů se spirálními vlnami, včetně deterministického chaosu, které byly v dobrém souladu s experimentálními pozorováními (srv. obr. 6.9 s obr. 6.7). Hranaté spirální vlny byly skutečně později vytvořeny v laboratoři, a to tak, že se reakce prováděla na krystalu rhodia: stejně jako podkladová mřížka CA vedla k vytvoření hranatých vln, tak rhodium vytvořilo pravoúhle vyhlížející vlny chemické koncentrace v reakci oxidu dusnatého (NO) a vodíku. Celulární automaty jsou nejen schopné simulovat známou makroskopickou komplexitu v nelineárním světě, ale dokážou ji i předvídat.

Tento přístup slavil úspěchy také při simulaci nepravidelných obrazců, jako jsou tečky a pruhy, kde tečky připomínají obrazce na těle geparda a pruhy vypadají docela jako různě zmagnetované domény,

které lze vidět v tenké vrstvě feromagnetického materiálu<sup>□</sup> (viz obr. 6.10).



Obrázek 6.10 / Stacionární Turingovy obrazce tvořené tečkami (nahore) a proužky (dole), které vytvořili M. Markus a H. Schepers v Dortmundu.

Ve spolupráci s Ingo Kuschem použil Markus celulární automaty také k modelování obrazců vyskytujících se na lasturách. Tyto obrazce se dají vysvětlit na základě celulárních automatů třídy IV, jak jsme je poznali ve 4. kapitole, které poskytují nepostradatelnou směs chaosu a řádu, zdobící schránky měkkýšů (viz obr. 6.11).

Obrázek 6.11 - Obrazce na ulitách (a) simulované pomocí celulárních automatů (b).

## Spatřit svět v zrnku písku<sup>175</sup>

Počítač nám dá nahlédnout ještě více do rozličných přírodních obrazců modelováním něčeho zdánlivě ještě jednoduššího, než je směs chemikálií v BŽ reakci. Lavina v kupě písku v kyberprostoru představuje paradigma pro povstávání komplexity, poskládané ze zdánlivě neuspořádané směsi mnoha rozličných procesů malého i velkého rozsahu. Tento proces se může uplatňovat stejně tak na

---

<sup>□</sup> Slovo „vidět“ není přehnané: skutečně se dají pod mikroskopem pozorovat. Kdysi se jim dokonce předvíдалo komerční využití pro tzv. bublinové paměti počítačů. Nedošlo k tomu proto, že pokrok v technologii hard- a floppy-disků byl rychlejší, (pozn. překl.)

<sup>175</sup> William Blake, „Auguries of Innocence,” 1, The Poetical Works of William Blake, J. Simpson(ed.)(1913).

finančních trzích jako u zemětřesení. Obrovský otřes může být završením předcházejících rázů a skluzů mnoha různých velikostí, jak dvě desky zemské kůry drhnou jedna o druhou. Podobně finanční krach, který přijde na miliardy, může být důsledkem příspěvků nesčetných faktorů různých velikostí, sahajících od výběru úspor jednou důchodkyní v Salt Lake City po válku v Evropě.

Podrobná analýza takovýchto "kaskádových" událostí se provádí dosti obtížně, protože zdánlivě malá událost může být pro výsledek stejně významná jako velká, stejně jako velbloudovi může stejně snadno zlomit páteř nepatrné stéblo jako těžko přehlédnutelný kamenný kvádr z Cheopsovy pyramidy. Zemětřesení, laviny a finanční krachy mají společný charakteristický rys: rozdělení velikostí událostí splňuje jednoduchý mocninný zákon. Vezměme si například laviny. Dojde-li v daném časovém intervalu k jedné události o velikosti 10 000, měřeno v nějakých libovolných jednotkách, potom dojde k přibližně 10 událostem o velikosti 1000, ke zhruba 100 událostem velikosti 100, k přibližně 1000 událostem o velikosti 10 atd. <sup>□</sup> Tento mocninný zákon znamená, že fyzika malých lavin je stejná jako velkých. Neexistuje žádná charakteristická časová škála, která by odlišovala chování události velkého rozsahu od událostí malého rozsahu.

Charakteristický rys spočívající v mocninné závislosti takových kaskádových událostí se dá odhalit prostřednictvím dvou různých, ale na sobě závislých "znaků": z fraktálního prostorového uspořádání míst, v nichž se událost odehrála, a z toho, že se objeví tzv. "třepetavý šum" (nebo  $1/f$  šum, kde  $f$  je frekvence výskytu), navenek náhodný průběh, který však nese mnoho informace. Ten dostaneme, když nakreslíme posloupnost událostí v průběhu času. Všudypřítomnost třepetavého sumuje jednou z největších záhad fyziky. Byl pozorován v tak rozdílných systémech, jako jsou odpory v elektronických obvodech, propadávání písku v přesýpacích hodinách, průtok Nilu a svítivost hvězd včetně našeho Slunce.<sup>176</sup> Podobné fluktuace se pozorovaly v

---

<sup>□</sup> Přesněji řečeno tento příklad popisuje mocninný zákon s exponentem rovným 1 ( $P(S) = S^{-1}$ ). Exponent ale může být libovolné číslo ( $P(S) = S^{-t}$  s exponentem  $t$ ). Například exponent 2 by znamenal, že bude průměrně 10 událostí velikosti 100, 100 událostí velikosti 1 atd. Význam hodnoty exponentu si lze zapamatovat pomocí tohoto pravidla: přidám-li k číslu udávajícímu velikost událostí jednu nulu, musím od čísla udávajícího průměrný počet událostí odebrat tolik nul, kolik činí exponent mocninného zákona, (pozn. překl.)

<sup>176</sup> W. Press, Communications in Modern Physics CI, 103 (1978).

ekonomických indikátorech, jako je Dow Jonesův index. □ Stejně záhadné je pozorování, že takové objekty jako jsou provazce kosmické hmoty natažené ve vesmíru, hornaté krajiny a čáry pobřeží vypadají jako soběpodobné fraktální struktury. Někdy uvidíme jak časové, tak prostorové fraktály: v turbulenci se vyskytují soběpodobné struktury v čase i prostoru.

Třepetavý šum se nedá vysvětlit obvyklým redukcionistickým přístupem, který se zaměřuje na individuální chování každého z milionů prvků komplexního systému. Jak říká Per Bak z Brookhavenské národní laboratoře, jeden z těch, kteří propagují nový přístup k analýze takových kaskád: "Globální rysy, jako je relativní počet velkých a malých událostí, nezávisejí na mikroskopických mechanismech. Z toho plyne, že globální rysy systému nemohou být pochopeny tím, že se jeho části budou analyzovat odděleně."<sup>177</sup>

Počítačové simulace prováděné Bakem a jeho kolegy v Brookhavenské národní laboratoři naznačují, že tyto typy událostí spojuje obecně platný "dominový efekt" všech možných velikostí a dob trvání.<sup>178</sup> Aby vysvětlili, proč se v takových událostech objevují znaky fraktálnosti a třepetavého šumu, pohlíželi si Bak a jeho skupina s pískem. Než by trávili čas na pískovišti, připravili raději počítačové simulace jedno-, dvoj- a trojrozměrných pískových kup s použitím modelů na bázi celulárních automatů. Tyto pískové kupy byly idealizované a skládaly se z krychlových zrnek stejné velikosti, přidávaných jedno po druhém. Poloha přidávaných zrnek byla zvolena náhodně, takže povrch rostoucí kupy byl nerovný. Když však výškový rozdíl mezi sousedními místy dosáhl mezní hodnoty - jinými slovy, když byl sklon příliš velký a kupa daleko od mechanické rovnováhy - mohla zrnka na povrchu sklouznout z vyšších oblastí do nižších. To mohlo zase nelineárním způsobem spustit další sesuv.

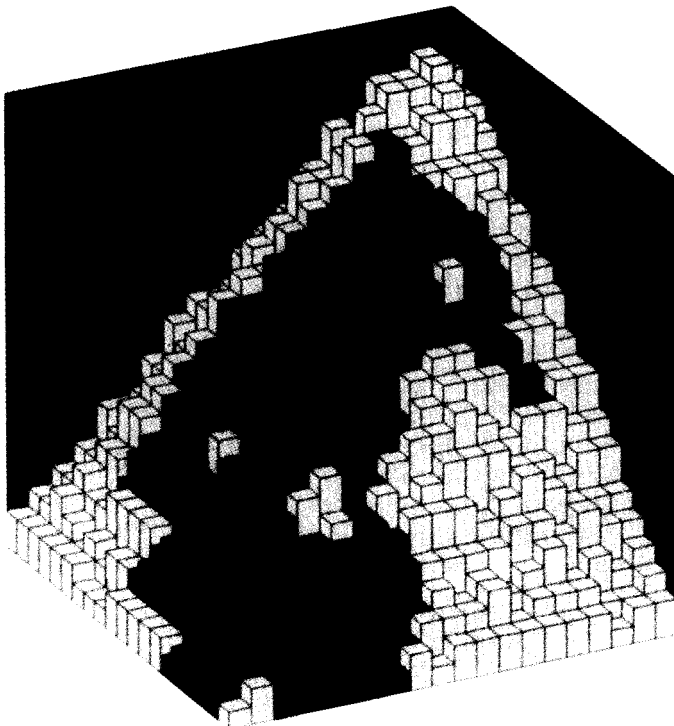
Bak a jeho kolegové vyzbrojení svými celulárními automaty zjistili, že během jejich počítačových simulací docházelo k samoorganizaci. Sklon pískové kupy se zvyšoval dál a dál, až se dosáhlo určité kritické hodnoty sklonu - tzv. synpého úhlu. Další zrnka přidávaná k této kupě vedla pouze k tomu, že povrchová zrnka klouzala pryč, a sklon zůstával

□ A přirozeně i v indexu PX50 pražské burzy: Jiří Hnilica, diplomová práce. Praha, VŠE 1999. (pozn. překl.)

<sup>177</sup> P. Bak and K. Chen, *Scientific American* 264, 26 (1991).

<sup>178</sup> P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, *Physical Review Letters* 59, 381 (1987). Jiný významný model byl zaveden v článku: M. Kardar, G. Parisi, and Y.-C. Zhang, *Physical Review Letters* 56, 889 (1986).

nezměněn. V počítačových simulacích v samoorganizovaném kritickém stavu stékal písek z kupy po jednotlivých zrnkách nebo ve velkých sesuvech nebo jako cokoli mezi tím. Bez ohledu na to, zda kupa začínala z příliš strmého nebo příliš plochého stavu, končila vždy v tomto kritickém stavu.



Obrázek 6.12 / Kritická lavina.

Tmavá zrna uprostřed obrázku představují cestu laviny, která byla spuštěna přidáním jednoho zrnka k této samoorganizované kritické pískové kupě.

Nejpřekvapivějším rysem tohoto samoorganizovaného stavu<sup>□</sup> je to, že nemá žádnou typickou délkovou a časovou škálu. Tak jako v případě fraktálních jevů a třepetavého šumu, žádná zvláštní velikost události

---

<sup>□</sup> Zde často dochází k omylu: toto ještě není ten kritický stav, o němž nám jde. Slovo „kritický“ má zde dva různé významy. Kritický sklon je v podstatě banální záležitost diktovaná vnějšími podmínkami a systém se k němu musí dostat vždy. Kritický stav, o němž se bude mluvit v dalších odstavcích, spočívá v něčem zcela jiném: v tom, že schází jakákoli typická délková a časová škála a objeví se fraktální tvary. Pro zamezení zmatkům by snad bylo vhodnější říkat „sypaný úhel“ než „kritický sklon“, jak se to koneckonců užívá v mechanice zemin, (pozn. překl.)



nebo frekvence nevyniká mezi ostatními. Pozoruhodné je, že v samoorganizovaném kritickém stavu je stejně pravděpodobné, že dvě události působí společně, ať se odehrávají blízko nebo daleko od sebe a bez ohledu na to, kolik času uplynulo mezi tím, co se objevila jedna a druhá. Fyzikům je velmi dobře známa tato nezávislost na vzdálenosti v prostoru a čase při jevu zvaném rovnovážné fázové přechody druhého řádu. Například v nádobě s oxidem uhličitým v jeho kritickém bodě se nedá žádným způsobem rozlišit mezi oblastmi, kde je plyn a kde je kapalina. Je tam jen jedno skupenství hmoty. Pohyb každé molekuly nádobou s tekutinou ovlivňuje stejnou měrou pohyb všech ostatních, bez ohledu na to, jak jsou vzdálené.<sup>179</sup>

Bakův model se snažil zkombinovat rovnovážný pojem kritična s nerovnovážným pojmem samoorganizace. Předmět jeho teorie se nazývá samoorganizované kritično a jejím konečným výsledkem je "samoorganizovaný kritický stav". Jakmile dosáhl sklon pískové kupy své kritické hodnoty, je poměrně obtížné ji narušit. Elegantní experimenty, při nichž byla zrnka písku sypána na vysoce přesné váhy, zjistily podobné chování u malých pískových kup.

Pomůže nám to představit si termodynamiku pískové kupy. Pokud by písek byl rozsypán po podlaze, po dosti dlouhé době by se dosáhlo rovnovážného stavu (bodového atraktoru). Avšak rostoucí písková kupa je daleko od rovnováhy. Zrnka písku v počítačových simulacích se chovají, jako by "spolupracovala": jednotlivé zrno může ovlivnit všechna ostatní. Neustálým přidáváním písku systém dospěje do kritického stavu, charakterizovaného dlouhými obdobími statického chování neboli stáze, přerušovanými náhlými výbuchy aktivity. Hromada se postupně stává strmější a uvolňují se větší a větší laviny, až hromada doroste do kritického sklonu, který produkuje laviny všech možných velikostí. Pokud se počítačový model přizpůsobí simulacím navlhlého písku místo suchého, strmost kupy se bude po krátkou dobu zvětšovat, až dosáhne nového kritického stavu, opět s lavinami všech velikostí.

Chování "bytostí" v Conwayově hře Life vykazuje také známky samoorganizovaného kritična. Per Bak, Kan Chen a Michael Creutz z Brookhavenské národní laboratoře studovali, zda počet "živých" buněk ve hře fluktuuje stejným způsobem jako velikost lavin v modelu pískové

---

<sup>179</sup> Potřebu zahrnout fyziku interakcí na všech délkových škálách ke správnému popisu kritických jevů jako první rozpoznal Kenneth Wilson z Cornell University, který k jejímu matematickému popisu zavedl takzvanou renormalizační grupu. Později (1982) za tuto práci dostal Nobelovu cenu za fyziku.

kupy. Jakmile se hra ustálila, dodali jeden organismus na náhodně vybrané místo, čekali, až se systém ustálí, a pak proceduru opakovali. Potom měřili celkové množství narození a úmrtí v "lavině" následující po každém dodatečném narušení systému. A ejhle, zjistilo se, že rozdělení splňuje mocninný zákon, což znamená, že se systém sám přivedl do kritického stavu.<sup>180</sup>

Charakteristické znaky samoorganizovaného kritična byly zjištěny u zemětřesení, což pomáhá vysvětlit jejich vývoj a rozdělení jejich epicenter. Epicentra menších zemětřesení - místa sklouznutí, která odstartují další sklouznutí, jež nakonec vytvoří otřes - nejsou na zemském povrchu rozmístěna rovnoměrně. Mapa Země ukazuje, že zemětřesení se objevují v provazcovitých sériích, které vypadají podobně na všech délkových škálách. Jinými slovy, jsou to fraktály. Teorie samoorganizovaného kritična předpovídá, že energie uvolněná během otřesu závisí na převrácené hodnotě frekvence, s níž se taková událost odehrává. Na této úrovni souhlasí časový obrazec zemětřesení se závislostí odpovídající samoorganizovanému kritičnu. Tato závislost je známá také jako Gutenbergův-Richterův zákon, což je mocninný zákon objevený geology Beno Gutenbergem a Charlesem Richtermem v roce 1956<sup>181</sup>.

Propojenost jevů založených na aktivitě mnoha jednotek, ať jsou to simulovaná zrnka písku nebo reálné molekuly, je zarážející. Samoorganizované kritično bylo mocnou pobídkou v úsilí nalézt základní podobnosti mezi rozdílnými komplexními jevy. Od té doby, co Bak a jeho kolegové ohlásili svůj model pískové kupy, strhla se lavina aktivity při honbě za příklady samoorganizovaného kritična. Tato módní vlna mezi teoretickými fyziky připomíná frenetický hon na podivné atraktory, který následoval po objevu Ruella a Takense. Dnes existuje mnoho příkladů, sahajících od sopečné činnosti a lesních požárů po tření, spirální řetězce polymerů, změnu odporu dýchacích cest během rozpinání plic a vodivosti izotopu hélia. Frekvence pulzarů a světla vysílaného kvasary vyhovuje podobnému fraktálnímu chování a třepavému šumu, s výbuchy všech velikostí. I ekonomika může vykazovat tento jev.<sup>182</sup> Když to všechno shrne a promítne do budoucna, cítí Bak, že tato myšlenka může vhodně vystihovat aspekty mozkové

---

<sup>180</sup> P. Bak, K. Chen, and M. Creutz, *Nature* 342, 780 (1989).

<sup>181</sup> P. Bak and C. Tang, *J. Geophys. Res.* 95, 15635 (1989); Z. Olami, H. Feder and K. Christensen, *Physical Review Letters* 68, 1244 (1992).

<sup>182</sup> P. W. Anderson, *Bulletin of the Santa Fe Institute* 4, 13 (1989).

aktivity: "V průběhu historie možná střídání válek a mírového soužití dovedly svět do kritického stavu, v němž se konflikty a sociální neklid šíří jako laviny. Samoorganizované kritično může dokonce vysvětlit, jak se informace šíří mozkiem. Nepřekvapuje, že náhlou velkou inspiraci mohou zažehnout malé události."<sup>183</sup>

Existují také skeptické hlasy, sahající od "no a co?" po polemiky o tom, zda tento jev vůbec existuje. Nepodařilo se například najít rozdělení podle mocninného zákona v reálných pískových kupách. "Zatímco teoretická přitažlivost samoorganizovaného kritična je mimo diskusi, jeho relevance pro dynamiku skutečného pískuje problematická," komentovali to britští experti na pískové kupy Anita Mehtaová a Gary Barker. Ačkoli stále pokračuje diskuse o tom, zda má co říci o skutečném světě, motiv samoorganizovaného kritična jsme našli na mnoha místech plátna pomalovaného přírodou. □

## Umělcův motiv

Rayleighova-Bénardova buňka elegantním způsobem demonstrovala rozhodující rys komplexity, že totiž samoorganizace je přirozeným důsledkem časového vývoje obrovských souborů jednoduchých jednotek, v tomto případě molekul v kapalině. Když se tyto jednotky nechají složitějším způsobem vzájemně působit, například prostřednictvím provázaných stupňů chemických reakcí v Bělousovově-Žabotinského reakci, můžeme vytvořit ještě větší rozmanitější chování a spirální struktury podobající se galaxiím, hurikánům a živým organismům. Je potěšitelné vidět, jak "programovatelná hmota" celulárních automatů dokáže napodobit tento proces a vytvářet přirozeně vypadající obrazce, což podtrhuje propojenost různých směrů při výzkumu komplexity.

Dávným snem, táhnoucím se od původních návrhů Alana Turinga, bylo spojit představy formování obrazců, vyvinuté pro poměrně snadno pochopitelné fyzikální nebo chemické systémy, se vznikem struktur a tvarů u živých bytostí.<sup>184</sup> Spektrum obrazců, které tvoří BZ reakce, se vyskytuje v živých organismech, pokud základní jednotky -ať už jsou to

---

<sup>183</sup> P. Bak and K. Chen, *Scientific American* 264, 32 (1991).

□ Snadno srozumitelný přehled výsledků v oboru samoorganizovaného kritična podává kniha: Per Bak, *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus Books, New York 1996. (pozn. překl.)

<sup>184</sup> M. Cross and P. Hohenberg, *Reviews of Modern Physics* 65. 1078 (1993).

molekuly nebo organismy - interagují nelineárně a nacházejí se v podmínkách velmi vzdálených od rovnováhy. Jak napsal teoretický biolog Art Winfree, BŽ reakce "sdílí mnoho rysů, které činí živé systémy zajímavými: chemický metabolismus, samoorganizovaná struktura, rytmická aktivita, dynamická stabilita v rámci svých mezí, nevratný rozpad, když se tyto meze překročí, a přirozená doba života". Teď přišla chvíle, abychom se podívali na samotný život.

# 7 Život, jak jej známe

Kdyby mezi všemi možnými světy nebyl jeden lepší než ty ostatní, pak by Bůh nikdy žádný nestvořil.

GOTTFRIED WILHELM VON LEIBNIZ

Biologové strávili velkou část 19. století hledáním jiskry života ve tkáních živých bytostí. Nikdy ji nenašli. Chemikové přišli s představou, že některé molekuly - ty "organické", založené na řetězcích uhlíkových atomů - jsou specifické pro rostliny a zvířata.<sup>185</sup> Brzy se však naučili tyto zdánlivě přirozené složky života připravovat z "anorganických" látek ve zkumavkách. Fyzikové, zaslepení druhou větou termodynamickou a její temnou předpovědí, že všechno spěje k náhodnosti a neuspořádanosti, tvrdili (mylně), že je divné, že život vůbec existuje.<sup>186</sup>

Díky obrovskému kolektivnímu úsilí biologů, chemiků a fyziků dnes máme úžasně podrobný obraz složitosti života. Fúze těchto disciplín vytvořila molekulární biologii, oblast zabývající se molekulárními základy života. Existují nesčetné příklady ohromující síly této redukcionistické vědy. Vezměme si Marfanův syndrom, potenciálně smrtelnou chorobu, spojenou s širokým spektrem symptomů: abnormální výškou, znetvořeným hrudníkem, očními problémy a s nebezpečným rozšířením tepen vedoucích k srdci. Roku 1991 bylo objeveno, že u těchto pacientů se tvoří neobvyklá forma jedné bílkoviny

---

<sup>185</sup> Materiály získané ze zvířat a rostlin byly klasifikovány a studovány odděleně od těch, které byly získány z minerálů, už od dob arabských alchymistů. Bergman roku 1790 poprvé zmiňoval „anorganická a organická tělesa“ a Berzelius roku 1806 poprvé použil termín „organická chemie“.

<sup>186</sup> Jak jsme viděli v 6. kapitole, druhá věta termodynamická říká, že každá změna v izolovaném systému v něm zvyšuje neuspořádanost. Živé organismy nejsou izolované systémy. Přijímají energii a hmotu z okolí a používají ji k udržování řádu uvnitř svých hranic; neuspořádanost nevyhnutelně v procesu vznikající je tím eliminována. Zvířata používají jako vstupující činitele kyslík a potravu; rostliny se zásobují oxidem uhlíčitým, kyslíkem, vodou a slunečním světlem. Důležitost tohoto aspektu života jako otevřeného systému mezi fyziky zdůrazňoval Erwin Schrödinger ve své knize *What Is Life?* (Cambridge University Press, 1944).

zvané fibrilin, nacházející se ve vazivové tkáni, která drží tělo, svaly a orgány pohromadě. V závislosti na tom, jaký přesně nastal molekulární defekt na genu fibrilinu, dochází k širokému spektru potíží, od očních po srdeční.

Nedávno byla objevena nádherná molekulární struktura viru slintavky a kulhavky (obr. 7.1), zhouby chovatelů dobytka. Struktura těchto nepatrných aktivních tělísek - kdyby se jich dal dohromady milion, měřily by právě tak jeden palec - byla zjištěna tak, že se studoval rozptýl záření na krystalech viru technikou rentgenové krystalografie. S použitím moderního rastrovacího mikroskopu s měřením síly, který má tak vysoké rozlišení, že dokáže zobrazovat samotné atomy, můžeme být svědky toho, jak se virus rodí, když opouští živou buňku. Laureát Nobelovy ceny Gerd Binnig a jeho kolegové pozorovali, jak virus opouští buňku, která sama o sobě měří pouze setinu milimetru, s použitím hrotu působícího silou jedné desetimiliontiny přitlaku gramofonové jehly.

Obraz, který poskytuje molekulární biologie, je neobyčejně přitažlivý a nabízí detailní pochopení mnoha aspektů života. Tyto rozsáhlé znalosti molekulárních procesů nám poskytují nevídané možnosti při léčení chorob, předcházení nemocem a při genetické manipulaci zemědělských plodin. Máme detailní znalosti o mnoha molekulách nepostradatelných pro život, ať jsou to jednotlivé bílkovinné molekuly plovoucí v buňce, struktura putujících virů nebo útržky genetického plánu, DNA. A víme, že manipulováním s těmito molekulami můžeme změnit běh života.

Obrázek 7.1 / Virus slintavky a kulhavky.

Právě kvůli pozoruhodnému úspěchu molekulární biologie intoxikovala redukcionistická doktrína mysl mnoha vědců. Jak napsal genetik z Harvardu Richard Lewontin, "ideologie moderní vědy, včetně moderní biologie, říká, že atomy a jednotlivé stavební součásti zcela určují všechny vlastnosti rozsáhlejších systémů. Předepisuje, jak se má studovat svět, a to tak, že jej rozřežeme na oddělené kousky, z nichž všechno plyne, a pak zkoumáme vlastnosti těchto izolovaných kousíčků." A tak se vyvinul populární názor, podle něhož jsme zcela v područí genetické výbavy, která se sama skládá ze samoreplikujících se molekul DNA, tak jak učí Richard Dawkins ve své knize *Sobecký gen*.<sup>187</sup>

---

<sup>187</sup> R. Dawkins, *Sobecký gen*, Mladá fronta, Praha 1998.

Ale i když je molekulární biologie mocná, není zdaleka všemocná. Již v minulé kapitole jsme ukázali, že čistě molekulární popis nestačí na vysvětlení komplexity mnoha chemických systémů, jako je Bělousovova-Žabotinského reakce, které jsou prototypem systémů biologických. Taková komplexita si vyžaduje analýzu spíše na makroskopické než na mikroskopické úrovni, protože je výsledkem interakcí mezi mnoha jednotkami, jejichž vlastnosti v izolaci od ostatních nám neřeknou téměř nic o důležitém globálním chování. Je to tak, život se dá pochopit jedině na této makroskopické úrovni. Formulovat nenapadnutelnou definici života je sice obtížné, ale jednou z jeho základních vlastností je nepochybně sebereplikace. Jak jsme již rozebírali ve 4.kapitole, von Neumann ve svých studiích o automatech předepsal logická pravidla sebereprodukce. Podtrhl důležitost minimální úrovně komplexity nezbytné k tomu, aby se stroj dokázal úspěšně replikovat, a zdůraznil potřebu přebytku informace a schopnosti vývoje, aby mohla být sebereprodukce udržována v proměnlivém prostředí.

Abychom se dozvěděli více o komplexitě, která je životu vlastní, potřebujeme prozkoumat, jak vyrůstá ze samoorganizace a evoluce. Potřebujeme zjistit, jak dochází ke koordinaci nesčetných součástí životních pochodů, a začneme s hledáním sebereplikující se chemie, z níž vyklíčil sám život. Není pochyb, že v tom kritickém okamžiku, kdy byl překročen předěl mezi neživými a biochemickými reakcemi, hrála rozhodující roli samoorganizace. Život není žádná náhoda.

Potřebujeme pochopit, jak tajné umění komplexity vedlo od provázaných "společenství" chemických reakcí ke komplexním společenstvím tvorů. Obrazce a struktury se dají rozeznat v chemii jednotlivých živých buněk, ve spolupráci milionů buněk v tlukoucím srdci, v evoluci druhů a jejich bohatého chování až po obrovský kotol propletených a prolínajících se živých a neživých procesů, z nichž se skládá naše planeta. Odhalením těchto obrazců se ozřejmí spousta souvislostí mezi různými obory. Turingovy a Bělousovovy-Žabotinského obrazce se objeví v biochemii buněk, v srdci, u podivných stvoření zvaných hlenky a u malého sladkovodního láčkovce nezma-ra. Průběhy hromadných vymírání a dalších přírodních katastrof mohou mít podobný základ jako laviny písku.<sup>□</sup> A s použitím počítačových modelů chování nalezneme účinné metody, jak darwinovským způsobem vysvětlit, jak se vyvinula spolupráce, styl chování, který je nám

---

<sup>□</sup> Samoorganizované kritično u hromadných vymírání popisuje tzv. Bakův-Sneppenův model biologické evoluce, (pozn. překl.)

nejpříjemnější a je přitom o to překvapivější, že přírodu si představujeme s krvavými zuby a drápy.

## Co je život?

Stejně jako v případě jiných termínů, o nichž v této knize hovoříme, jako jsou řád, nepořádek, emergence, vědomí a inteligence, je těžké definovat, co myslíme slovem život. Jedna slovníková definice popisuje život jako "vlastnost sdílenou živými objekty, která je odlišuje od neživých", jiná jej nazývá "stav bytí naživu". Podobné tautologie se často užívají ze zoufalství. Biologové však dovedou vyjmenovat celou řadu rysů, které mají téměř všechny živé bytosti. Kromě schopnosti rozmnožování je to existence genetické informace, komplexita, organizace a tak dále. Vždy se najdou výjimky. Například ne všechny předměty, které bychom považovali za živé, mají schopnost se rozmnožovat: neplodní muži, ženy po přechodu, mezci a viry, ti všichni se nedokážou sami rozmnožovat. Rýma je příkladem toho, jak obyčejný virus dokáže přesvědčit buňky v dýchacích cestách člověka, aby jej rozmnožily a rozšířily, i když sám není o mnoho více než útržkem genetického programu zabaleného v bílkovině. Neživé věci se také někdy chovají "jako živé". Například krystaly se během růstu dokážou sebereprodukovat.

Vynikající rakouský fyzik Erwin Schrödinger byl poněkud úspěšnější. Ve své knize *Co je život?* říká, že fundamentální vlastností života je vytvářet stále větší řád a zdánlivě nepravděpodobná uspořádání věcí, zatímco druhá věta termodynamická tvrdí, že když se věci ponechají samy sobě, mají tendenci skončit v nejpravděpodobnějším stavu neuspořádaného zmatku. S použitím vnějších zdrojů energie - slunečního světla, dopadajícího na povrch planety - tvoří život zdánlivě vysoce nepravděpodobné situace s nízkou entropií. Organizovaná komplexita existuje v živých systémech na všech úrovních, až k samotným molekulám, kde nacházíme atomy uhlíku, dusíku, kyslíku a fosforu uspořádané do nádherné dvojité šroubovice DNA. Aby vyrovnal svou bilanci, organismus neustále exportuje entropii dýcháním a vyměšováním a, jak říká Schrodinger, "neustále nasává uspořádanost ze svého okolí".<sup>188</sup> I zde však nastávají problémy s nejednoznačností,

---

<sup>188</sup> Erwin Schrödinger, *What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* Mind and Matter (Cambridge University Press, Cambridge 1967), str. 79.



protože tato definice by se dala stejně dobře použít pro samoorganizovanou chemickou reakci jako pro lidskou bytost.

Nejvíce udivující myšlenkou a zásadním opomenutím v mnoha učebnicových seznamech rysů života je poznání, že život je nerozlučně spojen s evolucí<sup>189</sup>. Na této myšlence je založena jedna z nejobecnějších pracovních definic, přijatá exobiologickým programem Národní agentury pro letectví a vesmír (NASA): život je chemický systém schopný sebe sama udržovat, v němž probíhá darwinovská evoluce. Tento předpis zahrnuje procesy sebereprodukce, materiální kontinuitu v historické posloupnosti, genetickou variabilitu a přírodní výběr.

Abychom definovali život, musíme přesunout důraz od přežívajících jedinců a sobeckých genů k vyvíjejícím se systémům. Evoluce je vlastnost, která nepřísluší jednomu individuu nebo genu, ale celému systému, a nesmírně nám pomáhá tím, že ukazuje od izolovaných jednotek ke vztahům mezi jednotlivci navzájem a k prostředí, v němž žijí. Někteří, jako britský vědec James Lovelock, naznačují, že život a okolní prostředí jdou ruku v ruce a vytvářejí jediný seberegulující se planetární superorganismus, zvaný Gaia.<sup>□</sup>

## Chybějící článek

Dávné představy o tom, jak povstal život, nerozlišovaly mezi původem života a původem obrovské rozmanitosti forem, které na naší planetě běhají a rostou. Bůh, tím jak stvořil svět plný živých bytostí, dodal obojí současně. Avšak v 19. století druhý z těchto problémů vyřešil Charles Darwin, aniž by se přitom nějak odvolával na Boha, i když samotný původ života nijak neosvětlil. Darwin dospěl k závěru, že všechny současné druhy mají společné předky, kteří existovali před dávnými věky. Původ druhů spočívá v proměnách způsobených náhodnými mutacemi a v selekci prostřednictvím boje o omezené zdroje.

Molekulární biologie dodala Darwinovým myšlenkám mocnou podporu tím, že odhalila, jak všechny živé bytosti užívají tentýž druh genetického "programování". Život má tak rozmanité formy jednoduše díky variacím v jisté třídě gigantických molekul nukleových kyselin, DNA a RNA. Jak DNA, tak RNA uchovávají genetickou informaci ve

---

<sup>189</sup> M. Eigen, *Steps Towards Life* (Oxford University Press, 1992), str. 39.

<sup>□</sup> J. Lovelock, *Gaia: Živoucí planeta*. Mladá fronta, Praha 1994.

formě nukleotidů, chemických jednotek, které jedna za druhou skládají páteř těchto makromolekul. Existují sice pouze čtyři různé nukleotidy, mohou však vytvářet v podstatě neomezenou různorodost zakódovaných "zpráv", v závislosti na jejich uspořádání podél molekuly DNA, podobně jako písmena ve slovech a větách. Zprávy, to jsou geny, které dodávají specifické instrukce pro stavbu bílkovin, nezbytných pro život na naší planetě. Tato chemická podoba informační techniky se může zdát omezená, ale uvědomme si, že i moderní počítače používají dvoupísmenový jazyk dvojkové aritmetiky (0 a 1). Chromozomy, které nesou DNA v jádře jediné lidské buňky, mají tolik kapacity pro ukládání informace, že by obsáhly všech třicet svazků díla Encyclopaedia Britannica třikrát nebo čtyřikrát.<sup>190</sup>

Molekulární etymologie dokáže osvětlit organizaci genetické výbavy jednotlivce, jeho genomu. Kvantitativní odhady a experimenty ukazují, že adaptace jednotlivých genů k provádění daného úkolu se ve skutečnosti odehrála dříve, než byly vtěleny do gigantické molekuly genomu, o níž se předpokládá, že se nacházela ve slavném nejstarším společném předkovi. Příčina spočívá v obrovské délce genomu: současná frekvence chyb při transkripci genů se přizpůsobila genomu dlouhému tři miliardy genetických "písmen", a podstatně se tak snížila, aby se zabránilo šíření příliš mnoha chyb. Kdyby tak malá frekvence chyb při replikaci byla typická pro izolované individuální geny, jejich evoluce by se drasticky zpomalila a nebyly by schopny provádět své specifické funkce tak efektivně, jak to dělají dnes.

Tyto změny v DNA a RNA se dají použít pro měření evolučního času. Srovnáním genetického materiálu živých a vymřelých druhů molekulární biologové zjistili, že DNA a RNA mutují dosti stálou rychlostí během dlouhých období. Mutace nakonec daly vzniknout druhům tak rozdílným, jako jsou lišky a lišejníky. □ Tyto procesy umožňují definovat evoluční "hodiny", které tikají rychlostí odpovídající frekvenci mutací. Tyto hodiny můžeme nařídít podle přesně datovaných fosilií a pak je použít při odhadech doby, kdy se jeden druh odštěpil od druhého.<sup>191</sup>

---

<sup>190</sup> R. Dawkins, *The Blind Watchmaker* (Longman, Harlow 1986), str. 116.

□ Takto překládáme malou slovní hříčku „leeches and lichen“, doslova „píjavky a lišejníky“, (pozn. překl.)

<sup>191</sup> Tento přístup byl použit k odhadu, že genetický kód nemůže být starší než asi 3,8 miliardy let.

Sám Darwin nevěděl, kdy začal běžet biologický čas. Avšak dopis, který napsal roku 1871, ukazuje, že s touto myšlenkou zápasil: "Ale kdyby (a jak veliké kdyby to je!) se nám podařilo představit si, jak v nějaké teplé malé tůnce se všemi možnými dusičnany a fosforečnany, světlem, elektrinou atd. se chemicky zformuje bílkovinná sloučenina, připravená podstupovat ještě složitější změny." Vědci, kteří dnes pokračují v Darwinově úsilí, mají dost důkazů o tom, že bakterie jsou nejstarším ještě přežívajícím článkem tohoto velkého řetězce života. Nestarší známé zkameněliny se nacházejí v australských horninách vzniklých asi před 3,5 miliardami let, kde zůstalo uvězněno cosi, co vypadá jako nejrůznější druhy bakterií.

Roku 1988 James Lake z Kalifornské univerzity v Los Angeles zveřejnil výsledky důmyslného cvičení s genetickými rodokmeny. Vyplývá z nich, že nejmladší společný předek všech živých bytostí byla pravděpodobně jednobuněčná sírná bakterie, která se ze všeho nejraději vyhřívala v horkých pramenech při teplotě varu vody. Jeho pokus odhalit genealogické vztahy u kořenů evolučního stromu byl jedním z předběžných pokusů, jejichž cílem bylo stanovit vztahy mezi všemi známými druhy života na Zemi.<sup>192</sup> Soupeří s konkurenčním stromem, který nakreslili Carl Woese z Illinoiské univerzity v Urbane, Otto Kandler z univerzity v Mnichově a Mark Wheelis z Kalifornské univerzity. Jejich tábor, který si získal širší podporu, propaguje schéma s třemi hlavními seskupeními živých bytostí, které dostali tak, že rozdělili bakterie do dvou skupin a všechny ostatní organismy spojili v jednu. Ať je to jakkoli, bakterie nepředstavují první krok; jsou spíše tím nejstarším ze všech článků řetězce života, které přežily až do dnešních dnů.

Zdá se tudíž vysoce pravděpodobné, že před dávnými a dávnými časy žily na světě ještě jednodušší formy života. Úkolem je nyní zrekonstruovat pár z těchto ještě starších, ale neviditelných článků, které byly evolučně úspěšné v době, kdy se objevily, ale později byly

---

<sup>192</sup> Lake provedl detailní analýzu genetického materiálu nacházejícího se v „továrnách“ na výrobu bílkovin. Nazývají se ribozomy a jsou společné všem typům buněk vyskytujících se v přírodě. Tradičně se třídy buněk dělí do dvou skupin. Jednu představují prokaryota, která nemají buněčné jádro. Mezi ně patří běžné bakterie a „archebakterie“, které přežívají v extrémních stanovištích, jako jsou místa nasycená solí (halofilní bakterie), v horkých pramenech (eocyty) a v bezkyslíkatém prostředí sedimentů, kde se daří bakteriím produkujícím metan. Druhá skupina jsou složitější buňky, které obsahují jádro. Nazývají se eukaryota a zahrnují živočišné a rostlinné buňky. Lakeova analýza naznačila odštěpení jedné skupiny archebakterií, eocytů, a jejich umístění blíže eukaryotům. V důsledku toho navrhl, že eukaryota a eocyty se mají seskupit do „karyot“, kdežto ostatní se mají seskupit do „par-karyot“.

vytlačeny. Tyto články pocházejí z období mezi zformováním Země před zhruba 4,6 miliardami let a dobou o miliardu let pozdější, kdy se Země zahemžila organismy připomínajícími ty, kterým dnes říkáme sinice.<sup>193</sup> Jelikož mezi námi a nejstaršími biologickými počátky leží celé věky, točí se kolem původu života velké množství spekulací a bouřlivých debat. Pokud jde o detaily, je mnohé z toho, co rozebíráme v této kapitole, téměř jistě špatně. Ale pojmový rámec, který tím získáváme, je dostatečně pevný, aby umožnil studovat samotný život v počítači, což je oblast, které se budeme věnovat v příští kapitole.

Studium počátku počátku

Ve 20. letech se zrodila myšlenka, že k vysvětlení původu života stačí rozumně vypadající chemické a fyzikální procesy, které kdysi dávno na Zemi probíhaly. Povstávání organizovaného života rozebíral v epochální stati o původu života, publikované roku 1924, Alexander Ivanovic Oparin. Jako příklad používal námrazu na okenní tabulce, která vypadá jako "ledové květy", i když se skládá pouze z molekul vody.<sup>194</sup> "Tyto částice, poslouchající věčné přírodní zákony, které jsou stejné jak pro živé, tak pro mrtvé, se poskládaly v určitém pořádku a na prosté okenní tabulce vytvořily obrazy pohádkových zahrad, třpytících se ve slunečním svitu všemi barvami duhy."

Vědecky fundovaným způsobem začal Oparin pomocí týchž zákonů vysvětlovat, jak mohou z "organických" molekul (tedy molekul obsahujících uhlík) vznikat struktury živých bytostí. Ve 30. letech Oparin a J. B. S. Haldane zdůrazňovali, že organické sloučeniny nezbytné pro vznik života by se nevytvořily, kdyby v atmosféře bylo tolik kyslíku, jako je tomu dnes. Místo toho přišli s tím, že atmosféra mladé Země byla redukční, tedy bohatá na vodík, metan a amoniak.<sup>195</sup> Pak následovala pauza až do roku 1953, kdy nastala první renesance studia počátku života. Stanley Miller, v té době student v laboratoři Harolda Ureye na Chicagské univerzitě, si položil otázku, jaké chemické děje by se mohly odehrávat v takové redukční atmosféře.<sup>196</sup>

---

<sup>193</sup> L. Orgel, *Scientific American* 271, 53 (1994).

<sup>194</sup> A. Oparin, *Proischoděnije žizni*, (Moskva, Moskovskij rabočij 1924). Viz sborník: D. Deamer and G. Fleischaker, *Origins of Life: The Central Concepts* (Jones and Bartlett, Boston 1994).

<sup>195</sup> Vědci později uvažovali tak, že jelikož vodík je ve sluneční soustavě běžný, musela raná atmosféra být redukční a ne oxidační - tedy že nejběžnější biogenní prvky uhlík, kyslík a dusík se vyskytovaly v hydrogenové nebo redukční formě.

<sup>196</sup> S. Miller, *Science*, 117, 528 (1953).

Vytvořil prvotní svět s použitím dvou spojených nádob. Ta spodní obsahovala "oceán" vody, kdežto v horní nádobě byl guláš jednoduchých chemikálií, o němž se tou dobou mysliło, že se podobá prvotní atmosféře. Když Miller nechal procházet touto atmosférou výboje umělého blesku, zjistil, že "voda v nádobě první den zřetelně zřůžověla a koncem týdne byl roztok tmavě červený a kalný". Obsahoval určité aminokyseliny, stavební kameny bílkovin, podstatných pro život, jak jej známe.

Od té doby se nashromáždilo značné množství výsledků, získaných Cyrilem Ponnampemou, Leslieem Orgelem ze Salkova ústavu v San Diegu, Sidneyem Foxem z univerzity v Miami a dalšími, které ukazují, že se podobným způsobem dá připravit široké spektrum biologicky významných molekul včetně nukleových kyselin a molekul sloužících k uchování energie, jako jsou adenosin trifosfát (ATP) a cukry. Další se dají vytvořit s pomocí světla nebo pomocí jílu jako katalyzátoru. A i kdyby na dávné Zemi chybělo několik klíčových složek, astronomové ukázali, že by do tohoto guláše napadaly z vesmíru. Ukázalo se, že uhlíkaté chondrity, což jsou meteority, o nichž se myslí, že jsou to shluky prachu, z něhož se vytvořila sluneční soustava, obsahují mnohé z těchto jednoduchých organických sloučenin.<sup>197</sup> Díky látkám vyrobeným na Zemi nebo importovaným z vesmíru měl život na začátku k dispozici široké spektrum materiálu.

Principy chemické samoorganizace nám pomáhají spekulovat o tom, podle jakého receptu by se mohl objevit život. Pokud v pre-biotické polévce na dávné Zemi fungoval vhodný zpětnovazební mechanismus, který mohl zodpovídat za nelinearity, pak už obecně řečeno nic nebrání vzniku samoorganizace. Například pokud by nějaká molekula v takové polévce katalyzovala svou vlastní replikaci, pak by se s velkou pravděpodobností objevila nelineární zpětná vazba, charakteristický znak samoorganizace. To by mohlo vést k narušení prostorové stejnorodosti prostředí a začaly by se objevovat rytmy a obrazce (způsobem do značné míry podobným tomu, který navrhl Turing v roce 1952), právě tak jako je tomu u prostorových obrazců chemických hodin.

Podstatnou složkou prebiotické polévky se tak stává samoreplikující se molekula (nebo molekuly), která katalyzuje svou vlastní výrobu. O takových molekulách jste již jistě slyšeli. DNA je v přírodě nejznámější samosestavující se a samoreprodukující se superstruktura. Její slavná

---

<sup>197</sup> J. D. Bernal, *Origin of Life* (Weidenfeld and Nicholson, London 1967), str. 8.

dvojitá šroubovice je pozorovatelná pomocí rastrovacího tunelovacího mikroskopu, jak ukázal jeden tým z Cal-techu (viz obr. 5 barevné přílohy). Zdá se rozumné představit si, že první primitivní formy života byly "nahé" geny, kratší sekvence nukleotidů se schopností množit se bez cizí pomoci. Nepředstavitelnou rozmanitost živé hmoty v přírodě umožňují schopnosti samosestavení, samoreplikace a samoorganizace, které se v těchto molekulách skrývají.

Proto je v mnoha studiích o počátku života ústředním problémem pochopit první sebereplikující se materiál nesoucí informaci, "první gen", který představuje evoluční článek mezi neživými molekulami a živými buňkami. Jelikož nemáme žádné důkazy ve zkamenělinách, je hledání nahého genu spíše hledáním možného než pravděpodobného. První fungující bílkoviny se snad replikovaly přímo; "vynalezly" nukleové kyseliny a nakonec jimi byly ztročeny. Jiná možnost je, že dávné nukleové kyseliny nebo příbuzné molekuly se replikovaly přímo a pak "vynalezly" syntézu bílkovin. Mohlo se stát obojí; to znamená, že se možná replikace nukleových kyselin a genetické kódování bílkovin vyvinuly souběžně. A je také možné, že nejstarší formy života byly možná založeny na nějakém anorganickém nebo organickém systému odlišném od bílkovin nebo nukleových kyselin.

## Nahý gen

Předpokládejme na chvíli, že je možné pospojovat molekuly DNA nebo její nevlastní sestry RNA z vhodných kratších nukleotidových surovin. Nějakou dobu se myslelo, že tyto molekuly nemohou být kandidáty na nahé geny. Ačkoli jsou vybavené k uchování genetické informace, ani DNA, ani RNA se nezdály dosti chemicky pružné, aby řídily svou vlastní replikaci. Problém se ještě prohloubil tím, že se molekulární biologové nechali svést na špatnou stopu studií způsobu, jak tyto molekuly fungují v živých bytostech: jak to vyjadřuje sloganem "DNA dělá RNA, RNA dělá bílkovinu".<sup>198</sup> Genetická informace proudí z DNA do bílkovin prostřednictvím RNA, která je pouhým poslíčkem, který přenáší informaci do ribozomů, kde se vyrábějí bílkoviny.

---

<sup>198</sup> Ústřední dogma molekulární biologie, vytyčené Francisem Crickem v roce 1958, vyhlásilo jednosměrný a nevratný tok chemických instrukcí od DNA k RNA a z RNA k bílkovině: „Přenos informace od nukleové kyseliny k nukleové kyselině nebo od nukleové kyseliny k bílkovině je možný, ale přenos od bílkoviny k bílkovině nebo od bílkoviny k nukleové kyselině je vyloučen.“ F. Crick, Symp. Soc. Exptl. Biol. 12, 138 (1958).

Bílkoviny byly protagonisty jiného módního dogmatu: enzymy, které urychlují biochemické reakce, i vnitřní stavební kameny buněk, všechno jsou to bílkoviny. Těm, kteří hledali nahý gen, který přímo katalyzoval svou vlastní produkci, se zdálo, že to vylučuje nukleové kyseliny: nahý gen musela být bílkovina.

Pak se ale zjistilo, že některé viry obsahují genetický plán zapsaný v RNA. Osmdesátá léta byla svědkem dramatického vzrůstu našich znalostí o chemických schopnostech RNA, které tuto molekulu postavily do centra dění v raném stadiu evoluce. Molekulární biologové objevili, že RNA si může dopřávat určitý druh komplikované chemie, spojované dříve výlučně s bílkovinami. Najednou bylo jasné, že zatímco silnou stránkou DNA může být uchovávání genetické informace a že bílkoviny mohou být dobrými enzymy, pouze RNA dokáže obojí. Objevila se myšlenka, že "na počátku" jak genetickým materiálem, tak katalyzátorem byla RNA. Ti, kteří se vydali na cestu hledání původu života, byli najednou posedlí "RNA světem". Tvrdili, že dnešní svět DNA vyrostl ze světa RNA, tak jako psaná kultura vyrůstá z ústní tradice, přičemž DNA účinkuje jako trvalý záznam toho, co se stalo předtím.

Světónázor postavený na RNA spočíval na dvou starších náznacích fundamentální role RNA. Prvním je to, že všechny buňky tvoří DNA nikoli z ničeho, nýbrž pozměňováním podjednotek RNA. To naznačuje, že prvotní buňky tvořily RNA mnohem dříve než DNA. Za druhé, mnoho konvenčních enzymů založených na bílkovinách může fungovat jen společně s menšími molekulami, které se nazývají koenzymy a jsou z velké části buď nukleotidy RNA, nebo jejich blízcí příbuzní. To naznačovalo, že koenzymy jsou pozůstatky dávných RNA enzymů. Kdyby se jako první vyvinuly enzymy založené na bílkovinách, dalo by se čekat, že koenzymy budou vytvořeny z aminokyselin, podjednotek bílkovin, spíše než z nukleotidových podjednotek RNA. Byly to však jen náznaky. Vědcům chybělo pochopení toho, co vedlo k opuštění RNA světa a k růstu světa DNA. A hlavně neměli dostatečný důkaz, že by RNA mohla být základem života.

To se všechno změnilo v roce 1982, který zažil druhou renesanci studia počátků života. Thomas Cech z Coloradské univerzity překvapil biology tím, že objevil molekuly RNA s katalytickými schopnostmi v jednobuněčném prvokovi zvaném *Tetrahymena*. O rok později Sidney Altman a jeho kolegové z Yaleovy univerzity objevili RNA enzym neboli ribozym, když zkoumali dobře známou střešní bakterii zvanou

*Escherichia coli*. V té době se to považovalo za druh živé molekulární zkameněliny - pozůstatek RNA světa, kdy ještě RNA hrála podvojnou úlohu genu a enzymu. Přišlo to však jako překvapení, jak poznamenal Leslie Orgel: "Když jsme Francis Crick, Carl Woese a já přišli na konci 60.let s tím, že RNA tu byla jako první, vůbec nás nenapadlo, že tady jsou ještě pořád RNA enzymy, které se nacházejí v živých organismech." Pak zapadly do skládačky další kostičky. Altman a Cech se roku 1989 dělili o Nobelovu cenu za chemii za to, že zavedli RNA světonázor. "Svět založený na RNA představuje náš základní tábor," říká Orgel. "Místo abychom měli jeden obrovský problém, odkud se vzaly organismy, můžeme si jej rozdělit na dva podproblémy: (a) odkud se vzal RNA svět a (b) jak se z něj vyvinul svět s bílkovinami a DNA? Je to jednodušší, než se snažit udělat všechno najeden zátah."

## Evoluce ve zkumavce

Při objasňování toho, co se stalo před třemi miliardami let, když prvotní chemické dění v blátivé kaluži vyústilo v první samorepliku-jící se předchůdce života, používají chemikové ještě další postupy. Jejich společným rysem je snaha najít chemii dostatečně bohatou na to, aby dala vzniknout provázanému systému nukleových kyselin a bílkovin. V průkopnické práci publikované v roce 1986 vytvořil Gunter von Kiedrowski krátké řetězcovité molekuly (oligonukleotidy), sestavené z týchž nukleotidových bází, které se vyskytují v DNA, a ukázal, že jsou schopny se ve vodě samy replikovat. V laboratoři na Massachusettské technice vytvořila skupina Julia Rebeka jiné chemické reakce s jistými biologickými rysy, které představují další úžasný krok vpřed v oboru, který Rebek nazývá "extrabiologie". Je to přístup k chemii "zdola nahoru", snaha namíchat něco, co se bude chovat jako živé: "Naším cílem je vyjádřit biochemické jevy, jako jsou replikace, regulace, přeprava a skládání pomocí syntetických molekul. Pokud se objeví chování, které se nepodobá ničemu, co je v přírodě, cosi, co ještě neumíme pojmenovat, pak tím lépe."<sup>199</sup>

Rebekův tým své hledání začal asi před deseti lety tím, že se snažil připravit od úplného začátku molekuly, které by měly schopnost sebe-replikace. Aby se objevila sebereplikace, musí nastoupit molekulární rozpoznávání: v podstatě je to tak, že chemické složky musejí na sebe

---

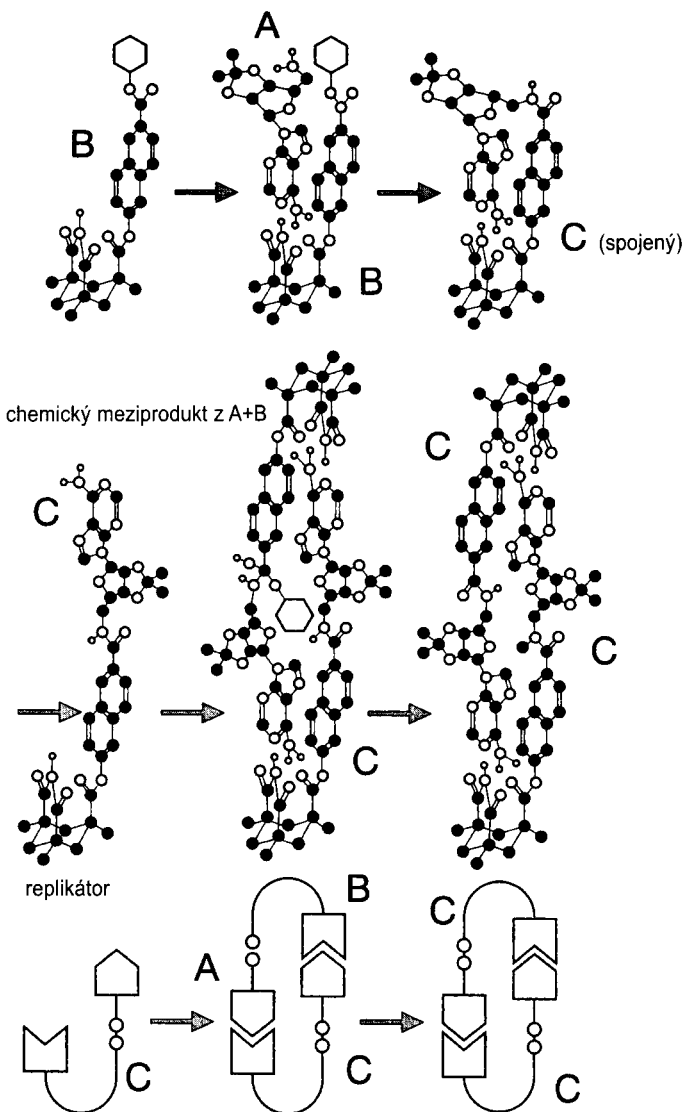
<sup>199</sup> J. Hong, Q. Feng, V. Rotello, and J. Rebek, *Science* 255, 848 (1992).



navzájem působit ještě předtím, než k něčemu vůbec dojde. S použitím metod počítačového modelování studoval Rebekův tým základní principy, které rozhodují, zda se jedna molekula spojí s druhou, od rozdělení elektrického náboje po celkový tvar. Na obrazovce mohli manipulovat s grafickými modely molekul a zkoušet, zda se k sobě hodí jako hostitel k hostovi, tak jako by navrhovali rozeklané kostičky puzzle.

Dva roky nato dosáhla jeho skupina svého prvního úspěchu. Recept na sebereplikaci spočíval v molekulách, které by se k sobě jen lehce přilepily a pak pokračovaly v tvorbě trvalejších chemických vazeb. Odtud vedla cesta k jednoduché sebereplikující se sestavě, skládající se ze tří molekul: molekuly A a B mají struktury zajišťující, že se spojí s rodičovskou či vzorovou molekulou C. Vzájemná poloha A a B, když jsou připojeny k C, vede k tomu, že se A a B spojí a vytvoří kopii C. Tato kopie C může povzbudit další molekuly A, aby se spárovaly s molekulami B atd., což působí jako autokatalyzátor. Replikace pokračuje, dokud se nevyčerpá zásoba molekul A a B.

Jsme-li navíc schopni zavést do takového jednoduchého procesu schopnost evoluce, pomáhá nám to vidět život méně jako náhodu, ale spíš jako něco, co se dalo očekávat. V jednom dalším krůčku tímto směrem se Rebekově skupině podařilo zavést do svých molekulárních her "mutanta". Vyvinuli nový systém, v němž efektivnější molekulární replikátory vítězily za přítomnosti ultrafialového světla, právě tak jako by ve slunném prostředí kmen bakterií odolných vůči světlu předhonal na světlo citlivou variantu. V tomto případě dvě různé molekuly B a B1 mohly vést k poněkud odlišným rodičovským molekulám C a C1. Nyní existovaly soupeřící populace C, které soutěžily o zdroje A, B a B1.



Obrázek 7.2 / Rebekův chemický replikátor. Molekuly A a B se spojují tak, aby vytvořily replikátor C prostřednictvím reaktivního meziproduktu. Tento replikátor má strukturu, která mu umožňuje spojovat se s jednou další molekulou A a s jednou B, čímž usnadňuje jejich přeměnu na nový replikátor a tak dále. Dole jsou schematicky znázorněny tři koncové kroky.

Výsledná populace mutantních RNA pak byla postavena před katalytickou úlohu: rozštípnout DNA. Pokud by určitý mutant ribozymu byl schopen rozštíhnout DNA vhozenou do směsi, vtělil by do sebe část svého substrátu - DNA. Tato "značka" umožňovala výzkumníkům identifikovat "vhodné" ribozymy a pro další fázi cyklu je znásobit. Výzkumníci znovu znásobili ribozymovou směs, tentokrát s použitím polymerázové řetězové reakce, <sup>□</sup> PCR, což je široce využívaná metoda na množení útržků genetického kódu za účelem získání dostatečného množství materiálu k dalšímu použití. Během tohoto druhého kroku, násobení, bylo úspěšným ribozymům dovoleno mutovat, a to tak, že se zajistilo, aby PCR dělala chyby, aniž by se nějaká určitá chyba preferovala. Po dvou dnech vytvořili Joyce a Beaudry zcela novou populaci ribozymů. Po dvaceti pracovních dnech se objevila desátá generace, která obsahovala enzymy, které stříhaly DNA stokrát účinněji než počáteční molekula. Ačkoli to můžeme interpretovat jako mírné zlepšení, znamená to ve skutečnosti neobyčejný úspěch: vzniklý enzym byl úplně první, který byl adaptován ve zkumavce pomocí evoluční techniky.

Tato studie korunuje roky intenzivního zájmu o svět RNA a o tvorbu nových biologických molekul prostřednictvím náhodných změn, namísto změn specifických a cílených. Je jasné, že k vylepšování účinku ribozymální aktivity je takovýto darwinovský nebo "genetický" přístup nezbytný. Vypočítat racionálním způsobem, která místa v molekule musejí být mutována, je NP problém, ležící zcela mimo dosah matematiky používající papír a pero. Přírodní výběr může připadat jako podvod vědcům, kteří chtějí dělat objevy pouhopouhou skvělou dedukcí. Avšak způsob, jak k takovým molekulárním strukturám dojít jednoduchým algoritmem, neexistuje. To se ukázalo ještě jasněji, když Beaudry a Joyce analyzovali výsledky své hazardní hry s molekulami. Molekuly, které fungovaly nejlépe, měly mutace na zcela nečekaných místech. A některé, jejichž význam ze začátku rostl, v delším běhu vymizely, protože nedokázaly soutěžit s jinými molekulami (viz obr. 6 barevné přílohy).

K vývoji nových léčiv využívaly farmaceutické firmy tradičně poznatky, které předpokládají redukcionistickou metodologii. K hromadné výrobě žádané bílkoviny v bakteriích používají genové inženýrství - pokud zjistili genetický kód bílkoviny. Jinou možností je tzv. "racionální návrh", kdy molekulu navrhuje počítač tak, aby působila

---

<sup>□</sup> Polymerase chain reaction (pozn. překl.)

na aktivní místo, obvykle na nějakém enzymu - pokud je známa struktura tohoto místa. Nepřirodní výběr (neboli "iracionální návrh") nabízí při hledání nových léčiv jednu obrovskou výhodu. Vědci nyní mohou vyvinout lék bez toho, že by se zabývali řadou matoucích podrobností ohledně jeho fungování na molekulární úrovni. Vše, co je potřeba, jsou tři hlavní složky darwinovské evoluce: mechanismus vnášení náhodných mutací do dané populace molekul, selekční tlak, který dává přednost některým jedincům před jinými, a "množivý" mechanismus, jenž podněcuje preferované jedince k replikaci. Krátce, princip je takový, že se na daný problém pustí biliony molekul a počká se, až se ty "nejzdatnější" vyberou samy prostřednictvím evoluce. Tímto směrem se nyní vydalo mnoho dalších badatelských skupin zabývajících se např. vývojem DNA k potlačení přírodního činidla způsobujícího srážení krve, což je dnes jedna z nejplodnějších oblastí současné biotechnologie.

Není bohužel ještě zřejmé, jak udělat s bílkovinami totéž, co dokázal Joyce s molekulami RNA. Jádro věci spočívá v tom, že nikdo nikdy nedokázal zpětně přeložit bílkovinu do RNA. Sydney Brenner z Laboratoře molekulární biologie Rady pro lékařský výzkum v Cambridgi a Richard Lerner ze Scrippsova výzkumného ústavu nedávno začali studovat jeden možný způsob, jak tento problém překonat. Uchýlili se k vytváření "hybridních" molekul, z nichž každá sestávala ze dvou částí, jednou byl fragment bílkoviny (zvaný peptid), ta druhá byla "gen". To poskytlo Brennerovi a Lernerovi z každého z těchto dvou světů to nejlepší. Umožnilo jim to selektovat molekuly podle chemické "zdatnosti" jejich peptidového ramene a pak je množit s použitím připojeného "genu".<sup>200</sup>

## Teorie, počítače a původ života

Vznik, evoluce a pád světa RNA se možná odehrály v minulosti vzdálené 4,2 až 3,6 miliardy let, podle jedné z vědeckých verzí knihy Genesis.<sup>201</sup> Lov přesných molekulárních fosilií je ale v konečném výsledku neplodný. I kdyby se našel rozumný scénář toho, jak se první nahý gen objevil, nikdo nikdy nebude schopen s jistotou říci, co se stalo v blátivé kaluži nebo v trhlině oceánského dna před třemi miliardami let.

---

<sup>200</sup> D. R. Mills, F. R. Kramer, and S. Spiegelman, *Science* 180, 916 (1973).

<sup>201</sup> G. Joyce, *The New Biologist* 3, 399 (1991).

Zatímco práce Kiedrowského, Rebeka a Joyce toho dost naznačily, nepustily se do základní otázky, totiž jak se z líhně plně jednodušších molekul sama od sebe vyklubala samoreplikující se směs genetického materiálu a bílkovin. Protože samoreplikující se systémy jsou vysoce nelineární, jsou velmi komplexní, a tak jsou to zase jednou počítačové simulace, odkud čerpáme překvapivé náznaky možných odpovědí.

Život je poháněn souborem chemických procesů daleko od rovnováhy. Aby se tyto procesy udržely v chodu, jsou všechny organismy otevřenými systémy; jejich komplexita je založena na zpětné vazbě, zahrnující katalyticky aktivní molekuly, které napomáhají reakcím, aniž by v tomto procesu byly samy spotřebovány. Jedna metabolická či regulační dráha může vytvořit molekulu, která bude urychlovat jiné dráhy, což může vést prostřednictvím obrovského množství provázaných, propletených a vzájemně závislých chemických reakcí k podpoře původní dráhy.

V Santa Fe Institutu v Novém Mexiku vytvořil Stuart Kauffman idealizované teoretické modely takových chemických "sítí", v nichž dlouhé molekuly vytvořené z jednoduchých částí (polymerní makromolekuly) spolu reagují, řízeny katalyzátorem, a vytvářejí produkty, které mohou samy účinkovat jako suroviny či jako katalyzátory (nebo obojí) v dalších reakcích. Kauffman tvrdí, že dostatečně složitě směsi takových polymerů se dokážou replikovat jako jeden celek, i když žádný jednotlivý člen takové skupiny se nedokáže replikovat sám. Podle Kauffmanova názoru, pokud začnete s "dostatečně komplikovanou" polévkou chemikálií, samoreprodukcující se chemické procesy nezbytné pro život se objeví naprosto zákonitě. Podle Kauffmana by to umožnilo malým bílkovinám (peptidům), aby se staly sebe-reprodukcujícími se, i když nemají explicitní autokatalytické vlastnosti DNA a RNA.<sup>□</sup> To by vedlo ke vzniku propojeného "metabolismu" založeného na bílkovinách, který možná mohl být teprve později vytlačen RNA.<sup>202</sup>

---

□ Kauffmanovy výsledky jsou důležité i proto, že zpochybňují ortodoxní interpretaci Dawkinsova sobeckého genu, která (zjednodušeně) zní: replikátor = úsek DNA/RNA = sobecký gen, vše ostatní = nástroj přežití. Naproti tomu strukturalistická interpretace, říkající (neméně zjednodušeně) sobecký gen = replikátor = celá chemická soustava (DNA + bílkoviny + atd.), replikující se jako celek, je přesně to, co Kauffman formuloval jazykem matematiky. Podle mého názoru by Dawkins dnes, po tolika letech vzrušených diskusí, sám neprotestoval proti označení za biologického strukturalistu. (pozn. překl.)

<sup>202</sup> S. Kauffman, *The Origins of Order* (Oxford University Press 1993), str. 340.

Některé vlivné osobnosti říkají, že Kauffmanovy chemické sítě mají k tomu, co v chemickém světě reálně existuje, dost daleko. Jak poznamenal Leslie Orgel: "Nemyslím si, že chemikálie vědí o jeho rovnicích nebo že se chovají tak, jak to jeho rovnice popisují." Práce Jacka Szostaka z Massachusettské všeobecné nemocnice v Bostonu je přesvědčivější. Szostak objevil katalytickou aktivitu molekuly RNA vybrané ze zásoby náhodných oligonukleotidů toho typu, který tady mohl být na úsvitu života. RNA katalyzátor mohl spojovat dohromady další molekuly RNA v reakci řízené molekulou nazývanou adenosin trifosfát. To je právě ta chemikálie, která nyní zásobuje palivem většinu biochemie. "Taková podobnost podporuje myšlenku, že RNA se mohla chovat jako bílkovinné katalyzátory, které dnes provádějí replikaci genetického materiálu v živých organismech, a mohla jim předcházet," řekl Orgel.<sup>203</sup>

Laureát Nobelovy ceny Manfred Eigen ukázal, jak se bílkoviny mohou dostat do akce vedené RNA. Společně s Peterem Schusterem z Vídně a s dalšími spolupracovníky se Eigen snažil vypracovat teoretický rámec pro takovou molekulární evoluci z prebiotické směsi pomocí takzvaných hypercyklů - replikačních cyklů nastavených podle šablony, které obsahují katalytické zpětnovazební smyčky, v nichž molekula A plodí molekulu B, která plodí molekulu C, která plodí molekulu A a tak dále. Tento pojem byl zaveden před téměř dvaceti lety, když si Eigen uvědomil, že samotné malé molekuly nemohou mít zakódován dostatečně komplexní mechanismus, aby se reprodukovaly bez spolupráce s jinými.

V pozdějším stadiu se hypercyklus setkal s kritikou: evoluční biolog John Maynard Smith z univerzity v Sussexu ukázal, že v přítomnosti "parazitujících" molekul, které mechanismus podrývají pro své vlastní sobecké cíle, je takový hypercyklus nestabilní. Parazité využívají katalytické schopnosti hypercyklů ke zvýšení svého vlastního počtu, ale nevracejí nic nazpátek. Maynard Smith tudíž argumentoval, že hypercyklus by za jakoukoli nezanedbatelnou dobu vyhynul.<sup>204</sup> Jeho analýza byla založena na idealizovaném scénáři, v němž jsou složky hypercyklů rozmístěny rovnoměrně v prostoru. Maynard Smithova kritika je sice často citována, ve skutečnosti je však sotva víc než strašák do zelí, protože Eigenův a Schusterův původní článek, napsaný o osm let dříve, došel k závěru, že k tomu, aby se hypercyklus udržel v chodu,

---

<sup>203</sup> L. Orgel, *Scientific American* 271, 55 (1994).

<sup>204</sup> J. Maynard Smith, *Nature* 280, 445 (1979).

je nezbytná nějaká forma rozparcelování prostoru (tedy prostorové nerovnoměrnosti).<sup>205</sup>

Složitější a pravděpodobně realističtější scénář byl v nedávné práci analyzován Martinem Boerlijstem a Paulinou Hogewegovou: provedli simulaci hypercyklů v nestejnorodém prostředí s použitím modelu založeného na celulárním automatu, který reprezentuje prebiotickou chemii.<sup>206</sup> Ten se choval podstatně jiným způsobem než Maynard

To, že biologické systémy mají podobnou vnitřní zpětnou vazbu jako BŽ reakce, není nic překvapivého. Když je v těle vyroben enzym, účastní se pak zase dalších procesů, které ovlivňují jeho vlastní výrobu. Enzym například může urychlovat nebo zpomalovat některé buněčné pochody. Předvídat průběh takových nelineárních procesů je nesnadné, protože spolu se změnou množství enzymu se mění i pravidla řídící jeho výrobu. Zpětnovazební smyčky jsou v biologii značně rozšířené a zahrnují obrovské množství procesů od energetického metabolismu buněk po organizaci složitých společenství. Mohou být příčinou samoorganizace třemi kvalitativně odlišnými způsoby, tak jak jsme to viděli v chemii BŽ reakce a u bruselátoru. Je to časová organizace, odpovídající oscilacím, prostorová organizace, odpovídající obrazcům, a kombinace obou, když se prostorem šíří vlny aktivity. Uvidíme, že když vezmeme v úvahu všechny tyto tři typy organizace, pochopíme spoustu procesů zodpovědných za chod biologických hodin v každém živém organismu.

Geny, které obsahují plán všech těchto zpětnovazebních procesů, samy regulují čtení a interpretaci genů v našich tělech. Procesy, odehrávající se v každé živé bytosti, jsou tedy svou podstatou vysoce nelineární. Komplexita, která tím vzniká, nás při pokusech modelovat nebo simulovat živé soustavy nutí spoléhat se na počítače.

## Samoorganizace uvnitř buněk

Zpětnovazební procesy probíhající uvnitř buněk rostlin a živočichů jsou nezbytné kvůli generování nezbytného fyziologického řádu umožňujícího život. Buňky potřebují energii pro trávení, syntézu biochemických sloučenin, k vyvolání stahu svalů, pro zahřívání těla a

---

<sup>205</sup> M. Eigen, *Naturwissenschaften* 58, 465 (1971); M. Eigen and P. Schuster, *The Hypercycle - A Principle of Natural Self-Organization* (Springer, Heidelberg 1979).

<sup>206</sup> M. Boerlijst and P. Hogeweg, in: *Artificial Life II*, C. Langton et al. (ed.), str. 255-76.

tak dále. Bezprostředním palivem pro buněčnou ekonomii je energeticky bohatá biomolekula, adenosintrifosfát, známější pod zkratkou ATP. Podobně jako stlačená pružina ATP přepravuje svůj náklad energie ve formě energeticky bohaté chemické vazby s chemickou jednotkou zvanou fosfátová skupina, kterou tvoří čtyři kyslíkové atomy obklopující atom fosforu. Když se fosfátová skupina odštěpí, ATP se mění na energeticky chudou formu, známou jako ADP (adenosindifosfát). ADP může být zase znovu aktivován na ATP chemickou reakcí zvanou fosforylace.

Jedním způsobem, jak vytvářet ATP, je fermentační proces zvaný glykolýza, ve kterém dochází k rozštěpení molekuly glukózy na dvě poloviny. Primitivní jednobuněčné organismy, jako jsou kvasinky, které nacházíme v jogurtu a ve zkaženém jídle, přežívají díky glyko-lýze i za nepřístupu vzduchu. Totéž dělají tvorové jako ústřice a mořská želva kareta obrovská, která tráví většinu času pod vodou. I uvnitř lidského těla hraje glykolýza svou roli, zvláště v místech s omezeným přísunem krve, například ve svalech zaměstnaných horečnou aktivitou.

Zhruba do roku 1940 byla zmapována úplná metabolická dráha glykolýzy. Roku 1957 si Duysens a Amesz poprvé všimli, že energie se v průběhu glykolýzy ne vždy produkuje ve stále stejném množství: příležitostně osciluje v pravidelném rytmu, a stejně tak je to s koncentracemi různých biochemických sloučenin účastnících se procesu, mezi nimiž má výsostné postavení energeticky bohatá molekula ATP. Zda koncentrace ATP kolísá s časem, to podstatně závisí na tom, kolik je přítomno cukru. Klíčem k roli, kterou hrají tyto oscilace ve fyziologické regulaci, je zpětná vazba. Pokud je v buňce jen málo ATP (a tedy více ADP), glykolýza se zapne, aby vytvořila potřebné molekuly ATP, přičemž buňka se pravděpodobně uchýlí ke svým zásobám škrobu nebo glykogenu. Pokud je molekul ATP dostatek, například proto, že dýchací řetězec dobře pracuje, glykolytická dráha se přeruší. Tento regulační proces, známý jako Pasteurův efekt, je v podstatě regulován jediným enzymem.

Enzym, o který jde, je fosforfruktokináza (zkratka PFK). Byl vyvinut speciálně pro tuto práci v průběhu milionů let evoluce a je zapínán vysokými koncentracemi ADP a vypínán vysokými koncentracemi ATP. Ale PFK je fosforylační činidlo: používá ATP k připojení fosfátové skupiny, čímž přeměňuje ATP na ADP. A je to samozřejmě přítomnost ADP, která enzym aktivuje k rychlejší práci. Tato zpětná



vazba je právě tím typem autokatalytického, nelineárního kroku, jenž je nezbytný k samoorganizaci.

Jeden úspěšný teoretický model byl sestaven roku 1972 Albertem Goldbeterem a René Lefevrem ze Svobodné univerzity v Bruselu. Obnažili proces glykolýzy na holou kostru. Začali s popisem pomocí dvanácti svázaných nelineárních diferenciálních rovnic a skončili s pouhými dvěma, přičemž se zaměřili pouze na koncentrace enzymu PFK a energeticky bohaté molekuly ATP.

Hrubé zjednodušení je vyváženo tím, že glykolytické rytmy jsou pak popsány rovnicemi podobnými těm, které se používají při popisu bruselátoru. Jak jsme viděli, samoorganizační schopnosti bruselátoru jsou popsány limitním cyklem. Atak pro vhodné koncentrace spolu množství ATP a ADP v cukerných hodinách tančují valčík v opakujících se kruzích; mění se s periodou kolem minuty, v dobrém souhlasu s experimentálními hodnotami. Glykolytické rytmy se tudíž staly prvním potvrzeným biologickým příkladem časového samoorganizovaného chování neboli disipativní struktury. Později byl formulován mnohem podrobnější matematický model, a to Mario Markusem a Benno Hessem v Německu, který dával vynikající kvantitativní souhlas s experimentálním pozorováním a předpověděl také možnost existence chaotických oscilací; chaos byl nyní v glykolýze skutečně pozorován.<sup>207</sup>

Existuje mnoho dalších příkladů takové rytmické biochemie. Byla objevena v řadě procesů týkajících se jediného enzymu, jako jsou autokatalyzátory peroxidáza a laktoperoxidáza z křenu a biochemické procesy využívající široké spektrum enzymů. Tyto oscilátory hrají roli při šíření informace jak uvnitř, tak vně buněk, což umožňuje správnou koordinaci buněčných a subbuněčných procesů, a při diferenciaci buněk, kdy se z buněk vyvíjejícího se embrya stávají například mozkové nebo jaterní buňky.

Existují také příklady prostorových obrazců uvnitř buněk, kde se uplatňuje samoorganizace. Při studiu žabích vajíček byly pod mikroskopem pozorovány nápadné šroubovitě profily koncentrace vápníku. Tyto obrazce připomínají ty, které se vyskytují v jiných vybuditelných prostředích, jako jsou spirální vlny vznikající v BŽ reakci nebo při simulacích celulárních automatů. Žabí buňky jsou dost velké, kolem jednoho milimetru v průměru, a tak umožňují vznik vln s vlnovou délkou deset mikronů (deseti milióntin metru). Velikost je

---

<sup>207</sup> M. Eigen, Scientific American 269, 36 (1993).

důležitá: formování obrazců v buňkách není přímočaré zmenšení BŽ reakce, jelikož molekuly mnohem snáze difundují z jedné strany buňky na druhou během jedné obrátky katalyzované chemické reakce, která je základem samoorganizace.

Prostorové obrazce byly objeveny také během formování mikrotubulů, o nichž Jim Tabony z Centra jaderných studií v Grenoblu věří, že jsou hlavními organizátory buněčného nitra. Tyto trubkovité molekulární útvary, složené z bílkoviny tubulinu, se dají vytvořit ve zkumavce zahříváním roztoku obsahujícího tubulin a nukleotid guanosintrifosfát. Je možné vytvořit stacionární vodorovné pruhy, obsahující pásy až milimetr široké, v nichž jsou mikrotubuly vysoce orientované. Tento nelineární proces se chová způsobem, který se očekává u disipativních struktur popisovaných Turingem.

"Výsledky ukazují, že ke komplexním biologickým jevům dochází v důsledku nelineárních mechanismů," říká Tabony. Zdůrazňuje, že ve vyvíjejících se vajíčkách banánové mušky se tvoří pásovité struktury, které odpovídají segmentům těla, jako jsou hlava a hrud'. Obrátme se nyní k této vyšší úrovni biologické komplexity a organizace a zabývejme se organizovaným chováním ne uvnitř buňky, ale v rámci celého souboru buněk.

## Buňky se sdružují

Pokročilé organismy, jako jste vy, čtenáři této knihy, obsahují mnoho miliard buněk, které jsou během vývoje od vajíčka k mláděti organizovány do nesmírně propracovaných struktur. Jen málokterý mechanismus účastníci se tohoto vývoje chápeme natolik dobře, abychom ho dokázali rozumně matematicky popsat. Nelineární matematika nicméně může poskytnout kvalitativní náčrt samoorganizace buněčného společenství, jak se dá ilustrovat na příkladech podivných stvoření zvaných hlenky.

Hlenky jsou něco mezi souborem jednotlivých buněk a organismem. Tak jako pospolitě žijící mravenci je i *Dictyostelium discoideum* superorganismem. Někdy tvoří mnohobuněčný útvar (kolem 100 000 buněk), zatímco jindy se jeho buňky toulají nezávisle jedna na druhé. Potravou hlenek jsou bakterie, a když je jich dostatek, jednotlivé buňky se jimi nenasytně krmí, chovají se jako osamělí tuláci a množí se přímým buněčným dělením. Nakonec však kolonii dojde potrava. V tom okamžiku si buňky začnou "všímat" jedna druhé. V důsledku ještě ne

zcela pochopených nelineárním pochodů začnou být některé buňky v kolonii aktivní a starat se o udržování rytmu; jsou to "vůdcové lidu", kteří vysílají rytmické pulzy chemické látky zvané cyklický adenosinmonofosfát (cAMP). Je to v biologii všudypřítomná molekula, která funguje jako molekulární přenašeč zpráv mezi sousedními buňkami. Je to signál glukózové nouze, oznamující, že došla potrava.

Tato polnice povolává okolostojící mužstvo a během několika mikrosekund organizuje přesuny. Buňky zprávu násobí a předávají dál, což je forma zpětnovazebního mechanismu, který vede k tomu, že stále více buněk se sune k pulzujícím centrům. Působí zde ještě dva dodatečné procesy: jakmile buňka uvolnila nějaké množství cAMP, nemůže bezprostředně odpovědět na další signál, protože předtím, než se vrátí do vybuditelné konfigurace, přejde do "netečného stavu". Buňky vylučují i jiný enzym, fosfodiesterázu, který rozkládá cAMP, což vede ke gradientu této chemikálie, která slouží jako orientační bod. Hladovější buňky se sunou k buňce, která udává rytmus ve směru rostoucí koncentrace cAMP. Shlukující se populace mohou vytvářet soustředné a spirálovité vlny, které jsou neuvěřitelně podobné spirálním vlnám vyskytujícím se v BŽ reakci. To není žádné překvapení: ačkoli se liší detaily, pozitivní a negativní zpětné vazby jsou tytéž.

Jakmile buňky vytvořily slizovitou hmotu, začínají se diferencovat a vytváří se hrot, který neustále vylučuje cAMP. Veškerá hmota se zorganizuje do lesknoucího se mnohobuněčného "slimáčka" s hlavou a ocáskem, který se svíjí, jak hledá světlo a vodu. Trvá to všehovšudy několik hodin, než buňky vytvoří tento jednoduchý organismus. Je dlouhý jeden až dva milimetry a plazí se pod vedením pulzujícího zdroje umístěného na svém hrotu. Potom se napřímí a vytvoří tuhou stopku, na níž sedí hlavička obsahující výtrusy; nakonec se hlavička roztrhne a vír spory rozeseje široko daleko. Dopadnou-li na vhodné místo, mohou vyklíčit a cyklus tohoto podivného organismu může začít nanovo.

Za tímto chováním se skrývá pozoruhodná biochemie, připomínající cukerné hodiny v glykolýze. Molekula cAMP, nesoucí poselství, které tuto kroutící se masu organizuje, se vytvoří z ATP pomocí enzymu zvaného adenylátcykláza. Zpětná vazba se objevuje stejně jako u glykolýzy: cAMP, který se již nachází v prostředí obklopujícím buňky, spouští adenylátcyklázu, aby se produkovalo více cAMP z ATP. Tím dochází k autokatalýze, podstatné součásti samoorganizace. Podobně jako když modeloval glykolytické oscilace u kvasinek, byl Albert

Goldbeter schopen podrobně ukázat s použitím nelineární analýzy a limitních cyklů, jak se mohou vytvořit oscilace cAMP s periodou několika minut. Je to vynikající příklad samo-organizovaného chování. Kromě toho jsou dnes známy i chaotické oscilace cAMP. V mutantní formě *D. discoideum* se pozoroval chaos v časovém vývoji oscilací cAMP a prostorová neuspořádanost projevující se anomáliemi ve stopkách a výtrusnicích, které se všechny vrátí k uspořádanému chování, když se přidá fosfo-diesteráza.

Příroda ovládá mechanismy, které organizují buňky do závratné šíře forem a tvarů, daleko přesahujících to, co dokážou skromné hlenky. Podrobný popis receptu na takovou rozmanitost je v nedohlednu. Nicméně samotný fakt, že *Homo sapiens* je ovládán do značné míry tímtež genetickým programem jako jiní tvorové, jako banánové mušky, pampelišky a šimpanzi, skýtá naději, že dokážeme pochopit aspoň obecné rysy vývoje jedince. Někteří vědci chtějí pouze vrhnout trochu světla na procesy, které přitom probíhají. Jiní sní o formulaci biologického ekvivalentu Newtonových zákonů. Na začátku tohoto století napsal D'Arcy Thompson, profesor zoologie na Univerzitě svatého Ondřeje ve Skotsku, ve své studii o růstu mnohobuněčných organismů, že vývoj živých tvorů se musí odehrávat uvnitř rámce, který poskytuje geometrie. Mnoho biologů by řeklo, že jeho přístup nikam nevede: zásadní objevy tohoto oboru nebyly učiněny na počítačích, ale laboratorním pozorováním.<sup>208</sup>

Nicméně souběžně s explozí aktivity v biologickém výzkumu dosáhli teoretikové určitého pokroku v chápání toho, jak jsou utkány živé obrazce v čase a prostoru. Poznávání evoluce tvaru v živých systémech neboli morfogeneze slavilo první výrazné úspěchy před padesáti lety, když roku 1952 napsal Turing svůj slavný článek. Dnes však můžeme takové studium dotáhnout mnohem dál díky existenci rychlých počítačů zvládajících všudypřítomné nelinearity, které jsou základem morfogeneze.

Nezmar, pár milimetrů dlouhý sladkovodní láčkovec, je jedním z fascinujících tvorů, na něž jsme tento přístup aplikovali. Sám Turing byl uveden do nezmařích divů toutéž knihou, která vzbudila jeho zájem o inteligenci strojů, Divy přírody, které má každé dítě znát, od Edwina

---

<sup>208</sup> F. J. Varela, H. R. Maturana, and R. Uribe, *Bio Systems* 5, 187 (1974); také F. J. Varela, *Autopoiesis: A Theory of Living Organization* (North Holland, New York, 1981). Definice autopoiesise navržená těmito autory sahá ve skutečnosti mnohem dále k pouhé aplikaci na prebiotické systémy. Tento pojem našel použití ve filozofii, sociologii a ekonomice.

Tenney Brewstera. Pokud se vezme malý kousek tkáně z blízkosti hlavy nezmara a umístí se na jiné místo těla, vyroste za osmačtyřicet hodin nová hlava. Odříznutý kus nezmara se přeskupí tak, že vytvoří kompletní nový organismus.

Turing si nezmara idealizoval do válcovitého tvaru a vykreslil ho jako kroužek buněk. Zjistil, že modelováním dvou chemikálií, reagujících a difundujících podél kroužku, dokáže nastavit chemické vlny tak, aby vyznačily úseky, kde se poté, co se nezmar rozpůlí, objeví chapadla. Tuto práci dále rozvíjel Hans Meinhardt z Ústavu Maxe Plancka pro výzkum virů v Tübingenu, který došel k závěru, že tento tečného stavu". Buňky vylučují i jiný enzym, fosfodiesterázu, který rozkládá cAMP, což vede ke gradientu této chemikálie, která slouží jako orientační bod. Hladovějící buňky se sunou k buňce, která udává rytmus ve směru rostoucí koncentrace cAMP. Shlukující se populace mohou vytvářet soustředné a spirálovité vlny, které jsou neuvěřitelně podobné spirálním vlnám vyskytujícím se v BŽ reakci. To není žádné překvapení: ačkoli se liší detaily, pozitivní a negativní zpětné vazby jsou tytéž.

Jakmile buňky vytvořily slizovitou hmotu, začínají se diferencovat a vytváří se hrot, který neustále vylučuje cAMP. Veškerá hmota se zorganizuje do lesknoucího se mnohobuněčného "slimáčka" s hlavou a ocáskem, který se svíjí, jak hledá světlo a vodu. Trvá to všehovšudy několik hodin, než buňky vytvoří tento jednoduchý organismus. Je dlouhý jeden až dva milimetry a plazí se pod vedením pulzujícího zdroje umístěného na svém hrotu. Potom se napřímí a vytvoří tuhou stopku, na níž sedí hlavička obsahující výtrusy; nakonec se hlavička roztrhne a vír spory rozeseje široko daleko. Dopadnou-li na vhodné místo, mohou vyklíčit a cyklus tohoto podivného organismu může začít nanovo.

Za tímto chováním se skrývá pozoruhodná biochemie, připomínající cukerné hodiny v glykolýze. Molekula cAMP, nesoucí poselství, které tuto kroučící se masu organizuje, se vytvoří z ATP pomocí enzymu zvaného adenylátcykláza. Zpětná vazba se objevuje stejně jako u glykolýzy: cAMP, který se již nachází v prostředí obklopujícím buňky, spouští adenylátcyklázu, aby se produkovalo více cAMP z ATP. Tím dochází k autokatalýze, podstatné součásti samoorganizace. Podobně jako když modeloval glykolytické oscilace u kvasinek, byl Albert Goldbeter schopen podrobně ukázat s použitím nelineární analýzy a limitních cyklů, jak se mohou vytvořit oscilace cAMP s periodou

několika minut. Je to vynikající příklad samo-organizovaného chování. Kromě toho jsou dnes známy i chaotické oscilace cAMP. V mutantní formě *D. discoideum* se pozoroval chaos v časovém vývoji oscilací cAMP a prostorová neuspořádanost projevující se anomáliemi ve stopkách a výtrusnicích, které se všechny vrátí k uspořádanému chování, když se přidá fosfo-diesteráza.

Příroda ovládá mechanismy, které organizují buňky do závratné šíře forem a tvarů, daleko přesahujících to, co dokážou skromné hlenky. Podrobný popis receptu na takovou rozmanitost je v nedohlednu. Nicméně samotný fakt, že *Homo sapiens* je ovládán do značné míry tímtež genetickým programem jako jiní tvorové, jako banánové mušky, pampelišky a šimpanzi, skýtá naději, že dokážeme pochopit aspoň obecné rysy vývoje jedince. Někteří vědci chtějí pouze vrhnout trochu světla na procesy, které přitom probíhají. Jiní sní o formulaci biologického ekvivalentu Newtonových zákonů. Na začátku tohoto století napsal D'Arcy Thompson, profesor zoologie na Univerzitě svatého Ondřeje ve Skotsku, ve své studii o růstu mnohobuněčných organismů, že vývoj živých tvorů se musí odehrávat uvnitř rámce, který poskytuje geometrie. Mnoho biologů by řeklo, že jeho přístup nikam nevede: zásadní objevy tohoto oboru nebyly učiněny na počítačích, ale laboratorním pozorováním.

Nicméně souběžně s explozí aktivity v biologickém výzkumu dosáhli teoretikové určitého pokroku v chápání toho, jak jsou utkány živé obrazce v čase a prostoru. Poznávání evoluce tvaru v živých systémech neboli morfogeneze slavilo první výrazné úspěchy před padesáti lety, když roku 1952 napsal Turing svůj slavný článek. Dnes však můžeme takové studium dotáhnout mnohem dál díky existenci rychlých počítačů zvládajících všudypřítomné nelinearity, které jsou základem morfogeneze.

Nezmar, pár milimetrů dlouhý sladko vodní láčkovec, je jedním z fascinujících tvorů, na něž jsme tento přístup aplikovali. Sám Turing byl uveden do nezmarů divů toutéž knihou, která vzbudila jeho zájem o inteligenci strojů, Divy přírody, které má každé dítě znát, od Edwina Tenney Brewstera. Pokud se vezme malý kousek tkáně z blízkosti hlavy nezmara a umístí se na jiné místo těla, vyroste za osmačtyřicet hodin nová hlava. Odříznutý kus nezmara se přeskupí tak, že vytvoří kompletní nový organismus.

Turing si nezmara idealizoval do válcovitého tvaru a vykreslil ho jako kroužek buněk. Zjistil, že modelováním dvou chemikálií,

reagujících a difundujících podél kroužku, dokáže nastavit chemické vlny tak, aby vyznačily úseky, kde se poté, co se nezmar rozpůlí, objeví chapadla. Tuto práci dále rozvíjel Hans Meinhardt z Ústavu Maxe Plancka pro výzkum virů v Tübingenu, který došel k závěru, že tento skromný tvor nám může říci mnoho o tom, jak je řízen vývoj relativně jednoduchého organismu.

Zdá se, že utváření tělesné formy u nezmar závisí na dvou komponentách. Jsou to krátkodosahová chemická aktivace (pomocí autokatalýzy) a dalekodosahová inhibice.<sup>209</sup> Z výsledných nelinearit vznikají obrazce, které mají shodné rysy u mnoha organismů. Typicky to probíhá tak, že malý flíček tkáně se začne poněkud odlišovat od svého okolí a začne vylučovat nepatrné množství molekulárního "aktivátoru", jehož koncentrace rychle naroste, protože katalyzuje svou vlastní produkci. Vysoká koncentrace v této oblasti odstartuje výrobu molekuly nesoucí inhibiční signál, která difunduje do okolní tkáně a brání jiným oblastem v tvorbě aktivátoru. Koncentrační profily těchto tzv. morfogenů fakticky buňkám říkají, jaká je jejich poloha vzhledem k orientačnímu bodu, představovanému speciální tkání. O tuto informaci se opírá rozhodování, jestli se v daném místě má vyvinout buňka hlavy nebo těla.

Aktivace a inhibice nejenže modelují počáteční vývoj obrazců, ale má se zato, že určují rozestupy v pravidelně se opakujících strukturách. U nezmar jsou to chapadla, u jiných živých tvorů to mohou být štětiny, chlupy, pera, listy nebo články těla. Pak mohou přijít na řadu další procesy. Například v závislosti na tom, na který článek těla hmy-zuho působíme, se mohou vytvořit nohy nebo tykadla. Turingova teorie se používá k vysvětlení mnoha prostorových struktur u nejrůz-nějších organismů, jako jsou tvary chrupavek v našich končetinách, rozmístění per a šupin či složité obrazce na motýlích křídlech a zvířecích kožešinách.

U zvířat tyto obrazce vznikají obvykle již v embryu skrytém ve skořápce nebo v děloze. Jakými vzory bude ozdobeno dospělé zvíře, závisí na tom, ve kterém přesném okamžiku se tyto obrazce vytvoří a jaká je v tu chvíli velikost embrya. James Murray z Washingtonské

---

<sup>209</sup> Čtenáře možná zaujme úvaha, jak často se u komplexních systémů takové protikladné prvky vyskytují. Ve 4.kapitole jsme se setkali s analogií aktivace a inhibice u frustrovaných spinových skel, u kterých jsou přítomny současně feromagnetické a antiferomagnetické interakce. U neuronových sítí (viz 5. a 9.kapitola) zjišťujeme, že jejich komplexita - a z toho vyplývající bohatost - je způsobena přítomností jak budících, tak tlumících synaptických spojů.

univerzity vytvořil podrobné matematické modely stejného typu, který produkuje různorodý repertoár BŽ reakce. V souhlase se skutečností mu vychází, že myš a slon, dva extrémy ve spektru velikosti savců, jsou zpravidla jednobarevní. Podobné modely ukazují i to, proč vzory na zvířatech střední velikosti, jako jsou aligátoři, levharti a zebry, mohou být velmi exotické. Modelováním mechanismů aktivace a inhibice na zužujících se válkách proměnlivé tloušťky zjistil mimo jiné, že špička ocasu levharta je příliš tenká, než aby mohla nést flíčky, které díky tomu splývají do pruhů, a proč je možné mít flekaté zvíře s pruhovaným ocasem, ale nikdy ne naopak.

## Tlukot srdce

Morfogeneze vysvětluje, jak se mohlo vyvinout něco tak složitého, jako je srdce, ale k pochopení komplexity jeho tlukotu potřebujeme ještě jiné nástroje. Lidské srdce tluče bez přestávky asi sedmdesátkrát za minutu, čtyřicetmilionkrát za rok a asi tak třítisícemilionkrát za celý život. Je odolné k náhlé zátěži a přesto se jeho činnost může vychýlit z rovnováhy pouhým nepatrným omezením vnitřního krevního oběhu, což má někdy fatální následky. Protože je srdce tak důležité pro přežití člověka, zajímali se vědci o studium jeho vlastností od těch dob, co se stalo působivým symbolem v umění a kultuře. Dnes dokážeme jeho globální chování pochopit díky moderním superpočítačům.

Holandřané van der Pol a van der Mark ve 20. letech formulovali jednoduchý nelineární model srdce a ukázali, že v něm lze generovat nastavením různých parametrů několik různých poruch pravidelného rytmu neboli arytmií. Na začátku každého typu arytmie je dobře známý mechanismus nelineární dynamiky: bifurkace, kterou jsme popisovali v 6.kapitole. K velkému pokroku ve snaze vytvořit realističtější matematické modely nervových impulzů došlo v roce 1952, když vyšla práce Alana Hodgkina a Andrewa Huxleyho, za niž pak dostali Nobelovu cenu. Pojednávala o obřím axonu olihně, dlouhém vláknovitém výběžku nervové buňky, který vede nervové vzruchy. Metody, které použili, vedly ke kvalitativnímu popisu, který se dnes rutinně používá pro studium elektrické aktivity v srdeční tkáni.

Po nějakou dobu tloukla na katedře fyziologie Oxfordské univerzity jedna digitální srdeční buňka, vyvinutá Denisem Noblem a jeho spolupracovníky. Jeho skupina sestavila matematický model, zahrnující chemické procesy odehrávající se v buňce. Tlukot buňky vzniká



koordinovaným pohybem bílkovinných filamentů. Tak jako se kyvadlo v dědečkových hodinách udržuje v chodu pomalu klesajícím závažím, speciální bílkoviny zvané sodíkové pumpy tlačí kladně nabitě sodíkové ionty skrz buněčnou membránu, a tím zajišťují, že srdce je drženo daleko od rovnováhy. Při každém stahu pronikají do srdečních buněk ionty vápníku. Při působení na kanály přepravující vápníkové ionty dovnitř buněk a ven přichází na scénu náš starý známý cAMP. Tak jako u hlenek, pracuje společně s enzymem adenylátcyklázou. Podstatou procesu je jejich koordinované působení ve zpětnovazebních procesech, které řídí náhlé otevírání a zavírání vápníkových kanálů. Vápníkové ionty, které pronikají do jednotlivé srdeční buňky, se znásobují pozitivní zpětnou vazbou a vedou k jejímu stažení molekulárním mechanismem typu "rohatky"<sup>□</sup>, ozubeného kolečka s perkem, které dovoluje otáčení jen jedním směrem. Přechod vápníku do srdce je jen polovina srdečního stahu. Než je stah u konce, musí se vápník dostat zase ven jiným transportním mechanismem, čímž se buňka uvolní. Každá jednotlivá srdeční buňka má tak své vlastní vnitřní hodiny, oscilátor s vápníkovými ionty - což je biochemická verze BŽ reakce.

Digitální buňka se chová velmi realistickým způsobem. Pokud je jednomu druhu buněk, nazývaných rytmus udávající (pacemakerové) buňky, podána injekce srdečního léku Digitalis,<sup>□</sup> je normální rytmus narušen a vzniknou ektopické srdeční stahy, tj. stahy objevující se v jiný okamžik, než by měly. Tato droga způsobuje nadměrné vybuzení vápníkových hodin srdeční buňky v důsledku proniknutí vápníkových iontů. K takovému bušení srdce dochází u většiny lidí jen velmi zřídka, ale když se vám to stane, ucítíte to. Podobným způsobem se dá měřit účinek hormonů, jako je adrenalin, a dají se reprodukovat různé abnormality v tlukotu srdce. Někteří lidé naznačovali, že toho nezbývá moc, co je třeba ještě vysvětlit, uvážíme-li úspěch modelu jedné buňky. Podle Nobleho je to ovšem "hloupé nedorozumění". Jeho počítačové simulace poskytují přesvědčivou ukázkou toho, jak vlastností plátku srdeční tkáně jsou víc než součtem jeho buněčných částí.

Co je na Nobleho přístupu překvapující, je to, že nepoužívá okleštěnou idealizaci, nýbrž zvětšený, ale fyziologicky přesný model

<sup>□</sup> Anglicky „ratchet“. Jde o tzv. brownovské molekulární motory, které převádějí tepelný pohyb molekul na posuvný, vlnivý či jiný uspořádaný pohyb. To ony dávají sílu svalům, pohánějí bičík spermie a podobně. Je to jedno z nejzaváhavějších témat moderní nanomechaniky. (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Jde o drogu z prudce jedovatého náprstníku, *Digitalis Purpurea*. Podobnost se slovem „digitální“ není náhodná: to totiž původně souviselo s počítáním na prstech, (pozn. překl.)

jednotlivé srdeční buňky. Tento přístup je výpočetně velmi náročný. Simulace dynamiky jediné buňky vede ke značnému objemu numerických výpočtů: vyčíslit jednu sekundu reálného času tlukotu srdce trvá na Nobleho pracovní stanici kolem sta sekund. Simulace i jen malého plátku tkáně vyžaduje superpočítač. Ve spolupráci s Raiem Winslowem z Univerzity Johna Hopkinse v Baltimoru užívá Noble počítač Connection Machine Výzkumného centra americké armády pro vysoce výkonnou výpočetní techniku, umístěný na Minnesotské univerzitě (viz obr. 7 barevné přílohy). V závislosti na velikosti simulací každý z 64 000 procesorů počítače může být pověřen zpracováváním dynamiky jedné nebo několika různých srdečních buněk; byly modelovány až čtyři miliony buněk, což je zhrubajedna setina celkového počtu buněk v srdci. Je jasné, že čím je model větší, tím více sériových výpočtů musí každý procesor vykonat, což práci zpomaluje.

Jednou z nejzajímavějších a z lékařského hlediska nejdůležitějších otázek je, jak je tlukot každé z milionů jednotlivých buněk synchronizován do koordinovaného tepu srdce. Je známo přinejmenším šest různých "dirigentů" tlukotu srdce. Jedním z nich je sinusový uzel, malý shluk svalových buněk v pravé srdeční síni. Speciální tkáň známá jako Purkyňovo vlákno obsahuje buňky, které velmi rychle dopraví impulzy sinusového uzlu k velkému objemu srdečního svalu. Chod těchto pacemakerových buněk musí být vybuzen takzvaným "srdečním pacemakerovým proudem", což odpovídá centřům, která nastartují vznik obrazců v BŽ reakci. Redukcionistický přístup by hledal buňky, které vyšlou signál jako první, s tím, že právě ty musejí obsahovat tajemství tepu. Ukazuje se, že buňky, které vysílají signály jako první, nejsou původci tlukotu srdce. Tento protiintuitivní poznatek bylo možné získat pouze při modelování obrovského množství společně pracujících srdečních buněk.

Tento podivný výsledek byl jasně vidět v simulacích jednoho potenciálního pacemakeru, sinusového uzlu, na počítači Connection Machine. V simulacích vznikají půvabná grafická schémata, kde každý z 16 384 pixelů na monitoru představuje buňku, která je zbarvená podle svého okamžitého elektrického napětí, od modré (kladné) po červenou (záporné). Každá buňka je s ostatními elektricky svázána pomocí malinkých pórů zvaných vodivostní kanály. Nepřekvapí, že čím intenzivněji spolu sousední srdeční buňky komunikují, tím spíše vysílají impulzy v unisonu. Avšak, jak zdůrazňuje Noble, tento model sinusového uzlu dává "zcela chybný výsledek." Videozáznam uzlu

ukazuje vlnu excitace hroustící se dovnitř směrem ke středu uzlu, místo aby se vlnila ven a spustila stah. Winslow a Noble byli hořce zklamáni. Zjistili však, že když připojí uzel k obrovské síti okolních buněk, které představují jednu ze srdečních komor, vlna excitace, která začíná v kotouči buněk sinusového uzlu, se rozšiřuje směrem ven, přes zbytek tkáně. Z toho je vidět, jak je dalekodosahové působení mezi buňkami stejně důležité v srdci jako v neuronové síti mozku. "Celkový srdeční rytmus je funkcí celého srdce," poznamenal Noble, "nejen samotného sinusového uzlu a určitě ne těch buněk, které vyšlou signál jako první." K radosti vědců se později ukázalo, že v experimentech provedených holandskou skupinou na izolovaném uzlu vznikaly sbíhající se vlny, což potvrdilo spolehlivost jejich modelu. "Byli jsme absolutně nadšeni," prohlásil Noble.

Simulace poskytly další fascinující výsledky. Je možné určit minimální počet buněk v sinusovém uzlu, které dokážou spustit impuls v srdečním svalu. Ukazuje se, že je to ostrůvek několika set tisíc buněk. V jedné simulaci Winslow a Noble zjistili, že když je okraj tohoto ostrůvku nerovný - jako je tomu u skutečného uzlu -, je stah převeden do okolní tkáně efektivněji. V jiné simulaci viděli, že malinký úsek poškozené tkáně, pouze 10 krát 10 krát 10 buněk stačí k vytvoření nadbytečného, ektopického stahu. "Pouhá tisícovka buněk stačí k vybuzení všech," říká Noble. Většina ektopických stahů je neškodná, ale občas, když dojde k poškození tkáně, dochází k život ohrožujícímu narušení srdečního rytmu, zvanému fibrilace. Noble a jeho kolegové nyní zkoušejí simulovat srdeční arytmií, zachvacující celé srdce, za předpokladu většího kritického množství počáteční poškozené tkáně. Je například možné, že ektopické stahy se pak skládají s vlnami vysílanými pacemakerem. Výsledkem budou spirální vlny zvané rotory, podobné těm, které se tvoří v BŽ reakci a které byly pozorovány u lidí postižených srdeční příhodou. Je to rozumný scénář, protože tyto rotory již byly vytvořeny při srážkách vln excitace. "Jsme možná blíže k pochopení fibrilace, než si myslíme," řekl Noble.

Práce Winslowa a Nobleho představuje vzácný, ale přesvědčivý příklad počítačového modelování komplexního makroskopického jevu, které začíná podrobným mikroskopickým popisem a pokračuje zabudováváním komplexity krok za krokem. U většiny příkladů uvedených v této knize včetně celulárních automatů a neuronových sítí, je globální chování vypočteno tak, že se začne od takzvaného mezoskopického modelu, v němž se zanedbává mnoho mikroskopických

podrobnosti na úrovni atomů a molekul. Nobleho práce ukazuje, že se současnými superpočítači můžeme za určitých okolností přejít od mikroskopického popisu k makroskopickým vlastnostem. Ve skutečnosti se zdůrazňování nedostatků redukcionismu nesmí přehánět. Noble připouští, že může být obtížné pochopit, co se v jeho simulacích odehrává. Redukcionistický přístup, analogický tomu, který aplikoval von Neumann, když používal počítače ke studiu dynamiky tekutin, určitě může říci, co je pro chování systému klíčové.

## Pravidla chování

Právě tak jako pro samotné živé bytosti jsou charakteristické obrazce v prostoru a čase, tak také společenství tvorů vytvářejí struktury větších rozměrů. Můžeme pozorovat prostoročasuovou organizaci, sahající od přibývání a ubývání populací potměnků po vznik spolupráce mezi druhy v boji o přežití. Objevují se organizované struktury zvířecích společenstev. Každého jistě napadne celá řada příkladů takové organizace, zejména ty, které vytváří sociální hmyz ze skupiny blanokřídlých, jako jsou včely, vosy, termity<sup>□</sup> a mravenci.

V koloniích těchto druhů hmyzu nacházíme spoustu podivuhodných jevů: přítomnost neplodných dělnic a vojáků, kteří se hrdinně obětují pro dobro kolonie při stavebních pracích a v obraně. Vypadá to jako "altruismus", pokud pokládáme život za nemilosrdný boj o přežití jednotlivce, hnaného svými sobeckými geny. Ve skutečnosti bylo vysvětlení existence tohoto typu spolupráce jedním z nej větších problémů i pro samotného Darwina. Nyní jsme však poznali, že tyto příklady se dají pochopit tak, že se díváme na kolonie blanokřídlých jako na "superorganismus" (podobný tomu, který vytvářejí hlenky), kde všichni jednotlivci sdílejí tutéž zásobu genů. Nebudeme sledovat tyto případy spolupráce založené na příbuznosti do hloubky, ale místo toho se soustředíme na spolupráci geneticky nepříbuzných jednotlivců, abychom ukázali, jak strategie vzájemně výhodného chování může povstávat sama od sebe v důsledku týchž slepých hnacích sil přežití.<sup>210</sup>

<sup>□</sup> Termiti ve skutečnosti nemají s řádem blanokřídlých nic společného. Podobnost s mravenci není dána příbuzností, ale stylem života. Nejbližší příbuzní termitů jsou švábi a kobylky, (pozn. překl.)

<sup>210</sup> Zvědavý čtenář by si měl přečíst Sobecký gen R. Dawkinse (Mladá fronta, Praha 1998) nebo knihu H. Cronina *The Ant and the Peacock* (Cambridge University Press 1991), má-li zájem o přehlednou diskusi o spolupráci založené na příbuznosti. Spolupráce na základě vzájemné výhodnosti se týká symbiózy či kooperace, často mezi velmi odlišnými druhy,

Tyto otázky studuje odvětví matematiky, zvané teorie her. Jejím cílem je určit, jaké strategie mají jednotlivci nebo organizace zvolit při hledání zisku, když je výsledek nejistý a podstatně závisí na tom, jakou strategii zvolí ostatní. Otcem zakladatelem tohoto oboru, který zvažuje rizika a zisk všech strategií ve hře o život, ve válečné, ekonomické nebo jakékoli jiné hře je von Neumann. Tak jako ve většině svých prací, snažil se používat matematiku k analýze něčeho, co se na pohled jeví jako nematematický obor. Jeho první článek o teorii her vyšel v roce 1928. Když byl na univerzitě v Princetonu, spolupracoval na konci 30. let s matematickým ekonomem Oskarem Morgensternem. V typickém von neumannovském stylu tato práce nejenže vedla k významným aplikacím v ekonomii, ale obohatila také čistou matematiku díky pokroku, kterého se dosáhlo souběžně s tím v kombinatorice (teorii uspořádání množin objektů). Von Neumann a Morgenstern publikovali svou nyní již klasickou knihu o teorii her *Teorie her a ekonomické chování*<sup>□</sup> sv roce 1944.

Dnes je čím dál jasnější, že tytéž principy se dají použít k pochopení toho, odkud se bere spolupráce "ve světě sobců usilujících jen o svůj zájem, ať jsou to supervelmoci, politici nebo soukromé osoby, neexistuje nad nimi žádná ústřední autorita, která by usměřovala jejich chování."<sup>211</sup> Tyto principy tedy mají význam pro spolupráci mezi obchodními společnostmi, mezi jednotlivci uvnitř organizací, v politice, ekonomii a mezinárodních vztazích, stejně jako v samotné biologii.<sup>212</sup>

Ekonomové byli teorií her fascinováni, protože si od ní slibovali matematické vysvětlení, proč neviditelná ruka Adama Smithe zdánlivě selhává, když jde o prospěch celku. Teorie nám pomáhá pochopit, jak se firmy rozhodují v prostředí tržního soutěžení. Politologové se na teorii her vrhli, protože ukazuje, jak "racionální" vlastní zájem může škodit celku. Do biologie byla teorie her uvedena v sedmdesátých letech zejména díky práci Johna Maynarda Smithe.

---

například řasou a houbou, které tvoří lišejník. Dalším příkladem je vosička a fíkovník, kde vosičky, které parazitují na fíkovníku, slouží tomuto stromu jako jediný opylovač, a rak poustevník s mořskou sasan-kou. Někdy mají účastníci takových symbióz i antagonistické rysy. Aplikace teorie reciprocity je pravděpodobně nejnovějším příspěvkem k biologickému chápání skupinového chování.

□ *Theory of Games and Economic Behaviour* (pozn. překl.)

<sup>211</sup> R. Axelrod, 77; *Evolution of Co-operation* (Penguin Books, London 1990).

<sup>212</sup> Jeden z nás (PVC) navštěvoval nejednu přednášku, v níž práce a přístup propagovaný Axelrodem a dalšími byly citovány jako model pro pochopení osobních vztahů uvnitř obchodních organizací.

Vůdčí osobností v tomto oboru je Robert Axelrod, profesor politologie a veřejné politiky na Michiganské univerzitě. Modeloval vzájemné působení mezi jednotlivci na základě jednoduché hry zvané věžňovo dilema.<sup>213</sup> Ideou této hry je simulovat konflikt, který se v reálném životě odehrává mezi sobeckým přáním každého hráče držet se strategie "vítěz bere vše" a nutností spolupracovat a dělat kompromisy při prosazování společných potřeb. Tak jako tolik jiných komplexních problémů, s nimiž jsme se setkali dříve, jako bylo nalezení stavu s nejnižší energií u spinového skla, učení neuronové sítě a řešení problému obchodního cestujícího, i zde jde o příklad optimalizačního problému, který je třeba řešit za přítomnosti vzájemně si odporujících podmínek.

Funguje to následovně. Dva jednotlivci se mohou rozhodnout navzájem spolupracovat či nikoli. Pokud oba spolupracují, získá každý z nich jako odměnu řekněme tři body. Pokud jeden spolupracuje a druhý ne, dostane zrádce vyšší odměnu, řekněme pět bodů. Ten, kdo naletěl, nedostane nic. A konečně když se oba navzájem zrazují, získá každý malou odměnu, jeden bod. I když oba hráči evidentně získají při vzájemné spolupráci, je tu vždy pokušení zrazovat, jednak kvůli maximalizaci zisku a jednak, aby hráč předešel tomu, že sám bude napálen. V tom spočívá ono dilema.

Tuto hru si můžeme snadno ilustrovat. Představte si, že vy a váš přítel jste byli chyceni s ukradeným obrazem pocákaným krví. Policie vás právem oba podezírá, že jste se dopustili jiného, mnohem závažnějšího zločinu, o němž nemá žádné důkazy. Drží vás v oddělených celách a nedovolí vám, abyste se kontaktovali. Vyšetřovatel vám nabídne dohodu: pokud udáte svého přítele a prozradíte jeho druhý zločin, neobviní vás z krádeže obrazu. Je přirozené se domnívat, že policie nabídla vašemu příteli stejnou dohodu. Co dělat? Pokud každý z vás odmítne poskytnout důkazy, oba budete obviněni pouze z lehčího zločinu, což je rozumný výsledek. Pokud každý z vás udá toho druhého, oba půjdete na základě vzájemného svědectví do vězení za vážnější trestný čin, což je špatný výsledek. Odtud pochází dilema: pokud budete sám, kdo bude mlčet, budete potrestán za oba zločiny, zatímco váš komplic bude na svobodě.

Věžňovo dilema zaměstnává matematiky, sociální vědce a biology, protože ilustruje široce rozšířený problém: jak individuální ambice vedou ke kolektivní mizérii. Pokud se tyto dva hráči už nikdy nesetkají,

---

<sup>213</sup> R. Axelrod, *The Evolution of Co-operation* (Penguin Books, London 1990).

nemají důvod spolupracovat. Ale v reálných situacích, které sahají od dopravních kolapsů po světové války, je mnohem pravděpodobnější, že jeden druhého v budoucnosti potká. A tady se dostávají ke slovu nejrůznější strategie.

Robert Axelrod pořádal celosvětový turnaj počítačových programů, které hrály věžňovo dilema, ve snaze odhalit nejlepší strategii. Nechal čtrnáct účastníků, z nichž někteří používali velmi složité strategie, ať spolu soutěží. "K mému značnému překvapení," řekl Axelrod, "se vítězem stal nejjednodušší z navržených programů, jak ty mně, tak já tobě' (tit for tat)."<sup>214</sup> Strategie 'jak ty mně, tak já tobě' byla vytvořena Anatolem Rapoportem, psychologem a herním teoretikem z Torontské univerzity, a je velmi jednoduchá: v prvním kole spolupracovat a pak dělat to, co dělal oponent v předcházejícím kole. Je to "pěkná" strategie, jelikož nejprve signalizuje ochotu spolupracovat a pak se mstí, kdykoli soupeř podvede. Kromě toho má schopnost "odpouštět" v tom smyslu, že nepřenáší zášť dále než k bezprostřední odvetě, a tím poskytuje příležitost vybudování "důvěry" mezi soupeři. Pokud je soupeř smířlivý, odpouští a oba sklídí větší prospěch ze spolupráce. A konečně není příliš vyspekulovaná. Vysoce komplikované strategie bývají nesrozumitelné: pokud se zdá, že neodpovídáte, váš nepřítel nemá žádný popud, aby s vámi spolupracoval. Velkým úspěchem strategie 'jak ty mně, tak já tobě' je její jednoduchost. Axelrod dále rozšířil tyto výsledky a vyzval k účasti v druhém kole, které hostilo dvaasedesát účastníků ze šesti zemí včetně některých vysocopropracovaných programů. Anatol Rapoport poslal opět strategii 'jak ty mně, tak já tobě'. A opět vyhrál. "Byli jsme svědky čehosi velice zajímavého," poznamenal Axelrod.

Poté, co se zabýval evolucí spolupráce v sociálním kontextu, uvědomil si, že tyto objevy mají důsledky také pro biologickou evoluci, a navázal kvůli tomu spolupráci s biologem z Oxfordské univerzity Williamem Hamiltonem.<sup>215</sup> V mnoha situacích se může tatáž dvojice jednotlivců setkat více než jednou. Má-li jednotlivec dostatečně výkonný mozek, aby v paměti rozpoznal druhého, s nímž dříve interagoval, a pamatuje si několik předchozích výsledků, stává se tato strategická situace tím, co známe jako opakované věžňovo dilema. Je nyní možné, aby se ve strategiích vyvinula pravidla, která berou v úvahu historii dosavadních interakcí mezi jednotlivci ve hře. Na začátku 70. let sociolog a bývalý právník Robert Trivers z Harvar-dovy univerzity

<sup>214</sup> Tamtéž.

<sup>215</sup> R. Axelrod and W. Hamilton, Science 211, 1390 (1981).

přišel s názorem, že tento typ vzájemnosti je nejdůležitějším způsobem, kterým zvířata, která nesdílejí tentýž soubor genů, dosahují spolupráce. Jeho rozbor zahrnoval nejen věžňovo dilema, ale i symbiózy, kde příslušníci jednoho druhu, jako je třeba pys-koun, čistí kůži jednotlivcům jiného druhu, jako je kanic (mořský okoun), nebo varovná volání ptáků a vzájemný altruismus v lidských společnostech, který může sloužit k odvrácení možné pomsty. Jeden obzvlášť barvitý příklad se našel u Křováků v Kalahari. Jejich lidová moudrost říká, že "chceš-li spát s ženou někoho jiného, nechej ho spát se svou, pak nehrozí, že na sebe půjdete s otrávenými šípy".

V biologickém kontextu lze interpretovat odměnu a trest udělovaný ve hře v termínech schopnosti jednotlivců nějakého druhu nebo různých druhů přežívat prostřednictvím reprodukce: dá se to brát tak, že odměna znamená počet potomků vyprodukovaných v každé rozmnožovací sezoně. Našlo se mnoho příkladů. Severoamerické vlaštovky stromové (*Tachycineta bicolor*) žijí ve skupinách, avšak ne všichni přítomní ptáci mají potomstvo, takže se tu objevují prvky věžňova dilematu. Připojením ke skupině se mohou nehnízdící ptáci naučit, jak vypadá dobré místo pro hnízdo. Rodiče mohou mít prospěch z toho, že je tu více ptáků, kteří upoutávají predátory. Avšak nehnízdící mohou zabít mladé ptáčky a převzít hnízdo. Rodičovské páry však obecně neodhánějí nehnízdící. Všichni ptáci mají prospěch z toho, že ukáží zdrženlivost: nehnízdící získají informace a hnízdící mají více mladých. Důkazy o tom, že se v jejich vztahu skutečně vyvinula strategie 'jak ty mně, tak já tobě', objevil Michael Lombardo z Rutgersovy univerzity v New Jersey.

<sup>216</sup>

V korálových útesech u Panamy hrají hru 'jak ty mně, tak já tobě' malé oboupohlavní rybky zvané hamlet. Během dvoření postupně každá ryba hraje samičku, zatímco ostatní hrají samce. Jak se dá čekat, je snazší být sameček než samička. Kvůli této pobídce k podvodu si "samičky" vyvinuly takovou strategii, že kladou pokaždé jen několik vajíček, než "sameček" prokáže, že po oplození vajíček nezradí, ale že bude hrát samičku, až na něj dojde. Jak mezi nimi narůstá důvěra, kladou pokaždé více vajíček.

Pokud jde o ekosystémy, je strategie jak ty mně, tak já tobě silná. Dobře se osvědčuje, když soupeří s nejrozmanitějšími jinými strategiemi. Ačkoli žádná strategie není evolučně stabilní, ukazuje se, že pokud je vztah dlouhodobý, pak strategie jak ty mně, tak já tobě

---

<sup>216</sup> M. Lombardo, Science 227, 1363 (1985).



nemůže být napadena a vytlačena notorickými podvodníky. Zjištění, že jak ty mně, tak já tobě' je všeobecnou strategií, posílá optimistickou zvěst těm, kteří se bojí, že lidská přirozenost je založena pouze na závisti a sobeckém zájmu, jak to typicky představuje Hobbesův divoch, jehož život byl "osamělý, bídný, hanebně surový a krátký".<sup>217</sup> Když se v lidské společnosti uplatní ve velkém, pak strategie 'jak ty mně, tak já tobě' znamená, že úspěšný podnikatel je možná spíše ten, kdo oportunisticky vyhledává spolupráci než bezohledný kapitalista. Hodní lidé možná nakonec nevyumřou.

## Vývoj strategie

Protože možné strategie ve věžňově dilematu jsou komplexní, použil Axelrod ke studiu jejich evoluce genetický algoritmus. Reprezentoval každou možnou strategii jako řetězec genů na chromozomu, který podstupuje obvyklý proces určený Hollandovým genetickým algoritmem. Úspěch každé strategie je dán v kontextu stávajícího prostředí, přičemž párováním, překřížením a mutací se postupně upřednostňují lepší strategie. Specifická třída strategií, kterou takto Axelrod zkoumal, byl soubor strategií beroucích v úvahu výsledky posledních tří tahů a nedělajících žádné chyby. (Jinými slovy hra se hraje deterministicky.)

Množství strategií, které lze takto reprezentovat, je ve skutečnosti obrovské.<sup>218</sup> Vyčerpávající hledání nejlepších strategií samozřejmě nepřipadá v úvahu. Jak zdůrazňuje Axelrod: "Kdyby tyto strategie zkoušel počítač rychlostí sto za vteřinu od okamžiku vzniku vesmíru, bylo by do nynějška vyzkoušeno méně než jedno procento."<sup>219</sup> Celíme tedy kombinatorické explozi dobře známé z teorie komplexní optimalizace, kde právě genetické algoritmy slaví největší úspěchy.

V jedné sérii simulací se hledaly nové strategie, které by soutěžily s neměnným souborem osmi reprezentativních strategií, které Axelrod

---

<sup>217</sup> T. Hobbes, *Leviathan* (Collier Books, New York 1962), str. 100. Český překlad: T. Hobbes, *Leviathan* (Praha, Melantrich 1941).

<sup>218</sup> V tomto případě je toto číslo  $2^{30}$ , kde exponent udává počet genů potřebných k reprezentaci všech možných kombinací posledních tří tahů, kde každý tah má čtyři možné kombinace, ( $4 \times 4 \times 4 = 64$ ) plus  $3!$  pro hypotetická tři kola před startem. Faktor 2 se objevuje proto, že je tu volba ze dvoutahů pro každou ze sedmdesáti možných posloupností.

<sup>219</sup> R. Axelrod in: *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, L. Davis (ed.) (Pitman, London 1987), str. 32-41.

vybral z druhého kola svého turnaje ve vězeňském dilematu. Je dosti pozoruhodné, že genetický algoritmus se vyvinul (z náhodného počátku) tak, že nejdominantnější člen měl zásobu strategií, které byly právě stejně úspěšné jako strategie jak ty mně, tak já tobě', která vyhrála turnaj. Ve skutečnosti většina jeho pravidel sdílela řadu společných rysů s jak ty mně, tak já tobě'. Dostal však také pravidla, která fungovala podstatně lépe.

Je však dobře možné, že nebudou příliš stabilní v různých prostředích. Jak jsme zdůrazňovali, genetický algoritmus, tak jak je obvykle definován, obsahuje určitý druh pohlavního rozmnožování, při němž dochází k rekombinaci chromozomů. Axelrod zkoumal, co se stane v případě bezpohlavnosti: populace se nadále vyvíjely k pravidlům, která byla zhruba stejně dobrá jako v přítomnosti sexuality, ale bylo asi dvakrát méně pravděpodobné, že vytvořily pravidla podstatně lepší než jak ty mně, tak já tobě'. To zdůrazňuje důležitost sexuality. Potom pokračoval tím, že uvažoval případ, kdy se samo strategické prostředí mění: nyní bylo tvořeno vyvíjejícími se populacemi chromozomů. Zjistil, že zpočátku se populace strategií vzdálila od stavu s vysokou úrovní spolupráce. Ale asi po dvaceti generacích se tento trend začal obracet. Účastníci si vyvinuli strategie spolupráce, kdekoli to bylo možné, se schopností rozlišovat mezi těmi, kdo oplácejí tuto spolupráci, a těmi, kdo nikoli. Nakonec se ti, kdo spoléhají na vzájemnou pomoc, rozmnoží a ovládnou celou populaci.

Axelrodovy hry s hrami poskytují fascinující vhled do evoluce strategie. Ve skutečnosti jeho studie znázorňují problém teorie her jako hledání vysokých poloh v krajně zdatnosti odpovídající spoustě genových kombinací.<sup>220</sup> Počítačové simulace ukazují, že pohlavní rozmnožování pomáhá populaci prozkoumat tento mnohorozměrný prostor, a tak najít kombinace genů s nejvyšší zdatností; že v evoluci dochází ke kompromisu mezi ziskem pocházejícím z flexibility a ze specializace (flexibilita je obvykle výhodná v dlouhodobé perspektivě, ale z krátkodobého pohledu jde o přežití jednotlivců). Některé aspekty evoluce jsou navíc zcela libovolné. Jedním z nejvýraznějších příkladů této libovольnosti jsou hromadná vymírání, která vymazala jedním rázem celé druhy, což je rys evoluce, k němuž se vrátíme, jen co se zmíníme o některých novějších výsledcích teorie her.

---

<sup>220</sup> Krajiny zdatnosti byly poprvé zavedeny Sewallem Wrightem před mnoha lety; viz S. Wright, *Evolution* 36, 427 (1982).

# Neurčitost a Pavlov

Hodní hoši mohou v reálném životě skončit poslední. Vznik spolupráce závisí na několika věcech: "hráči" musejí jeden druhého opakovaně potkávat a musejí být schopni jeden druhého rozpoznat. Musejí si také pamatovat, jak dopadla předchozí setkání. Výsledek mohou ovlivnit i jiné faktory, od náhodnosti setkání po pravděpodobnost, že genetické faktory určující chování jsou předány z rodičů na děti. Když uvážil tyto neurčitosti reálného světa, Robert May z Oxfordské univerzity roku 1987 prohlásil, že Axelrodova převratná práce je vysoce idealizovaná a není pravděpodobné, že by se dala aplikovat ve velkém na přirozený svět.

Pokusy zjistit, jak se strategie jak ty mně, tak já tobě' vypořádá s těmito komplikacemi, se zabývali Martin Nowak a Karl Sigmund na univerzitě ve Vídni. Zjistili, že když se vezme v úvahu trocha neurčitosti reálného světa, způsobená až příliš lidskou tendencí dělat chyby, přestává být 'jak ty mně, tak já tobě' tou nejdokonalejší strategií. Když to antropomorfizujeme, tato neurčitost dovoluje jednotlivcům vyvinout nové strategie, zatímco přidání trochy náhodnosti k chování dovoluje "odpuštění" a šanci vyzkoušet chování jiného hráče. Výsledkem Nowakovy a Sigmundovy práce bylo zjištění, že neexistují žádné evolučně stabilní strategie. Po tisících generací povstávají neustále nové strategie, ovládají pole a zase vymírají. Neurčitost však přesto umožňuje spolupráci. Optimistické poselství Axelrodových výzkumů i nadále platí.

Dva hráči uplatňující deterministicky 'jak ty mně, tak já tobě' se mohou dostat do začarovaného kruhu vzájemné pomsty. Pokud jeden začal spoluprací a druhý zrazováním, budou se točit v nekončících výměnách chování - spolupráce, zrada, spolupráce, zrada - donekonečna. Ale tím, že se přidají chyby, nakonec po asi tak 200 generacích převáží nad 'jak ty mně, tak já tobě' jiná strategie. Je to strategie zvaná 'jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně'. Tak jako předtím se na spolupráci odpovídá spoluprací. Občas je však zrada "odpuštěna" a dojde ke spolupráci, místo aby přišla odplata ve stylu Starého zákona. V důsledku toho může být prolomen kruh vzájemné pomsty, který paralyzuje deterministickou strategii jak ty mně, tak já tobě'.

Nowak zdůrazňuje, že úspěch strategie závisí do značné míry na okolnostech. Například v populaci podvodníků je nejlepší cestou k

počátečnímu vývoji spolupráce 'jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně'. Nowak nazývá tuto strategii "katalyzátorem" pro její schopnost nastartovat vzájemné vztahy. Kromě toho závisí preferovaná strategie na tom, jak je hra nastavena. Strategie jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně' je poněkud omezená v tom smyslu, že reaguje pouze na protihráčův předchozí krok. Avšak pokud jsou vzaty v úvahu tahy obou hráčů, nabízejí se pro každou akci čtyři možnosti. S touto dodatečnou komplexitou je samotná strategie 'jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně' překryta jinou strategií. Nowak se s ní setkal, když se Sigmundem pobýval na zámku poblíž Vídně. Zpočátku ho zlobilo, že strategie 'jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně' prohrála, když nechal běžet simulaci na svém laptopu. "Trvalo mi dva týdny, než jsem si uvědomil, že nejzajímavějším výsledkem věžňova dilematu je strategie, která se od 'jak ty mně, tak já tobě' liší."

Strategii se říká Pavlov, je stejně jednoduchá jako jak ty mně, tak já tobě' a ztělesňuje tento základní mechanismus chování: "vyhraješ-li zůstaň, prohraješ-li, změň". Tento typ chování se dá shrnout ještě lépe známou zásadou "co tě nepálí, nehas". Tuto strategii Rapoport s posměchem označil za strategii "brouka Pytlíka" už v roce 1965. Její schopnost korigovat omyly došla ocenění, teprve když Sigmund a Nowak zavedli prvek náhodnosti, který reprezentuje chyby. Typicky dokážou hráči hrající podle Pavlova obnovit spolupráci po dvou kolech vzájemného zrazování. Sigmund to přirovnal k manželské dvojici, která se smíruje po domácí hádce. Vypadá to jako 'jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně', ale Pavlov nabízí další výhodu v tom, že nemá žádné výčitky, když vykořisťuje naivky: chyba, která vede k tomu, že pavlovovský hráč zrazuje, mu pak dovolí zjistit, zda jeho partner spolupracuje za všech okolností.<sup>221</sup>

Nové poznatky pozměnily závěry z významného experimentu, který provedl Manfred Milinski z Ruhrské univerzity v Bochumi, který se nyní usadil v Bernu. Myslel si, že našel důkaz, že koljušky užívají strategii 'jak ty mně, tak já tobě'. Ve volné přírodě se koljušky často přibližují k lovicímu predátorovi, a to podle všeho tak, aby jej identifikovaly a otestovaly jeho připravenost zaútočit. Pokud to malé ryby dělají hromadně, mohou být blíž, a kdyby měl predátor zaútočit, budou lépe chráněné tím, že jsou ve skupině a predátora matou. Je však

---

<sup>221</sup> Zní to tvrdě, ale je to nutné. 'Jak ty mně, tak já tobě' i jak ty mně, tak já tobě, ale velkomyslně mohou být po svém ustavení napadeny vykořisťovateli, kteří se objeví díky mutacím. Naproti tomu naivkově nedokážou rozvrátit pavlovovskou populaci.

třeba volit z několika možností. Pokaždé, když jedna ryba připlave blíže, mohou její průvodci spolupracovat a přiblížit se také anebo zradit a otočit se zády. Podvodník podstupuje menší riziko, že bude sám sežrán, a může získat více informací než naivkové tým, že sleduje osud těchto ryb.

Milinski umístil koljušky do nádrže, z níž mohly vidět velkou cichlidu *Tilapia mariae*, která připomíná okouna, obvyklého lovce koljušek. S důmyslným použitím zrcadel mohl Milinski buď vytvořit odraz koljušky, která vypadá, jako že plave směrem k predátorovi, anebo jiné, která se vzdaluje a nakonec zmizí. "V obou případech," uzavírá Milinski, "se pokusná ryba chovala podle 'jak ty mně, tak já tobě', což podporuje hypotézu, že se mezi egoisty může vyvinout spolupráce." Avšak mezi koljuškami, které pokaždé zrazovaly, objevil také takové, které se pokoušely v každém druhém tahu spolupracovat. To je přesně to, co se dá čekat od pavlovovské strategie.

## Prostor, náhodnost a věžňovo dilema

Jiná variace věžňova dilematu se objevila ve výzkumu Martina Nowaka a Roberta Maye. Přišli na to, jaký má na věžňovo dilema vliv, rozmístíme-li hráče v prostoru. Použili model s deterministickým celulárním automatem, který dovoluje velkému množství hráčů vzájemné působení na mřížce. Kdyby tu nebyla prostorová struktura, vedl by tento model k jednoznačnému vítězství podvodníků. Avšak, jak říká May: "Aniž by bylo potřeba si cokoli pamatovat nebo používat nahodilé strategie nebo vzpomínky na předchozí setkání či uvažovat o budoucnosti, prostě pomocí vzájemného působení se sousedy můžete dostat samoorganizované prostorové struktury, které umožňují spolupracujícím hráčům přežít."<sup>222</sup> Spolupráce tak může být důsledkem opakování, neurčitosti a také prostorové struktury.

Protože hráči jsou v Nowakově a Mayově modelu umístění na dvojrozměrné pravoúhlé síti, není zde žádná neurčitost, pokud jde o to, s kým jednotlivec v každém časovém okamžiku jedná: každý čtverec má osm sousedů. Hráči zanedbávají všechny jemnosti strategie či vzpomínek na minulé setkání - buď spolupracují, nebo podvádějí. Jedinou proměnnou v této hře je, nakolik se zrada vyplácí. Po každém kole hry je každý čtverec obsazen tím, kdo získal nejvíce bodů, to jest

---

<sup>222</sup> M. Nowak, R. May, and K. Sigmund, *Scientific American* 272, 76 (1995).

bud' sousem, nebo původním vlastníkem. Nepřekvapuje, že v této usedlé populaci je spolupráce větší. Podvodníci mohou prosperovat v anonymním zástupu, ale mezi sousedy je častá vzájemná pomoc. Když pomocí barevného kódu znázorníme, které buňky se změnily a které nikoli, dávají tyto prostorové hry věžešskému dilematu docela nový švih a produkují prostorové obrazce neobyčejné krásy a komplexity. Výsledky jsou překvapující (viz obr. 8 barevné přílohy). Jak říkají autoři: "Je tu nový svět, který je třeba probádat."

Tyto evoluční hry generují nepravidelné nebo pravidelně se posouvající mozaiky, kde se udržují jak strategie spolupráce, tak podvodu. I když je šachovnicová mřížka nahrazena šestiúhelníkovou nebo jsou tato pravidla mírně pozměněna či pokud jsou stavy buněk obnovovány náhodně, směsi spolupracovníků a podvodníků zachovávají svůj poměr, který fluktuuje kolem dlouhodobě předvídatelných průměrných hodnot. Výsledkem je nekonečně se přemílající chaos, v němž se shluky rozšiřují, srážejí a tříští se a "přežívají jak hodní hoši, tak grázlové". Z jediného podvodníka může vyrůst fantastický kaleidoskop skvělých obrazců, připomínajících perské koberce, krajkové dečky a rozetová okna. Ačkoli jsou pravidla jednodušší než u Conwayovy hry Life, dokážou vytvořit kluzáky, blikače, rotující obrazce a neomezeně rostoucí motivy nebo vykazovat fraktální vzory.

Tyto studie jsou vzrušující z několika důvodů. Za prvé ukazují, že když se do věžňova dilematu přidá geografie, mohou spolupracovníci a podvodníci koexistovat jedni vedle druhých. V přírodě to znamená, že rozličné populace hostitelů a parazitů nebo predátorů a jejich kořisti mohou přežít ve společenstvech navzdory nestabilitě jejich vzájemného působení. Za druhé mohou být tyto studie rozšířeny tak, aby nám něco řekly o chování jiných prostorově rozlehlých systémů, jakými jsou dvojrozměrná verze modelu spinového skla, na nějž jsme narazili ve 4.kapitole, modely umělých a biologických neuronových sítí, popisované v 5. a 9.kapitole, a prebiotická polévka molekul (rozebíraná výše), z níž poprvé povstal život. Jak tvrdí vědci: "Kataly-zovat replikaci molekuly je forma pomoci; řetězec katalyzátorů, kde je každý článek napojen zpátky na sebe sama, bude asi nejstarším případem vzájemné pomoci. V tomto smyslu by byla spolupráce starší než sám život." Zvláště tato aplikace může znít velmi povědomě: prostorové struktury generované touto dvojrozměrnou hrou jsou něco jako chemie celulárních automatů, použitá Martenem Boerlijstem a Paulinou Hogewegovou z Utrechtské univerzity k argumentaci, že spolupracující

řetězce neboli "hypercykly" nejsou zranitelné "podváděním" molekulárních mutantů, kteří přijímají více katalytické pomoci, než kolik jí poskytují.

Tyto počítačové experimenty zdůrazňují, jak může spolupráce vytrvat navzdory všudypřítomné hrozbě zneužití, vyplývající zdánlivě z přirozeného výběru, který preferuje vysokou odměnu za úspěch jednotlivce. Po celou evoluční historii života vedla spolupráce ve skupině menších jednotek, jako jsou buňky, k povstávání komplexnějších struktur, například eukaryontních buněk nebo mnohobuněčných organismů. V tomto smyslu, argumentují May a Nowak, má spolupráce a z ní plynoucí samoorganizace stejně zásadní význam pro evoluci jako přirozený výběr. "Spolupráce vytváří komplexnější struktury, zatímco přirozená selekce z nich vybírá ty, které mohou přežít." Avšak, jak zdůrazňují, klikaté cesty miliardu let trvající biologické války mezi spoluprací a vykořisťováním se během darwinovské evoluce natolik zkomplikovaly, že by bylo nereálné očekávat, že se v tak jednoduchém modelu budou reprodukovat všechny příklady z reálného života.

## Katastrofy

Neexistují žádné "Darwinovy rovnice", popisující biologickou evoluci kvantitativním, matematickým způsobem<sup>□</sup>. Nicméně, jak jsme rozebírali v předcházejících kapitolách, biologická evoluce je vysoce komplexní (tedy nelineární) dynamický systém. V příští kapitole uvidíme, jak počítačové studie, založené na booleovské logice, pomáhají definovat obecné rysy evoluce. Zatímco počítačové simulace jsou jediným spolehlivým způsobem, jak studovat globální vlastnosti evoluce, k určitým specifickým aspektům se dá přistoupit s použitím některých pojmů, s nimiž jsme se již setkali. Jedním z nich je fenomén "přerušované rovnováhy",<sup>□</sup> popsany roku 1972 Nilesem Eldredgem z Amerického přírodopisného muzea a Stephenem Gouldem z Harvardovy univerzity na základě studia fosilních nálezů, které naznačují, že evoluce jednotlivých druhů se odehrává v dobře definovaných skocích (které přirovnávají k interpunkčním znaménkům

---

<sup>□</sup> Není to tak beznadějně, jak by se mohlo zdát. Dnes se již například studuje řada matematických modelů inspirovaných statistickou fyzikou, o nichž se předpokládá, že relativně dobře popisují evoluci virů. (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Punctuated equilibrium (pozn. překl.)

v textu), oddělovacích dlouhá období stability (rovnováhy neboli stáze).<sup>223</sup> Během osmdesátých let David Raup a John Sepkoski z Chicagské univerzity při studiu záznamů tisíců fosilních rodů zjistili, že vymírání druhů se dá přirovnat k náhlé explozi.

Tato pozorování se vysvětlují různými způsoby. Někteří považují hromadná vymírání jednoduše za soubor nezávislých náhod. Jiní hledali jediný mechanismus, který by je všechna vysvětlil: bombardování Země kometami, destrukce mělkých moří při srážce a spojování kontinentů, nedostatek kyslíku nebo dramatická změna klimatu. Nejznámější z takových událostí byl dopad obřího meteoritu, kterým se populárně vysvětluje vymizení dinosaurů před pětadesáti miliony lety. Aplikovaný matematik sir Christopher Zeeman použil "teorii katastrof"<sup>224</sup> pro vytvoření jednoduchého a obecného vysvětlení přerušované rovnováhy na základě změn prostředí, v němž druhy žijí a v němž dochází k nestabilitám.

Jiný evoluční model byl navržen s použitím pojmu samoorganizovaného kritična, který jsme rozebírali v minulé kapitole. Per Bak tvrdí, že život je dynamický systém, který ani zdaleka není ve stabilním neproměnném stavu (v "rovnováze"), ale spontánně se organizuje do charakteristicky neklidného kritického stavu. Tak jak to navrhoval Zeeman, tento model opět předpovídá, že život se nevyvíjí postupně, ale ve skocích, s dlouhými obdobími nečinnosti neboli stáze, přerušovanými výbuchy změn, charakterizovanými hromadným vymíráním jedněch druhů a vznikem nových. Podstatné na této myšlence je to, že nevyžaduje, aby vymírání pocházelo od nějaké "vnější" příčiny. Pokud se život organizuje do kritického stavu, mohou být katastrofy, jakkoli budou veliké, vnitřním samoorganizovaným rysem evoluce, který nevyžaduje žádné vnější příčiny. □

Zatímco je pravděpodobné, že vymizení dinosaurů bylo skutečně způsobeno dopadem meteoritu, během 600 milionů let následujících po kambrické explozi, během níž byla Země zabydlena mnohobuněčnými organismy, došlo ke spoustě jiných krizí. V nejdrastičtějších ze všech

---

<sup>223</sup> Pojem přerušované rovnováhy je kontroverzní, z větší části kvůli „nabubřelé rétorice“ jeho zastánců, která často vypadá, jako by se tento pojem nesnášel s konvenčním darwinismem. Viz např. R. Dawkins, *The Blind Watchmaker* (Penguin, London, 1986) a Maynard Smith, *Did Darwin Get It Right?* (Penguin, London 1993), část 3.

<sup>224</sup> Teorii katastrof vynalezl René Thom k popsání situací, kdy spojitě příčiny - v tomto případě změny v evoluční krajině - vedou ke skokovým změnám.

□ Zde popisovaný model evoluce se nazývá Bakův-Sneppenův model. (pozn. překl.)



hromadných vymírání, před asi 250 miliony let, na konci permu, bylo vyhlazeno přes devadesát procent druhů nalézajících se ve zkamenělinách.<sup>□</sup> Je možné, že takové události jsou přirozeným důsledkem darwinovské dynamiky?

V silně idealizovaných počítačových simulacích objevili Bak a jeho kolegové některé velmi zajímavé postřehy. Během období horečně evoluční aktivity je průměrná zdatnost druhů nízká, jak neustále mutují při hledání vyšší zdatnosti. Zdatnost těchto různorodých druhů je nízká také během hromadných vymírání a vysoká během období stáze spojené s nízkou evoluční aktivitou. Zatímco evoluce v těchto modelech uvádí ekologii do kritického bodu svojí samoorganizační dynamikou, zdatnost druhů v tomto bodě není nijak zvlášť vysoká. V jejich práci tedy "přežití nejzdatnějšího" neznamenovalo evoluci do stavu, v němž se každému druhu daří dobře: "Právě naopak, jednotlivé druhy jsou stěží schopny se zastavit - jako zrnka písku v kritické pískové kupě," shrnují to.

Podle jejich modelu se v kritickém bodě všechny druhy navzájem ovlivňují. V tomto stavu působí kolektivně, jako jediný "metaorganismus", v němž mnozí sdílejí společný osud. To je zvláště zřejmé samotnou existencí vymírání velkého rozsahu. Jedním z důsledků je to, že ty druhy, které jsou navzájem provázány mnoha biologickými závislostmi, jako jsou potravní řetězce a vztahy lovec-kořist a parazit-hos-titel - tedy ty, které mají vysoký stupeň komplexity -, jsou citlivější k fluktuacím, které rozrušují dynamiku, a proto budou s větší pravděpodobností součástí příští laviny vymírání. Jak říká Bak: "Náš model předpovídá, že švábi přežijí člověka."<sup>225</sup>

## Globální ekosystém

Myšlenka, že hmyzí společenstva se dohromady chovají jako nějaký superorganismus, je dobře známá. Jak jsme se již zmínili, můžeme takto vysvětlit pouze altruismus založený na příbuznosti. Aplikace samoorganizovaného kritična nás ale vede k tomu, abychom ještě jednou zdůraznili, že globální vlastnosti biologické evoluce se nedají pochopit tak, že je rozčleníme na jednotlivé součásti a pak je analyzujeme, jako by nezávisely na ostatních. Takový redukcionismus je samozřejmě jen prvním přiblížením k pravdě, a ačkoli nám může

---

<sup>□</sup> Postihlo to například dobře známé trilobity, (pozn. překl.)

<sup>225</sup> P. Bak, H. Flyvbjerg, and K. Sneppen, *New Scientist* 141, 1916 (1994).

poskytnout mnoho postřehů, slušnost by měla velet, abychom rozebrané kusy složili zase dohromady.

Roku 1968 rozčílil James Lovelock genocentrické darwinisty tvrzením, že Země není jen kamennou koulí se zelenou slupkou života na povrchu.<sup>226</sup> Biologové, kteří následují Darwina, vidí život, jak se přizpůsobuje svému prostředí. Nezávisle myslící Lovelock ukazuje život a prostředí jako části jednoho superorganismu, v němž tvorové, skály, vzduch a voda na sebe komplikovaným způsobem vzájemně působí a tak zajišťují, že prostředí zůstává stabilní. Jeho představa byla jeho tehdejším sousedem, spisovatelem Williamem Goldingem, pojmenována Gaia, podle starořecké bohyně země.

Pojem Gaia, jak byl poprvé popsán roku 1973, byl napaden mnoha renomovanými mainstreamovými biology. Stěžují si hlavně na to, že tato myšlenka má teleologický podtext, tedy že předpokládá akci účelově zaměřenou směrem k specifickému cíli, a je tudíž nevědecká. Problém tkví v tom, že Gaia vypadá jako návrat do doby před Darwinem, kdy v 17.století arcibiskup ze severoirského Armaghu James Usher tvrdil na základě svatých písem, že datem stvoření byl rok 4004 př. Kr. Lovelock a další zastánci Gaie nyní zřídka používají slovo "organismus" a dávají přednost méně dráždivým termínům, jako je "systém". Odmítají také koncepci předem daného účelu, ale přesto tvrdí, že tu jsou regulační mechanismy, které udržovaly prostředí vhodné pro život po dobu posledních tří i více miliard let. Těmito zpětnovazebními mechanismy se vysvětluje relativní stálost podnebí, překvapivě mírná slanost oceánů, stálá koncentrace kyslíku po dobu posledních sto milionů let a také to, že formy života jsou tak rozmanité.

Ať se vám tato myšlenka líbí nebo ji nesnášíte, je jasné, že hledání Gaie dokáže poskytnout nový pohled na komplexní zpětnovazební systémy, které ovládají naši planetu. Jeden nedávný příklad pochází ze studií prováděných v Roaring Forties, bouřlivých mořích u jižní Austrálie. Našly se důkazy podporující gaiovský názor, že živé organismy pomáhají regulovat klima. Práce vedená Gregem Ayersem z Melbourne sledovala osud dimetylsulfidu (DMS), plynu uvolňovaného mikroskopickými mořskými rostlinami žijícími v oceánu neboli fytoplanktonem. Zájem o DMS se datuje od 70.let, kdy během okružní plavby z Británie do Antarktidy Lovelock a někteří kolegové potvrdili

---

<sup>226</sup> J. Lovelock, Gaia: živoucí planeta, Mladá fronta 1994. Teolog William Paley publikoval roku 1802 knihu nazvanou Natural Theology. V ní vášnivě argumentoval, že mechanismus života je tak komplikovaný, že musel mít svého konstruktéra - Boha.

předpověď "teorie Gaia" tím, že našli překvapivé množství této molekuly v povrchových vodách uprostřed oceánu. Lovelock a kolegové na Washingtonské univerzitě předpověděli, že veškerý DMS se chemicky změní působením vzdušného kyslíku tak, že bude produkovat částice obsahující síru (sulfáty), na nichž mohou kondenzovat mračna.

Lovelockova hypotéza Gaia zahrnovala samoregulační biologický termostat: mraky budou stínit zemi odražením nadbytečného slunečního světla, což omezí růst planktonu, který produkuje DMS, a tím sulfátové částice, které jsou zárodky mraků. Od listopadu 1988 do května 1990 měřili australští vědci vedení Ayersem koncentraci DMS a vzduchem roznášených částic na Cape Grim na severozápadním pobřeží Tasmánie. Jak se čekalo, koncentrace DMS a těchto částic se měnila podle ročního období, přičemž v létě byla vysoká a v zimě nízká. Ayers byl opatrný: "Naše práce je ukazatelem směrem ke Gaii, ale výsledky nejdou dostatečně daleko, aby obhájily celou (termostatovou) teorii." Avšak Lovelock zdůrazňuje, že nebýt jeho Gaie, nikdo by nikdy nehledal DMS a jeho souvislost s mraky a klimatem.

Lovelock tvrdí, že Gaia je dobře definovaná teorie s pevnou matematickou základnou, schopnou osvětlit zásadní otázky, jako je rozmanitost života neboli biodiverzita. Kritické odpovídají, že teorie je přinejlepším vágní a přinejhorším téměř mystická. Nakonec ji musel Lovelock přejmenovat na "geofyziologii", protože renomované vědecké časopisy nepřipustí slovo "Gaia" jinak než jako očeřování. Mnoho seriózních evolučních biologů couvá děsem, když vidí, že "v populárním přírodopise, zvláště v televizních dokumentárních pořadech, se to tím jen hemží". Doufají, že vliv Gaie brzy odumře.

Navzdory svým vadám, pomáhá studium komplexity takového typu, jaký jsme zkoumali v této kapitole, učinit Gaiu či alespoň jejího ducha přijatelnější, než by věřili redukcionisté. Posunutím důrazu od jednotlivých molekul ke globálnímu chování je možné schematicky ukázat, jak přírodní výběr v souhře se samoorganizo-vanými molekulárními procesy vedl ke vzniku života: sebereplikace - což je ve skutečnosti forma autokatalýzy - byla základem nelineární komplexity, která vedla ke spontánní samoorganizaci na úrovni molekul. Proměny sebereplikujících se molekul vznikají díky mutacím, způsobeným zářením nebo chemikáliemi v prostředí nebo chybami, k nimž během replikace nevyhnutelně dochází. Molekulární evoluce pak vybrala

samoreplikující se molekuly, které dokázaly nejlépe využívat chemické energie (potravy či "paliva") díky samoorganizovaným procesům.

Krátce řečeno, příběh života obnáší více než jen soutěžení, dědičnost, sobectví a přežívání nejzdatnějších replikátorů nebo genů. Nezanedbatelnou roli hrají také pojmy samoorganizace a komplexity, s nimiž jsme se setkali v posledních třech kapitolách, ačkoli vztah mezi evolucí, komplexitou a spontánním stvořením řáduje námětem neustálých debat mezi biology. Jak uvidíme v příští kapitole, tytéž celkové rysy komplexních adaptivních systémů mohou dokonce umožnit vývoj umělého života.

## 8 Život, jaký by mohl být

... kde všechna naopak  
plodí přirozenost; divné potvory  
obludy a šeredy, a příšery  
nevýslovné, hroznější, než jakové  
báseň bájila, neb hrůza smyslila  
Hydry, Gorgony a mrzké Chymery. □

MILTON

"Lidé se nespokojí s výrobou života: budou jej chtít vylepšovat." Těmito slovy předvídal v roce 1929 mladý irský krystalograf John Bernal možnou existenci strojů, podobajících se živým organismům tím, že se dokážou rozmnožovat.<sup>227</sup> O této "postbiologické budoucnosti" napsal v knize Svět, tělo a ďábel: "Vyrobít samotný život bude jen předběžné stadium. Pouhá výroba života by měla význam jen tehdy, pokud máme v úmyslu nechat jej, ať se sám dále vyvíjí."

Když o téměř dvacet let později zápolil von Neumann se samoreprodukcí se automaty, dospěl poprvé k výsledkům ukazujícím, že umělý život je možný. Jeho takzvaný kinematický model, s nímž jsme se setkali v 3.kapitole, se snažil izolovat logický obsah biologické sebereplikace. Ačkoli von Neumann vymyslel svůj samoreplikující se automat několik let předtím, než byla odhalena struktura genetického stavebního plánu (DNA), položil důraz na jeho schopnost vyvíjet se. Při své přednášce v Hixonu posluchačům řekl, že každá instrukce, kterou stroj provádí, "zhruba vykonává funkci genu". Pokračoval tím, že popsal, jak chyby v automatu "mohou vykazovat jisté typické rysy objevující se ve spojení s mutací, která sice zpravidla vede k zániku, ale někdy může pokračovat reprodukce v pozmeněné podobě".<sup>228</sup>

---

□ Přeložil Josef Jungmann, Praha 1811

<sup>227</sup> J. Bernal, *The World, The Flesh, and The Devil* (E. P. Dutton, New York 1929).

<sup>228</sup> S. Levy, *Artificial Life* (Jonathan Cape, London 1992), str. 28.

Následovaly snahy uvést jeho myšlenky v život. V roce 1956 byl navržen plán "umělých živých továren", samoreprodukcujících se plovoucích dílen, které by dokázaly sbírat životně důležité minerální a potravinové zdroje.<sup>229</sup> S vědomím nebezpečí, které by vzniklo, kdyby se jeden z takových strojů rozeběhl v amoku po planetě, navrhl Freeman Dyson z Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu neškodnější myšlenkový experiment, v němž by samoreprodukcující se stroje rozsávaly život ve sluneční soustavě. Von Neumannem odhalená logická podstata života má však dnes větší význam než kdy předtím, díky moderním počítačům schopným produkovat komplexitu.

Již jsme viděli, že v biologii a počítačovém programování je tendence přecházet od racionálního návrhu k technikám založeným na slepých silách biologické evoluce. Představme si, co se stane, když se budou vyvíjet počítačové programy, které budou řešit těžké optimalizační problémy. Přijmeme-li jako fakt, že sám život je takový problém, mohlo by to v nějakém smyslu vést k novým, počítačovým formám života? Je možné provádět darwinovskou evoluci "přirozeným výběrem" - což je jediná vlastnost definující život - uvnitř počítače? Zatímco život na Zemi se omezuje na organismy založené na uhlíku, to, co můžeme vytvořit v počítači, je založeno na logických strojových instrukcích. Nezdá se, že by něco bránilo evoluci opírající se o počítače, jež by vytvářela komplexitu srovnatelnou s tou, s níž se setkáváme v biologii. Ve skutečnosti by vyvíjející se strojové kódy měly být schopny produkovat jakýkoli stupeň komplexity v tom smyslu, že by měly být schopny provádět univerzální výpočty, o nichž hovořil Turing.

Tak jako biologický život nakonec povstává z nesmírně složitého vzájemného působení velkého množství neživých mikroskopických jednotek zvaných molekuly, tak někteří věří, že z komplexních logických interakcí v počítači může povstat umělý život<sup>□</sup> (A-Life). Podstatou analogie mezi těmito dvěma světy je to, že všechny logické procesy, které se v počítači odehrávají, jsou založeny na atomárních skladebních blocích Booleovy dvojkové symbolické algebry (viz 3.kapitulu). Nová věda o umělém životě má původ ve von Neumannově abstraktní vizi a je prospěšná hned v několika ohledech. Jak uvidíme, může nám pomoci lépe porozumět biologickému životu pomocí abstraktnějších studií emergentních vlastností, které jej vylepšovaly a tvarovaly prostřednictvím procesů reprodukce, soutěžení a evoluce. A

<sup>229</sup> E. Moore, Scientific American, říjen 1956, str. 118.

<sup>□</sup> Artificial life (pozn. překl.)

naopak tím, že v počítači zapřáháme schopnosti darwinovských systémů do řešení problémů, dokážeme efektivně řešit mnoho nebiologických komplexních optimalizačních úloh, jako jsou ty, které jsme rozebírali v 2. a 5.kapitole.

Umělý život představuje nový přístup, jak se postavit k nelehkým pojmům inteligence a umělé inteligence, a to tím, že se klade důraz na vlivy okolí na učení, jak to předvídal kdysi dávno Turing. A nejvíce vzrušující je naděje, že ALife může vést ke vzniku radikálně nových forem života. Příchod nejrůznějších počítačových virů znamenal první krok na této cestě a nyní ožívají v počítačích ještě dokonaleji "žijící" organismy. Ve své podstatě se umělý život snaží objevit nejzákladnější podstatu a univerzální rysy "života": nejen života, jak ho v současnosti známe, ale života, jaký by mohl být, ať na Zemi, v počítačích nebo jinde, a v jakékoli formě, v níž se nachází nebo může být vytvořen v našem vesmíru.

## Slabý a silný umělý život

Dalo by se možná říci, že se výzkum umělého života provozoval desítky let, i když se tomu tak neříkalo. Počítače se používaly k simulaci širokého spektra biologických procesů, které se často nedají zvládnout žádným jiným způsobem, jak jsme viděli v předchozí kapitole. Typicky to v podstatě znamená, že se počítači zadá k řešení soustava rovnic, o nichž se věří, že modelují jev, o který nám jde, ať je to růst končetin nebo shlukování hlenek. Právě tak jako počítačový model záblesku a hříbu z jaderného výbuchu není sám vybuchující bombou, ani tyto simulace nejsou žádným způsobem živé. Ty, kteří provádějí takový výzkum, můžeme označit za příznivce "slabého" umělého života, protože studují počítačové modely biologických procesů, v nichž by se simulace nikdy neprohlašovaly za živé. To, co odlišuje jistý směr současného výzkumu v tomto oboru od hlavního proudu, je často nevyřčená víra v "silný umělý život", podle níž se dá vhodně naprogramovaný počítač sám považovat za živý nebo aspoň má vlastnosti živé bytosti. Tento druh rozlišování je docela dobře znám badatelům zkoumajícím umělou inteligenci. Tam najdeme komunitu "slabé" umělé inteligence, složenou z lidí, kteří používají počítače k modelování procesů, k nimž dochází v mozku a které by se nedaly simulovat nebýt síly počítačů. Komunita silné umělé inteligence naproti tomu má ještě vznešenější cíl než skupina umělého života - vnést do

správně naprogramovaného počítače vědomím obdařenou mysl. Jedním způsobem, jak od sebe odlišit tyto postoje k umělé inteligenci, je přeložit přídavná jména tak, že "slabá" znamená umírněná a "silná" je totéž co troufalá. Dnes je umělá inteligence podoborem umělého života, neboť pouze u některých forem života se dá očekávat, že budou vykazovat inteligentní chování. Avšak mezi umělou inteligencí a umělým životem jako předměty současného bádání je jeden důležitý rozdíl: jak zdůraznil filozof Elliot Sober z Wisconsinské univerzity, pozemský život chápeme v mnoha směrech lépe než lidskou mysl, takže umělý život stojí na pevnějších základech než umělá inteligence.

Jak známo, pojem "život" je těžké definovat, což jsme zdůraznili v 7.kapitole. Protože je těžké najít dva lidi, kteří by se shodli na definici života, mohli bychom si myslet, že pokusy definovat umělý život budou zmatek jen zvyšovat. Malicherné hádky o definice nicméně neodradily komunitu silného umělého života od povýšeneckých prohlášení. Jedno z nejprovokativnějších pronesl Doyne Farmer z Los Alamos a Alletta Belinová z agentury Shute, Mihaly and Weinberger, a to způsobem připomínajícím prohlášení přívrženců silné umělé inteligence. "Za padesát až sto let se pravděpodobně objeví nová třída organismů. ... Příchod umělého života bude nejdůležitější historickou událostí od té doby, co se objevily lidské bytosti. Dopad na lidstvo a biosféru může být nesmírný, větší než průmyslová revoluce, jaderné zbraně nebo znečištění životního prostředí. Nyní musíme učinit kroky k ovládnutí tvorby umělých organismů; mají potenciál být buď nejpříšernější pozemskou katastrofou, nebo nejkrásnějším výtvozem lidstva." Zní to jako přemrštěná fantazie. Avšak než takové názory ukvapeně odmítneme, musíme téma umělého života pečlivěji prozkoumat.

## Viry

Některé příklady "slabých" forem umělého života jsou již vidět kolem nás a jsou všeobecně známé. Zrodily se během Válek Jader, což byla původně hra pro počítačové nadšence.<sup>230</sup> Ideou bylo vytvořit programy, které spolu bojují o čas procesoru a místo v paměti počítače - tak jako bojují zvířata o potravu a životní prostor. Dnes tu máme nezamýšlené verze Válek Jader, známé spíše jako počítačové viry, šířící se v PC, pracovních stanicích a sálových počítačích po celém světě.

---

<sup>230</sup> A. K. Dewney, Scientific American 250, 14 (1984), Scientific American 260, 110 (1989).



Pojem "počítačový virus" vyvolává určité asociace: byl zaveden v roce 1983 pro krátký úsek počítačového programu, který se dokáže, když je aktivován, sám nakopírovat do jednoho nebo více větších "hostitelských" počítačových programů. Hrozba, kterou počítačové viry představují, je tak velká, že skoro vždy dostanou atraktivní barvitá jména jako Brain, Denzok, Michelangelo, Elk Cloner, Festering Hate nebo Cyberaids. Viry mohou i "mutovat", když hacker poněkud pozmění kód viru: například jeden z nejrozšířenějších, Jerusalem, dal vzniknout virům Jerspain, Payday, Mendoza, Anarkia, Sunday, Fu Manchu a Zerotime. Viry se také staly mazanějšími. V polovině 90. let se objevil první virus, který využíval ke svému množení dvě strategie, z nichž si vybíral podle okolností. Celkově od první infekce virem Brain v lednu 1986 do 1. dubna 1991 infikovalo pouze osobní počítače IBM dvě stě různých virových kmenů.

Když se tyto infikované programy spustí, provádí se také virový kód. Může přitom způsobit poškození operačního systému počítače, přepsání důležitých souborů, dat a instrukcí; kromě toho obsahuje virus instrukce pro svou vlastní reprodukci, což mu umožňuje šířit se přenosem na magnetická média, jako jsou disky a pásky. Máme ještě jiné obyvatele zvěřince nakažlivých programů. Například "červi" jsou programy, které mohou běžet nezávisle a putovat z počítače do počítače rozrůstající se globální počítačovou sítí prostřednictvím elektronického ekvivalentu řetězového dopisu. Jiné typy tzv. vandalwaru zahrnují bakterie, trojské koně, logické bomby a propadliště. Výrobci počítačů ochotně unifikovali software, v němž se viry množí. Tak jako obilné monokultury může vážně poničit choroba, která by stěžejně narušila zdravou smíšenou louku, tak i šiky totožných operačních systémů mohou být zničeny těmito zdánlivě bezvýznamnými počítačovými infekcemi.

Jeich šíření klade nevyhnutelnou otázku: jsou počítačové viry živé? Tato otázka je ještě zapeklitější než tatáž otázka adresovaná biologickým virům. Odpověď záleží na tom, jak kdo definuje "život". Jak přírodní, tak umělé viry mají určité některé rysy živých bytostí. Dokážou se rozmnožovat, uchovávají informaci a mají metabolismus v tom smyslu, že vykrádají funkce hostitele, ať je to počítač nebo buňka. Jsou dokonce příklady vzájemného působení mezi různými druhy počítačových virů: virus Denzok vyhledá a přepíše virus Brain, pokud oba dva infikují tentýž počítač. Jeden klíčový rozdíl však uvidíme při srovnání se žloutenkou, virovou chorobou, která infikovala kolem

poloviny světové populace a je zodpovědná za 90 procent případů rakoviny jater.

Virus žloutenky není jen jeden, ale má mnoho variant. První byl objeven virus žloutenky B. Potom následovaly A, C, D a E. Nedávno byla naznačena existence dvou nových odrůd a je jich nepochybně ještě více. Překvapivé je, že to nejsou kmeny jednoho viru, ale že pocházejí ze zcela odlišných čeledí, v závislosti na jejich genetické výbavě. Jedno mají ale všechny společné. Jsou to "řešení", která si naprosto odlišné rodiny virů vyvinuly pro řešení téhož problému: jak nakazit lidskou jaterní buňku, a tak se rozmnožit. A a E vstupují do těla v potravinách a vodě znečištěné splašky; jiné viry využívají našeho potěšení ze sexu a podobně jako virus AIDS jsou přenášeny krví. To umožňuje přenos z matky na dítě, přenos prostřednictvím kontaminovaných jehel a při takových praktikách, jako jsou rituální obřizka, tetování a obřadná výměna krve.

Ačkoli vědci nemají rádi antropomorfizaci toho, co je stěží více než složitá molekula na pomezí života, jeden z průkopníků výzkumu žloutenky, Baruch Blumberg, připouští, že strategie, které si viry osvojily, jsou tak důvtipné, že je obtížné nepřisoudit jim prohnanou záměrnost. Virus sestávající z hrstky genů si díky své schopnosti vývoje, zdánlivě chystá nekonečné strategie, jak přelstít lidské tělo: reprodukce a mutace virů jsou tak rychlé, že v každé populaci je jich vždy několik schopných adaptovat se na změněné okolnosti nebo využít novou možnost.

Na rozdíl od přírodních virů se žádné počítačové viry zhotovené člověkem nevyvíjejí. Vytvořit nějaký, který by to uměl, by bylo skutečně velikou programátorskou výzvou, vezmeme-li v úvahu nesnášenlivost - takzvanou "křehkost" - většiny počítačových jazyků k chybám či "mutacím". Je to také spravedlivé, uvážíme-li škody, které již teď mohou viry způsobit počítačovým systémům. Jak jsme popisovali v 6.kapitole, nejpłodnější definice živého systému je taková, že je podřízen nemilosrdné selekci v darwinovském stylu; přinejmenším podle této definice takové programy nemohou být považovány za živé. Nicméně někteří zastánci silného umělého života, zvláště Farmer a Berlin, stále argumentují, že ačkoli počítačové viry potřebují lidské bytosti, aby je stvořily, mnoho přírodních organismů nemůže existovat bez pomoci jiných. Tudíž, argumentují, počítačové viry mají s člověkem vztah symbiózy, za účelem svého evolučního vývoje. Pomineme-li neplodnost terminologických debat, je jasné, že ačkoli tyto umělé

výtvořy obsahují více či méně odhmotněnou informaci, jsou znepokojivě blízko tomu, aby byly živé v obecném smyslu slova.

## Umělý růst

V některých typech výzkumu slabého umělého života se počítače používají k modelování procesů růstu rostlin, což je neuvěřitelně složitá otázka. Několik čísel může ilustrovat, jaký problém představují mnohobuněčné rostliny. V každé buňce se nacházejí tisíce genů. Ne všechny se používají v libovolné dané buňce - přesná konfigurace aktivních a neaktivních genů závisí na typu buňky, například zda je to květ, stonek nebo semeno. Pro  $n$  genů je počet kombinací aktivity  $2^n$ . I nepředstavitelně jednoduchá rostlina s deseti geny by měla k dispozici 1 024 kombinací genových stavů, aby vyjádřila spousty možných stavebních plánů svého těla.

Ve stopách britského zoologa D'Arcyho Thompsona, ve snaze zachytit základní univerzálnost genetického jazyka používaného všemi rostlinami, vyvinul zesnulý Aristid Lindenmayer, botanik z Utrechtské univerzity, formální matematický popis růstu rostlin. To, co se v jeho pracích před více než pětadvaceti lety objevilo, byly úchvatné simulace, kterým se dnes na jeho počest říká L-systémy.<sup>231</sup> Pokusil se modelovat růst rostlin s použitím těchto druhů gramatických technik, které používají lingvisté k analýze vět. Místo "větného rozboru" rostlin, tak jako se dělá rozbor věty, abychom se dostali od skutečných slov k abstraktním prvkům řeči, nechávají se L-gramatiky typicky běžet obráceně. Začne se od abstraktních "částí rostlin" a ty se pod vedením gramatiky opakovaně vkládají, až se dostaneme k částem, jako jsou kůra, stonek, listy a květy. Krása je v tom, že v gramatických pravidlech se neříká nic o celkovém tvaru rostliny. Struktura prostě povstává z výpočtu.

Lindenmayerovy počítačové modely reprezentují tělo rostliny řetězcem symbolů, kde každý symbol zastupuje jeden modul (list, stonek a pupen). Tělo "roste" tím, jak opakovaně aplikujeme algoritmy pro manipulování se symboly. I jednoduché soubory pravidel dokážou vytvářet "rostliny", které vypadají jako skutečné. V dalším kroku se do tohoto přístupu "zdola nahoru" zavedlo větvení, takže se dají vyrobit "stromovité" formy. Lindenmayerovy modely pracovaly způsobem ne nepodobným celulárním automatům. Co bylo nejpůsobivější, bylo

---

<sup>231</sup> A. Lindenmayer, *Journal of Theoretical Biology* 18, 280 (1968).

použití L-systémů k vytváření neobyčejně realistických rostlinných forem podobných kapradinám. Dva z jeho doktorandů na univerzitě v Utrechtu v Nizozemí, Ben Hesper a Paulině Hogewegová, převzali digitální výsledky ze souboru pravidel jednoho L-systému a zobrazili je graficky na obrazovce. Takto produkovali realistické,



Obrázek 8.1 / Umělé květiny. Větvička šefíku a květinový záhon, vytvořené Lindenmayerovými metodami.

počítačem generované kapradiny a také obrázek astry, rostliny, kterou drží Lindenmayer v ruce na fotografii z workshopu o umělém životě v Santa Fe v roce 1987. Ve sborníku článků z druhé konference o umělém životě, která se konala rok po Lindenmayerově smrti, je tento snímek uveřejněn jako dedikace jeho památce.<sup>232</sup>6

Někteří vědci použili Lindenmayerův přístup k tomu, aby zjistili, zda se dají mutanti skutečných rostlin vysvětlit pomocí změny v určitých pravidlech vývinu. Dokonce i laboratoře animovaného filmu dnes používají L-systémy pro generování obrazů stromů pomocí počítačové grafiky. Jeho metody poskytují vhled do procesů morfogeneze, poněvadž odhalují, jak aplikací lokálně účinkujících jednoduchých pravidel, ať už jsou genetická nebo algoritmická, se mohou souběžně vyvíjet větve, listy a květy. Avšak L-systémy nejsou navrženy tak, aby rostly stejným způsobem jako biologické buňky. Proto spadají přirozeně do širšího oboru studia "umělého" života.

## Nepřirodní výběr

Programy Války Jader, počítačové viry a počítačovní červi se dokážou rozmnožovat, nepodléhají však vývoji s otevřeným koncem. L-systémy nemají ani schopnost sebereplikace. Schopnost vyvíjet se je ústředním aspektem života, jak jej známe, a dnes se provádějí pokusy udělat přesně totéž v kyberprostoru. Aby totiž byla nějaká naděje na vytvoření pravého umělého života v počítači, musíme najít způsoby, jak pomocí mutací zavádět novinky a pak vybrat "nejzdatnější" objekty.

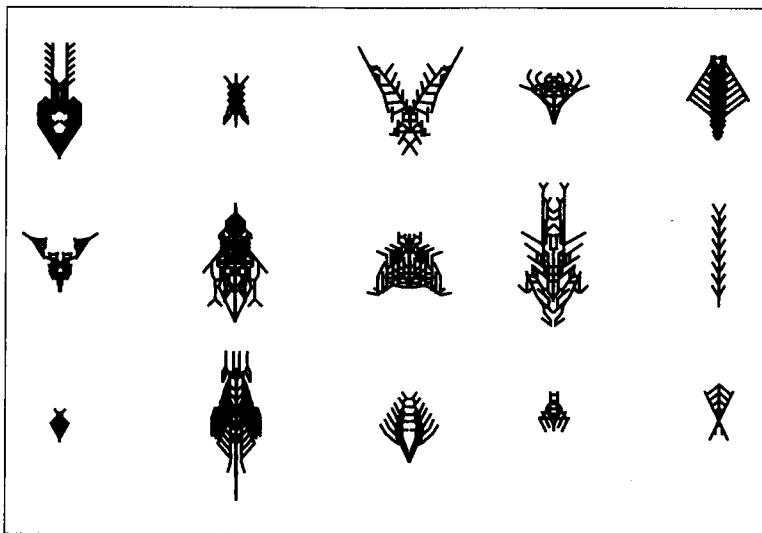
V září 1987 se konala první konference o umělém životě v Los Alamos v Novém Mexiku. Sjezd příznivců umělého života přilákal 160 delegátů, od zoologů a rostlinných biologů po chemiky, fyziky a informatiky, a spolu s nimi výzkumníky pracující na automatizovaných sadách Lega pro děti a další, z nichž všichni sdíleli společný zájem o simulaci a syntézu živých systémů, ať už používají chemii, software nebo hardware. Organizátor setkání Chris Langton konstatoval: "Nejzákladnější myšlenka, která z workshopu povstala, byla tato: umělé systémy, které vykazují životu podobné chování, stojí za to zkoumat samy o sobě, ať už si myslíme nebo ne, že procesy, které napodobují, hrály roli při vývoji nebo v mechanismu života, jak jej my známe.

---

<sup>232</sup> C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen (eds.), *Artificial Life U*, (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1991).

Takové systémy nám mohou pomoci rozšířit naše chápání života, jak by mohl být.<sup>233</sup>

Mezi účastníky byl i oxfordský zoolog Richard Dawkins. Hovořil o tom, jak jeho program Slepý hodinář dokáže vyvinout "tvory", které vykresloval na obrazovce svého osobního počítače Apple Macintosh.



Obrázek 8.2 / Pěstování rozmanitosti v počítači. Dawkinsovy biomorfy.

"Vypůjčil jsem si slovo, které používá Desmond Morris<sup>□</sup> pro tvary podobné zvířatům ve svých surrealistických malbách, a nazval jsem je biomorfy," vysvětloval. "Mým hlavním záměrem při návrhu Slepého hodináře bylo redukovat na holé minimum míru, do jaké jsem navrhoval biomorfy. Chtěl jsem, aby se objevilo co nejvíce biologie biomorfů."

Biomorfy byly generovány řetězcí kódu počítačového programu, docela jako jsou těla generována geny. Počítač prováděl malé změny ("mutace") v kódu popisujícím biomorf a zobrazoval spektrum tělesných tvarů, k nimž to vedlo. Jelikož nebyl schopen vybírat biomorfy podle toho, jak dobře si vedly v okolním prostředí, vybral Dawkins některé z nich na základě estetických důvodů a pak z nich

<sup>233</sup> C. Langton (ed.), *Artificial Life* (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1988).

<sup>□</sup> Desmond (John) Morris (\* 1928), zoolog z Oxfordu, surrealistický malíř a režisér, autor knihy *Nahá opice*. (pozn. překl.)

namnožil další generace. Po několika generacích vznikly překvapivě živě vypadající biomorfy. "Byl jsem opravdu ohromen a nadšen bohatstvím morfologických typů, které během šlechtění povstávaly před mýma očima," poznamenal.

Dawkins použil svého programu k tomu, aby ukázal, jak "slepý hodinář" mohl vytvořit rozmanitost živých tvorů, bez odkazování na Boha nebo velkého stavitele. <sup>□</sup> Dawkins, v Darwinových stopách, tvrdil, že komplikovaná skladba lidského oka mohla být výsledkem evoluce prostřednictvím přírodního výběru, souhrou náhody a soutěžení. To bylo elegantně prokázáno v pozdější práci Dana Nilssona a Susanny Pelgerové z univerzity v Lundu ve Švédsku, kteří ukázali, že pokud výběr dává neustále přednost zvyšování množství zpracovávané vizuální informace, světlocitlivý flíček tkáně se postupně stane okem s čočkou umožňující zaostřovat. Dochází k tomu sérií postupných malých zlepšení po dobu několika set tisíc generací. Studie ukazuje, že k evoluci něčeho tak složitého, jako je oko, mohlo - alespoň teoreticky - dojít za méně než milion let, což je jako mrknutí oka vzhledem k nesmírným rozlohám geologického času.

## Evoluční algoritmy

Dawkinsovy biomorfy krásně ilustrují, jak posloupnost náhodných mutací může udělat z jednoduché struktury objekt, který vypadá jako živý. Jsou však stále produktem nepřírodního výběru. Byl to "bůh" Dawkins, kdo vytvořil selekční tlak, který vede k tomu, že se objevují komplexní tvary, nikoli evoluce s otevřeným koncem, zprostředkovaná soutěžením s ostatními objekty v prostředí. Jak jsme opakovaně uvedli, mají živí tvorové vrozenou schopnost vyvíjet se přírodním výběrem, a to prostřednictvím "přežití nejzdatnějšího". Přežijí ty druhy, které jsou nejlépe optimalizovány k tomu, aby se chránily před vymřením v komplexním, avšak konečném prostředí zabydleném všemi ostatními druhy a vybaveném zdroji energie. Tvorové horší než optimální nakonec vymřou. Ve 4. kapitole jsme viděli, že když ji vyjádříme těmito termíny, je evoluce velmi podobná mnoha jiným těžkým optimalizačním problémům, které jsme v této kapitole rozebírali, s tou dodatečnou komplikací, že krajina zdatnosti (hory a údolí) se vyvíjí souběžně,

---

<sup>□</sup> Čtenář si jistě všiml, že biomorfy ve skutečnosti nevyšlechtil slepý hodinář, ale vidoucí Richard Dawkins (je to konečkonců zmíněno dále v textu). Tím vlastně nevědomky podpořil ideu, že život má svého inteligentního Stvořitele, (pozn. překl.)

protože každý z ostatních druhů sám o sobě také bojuje o přežití. To znamená, že evoluce podléhá vysoce nelineární dynamice, obsahující masivní zpětnovazební smyčky. Vzniká tím systém, který bezesporu představuje mistrovské dílo komplexity.

Nicméně téměř absolutní možnosti moderních počítačů skýtají optimistickou naději, že skrytá tajemství biologické evoluce mohou být simulována výpočetními procesy. Vzpomeňme si na genetické algoritmy (GA) Johna Hollanda, které jsme rozebírali v 5. kapitole a které byly inspirovány Darwinovými myšlenkami. Během prvních zhruba dvaceti let následujících po jejich vytvoření byly GA široce využívány k řešení komplexních problémů v neživém světě. Avšak už v šedesátých letech používala Hollandova skupina GA pro výzkum biologických systémů, počínaje simulací jednobuněčných organismů. Ačkoli byly GA zpočátku pomalé na nějakou pořádnou práci, výzkumy, které je využívaly, zvláště pak v posledních letech, představují báječnou virtuální laboratoř, v níž se dá pítvat evoluce. Genetické algoritmy používají vzájemně na sebe působící populace digitálních kódů, z nichž každý reprezentuje jednotlivý organismus, k modelování populací organismů. Vytvářející se kódy "vykazují analogie takových jevů, jako jsou symbióza, parazitismus, biologické 'závody ve zbrojení', mimikry, vytváření ekologických nik a vznik nových druhů."<sup>234</sup> Další práce s genetickými algoritmy osvětlila podmínky, za nichž evoluce bude preferovat pohlavní nebo nepohlavní rozmnožování. Mezitím Rick Riolo z Michiganské univerzity pozoroval genetické algoritmy, u nichž se objevuje "latentní učení", jev ne nepodobný učení neuronových sítí, při němž zvíře, jako je krysa, prozkoumává bludiště, aniž by dostávala odměnu, a je poté schopna najít jídlo umístěné v bludišti mnohem rychleji.

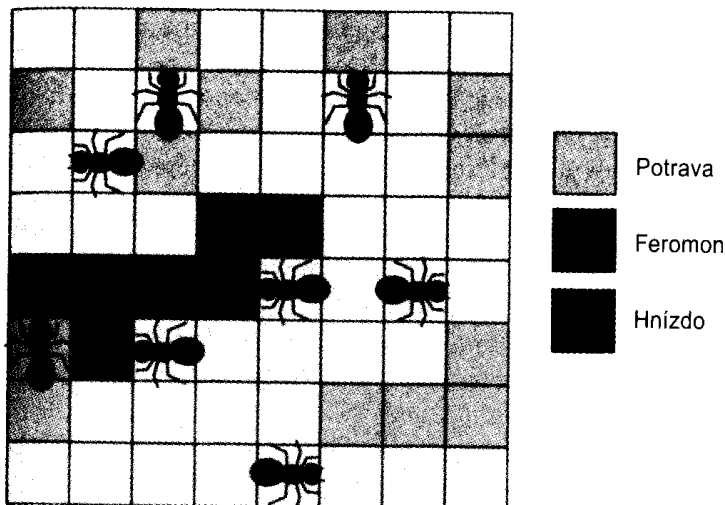
David Jefferson, který na Kalifornské univerzitě v Los Angeles pracuje ve skupině zkoumající umělý život, použil GA k vývoji průkopnického "umělého mravence". Jde o digitální hmyz žijící v počítači, skládající se ze souboru instrukcí, které mu předepisují snahu "naučit se" sledovat klikatou přerušovanou stopu vyznačenou na šachovnici, právě tak, jako reální mravenci sledují v přírodě pach chemických značek. Mravenec byl reprezentován jako "konečný automat" - to znamená jako řetězec dvojkových číslic, který mohl obsáhnout jen konečný počet možných pravidel chování, nebo jako umělá neuronová síť. GA byl použit k vývoji vylepšených pravidel,

---

<sup>234</sup> J. Holland, *Scientific American* 267, 72 (1992).



určujících příští krok mravence, jakmile si "očíchal", co je obsahem mřížové buňky nacházející se právě před ním. Program byl odstartován s 65 536 (neboli 2 na šestnáctou) digitálními mravenci. (Což je jinak libovolné číslo, ale právě vhodné pro výpočetní zařízení, které bylo k dispozici: jeden mravenec na jeden procesor). Na masivně paralelním počítači Connection Machine 2 se za sedmdesát generací vyvinula značná populace schopná vyznačit kroučící se klikatou stopu dlouhou osmdesát devět čtverců. Může to vypadat jako dosti dlouhá evoluce, ale každá generace "žila" méně než třicet vteřin.



Obrázek 8.3a / Mravenčí farma. Na začátku nové generace jsou všichni mravenci v hnízdě, nejsou tu žádné chemické signální molekuly – feromony – a potrava je rozptýlena po farmě. Virtuální mravenci si vyvíjejí při hledání obživy strategie shánění potravy a kudy chodí, pokládají feromonové cestičky.

Tímto způsobem výzkumný tým předvedl, že je možné vytvořit evolučními prostředky umělé organismy vykazující komplexní, životu podobné chování - chování, které by bylo velmi obtížné vyprojektovat z prvních principů tím, že by se napsal počítačový program. S kolegou Robertem Collinsem pokračoval Jefferson tím, že vyvinul Mravenčí farmu, počítačový program, který simuluje evoluci strategií pro shánění potravy v umělých mravenčích koloniích (viz obr. 8.3a).

Genetické algoritmy ukazují, jak se takové komplexní chování vyvíjí. Naproti tomu mravenci ilustrují, s jak velkým množstvím aktérů

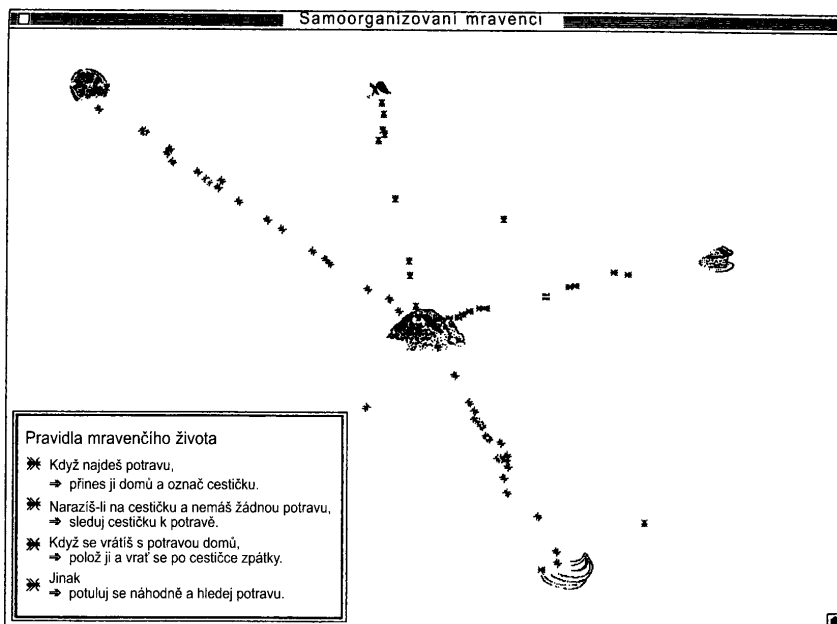
splňujících jednoduchá pravidla můžeme dostat komplexní chování při shánění potravy. Steve Appleby z Laboratoří Britského Telecomu v Martlesham Heath vyvinul podobný mravenčí program pro simulaci těch vlastností mravenců, které jim poskytují odolnost - jejich jednoduchost a schopnost samoorganizace při důležité práci, shromažďování jídla. Doufá, že tento hmyz bude inspirovat řešení jednoho z nejdůležitějších problémů, který stojí před každou moderní telekomunikační společností - jak směřovat hovory skrz nesmírně komplikovanou komunikační síť.

Jsou možná dvě krajní řešení. V jednom by superpočítač seděl jako pavouk v centru této nesmírné komunikační pavučiny. Teoreticky dokáže počítač vždy vyhledat nej lepší cestu, kudy směřovat hovory. V praxi to ale může trvat dosti dlouho, než se poškrábe na hlavě a přijde na to, co dál. V druhém extrému by každá telefonní ústředna konala nezávisle a přesměřovávala by hovory podle toho, jak jsou zatíženy okolní ústředny. Je to rychlé, ale nikdy se tím nepřiblížíme k nejlepšímu řešení, protože nám chybí globální pohled. Důvod, proč Britský Telecom pozoroval mravence, bylo hledání kompromisu mezi globálním a lokálním řízením.

K tomu, abychom mravence v mraveništi přiměli efektivně shánět potravu, nám stačí pouhá čtyři pravidla. První tři se týkají toho, jak spolu mravenci komunikují zanecháváním stop tvořených chemickou signální molekulou zvanou feromon: 1) jestliže mravenec najde potravu, donese ji do hnízda a vyznačí stopu feromonem; 2) když mravenec zkrátí stopu a nemá žádnou potravu, sleduje stopu k potravě; 3) když se mravenec vrátí do hnízda, odloží potravu a putuje zpátky po stopě. Poslední ingrediencí je pravidlo pro všechny případy: nedají-li se použít ostatní pravidla, toulej se, kde tě napadne (viz obr. 8.3b).

"Tato feromonová stopa je jedním z klíčů ke spolehlivosti," domnívá se Appleby. "Je to zpráva, ale poskládaná tak, aby každého pořádného mravence praštila do nosu. Dost málo se to podobá tomu, jak fungují počítače, kde program pracující na jednom počítači posílá zprávu nějakému jinému počítači." Spolehlivost se dostavuje přirozeně v důsledku toho, že zprávy nemají adresáty. Jeden mravenec může převzít úkol kteréhokoli jiného, který zahynul. Ve spolupráci se Simonem Stewardem nyní Appleby vyvinul roj "mravenců" - pohyblivých programů - které mohou pomáhat při směřování hovorů telefonní sítí a vyrovnávat zatížení tak, aby bylo zaručeno, že každá ústředna je využívána efektivně a není přetížena. Podobně jako mravenci

nekomunikují tyto úseky kódu přímo, ale zanechávají si navzájem zprávy na každé ústředně, přes kterou prošly. "Když jeden program selže, ve skutečnosti na tom nezáleží, protože později přijde jiný, sebere zprávu a pokračuje dále. To právě dodává systému odolnost," říká Appleby. Britský Telecom nyní zkoumá, jak použít takový systém ke zvládnání dynamických sítí, zejména sítí, které propojují počítače.



Obrázek 8.3b / Samoorganizovaní mravenci, inspirace pro nové způsoby řízení telekomunikačních sítí

## Evoluce s otevřeným koncem

Konvenční genetické algoritmy vnášejí do hledání umělého života některé rysy přírodního výběru, jsou však zatíženy mnoha omezeními. Jedním je celková velikost simulace, nezbytná k reprodukování komplexity života, jak ho známe. Přirozené populace mohou čítat miliony v případě velkých zvířat, biliony v případě hmyzu a kvadriliony (miliardy miliard) nebo i více u bakterií.<sup>235</sup> Avšak až se výkon masivně

<sup>235</sup> J. Holland, Scientific American 267, 72 (1992).

paralelních počítačů zvýší, mělo by být možné vyvinout digitální populace čím dál realističtějších velikostí.

Jiné omezení pochází z toho, že chromozomy, které reprezentují zakódovaná řešení daného problému - digitální organismy -, mají u GA všechny tutéž velikost. Mnoho nejdůležitějších částí evolučního receptu bylo v simulaci již předem sestrojeno, místo aby se přirozeně vyvinuly. Kromě toho přítomnost "překřížení" jako klíčového genetického operátoru znamená "sexuální" evoluci, zatímco v přírodě se ty nejstarší a nejprimitivnější organismy rozmnožují nepohlavně.<sup>236</sup>10

Kromě toho užívají genetické algoritmy evoluci orientovanou na daný úkol, zatímco reálný svět užívá evoluci orientovanou na vnější prostředí. Jinými slovy prostředí kypící životem má své vlastní problémy k řešení a ne jeden, který je kladen zvnějšku. Představme si, že cílem je vyšlechtit tvora běhajícího rychlostí 60 km/h. Existují dva možné přístupy. Uvědomíme-li si, že koně jsou už teď dosti rychlí, můžete začít s programem selektivního šlechtění tak, že vezmete stádo koní, necháte je závodit, vyřadíte ty, kteří prohráli, a rozmnožíte jen vítěze. To je přístup, který aplikuje většina dnešních GA. Anebo si můžete zvolit otevřenou travnatou planinu, jako je Serengeti, osídlíte ji lvy, vypustíte celý zvěřinec a pak počkáte pár milionů let a uvidíte, co se vyvinulo. Může to být kůň nebo nějaký obzvlášť čiperný nosorožec. Avšak jediné, na čem záleží, je, že zvíře dokáže soustavně běhat rychlostí 60 km/h. Velmi nedávno začalo být možné právě tohle simulovat pomocí GA, takže evoluční dynamika povstává sama od sebe, tak jak je tomu v přírodě. I když je tento přístup méně kontrolovatelný, je mnohem více tvůrčí a někteří z jeho nejnadšenějších příznivců věří, že může vést k nefalšovanému umělému životu.

Podobně jako biologický život, musí být pravý umělý život schopen vyvinout struktury, které nejsou naplánované nebo předem naprogramované. Aby se z procesu umělého života stal proces s otevřeným koncem, musí být náhodný (stochastický); to znamená, že musí zahrnovat všudypřítomný prvek novosti, který může způsobit změnu a chod evoluce naprosto nečekanými cestami. Jak se mění zdatnost jednoho organismu, tak se podle toho posouvá krajina zdatnosti jeho souběžně se vyvíjejících sesterských a bratrských organismů. Takto mohou náhodné simulace produkovat řešení v takové formě, na jakou se

---

<sup>236</sup> Dosti oblíbeným vysvětlením toho, proč se vyvinulo pohlavní rozmnožování, je, že se jím čelí parazitům. Viz P. Coveney a R. Highfield, *Šíp času*, OLDAG, Ostrava, 1995, a také M. Ridley, *Červená královna*, Mladá fronta, Praha 1999.

nikdy nepomyslelo a kterou nikdo nepředpokládal, a počítač je prostoupen originalitou a inovací. Tento aspekt je naprosto zásadní pro zajištění tvárnosti evoluce. Jen tak lze zabránit tomu, aby celý proces neskončil ve slepé uličce.

Pokusy simulovat evoluci, které jsme dosud rozebírali, neměly otevřený konec; jinými slovy jejich "funkce zdatnosti" či krajiny jsou pevné jednou provždy. Například to, že v GA máme genomy pevné délky, má za následek, že potenciál inovace je pevně ohraničen. V těchto modelech reprezentuje řetězec znaků genomy organismů, které jsou mutovány, rekombinovány, podléhají výběru a množení podle neměnných stavebních pravidel v simulátoru. Neexistuje žádný mechanismus replikace - genomy jsou prostě zkopírovány, pokud přežijí fázi výběru.<sup>237</sup> Pokud má povstat plnohodnotný digitální život, musí se toho udělat víc.

## Virtuální život: Tierra

První příklad umělé evoluce založené na darwinovských principech vytvořil Thomas Ray z univerzity v Delaware. Jeho výsledky patří pravděpodobně mezi nejvýznamnější příspěvky k teoretické vývojové biologii 20.století. Uvnitř Rayova počítače bojují digitální organismy o místo v paměti centrální výpočetní jednotky (což je analogie zdrojů potravy a energie). Než přišel Ray se svou prací, nedovedli jsme s evolucí experimentovat, mohli jsme ji pouze pozorovat. Pouhé pozorování není ani zdaleka uspokojivé, protože lidský život je jako nic ve srovnání s časovým měřítkem - s "hlubinou času" -, na němž se odehrávají události v biologické evoluci. Rayova simulovaná evoluce nesoucí jméno Tierra, což španělsky znamená země, představuje typ metafory pro biologickou komplexitu, nástroj k pochopení, proč je život na Zemi tak nesmírně mnohotvárný.

Ray je původním vzděláním tropický ekolog a strávil spoustu času studiem lián v tropických pralesech Kostariky. Ještě pořád tam bydlí, ve

<sup>237</sup> Evoluce s otevřeným koncem - svatý grál umělého života - nemůže nastat při fixované, předem dané funkci zdatnosti. Fixní a konečná velikost genomu však může přesto vést k evoluci s otevřeným koncem, pokud je řízena funkcí zdatnosti, která se průběžně mění. Jak k tomu dojde? Neustálou koevolucí. Pokud je funkce zdatnosti tvorů X dána v prvé řadě ekologií druhů Y Z atd., které tvoří životní prostředí druhu X, a podobně životní prostředí druhu Y tvoří druhy X, Z, atd. atd., pak evoluční závody ve zbrojení, kooperace a další efekty vedou k tomu, že funkce zdatnosti každého druhu se neustále mění nepředvídatelným způsobem. Tedy: evoluce s otevřeným koncem a neustále se měnící funkce zdatnosti, která z toho vyplývá, je ústředním rysem života.

svém domě s laboratoří, postaveném na čtyřiceti akrech džungle. Inspiraci pro svůj počítačový program ale nečerpal ze závratného množství tvorů, kteří ho obklopují, od kolibříků po brouky, ale z čínské hry Go.

Když byl doktorandem na Harvardu, rozebíral jednou tuto deskovou hru s jedním informatikem a všiml si, že černé a bílé kameny používané při hře tvoří zdánlivě samoreplikující se obrazce, řízené jednoduchými pravidly hry. Informatik pronesl osudovou poznámku, že by bylo stejně dobře možné udělat samoreplikující se počítačový program. To bylo pro Raye něco nového a okamžitě si začal představovat, jak se přidají mutace a výsledkem bude darwinovská evoluce. Zeptal se, jak se dá tato samoreplikace provést, a dostal odpověď, že je to "triviální". Rayovi ale trvalo deset let, než se dokázal s tímto "triviálním" problémem vypořádat.

Mutace a následné soutěžení o omezené zdroje jsou pro evoluci nepostradatelné - nestačí, aby se objekt jednoduše reprodukoval. Tím by vznikl "virus" s banální schopností zahltit počítač identickým potomstvem. Tudíž, aby se v Tieve objevila evoluce, musel Ray nejen vytvořit samoreplikující se počítačový program, ale umožnit mu také mutovat. Jakmile máme mutace, může nastoupit "přírodní" výběr: ty druhy organismů, které jsou nejlépe uzpůsobeny pro své prostředí, se množí efektivněji. Výsledný umělý život by pak byl kombinací sebe sama udržující komplexity a reprodukce, přičemž právě díky reprodukci se může komplexita vyvinout. Šlo by také o evoluci podřízenou zákonům logiky namísto fyzikálních zákonů.

Byl tu však důležitý technický problém, který bylo třeba překonat, než bylo možné tento záměr realizovat. Tradiční program pro von Neumannův stroj není odolný vůči mutacím: jedna čárka na nesprávném místě může způsobit, že se program zhroutí. Tato netolerance, tato "křehkost", na niž jsme již dříve narazili, byla původně mnoha proroky umělého života považována za téměř nepřekonatelný problém. Například Farmer a Bělin tvrdili, že "objevit způsob, jak učinit tyto samoreplikující se obrazce odolnějšími, tak aby se mohly vyvíjet v čím dál složitější stavy, je pravděpodobně ústředním problémem studia umělého života". "Zaujalo mě to, ale nepřesvědčilo," říká Ray. "Proč by měl strojový jazyk být křehký a genetický jazyk nikoli?"

Inspirován kompilátorem vyššího programovacího jazyka ("C") a jeho doprovodným ladicím programem, který jasně odhaloval vnitřní fungování jeho nově zakoupeného laptopu, rozhodl se Ray v roce 1987

zkonstruovat svou verzi evoluce s použitím assembleru. Připomeňme, že assembler je jazyk nízké úrovně, specifický pro daný stroj, jehož příkazy přímo volají soubor instrukcí v CPU počítače, a stejně tak služby poskytované operačním systémem. Jelikož assembler je tak úzce spojen se specifikací hardwaru počítače, byl pro Rayovy potřeby přirozeným jazykem pro udržení kontroly nad umělým prostředím, v němž, jak doufal, bude pěstovat své digitální organismy. Ray učinil svůj strojový kód odolnějším vzhledem k náhodným mutacím (přehození bitů) tím, že si vypůjčil nápady z molekulární biologie. Biologický genetický kód je charakterizován malým souborem instrukcí: instrukcí (kodonů) vytvořených z bází nukleové kyseliny je šedesát čtyři a překládají se do dvaceti různých aminokyselin. Tierrovský jazyk má všehovšudy třicet dvě instrukce, a je tedy řádově stejně velký jako samotný genetický kód. To představuje dramatický rozdíl od situace, kterou vidíme u konvenčních počítačů. I nová generace strojů s RISC (redukovanou sadou instrukcí) má assembly obsahující mnohem více instrukcí.

Ray použil tři mechanismy mutace, každý odrážející souběžné efekty v biologické evoluci. Občas dojde k chybě ve výpočtu. Tu a tam je změněno náhodně vybrané místo v paměti, což změní dvojkový kód představující jednoho digitálního tvora; a kdykoli se takový organismus rozmnožuje, může se stát, že se do jeho potomstva zanesou chyba při kopírování. Aby se vyhnul přeplnění paměti, což by nakonec ekosystém zmrazilo, funkce zvaná "sekačka" <sup>□</sup> zabíjí staré a chybující organismy a hraje roli predátorů. Smrt organismů v Tieře nastává proto, že lakomější nebo úspěšnější organismy získaly monopol na životní prostředky.

Ray zavedl také "adresování obsahem" jako prostředek dovolující přímou interakci mezi organismy. To dovoluje jednomu organismu využívat soubory instrukcí - genomy - reprezentující jiné digitální organismy uložené poblíž v paměti počítače. Zatímco žádný organismus v Tieře nemůže jinému přepsat genom, dokáže tento kód přečíst a spustit. Ray popisuje význam takových interakcí v přírodě pomocí metafory deštného pralesa: v některých částech Amazonie se fyzikální prostředí skládá z čistého bílého písku, vzduchu, padající vody a slunečního svitu. V tomto fyzikálním prostředí je uzavřen nejsloži-tější ekosystém na Zemi, se statisíci, možná miliony organismů. Ty nepředstavují statisíce adaptací na fyzikální prostředí, ale statisíce adaptací na ostatní organismy: samy organismy se stávají dominantní

---

<sup>□</sup> Nebo také "zubatá s kosou" (pozn. překl.)

složkou prostředí, ve srovnání s níž význam fyzikálního prostředí bledne téměř k bezvýznamnosti.

Celkový cíl Rayovy práce je jasný: zatímco život na Zemi je omezen na organismy na bázi uhlíku, život, který můžeme vytvořit v počítači, je založen na logických strojových instrukcích. To nicméně neznamená, že evoluce na bázi počítačů nemá potenciál pro vývoj komplexity srovnatelné s uhlíkovým životem. Ukázalo se skutečně, že strojové instrukce v Tieře jsou schopné univerzálních výpočtů, což znamená, že vyvíjející se strojové kódy by měly dokázat vytvořit jakékoli množství komplexity, nebo přinejmenším všechno, co je vyčíslitelné v Turingově smyslu.

Při popisu simulátoru Tierra si vypomůžeme analogií mezi Rayovou verzí umělého života a životem na Zemi. Pozemská evoluce se řídí základními principy samoorganizace, které jsme nastínili v předcházejících kapitolách. Dochází k ní ve stavu daleko od termodynamické rovnováhy, kde je udržována neustálým přísunem energie a hmoty. Zdrojem energie je Slunce a dodávaná hmota, to jsou materiální zdroje (potrava), které musí každý živý tvor konzumovat, aby zůstal naživu. Za těchto podmínek se hmota samoorganizuje. Následkem sebereplikace a mutace a v důsledku omezenosti zdrojů se vyvine soutěžení.

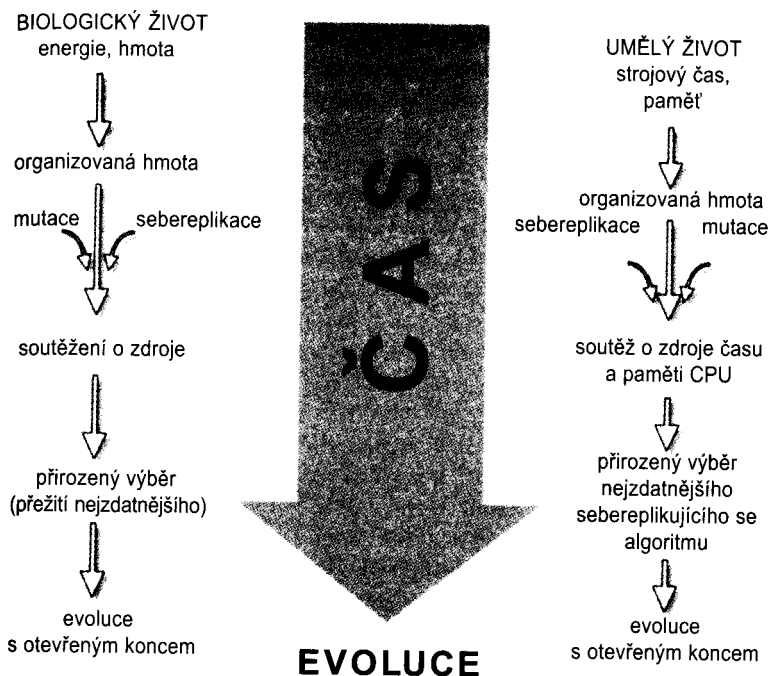
Ray navrhl Tierra jako paralelní počítač s architekturou MIMD, kterou jsme viděli ve 2. kapitole. Přiřadil každému tvorovi jeden samostatný procesor - tedy takový, který má svou vlastní CPU. V sériových strojích, které Ray původně používal, je paralelismus pouze simulován, a to tak, že postupně každé virtuální CPU se přiřazuje čas, kdy může běžet (dnes však existují verze, které využívají vnitřní paralelismus Tierry).

Právě tak jako biologické organismy užívají energie k organizaci hmoty, Ray doufal, že digitální organismy v Tieře budou užívat svého času v centrálním procesoru k organizaci paměti počítače. Podstatný rozdíl mezi tradičnějším programem s genetickým algoritmem a Tierrou je ten, že zatímco u genetického algoritmu je funkce či krajina zdatnosti řízena simulačním programem, v Tieře je definována lokálně jednotlivými tvory ve vztahu k prostředí. Krajina zdatnosti se tak vyvíjí spolu s organismy.

Ray doufal, že počáteční samoreplikující se digitální organismus se bude vyvíjet prostřednictvím mutací v rozličné organismy, které by samy o sobě mohly být schopné replikace. Tímto způsobem by



organismy soutěžily o omezené počítačové zdroje: čas centrální výpočetní jednotky a paměťový prostor. Tvorové, kteří přežijí, by pak měli být ti, kteří se vyvíjejí nejefektivněji tak, že využívají ostatních tvorů (viz obr. 8.4).



Obrázek 8.4 / Analogie mezi umělým a biologickým životem.

3. ledna 1990 zasel Ray do virtuální krajiny v Tieře život. Začal samoreplikujícím se digitálním organismem dlouhým asi tak osmdesát instrukcí, což byl tierrovský ekvivalent jednobuněčných nepohlavních organismů. Toto stvoření, vůbec první, které si Ray vysnil, bylo prostě proužkem instrukcí napsaných v assembleru. Našlo svůj začátek a konec, spočetlo svou délku, nakopírovalo se do volné části paměti a pak se rozdělilo. V pojmech analogických biologií by se strojové instrukce těchto samoreplikujících se digitálních organismů spíše daly považovat za aminokyseliny než nukleové kyseliny, protože jsou "chemicky aktivní" - manipulují s byty informace, s registry centrální výpočetní jednotky, se sadou instrukcí a s operačním systémem. Ale digitální

organismy, které Ray předpovídal, jsou snad nejbližší molekulárně biologickým stvořením založeným na RNA - která vymřela dlouho před kambriickou explozí před 600 miliony let, jež vedla k rozmachu složitých mnohobuněčných tvorů -, protože nesou genetickou informaci a zároveň vykonávají "metabolickou" aktivitu; krátce řečeno představují jak genotyp, tak fenotyp.

Aby zjistil, jestli byl při tvorbě kybernetické pospolitosti úspěšný, nechal počítač zobrazovat, kolik tvorů o dané velikosti genomu se množí. Nyní zbývalo jen čekat. Neuplynulo ještě mnoho od chvíle, kdy Ray spustil simulaci, a už zpozoroval mutanta. Byl o něco menší než originál a jeho populace rostla, až převýšila populaci svého předka. Další mutanti potřebovali ještě méně instrukcí k tomu, aby se efektivně rozmnožovali a čím dál tím více se proháněli ve volném kyberprostoru.

Ray zastavil činnost Tierry po několika hodinách počítačového času. Měsíc potom Rayovi zabralo následné studium, než přesně dohledal, co jeho digitální organismy dělaly. Umělá společnost Tierry se rychle zkomplikovala. Objevil se tvor zhruba o polovičním počtu instrukcí, než bylo na počátku, což bylo příliš málo na to, aby se mohl množit obvyklým způsobem. 45aaa (jak se mu pak říkalo) závisel při své reprodukci na ostatních. Byl to první z mnoha parazitů. Později se v Tierře vyvinuli hyperparazité - tvorové, kteří nutí jiné parazity, aby jim pomáhali se násobit, ačkoli jsou schopni se množit sami o sobě. Byli schopni vyhubit předchozí generaci parazitů tím, že sdíleli jejich klíčové operační instrukce. Když parazité v polévce chyběli, objevilo se "sociální" chování, kdy každý tvor spoléhal při reprodukci aspoň na jednoho dalšího. Postupně se komunita při evoluci "dostala do slepé uličky", když vytvořila minimální organismus o délce dvaadvaceti instrukcí, oproti původním osmdesáti. Ukázalo se dokonce, že Tierra vykazovala znaky Eldridgeovy a Gouldovy přerušované rovnováhy, s dlouhotrvajícími úseky naprázdno plynoucího času, kdy se téměř nic nedělo (viz obr. 9 barevné přílohy).

Je zajímavé si všimnout, že jakmile se původní polévka vyvinula k určité úrovni komplexity, objevili se parazité, kteří se v důsledku svého genetického vybavení nereplikovali dokonale. Ve skutečnosti tito parazité hráli podobnou roli, jakou hraje v přírodě pohlavní rozmnožování, v tom smyslu, že náhodně míchali kusy genomu mezi různými tvory. Z tohoto hlediska se zdá, že náhodné mutace nejsou nezbytné k dodávání genetických změn, které pohánějí evoluci Tierry.

Výsledkem toho všeho byla bez námahy pořízená rekonstrukce toho typu přírodní rozmanitosti, která kolem Raye bujela v Kostarice. Právě tak jako bohatá rozmanitost pralesa závisí na "klíčových dravcích", má Tierra klíčové parazity, bez nichž se nepovede umělý život vytvořit. "Dostal jsem celou tuto ekologickou rozmanitost hned na první pokus," říká Ray. "Skutečně mě to vzrušovalo - bylo zřejmé, že se mi plnily nejdřívejší sny. Myslel jsem si, že se budu pět let babrat s parametry." Bohaté společenstvo parazitů se adaptovalo na sebe navzájem, spíše než na prostředí v počítači. Jakmile se život nastartuje, evoluční proces sám sebe udržuje. "Je to autokatalytický, explozivní proces, který buduje své vlastní struktury, takže jednoduchost fyzikálního prostředí nehraje roli."

Ačkoli bychom naivně očekávali, že Tierra bude upřednostňovat organismy, které používají k replikaci méně strojového času, což se skutečně děje, ukazuje se, že v evoluci Tierry se mnohdy vyskytují tvorové objevující metody, jak se navzájem využívat. To vše povstává spontánně - není to předem naprogramováno - a je to v naprostém souladu s heslem darwinovské evoluční teorie zmíněným výše: prvotním faktorem vedoucím k rozrůznění organismů je adaptace na biotické prostředí (odvozená od selekčního tlaku působeného ostatními organismy) spíše než na prostředí fyzikální.

Tierra byla poprvé představena publiku na druhém workshopu o umělém životě v Santa Fe Institutu poté, co Ray v hotelovém pokoji narychlo dokončil analýzu výsledků z prvního úspěšného běhu Tierry. Jeho prezentace byla bohužel "úplný propadák", jak se sám vyjádřil. Musel čekat, až vyhraje cenu v superpočítačové soutěži IBM, pak teprve jeho práce přitáhla větší pozornost. Dnes je tato práce široce uznávána jako předěl ve výzkumu umělého života. Ray z toho činí šokující závěr: "Zdálo by se... , že je docela jednoduché stvořit život. Je zcela jasné, že virtuální život je zde a čeká, až mu poskytneme prostředí, v němž by se mohl vyvíjet."

Existují však skeptické hlasy. Robert May ze zoologického oddělení univerzity v Oxfordu, který významně přispěl k moderní teoretické biologii svými pracemi o nelineární dynamice a chaosu, považuje tuto práci za stimulující, má ale "mírné námitky pokud jde o míru, do jaké jsou závěry, možná nevědomky, předem zabudovány do programu", a stejně tak pochybnosti o všeobecné platnosti získaných závěrů. Ray ve své odpovědi zdůraznil, že "to, co v umělém životě děláme, je stvoření světa, definování 'fyziky' tohoto světa a pak jeho uvedení do chodu a pozorování, co z toho vyleze. Pravda je, že když navrhujete fyziku,

předem určujete, co je v takovém světě možné." V jádru těchto kritik tak stojí podezření, že si Ray vymyslel počáteční organismus v Tieře takovým způsobem, aby z něho automaticky vyplynul vznik společenstev. "Tak to rozhodně nebylo," trvá Ray na svém. "Nejsem tak chytrý, abych do toho dokázal ‚zabudovat‘ takovou bohatou ekologii a dlouhý řetězec změn v evoluční honičce mezi hostiteli a parazity."

## Plateau a C-Zoo

Navzdory kritikám byla Rayova práce podpořena dalšími úspěšnými simulacemi evoluce s otevřeným koncem. Jedna byla vyvinuta na Oxfordské univerzitě a byla inspirována Rayovým úspěchem. Carlo Maley, v té době americký doktorand specializující se na informatiku a evoluční teorii, si pro svou diplomovou práci na katedře zoologie zvolil ověření Rayových myšlenek. "Chtěl jsem vědět, jestli je to podfuk, nebo vážná věc," řekl Maley. "Bylo pro mě důležité napsat si sám svůj vlastní počítačový program, abych mohl říci něco o tom, zda Tom Ray ty věci do svého programu schválně zabudoval, nebo ne, a jestli tyto závěry platí obecně." Maley strávil dva roky na jedné univerzitní pracovní stanici DEC tím, že se pokoušel reprodukovat Rayovu práci znovu od samého začátku v programu zvaném Plateau.

Jméno programu odkazovalo k dvojrozměrnému světu, který Maley vytvořil. Zatímco Ray používal jednorozměrný řetězec programových instrukcí, Maley použil dvojrozměrný program, takže jeho tvorové měli tvar: jedním z dvojrozměrných tvorů, které nechal pobíhat v paměti svého počítače, byl Smyčák, který se skládal ze smyček instrukcí uzavřených do sebe. Na rozdíl od Raye měl Maley potíže uvést program do chodu jednak kvůli chybám a jednak proto, že mu chyběly nepublikované detaily Rayovy práce. Dvojrozměrný programovací jazyk, který použil, byl také křehčí: byl méně tolerantní k mutacím a k vzájemnému působení mezi tvory. Ale Maleyovi se nakonec podařilo vyhledat tyto vrásky na svém počítačovém modelu. Potom se v Plateau vyvinul bohatý zvěřinec, ačkoli ne tak rychle jako v Tieře. "V každém z těchto modelů dostanete nějakou formu parazitismu. V ekologii reálného světa je to ta nejpravidelněji se vyskytující věc a bylo překvapivé, že tyto modely vykazují totéž chování," říká Maley.

V laboratořích Britského Telecomu v Martlesham Heath byla vyvinuta jiná varianta, založená na programu zvaném C-Zoo, který původně napsal Jakob Skipper z univerzity v Kodani. José-Luis Fernán-

dez vysvětloval, že Britský Telecom zvolil program C-Zoo, protože měl vlastnosti Tierry, ale bylo jednodušší jej používat. Jedním problémem u Tierry je, že v každém organismu je tolik instrukcí věnováno reprodukci, že je obtížné je přesvědčit, aby se vyvíjely k dosažení jiného cíle, jako je například nalezení cesty bludištěm. Dalším je to, že výsledky, zobrazené jako série mnohobarevných pruhů na obrazovce, se dosti obtížně analyzují. A pak, tierrovské programy se obtížně interpretují, protože se u nich vyvinula tolerance k chybám v důsledku přebytku informace. "Na C-Zoo je dobré to, že biologické myšlenky jsou u něj tytéž jako u Tierry, ale je mu mnohem lépe rozumět," říká Fernández.

Typická ukázka C-Zoo vypadá tak, že dvojrozměrným paměťovým prostorem cupitá zástup mravenců shánějících potravu, reprezentovanou na obrazovce jablkem. X na obrazovce označuje místo, kde je více než jeden mravenec, kde tedy dochází k boji o místo v paměti. "Nahradili jsme tyto kousky počítačového kódu bitmapou<sup>□</sup> mravence. Když vidíte mravence, pak to, na co se doopravdy díváte, je soubor buněk, z nichž každá obsahuje výpočetní instrukce," říká Fernández. Kód každého mravence se skládá pouze z dvaatřiceti různých instrukcí, seskupených jako čtyři buňky po osmi instrukcích. Z nich povstává komplikované chování, tak jako v přírodě mohou být složité bílkoviny sestaveny ze souboru pouhých dvaceti aminokyselin.

Pouhé čtyři instrukce stačí k tomu, abychom řekli mravenci, jak se pohybovat: běž vpřed, vpravo, vlevo nebo stůj. Cílem je najít potravu, buď jablko, nebo jiné mravence. Ti, kteří to nedokážou, zahynou. Úspěšní mravenci se množí a mutují, a tak produkují potomstvo, kde každý z různých "druhů" je odlišen jinou barvou. Když mravenec umírá, odkládá svou potravu - svůj kód - do centrální zásobárny paměti, kam chodí ostatní mravenci. Poslední úpravou bylo to, že zobrazení na obrazovce bylo cyklické, takže mravenec, který putoval za horní okraj obrazovky, se vynořil znovu dole, a ti, kteří putovali ven jednou stranou, se objevili znovu na druhé straně. Fernández dokazoval samoorganizované chování mravenců na tom, že odkládají všechnu potravu uprostřed obrazovky.

Začal nejprve s mravenci, kteří se dokážou pohybovat pouze vpřed. Ti, kteří přežívají, se soustavně vracejí doprostřed obrazovky, kde je potravina. Mutanti, kteří se odchýlí od cesty, zahynou. Po chvíli se stanou dominantním druhem zelení mravenci. Poté dovolil některým

---

<sup>□</sup> Bitmapa je malý obrázek na obrazovce počítače. (pozn. překl.)

mravencům náhodně mutovat instrukce, které řídí jejich pohyb. Vyvinula se armáda mravenců kroužících kolem potravy. "Tato horečná žravost je efektivní řešení a je to velmi jasná ukázka evolučního vylepšení," říká Fernández. "Na C-Zoo je dobré to, že reprezentace je mnohem hezčí ve srovnání s Tierrou, kterou je obtížné analyzovat." Mezitím, co diskutoval o programu, objevil se roj mravenců, kteří přiměli okolní mravence, ať vykonávají jejich instrukce za ně.

## Virtuální včely a ryby

Počítačové simulace, které jsme dosud popisovali, jsou simulace virtuálního života, i když by si nikdo ani na okamžik nemyslel, že to, co je vidět na obrazovce počítače, je víc než jen velmi idealizovaná nápodoba života na Zemi. Vyvíjejí se však simulace, které mnohem věrněji modelují chování reálného světa. V Salkově ústavu v La Jolle použili Terry Sejnowski, Read Montague a Peter Dayan neuronovou síť k modelování a pochopení toho, jak se včely naučí, které květiny se jim nejvíc odmění za jejich námahu.

Středem zájmu biologů je mozková buňka zvaná VUMmx1, která má, podle studií Martina Hammera ze Svobodné univerzity v Berlíně, spoje táhnoucí se celým včelím mozkem. Některé spoje jsou stimulovány smyslovými orgány včely, když třeba saje něco sladkého nebo vnímá vůni tykadly. Jiné jsou napojené na centra, která řídí pohyb, nebo na "houbovitě tělísko" zodpovědné za učení. Podle práce psychologa Randolpha Menzela, také ze Svobodné univerzity, se včela díky spojům buňky VUMmx1 učí souvislostem mezi stimulem a odměnou. Výsledkem je vzpomínka svazující vůni květu s odměnou ve formě nektaru. Sejnowski uvažoval tak, že jakmile jsou tato spojení nastavena, dokáže včela používat VUMmx1 k předpovídání, které květiny na louce pravděpodobně dají největší odměnu.

Pak se dal do simulování mozku včely. Ačkoli má jen něco kolem milionu neuronů, ve srovnání s našimi 100 miliardami, její malinký mozek představuje značný výpočetní úkol: dokáže zvládnout kolem 10 000 000 000 000 operací s reálnými čísly za vteřinu (10 teraflopů), zatímco dnešní nejvýkonnější počítače většinou pracují s více než desetkrát menší rychlostí. Sejnowského neuronová síť obsahuje dost podrobností, aby byla biologicky realistická, bez přílišného zjednodušení. "Model nejde až úplně na molekulární úroveň, ale není tak zcela obecný, že by ztrácel přehled o jednotlivých neuronech," říká.

Umělá neuronová síť byla cvičena na základě odpovědí přicházejících ze "smyslů", které zjišťovaly barvu a chuť nektaru. V závislosti na načasování těchto odpovědí a na vzpomínce na možnou nektarovou odměnu předvídal umělý neuron VUMmx1, zda se vyplatí určitou květinu zkoumat, anebo přelétnout na jiný květ. Tato síť se dá ověřovat na skutečných situacích, protože existují studie Leslieho Reala z univerzity v Indiáne o shánění potravy u čmeláků, kde se používaly umělé květiny: hmyz dával přednost modrým květům, které byly upraveny tak, že dávaly pravidelnější zisk nektaru, i když žluté květy poskytovaly tentýž průměrný zisk, ale nepravidelně. Sejnow-ského umělá včela volila přesně stejným způsobem.

Jiný báječný virtuální tvor - přesněji jejich hejno - se nachází v oddělení informatiky na univerzitě v Torontu. Tam můžete vidět fascinující "akvárium" a v něm "virtuální ryby". Tyto ryby mají všechny výhody mořského světa, aniž bychom se museli starat o krmení, čištění akvária nebo odstraňování občasných obětí nemoci či agrese.

Abyste se mohli s rybami pobavit, stačí mít vysoce výkonnou pracovní stanici Silicon Graphics, která stojí pár desítek tisíc dolarů, a kopii programu Umělý svět ryb. Simulace navrhl Demetri Terzopoulos se svými doktorandy Xiaoyuanem Tu a Radkem Grzeszczukem tak, aby co nejvíce napodobovaly skutečné ryby a vystihovaly jejich tvar, pohyby a chování.<sup>238</sup> Ryby ladně plavou ve vodě, rozprchnou se, když je pronásleduje žralok, a zápasí o sousta potravy. Při dvoření se dokonce komplikovaně předvádějí. A přesto fyzicky neexistují. Každá ryba je popsána jednotlivým počítačovým programem vloženým do většího programu, který generuje jednoduchý vodní ekosystém. "Předvedli jsme realisticky vyhlížející umělé ryby, které se dovedou překvapivě dobře tvářit, jako by byly živé," říká Terzopoulos (viz obr. 10 přílohy).

Při psaní programu použili Kanadáné nejdříve reálné fotografie a dodali rybám zbarvení a strukturu kůže. Potom rybám vytvořili "mozky", pravidla odpozorovaná z reality, která řídí jejich dvanáct svalů, a dále "oči", které jim umožňují vnímat a reagovat na to, co se děje kolem nich. Program bral v úvahu hmotnost a pružnost každé ryby a modeloval je tak, že se dokázaly deformovat, jak plavaly simulovanou vodou. Aby dokázala koordinovat složitou práci všech svalů, učí se ryba plavat, což se "dost podobá dítěti, které se učí chodit", jak říká Terzopoulos.

---

<sup>238</sup> D. Terzopoulos, X. Tu, and R. Grzeszczuk, Proceedings of the Artificial Life IV Workshop (MIT Press, Cambridge, MA1994).

Ryba zkouší náhodné kombinace svalových akcí a používá přitom algoritmus, který práci svalů vylepšuje. S použitím simulovaného žíhání je zvolena nejlepší kombinace v závislosti na rychlosti a, co je nejdůležitější, na účinnosti plavání. Po devadesáti krocích simulovaného žíhání se virtuální žralok sotva hýbe, protože jeho svaly sebou náhodně cukají. Po několika tisících takových kroků dokáže ladně plavat. "To, co dostaneme, je velmi, velmi přirozené," říká Terzopoulos, "a je to právě to, co ichtyologové nazývají ocasní lokomoce, protože spoléhá zejména na zadní, ocasní ploutev." A právě tak jako vlnivý pohyb při plavání není naprogramovaný, ale objevuje se přirozeně, tak chování ryb povstává z jednoduchých zákonitostí: výzkumníci naprogramují, do jaké míry má každá z ryb ráda či nerada temnotu, chlad, jaký má sklon shlukovat se v hejnu, a k tomu přistupuje síla motivace, jako hlad, strach nebo touha se pářit. "Pak můžeme začít vyvíjet dravce a jejich kořist," vysvětluje Terzopoulos, "a kořist se přitom shlukuje v hejna, dělá únikové manévry a rozprchává se - tak jak to dělají skutečné ryby."

Při modelování komplikovaných rituálů dvoření, které nalzáme v reálném světě, se tým z Toronta opíral o příklady známé z literatury. "U některých ryb samička stoupá a sameček plave pod ní a strká ji do břicha čumákem," říká. "Existují také typy chování při dvoření, kdy sameček a samička krouží kolem sebe a honí se za ocasy." Při aranžování takovýchto vystoupení sestavil tým jednoduché pohyby, jako kroužení, stoupaní a strkání čumákem, do posloupnosti, která se mění podle rozličných okolností - například samička musí sledovat samečkův svatební tanec po určitou dobu, dříve než mu odpoví.

Ačkoli repertoár chování ryb je naprogramován, to, k čemu dochází, je vysoce komplexní a nepředvídatelné, protože to závisí na ostatních rybách v okolí a na tom, co dělají. "Pokud je sameček vyrušen dravcem, pak svatba není dovršena." Terzopoulos doufá, že pokročí ještě dál, když dovolí rybám párovat se tak, že při plození potomstva budou mít genetický materiál samce a samičky: "Jsme možná na dosah počítačových modelů, které imitují chování ryb, když se třou, a tudíž evoluci nových druhů umělých ryb prostřednictvím simulovaného pohlavního rozmnožování."

## Animáti

Jinou slibně se rozvíjející oblastí výzkumu umělého života je zkoumání animátů, reálně fyzicky existujících, avšak umělých tvorů.



Zatímco výše zmíněné ryby jsou virtuální animáti, nyní jsme svědky úsilí zkonstruovat roboty-animáty. Dřívější pokusy postavit inteligentní roboty, které se odehrávaly na sklonku 60. a na začátku 70.let, se točily kolem staré dobré umělé inteligence (GOFAI). Jak jsme viděli v 5. kapitole, je GOFAI přístupem shora dolů, který rozčleňuje inteligenci do oddělených "modulů", zabývajících se specifickými typy vědění. Jedním klasickým příkladem byl projekt "Shakey" na Stanfordském výzkumném institutu a dalším projekt "copy-demo" na MIT. První robot proplouval kolem překážek v místnosti; druhý skládal na sebe kvádry podle modelu, který mu ukázali, a to ve složitě strukturovaném prostředí.



V novém přístupu k umělé inteligenci, přístupu zdola nahoru, který byl také popsán v 5.kapitole, se komplexní chování vynořuje ze vzájemného působení jednoduchých reflexů, s použitím adaptivních, učících se algoritmů, které byly vyvinuty při studiu konekcionismu neboli umělých neuronových sítí. Základním předpokladem je to, že zajímaví roboti jsou příliš složití, než aby se dali vyprojektovat. Průkopníkem tohoto přístupu v robotice je Rodney Brooks z

Massachusettské techniky, který dal tomuto oboru inspiraci v roce 1989 prototypem animáta zvaného Genghis, který napodoboval švába. Místo aby byl ovládán počítačovým programem ve stylu GOFAI, měl Genghis šest nezávislých nohou, které navzájem komunikovaly a pracovaly podle několika málo jednoduchých pravidel kombinovaných se schopností učit se při práci.

Obecně řečeno má Brooksův přístup dva proudy: jednak rozptýlenou architekturu s paralelním zpracováním a pak opuštění "počítačostředného" přístupu, tedy explicitního programování mozku robota, v němž běží myšlenkový model světa, ve prospěch řízení v reálném čase. Brooks chtěl, aby jeho stroje vytvářely své vlastní modely světa adaptivně, prostřednictvím svých smyslových zážitků. "Co je důležité, je propojení stroje s jeho okolím," tvrdí. Umělý nervový systém je v těchto pohyblivých robotech vrstevnatý. Tak u Genghisových nohou přispívá k chování každá vrstva samostatně, ačkoli může nepřímo spoléhat na ostatní. Například "průzkumná" vrstva se nezabývá překážkami, protože se o to postará "vyhýbací" vrstva. Stavba stále komplikovanějších robotů postupným přidáváním vrstev je analogická dlouhodobým výsledkům evoluce.

Animát pracně prolézající nepravidelný terén vůbec nepotřebuje nějaký určitý počítačový program. "Když robot kráčí různými rychlostmi, objeví se automaticky různé způsoby chůze," říká Brooks. "Nestará se o to, který způsob chůze je nejlepší, ani nedělá výslovné rozhodnutí." Když se připojí smyslové orgány, objeví se přirozené reflexy, a to prostřednictvím technik adaptivního řízení. Například můžeme přidat tepelné čidlo, takže když animát cítí více tepla na pravé straně ve srovnání s levou, rozpětí nohou na jedné straně se může změnit, takže animát odbočí. "Skutečná dráha, kterou robot zvolí, není předem vypočtená. Povstává sama."

Rychlost a jednoduchost navrhuje taková, že IS Robotics, společnost založená Brooksem, nyní prodává Genghise komerčně, spolu s kanadskou společností zvanou Applied AI Systems. Roj dvaceti těchto malých robotů byl použit k simulaci chování termití kolonie.

Uvažuje se o velkých verzích těchto robotů na prořezávání podrostu kolem stromů v kanadských pralesích. Levná verze Genghise, zvaná Marv, byla vyvinuta ke zdolávání členitého terénu, jaký se nachází třeba v Údolí smrti v Kalifornii. Tento projekt řídil Cris Melhuish z Univerzity Západní Anglie v Bristolu. Zájem projevila také americká vesmírná agentura NASA, poté co v roce 1989 Brooks napsal článek pro

Journal of the British Interplanetary Society, který se jmenoval "Rychlí, levní a nekontrolovatelní: Invaze robotů ve sluneční soustavě". Argumentoval, že namísto vyslání jednotlivého těžkotonažního vozidla k výzkumu planety představuje roj menších robotů levnější, lehčí a stabilnější alternativu. Podle Brookse se NASA líbila myšlenka, že roboty budou rychlé a levné, ale nedovedla se dost srovnat s tím, že budou nekontrolovatelné. NASA v současnosti uvažuje o šestikolovém průzkumníkovi Marsu. □

Existuje spousta dalších výzkumů týkajících se animátů. Neuronové sítě, které roboty řídí, vyvíjejí na Sussexské univerzitě Dave Cliff, Inman Harvey, Phil Husbands, Nick Jakobi a Adrian Thompson. Místo aby navrhovali pevné řídicí programy robota, opírají se o genetické algoritmy, provádějící simulovanou evoluci náhodné populace šedesáti až sta dynamických rekurentních neuronových sítí. Síť řídí chování simulovaných robotů. Jejich čidla a aktuátory věrně modelují ty, které má skutečný robot. Během umělé evoluce je selekční tlak řízen tak, že se vypočte úspěšnost každého robota. Čím lépe provede robot svůj úkol, tím více potomstva má jeho kognitivní architekturu. V jednom experimentu tým ze Sussexu dokázal vyvinout síť pro použití vizuálních senzorů, "očí", takže robot o velikosti dlaně se dokázal vyhýbat překážkám a vyhledávat světlo. Jiný robot o velikosti koše na papír používal sonary, tykadla a nárazníková čidla k tomu, aby si našel cestu v prostorách oddělení kognitivní vědy na Sussexské univerzitě. "Používáme selekční tlak tak, že ti, kteří lépe vykonávají úkoly, jež po nich vyžadujeme, mají větší pravděpodobnost, že se rozmnoží," říká Dave Cliff, jehož kolegové se nyní dali do vývoje řídicích programů v reálném robotu. Máme některé velmi slibné výsledky, jež naznačují, že dokážeme vyvinout roboty orientující se zrakem, kteří by si dokázali najít cestu po pokoji," říká. "Pokud víme, jsme první lidé na světě, kteří to dokázali."

---

□ Čtenář si možná vzpomíná na zprávy z tisku a televize o tomto vozidle, které zkoumalo Mars v roce 1998. (pozn. překl.)



Obrázek 8.6 / Rodney Brooks a jeho robot-humanoid Cog

Tradiční badatelé v oboru umělé inteligence se posmívali, že tento druh práce má málo společného s inteligencí, protože takoví animáti dělají jen to, co dělá hmyz. Brooks odpověděl ambiciózním plánem reprodukovat evoluci člověka s použitím robota-humanoida zvaného Cog. Pracuje se na něm od roku 1993 a má lidské tvary s hlavou, pažemi a dokonce s hlasem, ačkoli mu chybějí nohy (byl modelován podle jednoho doktoranda na MIT). "A chceme, aby měl chování podobné lidskému," dodává Brooks. Citlivost v rukou a pažích zajišťuje vodivá pryž, která umožňuje dotyk. Měřiče deformace, tepelná čidla a detektory elektrického proudu dovolí Cogovi, aby cítil, že používá paže a jak dobře se mu to daří. Cog bude mít i dvě oči. Každé bude sestávat ze dvou maličkých kamer, z nichž jedna bude zprostředkovávat pohled v širokém záběru a druhá sledovat střed obrazového pole. Oči těkají - tedy vrhají pohled hned sem, hned tam, tak jako lidské. Cog bude mít jako přijímače tři mikrofony, aby lokalizoval zdroj zvuku, což je trik, který zvládneme pomocí dvojice uší a rafinovaného zpracování signálu v mozku. Takové detaily mají zásadní důležitost, protože právě na tom, že máme tělo, záleží. Naše tělo definuje a omezuje naši schopnost vyznat se ve světě; bez těla by to vůbec nebylo možné. To, jak se vyvinul mozek a vytvořilo se lidské vnímání, je založeno na vztazích nás jako individuí se světem. "Každá inteligence, s níž budeme skutečně schopni komunikovat, ať má radši člověku podobné tělo, jinak to bude vetřelec,"

říká. "Nechtěl jsem sestrojít vetřelce, ale cosi, co můžeme poznat a mít rádi."

Cog se pohybuje ve společných prostorách laboratoře umělé inteligence a dokáže interagovat s lidmi, asi tak, jako by to dělalo nemluvně, třeba když si hraje s hračkami, skládá na sebe předměty, pohybuje se kolem nich atd. Ačkoli Cog bude mít schopnost se učit a jeho názor na svět bude postaven na zkušenosti, bude mít stále některé předem naprogramované odpovědi, právě tak, jako je skutečné dítě vybaveno sacím reflexem a schopností naučit se mluvit. Cog má smysl pro rovnováhu a dokáže koordinovat pohyb hlavy tak, aby si udržoval tvář blízkého člověka v zorném poli. "Chce, aby se mu lidé věnovali," říká Brooks. "To je jeho vnitřní hnací síla a doufáme, že dokážeme tuto motivaci zužitkovat k tomu, abychom u něj vyvinuli nej-různější typy chování." Prostředky ke zpracování informace jsou umístěny v externím počítači, s nímž je propojen jako pupeční šňůrou. "Můj osmiletý syn byl velmi nespokojen, když zjistil, že mozek není v hlavě," říká. Brooks je opatrný při odhadech, kdy se dá očekávat, že se u Coga vyvine chování podobné člověku. "Šest měsíců až dva roky, to je úroveň schopností, o niž usilujeme." Nečeká, že se u něj vyvine hlas, pouze hrdelní odpovědi. "Mohli jsme do něj dát syntezátor řeči, ale to by byl podvod," říká.

## Evoluce lepších programů

Je jasné, že evoluční přístup k programování počítačů (a robotů) je již skutečností. Vyvíjející se společenstva digitálních kódů mohou být užitečná, když je potřeba naprogramovat vysoce komplexní systémy. Britský Telecom již díky své zkušenosti s Tierrou a C-Zoo začal odhadovat, kdy asi se dá očekávat, že lidé budou software spíše šlechtit než ho psát. Chris Winter, Paul McIlroy a José-Luis Fernández z Britského Telecomu začali s předpokladem, že dobrý programátor dokáže napsat za den až třicet řádků odladěného programového kódu. Podle jejich úvah stroj s předpokládanou rychlostí výpočtu deseti MIPS (milionů instrukcí za vteřinu), jako je dnešní Mac Quadra, by potřeboval 100 dní, aby dosáhl téhož výsledku. Avšak když uvážili, jakým tempem dnes roste rychlost počítačů, odhadli, že do roku 2000 stolní počítače, schopné drtit čísla rychlostí kolem 3000 MIPS, budou generovat počítačový kód přibližně stejně rychle jako dobrý lidský programátor. Ve skutečnosti může být dokonce možné nechat tento software, ať se v

počítači množí tak, aby si vyvinul schopnost vypořádat se s novými úkoly, jako je třeba infekce počítačovým virem.

Je samozřejmé, že před námi stojí nelehké technické problémy. Jedním z nich mohou být zkrácené postupy používané při testování každé generace vyvinutého softwaru. Je výpočetně nákladné testovat každý organismus v každé generaci na každém z daných úkolů, řekněme směřování hovorů telefonní sítě. Místo toho se používá jednodušší test, měřící úspěšnost organismu v situaci, kdy dojde k jednomu specifickému ucpání síťového provozu. Nebezpečí spočívá v tom, že úspěšné organismy jsou dobré pouze k řešení tohoto jednotlivého síťového problému a žádného jiného. Jeden důvtipný způsob, jak tento problém překonat, je vyvíjet populaci problémů souběžně s populací řešení, takže se neustále vybírají ty úkoly, které se ukážou jako nej-těžší. Metoda evoluce jak problémů, tak jejich řešení byla vyvinuta Dannym Hillisem z Thinking Machines a nazývá se "koevoluční model s parazity", což odkazuje na podobné evoluční dostihy, které probíhají v přírodě mezi parazity a jejich hostiteli.

To, jak jednou v budoucnu může být software ponechán vývoji, místo aby se ručně psal, ilustroval Tom Ray v rámci probíhajícího rozvoje jeho simulátoru umělého života Tierra na oddělení evolučních systémů v Mezinárodním výzkumném ústavu pokročilých telekomunikací v Kjótu. Ray chce založit "rezervaci biodiverzity" opakováním evolučních počítačových experimentů s Tierrou, které by prováděli dobrovolníci na celosvětové počítačové síti, na internetu, který propojuje odhadem třiadvacet milionů<sup>□</sup> uživatelů po celém světě. Ve spolupráci s Kurtem Thearlingem vyvinul software, který by digitální "volné přírodě" umožnil množit se na síti. S použitím několika tisíc dobrovolnických počítačů, spojených po celém světě, se programy vystaví složitějšímu prostředí, které by je mělo povzbudit, aby vyvinuly ještě důmyslnější strategie přežití a reprodukce. Mezi tvory v tomto digitálním zvěřinci se může vyloupnout komerčně užitečný software, vhodný k distribuci úloh mezi mnoho různých počítačových procesorů nebo k vykonávání úkolů, o nichž Ray s Thearlingem ani nepřemýšleli. Zjistilo se například, že u digitálních organismů se spontánně vyvíjejí programovací triky a soubor procesů uplatňujících se v tierrovské evoluci se dá považovat za obecnou optimalizační techniku pro paralelní programování. Řečeno Rayovými slovy: "Nakonec se může ukázat, že

---

<sup>□</sup> Připomeňme, že kniha vyšla v roce 1995 a od té doby se internet samozřejmě dále prudce rozvíjel. (pozn. překl.)

umělá evoluce je nejlepší metodou, jak programovat masivně paralelní stroje."

Když se bude chtít k počítači připojit jeho právoplatný vlastník, budou z něho organismy vyhnány, a tak budou internetové bytosti neustále nuceny zkoušet nové strategie, velikost nezbytnou ke kopírování budou zkracovat na minimum a budou se rychle učit, jak najít málo používané zdroje na síti. "Měly by začít migrovat po celé zeměkouli tak, aby zůstávaly na té straně planety, kde je právě noc" říká Ray.

Tvorové mohou začít spolupracovat a vytvářet tak "mnohobuněčné" organismy. Tato adaptace Thierry k více spolupracující mnohobuněčné formě (oproti Jednobuněčné", která se používá nyní) by měla vést ke konstruktivní spolupráci mezi organismy při řešení jednotlivého problému, namísto roztržitého úsilí o řešení celé řady rozdílných problémů, jak je to typické v jednobuněčném případě.

Ke koordinaci složených organismů v Tieře jsou potřebné různé mechanismy komunikace: jeden pracuje jako hormon, nesoucí zprávu z mateřské buňky do jejích dceřiných buněk; druhý funguje jako nerv, běžící mezi dvěma specifickými buňkami. Avšak jisté řídicí úkoly musejí vycházet pouze z jediné buňky. Například když se mateřská buňka dělí a vytváří dceřinou buňku, musí být proveden pouze mateřský program, má-li dvojice provést útočnou akci nebo vyhledat zdroje nebo se spářit. Pokud matka s dcerou tímto způsobem úspěšně spolupracují, povstává první umělý mnohobuněčný tierrovský tvor. To by se ukázalo jako milník v hledání umělého života a inteligence. Ray to formuluje takto: "Jsme živými příklady tohoto druhu paralelismu v astronomických měřítkách, s biliony buněk a stovkami typů buněk, které jsou nádherně sladěné. Tvrdím, že evoluce prokázala schopnost toho dosáhnout a právě tak mohu tvrdit, že evoluce je jedinou prověřenou technikou, jak vytvořit inteligenci."

## Celulární automaty a hrana chaosu

K Rayově práci se připojily další skupiny zabývající se umělým životem a dnes pracuje na podobné tematice mnoho lidí. Jednou variantou Thierry je Avida, kterou vyvinuli Chris Adami a C. Titus Brown, působící na Caltechu. Zatímco organismy v Tieře existují v bezrozměrném kyberprostoru, Avida je navržena tak, že do umělé evoluce vnáší prostorové dimenze. Ponechává si většinu rysů Thierry, ale

spočívá na dvojrozměrné mřížce buněk. Digitální organismy obsazují místa na mřížce a způsobem charakteristickým pro celulární automaty mohou na sebe vzájemně působit jen nejbližší sousedé. Avšak obnovovací pravidla, která říkají, jak se každé místo na mřížce má změnit od jednoho časového okamžiku k druhému, nejsou pevně dána jednou provždy ještě před výpočtem. Místo toho jsou pravidla určena genomy na nejbližších sousedních místech. Tyto genomy se náhodně mění díky bodovým mutacím jejich řetězce instrukcí, čímž dochází k evoluci. Tak jako je tomu u Tierry, dá se Avida použít k provádění úkolů zadaných programátorem. Například kdybychom chtěli vyvinout metodu k násobení dvou celých čísel, mohli bychom odměnit každý digitální organismus, který tento úkol splnil, tím, že mu poskytneme více úseků počítačového času, v nichž může běžet.

Po čase se samy vyvinou umělé organismy, které se tímto úkolem budou zabývat. V principu, tak jako u Tierry, by takový systém měl být schopen adaptovat se pro řešení jakéhokoli úkolu, bez ohledu na jeho komplexitu, pouze za předpokladu, že bude vyčísitelný v Tu-ringově smyslu.

Někteří vědci tvrdili, že živé bytosti musejí být schopny provádět v podstatě neomezeně složité výpočty, aby přežily v evolučních závodech ve zbrojení. Naproti tomu je známo, že jisté typy celulárních automatů (CA) dokážou provádět univerzální výpočty - jinými slovy dokážou simulovat univerzální Turingův stroj. (Taková schopnost byla zjištěna poprvé u hry Life, na niž jsme narazili ve 4. kapitole.) Tvrzení o schopnosti univerzálních výpočtů inspirovalo některé lidi k tomu, aby se znovu vrátili k Wolframově klasifikaci dynamiky CA a aby se podívali, jestli dává nějakou odpověď na otázku, zda jsou některé typy CA vhodnější pro umělý život.

Jak jsme viděli, Wolfram předpokládal, že jeho CA tzv. třídy IV budou podporovat univerzální výpočty. Jelikož třída IV leží mezi periodickým a chaotickým režimem, zdá se, že podporuje tu nejkomplictnější dynamiku CA. Může se tedy zdát rozumné předpokládat, že u systémů umělého života založených na CA - což je ve skutečnosti pouze malá podmnožina všech takových systémů - by dynamika musela v okamžiku, kdy se objeví "život", přejít do třídy IV.



## Jin a jang

Tyto myšlenky o vztahu mezi dynamikou a výpočty jsou součástí širšího úsilí, a to zejména v oblasti statistické fyziky, objevovat komplexní chování právě v "kritických režimech" mezi řádem a deterministickým chaosem. Hledání komplexity v takových režimech je kromě toho i intelektuálně přitažlivé, neboť se zdá, že živí tvorové vystihli prchavou směs principů jin a jang. Zdá se, že biologický život obsazuje pásmo mezi pravidelností a turbulentním chaosem, kde koexistuje náhodnost s tvůrčí adaptací. Organismy kombinují schopnost změny a inovace se stabilitou zpětnovazebních systémů, která zajišťuje dobře definovanou strukturu a metabolismus.<sup>239</sup>

Sugestivní důkaz tohoto typu rovnováhy mezi chaosem a řádem lze najít v mravenčích koloniích. Blaine Cole, který pracuje v Hous-tonu v Texasu, pomocí videozáznamu odhaluje, že jednotliví mravenci se chovají chaoticky. Jedinec chvíli cupitá, pak si odpočine a tak dále a tak dále. Jeho životní pouť se kodrcá po podivném (chaotickém) atraktoru toho typu, jaký jsme popisovali v 6. kapitole. Na úrovni kolonie však vykazují mravenci docela rytmické chování. Nigel Franks z univerzity v Bathu pozoroval, že kolonie je chvíli aktivní, pak odpočívá, pak je znovu aktivní, přičemž celý cyklus trvá kolem dvaceti pěti minut.

Coleovy experimentální studie ukázaly, že vzorec chování závisí na hustotě mravenců. Pokud je jich na daném území jen málo, je jejich chování chaotické. Ale když počet na daném území naroste nad určitou mezní hodnotu, celá skupina se zrytmizuje. Je to proces organizace zdola nahoru, řízený kontaktem jednoho mravence s druhým. Mravenci se navzájem povzbuzují, takže aktivní mravenec uvede neaktivního do pohybu, když se setkají. Toto chování bylo simulováno Octaviem Miramontem a Richardem Solé ve spolupráci s Brianem Goodwinem na Open University. S použitím celulárního automatu vyvinuli model mravenčích kolonií, v němž je aktivita jednotlivých mravenců řízena Hopfieldovou neuronovou sítí. Goodwin říká: "Při určité hustotě počítačových mravenců nastává ostrý přechod, při němž to, co bylo souborem jednotlivců, z nichž každý si vytváří svůj vlastní chaos, se

---

<sup>239</sup> Otázka existence komplexního, vysoce adaptivního chování v jisté přechodové oblasti mezi extrémním řádem a extrémní neuspořádaností byla vysvětlena v práci Eigena a Schustera (viz P. Schuster, *Artificial Life* 1, 1994) o takzvaném chybovém prahu. Viz též práce amerického filosofa Marka Bedaua, např. M. Bedau and R. Seymour, *Complex Systems - Mechanisms of Adaptation* (IOS Press, Amsterdam 1994).

náhle transformuje v jeden celek - kolonie se stává superorganizmem s dobře definovaným rytmem a současně se objevuje prostorový pořádek."<sup>240</sup>

Laboratorní pozorování z laboratoře Nigela Frankse naznačují, že skutečné mravenčí kolonie nastavují své hustoty tak, že žijí poblíž tohoto bodu přechodu, na "hraně chaosu". Mravenci regulují velikost teritoria, v němž si dělají hnízda s královnou uprostřed a s vyvíjejícími se embryi a larvami uspořádanými kolem ní. Když mravenci dostanou zrnka písku, ohraničí jimi hnízdní komoru. Ale když zlomyslný vědec posune zrnka písku dovnitř a tak zmenší velikost komory, mravenci je odtlačí zase zpátky. Podobně když se teritorium zvětší, mravenci je zase omezí. "Kolonie má smysl pro hustotu a prostorový pořádek," říká Goodwin. "Tak se zdá, že mravenci možná opravdu nastavují hustotu své kolonie tak, aby byli poblíž hrany chaosu."

Právě takové příklady činí ideu "hrany chaosu" tak lákavou. Pro Goodwina je to "téměř poučka o tom, jaký je život, vesmír a cokoli, co je komplexní a nelineární (což je skoro všechno). Řekneme-li to více antropomorfně, hrana chaosu je skvělé místo k životu v neustále se měnícím světě, protože odtamtud můžete vždycky prozkoumávat obrazce řádu, které jsou k dispozici, a zkoušet jejich vhodnost k stávající situaci. To, co nechcete, je zůstat trčet v jednom z možných stavů řádu, který se nutně musí dříve nebo později stát zastaralým (vzpomeňme si na dinosaury, Britské impérium nebo IBM, než došlo ke katastrofě). Proto budou komplexní systémy, které se dokážou vyvíjet, stále poblíž hrany chaosu, budou očekávat onen tvůrčí krok do nadcházející novosti, který je podstatou evolučního procesu. Je to přinejmenším domněnka, jak to na světě chodí."

## Evoluce a univerzální výpočty

Chris Langton ze Santa Fe Institutu v Novém Mexiku byl zapáleným příznivcem těchto sugestivních myšlenek. Věnoval spoustu času pokusům pochopit, jak život vyvažuje jin zdánlivého zmatku jangem samoorganizace: "V živých systémech získala dynamika informace kontrolu nad dynamikou energie, která určuje chování většiny neživých systémů. Jak k tomu došlo, že si informace podle své vůle ochočila hrubou sílu energie?" ptá se. Tvrdí, že celulární automaty, které jsou

---

<sup>240</sup> B. Goodwin, *How the Leopard Changed Its Spots* (Weidenfeld & Nicolson, London 1994), str. 175.

schopné vykonávat "netriviální výpočty" včetně univerzálních výpočtů se s největší pravděpodobností nacházejí poblíž přechodu mezi řádem a chaosem; to je dynamika celulárních automatů třídy IV, která leží "mezi" uspořádaným chováním třídy II a chaotickým chováním třídy III.

Langton argumentoval, že pokud živé systémy provádějí komplexní výpočty proto, aby přežily, evoluce přirozeným výběrem bude mít tendenci dávat přednost systémům blízko hranice mezi uspořádaným a chaotickým chováním, na "hraně chaosu", kde bude schopnost zpracovávat informaci největší. Ze studia velkého množství simulací celulárních automatů s použitím různých dynamických pravidel došel Langton k přesvědčení, že podmínky pro život jsou optimální tehdy, když zdánlivě náhodné chování koexistuje s pravidelnější dynamikou. Slovo "život" zde znamená jak skutečný, tak umělý.

Langton věřil, že našel kritickou přechodovou oblast v prostoru parametrů dvoj- a jednorozměrných celulárních automatů, kde "se pozoruje fázový přechod mezi vysoce uspořádanou a vysoce neuspořádanou dynamikou, analogický fázovému přechodu mezi pevným a kapalným skupenstvím hmoty."<sup>241</sup> To byla oblast třídy IV, mezi třídou II a třídou III. Fázové přechody ve fyzikálních systémech, od ledu k vodě nebo od vody k páře, dokážou vytvořit korelace mezi molekulami na libovolně velkých vzdálenostech v prostoru a čase. Jelikož univerzální výpočty v Turingově smyslu mohou fungovat pouze v systémech s pamětí a komunikací na vlastně libovolně velkou vzdálenost, zdá se, že komplexní (třída IV) kategorie dynamických stavů CA by byla s největší pravděpodobností ta, která by umožňovala netriviální a možná i univerzální výpočty. Jinými slovy Langton argumentoval, že zpracování informace v síti s paralelním zpracováním by mohla být maximalizována na "hraně chaosu". Pak by se dalo čekat, že takové systémy, jako jsou živé bytosti, se budou vyvíjet směrem k této oblasti, pokud mají provádět tolik komplexních úkolů, které po nich žádá jejich prostředí.

Aby pojem "hrana chaosu" podpořili, pokusili se podobně myslící kolegové tuto myšlenku dále rozvinout. Například Stuart Kauffman argumentoval tím, že tento pojem představuje "nový mocný rámec k pochopení evoluční biologie".<sup>242</sup> V přírodním ekosystému deštného pralesa, koevolučním systému znázorněném proměnlivou krajinou zdatnosti, může úspěch jednoho druhu (jako je žába) představovat

<sup>241</sup> C. Langton, *Physica D* 42, 12 (1990).

<sup>242</sup> S. Kauffman, *The Origins of Order* (Oxford University Press, Oxford 1993), str. 261.

záhubu pro jiný (mouchu), který je jeho oblíbenou potravou. Kauffman tvrdil, že celý ekosystém se může souběžně vyvíjet do stavu držícího se hrany chaosu, což propojuje tuto myšlenku s Bakovým pojmem samoorganizovaného kritična, rozebíraným v 7.kapitole. I tam se ukazuje, že řada systémů včetně některých celulárních automatů<sup>243</sup> se vyznačuje evolucí směrem ke kritickému stavu.

Zbývala jedna klíčová otázka: jaké jsou výpočetní schopnosti, o nichž se předpokládalo, že budou vzkvétat na hraně chaosu? Tomu se ve stejnou dobu, avšak zcela nezávisle, věnovali Jim Crutchfield a jeho kolegové na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Crutchfield a Young ukázali, že výpočetní schopnosti systému dramaticky vzrůstají tam, kde začíná chaos, což je určitý druh fázového přechodu.<sup>244</sup> Jejich práce byla publikována v roce 1989 na vrcholu deset let trvající linie výzkumu, kterého se účastnili Ditzia Auerbach, Remo Badii, Peter Grassberger, Bernard Huberman, Györgyi Sepfalusy, Robert Shaw a další<sup>245</sup>.

Crutchfield uvažoval o nejlepší metodě, jak popisovat jin ajang komplexity statistickým způsobem.<sup>246</sup> Jeho definice komplexity vedla k protiintuitivnímu výsledku. Řetězec jedniček představuje čistý řád. Zdálo by se, že náhodný řetězec jedniček a nul je nekonečně komplexní. Avšak Crutchfield a Young namítali, že máme-li zdroj takových náhodných binárních číslic (například z chaotického systému), je stejně snadné generovat náhodný řetězec bitů jako řetězec nul, takže holá náhodnost je stejně prostá jako čistý řád. Když ohodnotíme výpočetní náročnost náhody tímto způsobem, dokážeme odhalit vyšší úroveň komplexity mezi těmito dvěma extrémy: statistická komplexita se maximalizuje někde mezi řádem a náhodností. Ve skutečnosti Crutchfield a Young ukázali, že v bodě, kde začíná chaos, existuje skok z konečné paměti na nekonečnou. Takže v termínech jejich míry komplexity je výpočetní schopnost největší v přechodovém režimu mezi řádem a náhodností.

---

<sup>243</sup> P. Bak, K. Chen, and M. Creutz, *Nature* 342, 780 (1989).

<sup>244</sup> Že přechod mezi chaosem a řádem je skutečně fázový přechod, dokázal Mitchell Feigenbaum v práci: M. Feigenbaum, *J. Stat. Phys.* 21, 669 (1979).

<sup>245</sup> Ve své doktorské disertaci zkoumal Chris Langton výpočetní schopnosti automatů tak, že naladil jejich chování nastavením takzvaného parametru  $\lambda$ . Říká však, že parametr nenachází jednoznačně všechna potenciálně kritická pravidla. C. Langton, e-mail Peteru Coveneymu, únor 1995.

<sup>246</sup> J. Crutchfield and K. Young, *Phys. Rev. Lett.* 63 105 (1989); J. Crutchfield and K. Young, *Entropy. Complexity and the Physics of Information*, W. Zurek (ed.), Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity VIII (Addison-Wesley, 1990), s. 223-69.

Z důvodů, které brzy ozřejmíme, je nešťastné, že mnohem více pozornosti soustředila média na úsilí Langtona v Santa Fe a také na práci Normana Packarda na Illinoiské univerzitě, který přišel s myšlenkou o biologickém významu hrany chaosu a vyvinul celulární automaty k provádění celé řady výpočetních úloh. S použitím genetického algoritmu Packard prozkoumal, která pravidla celulárních automatů jsou "přirozeně" vybírána na základě jejich výpočetní efektivnosti,<sup>247</sup> a došel k závěru, že pravidla celulárních automatů odpovídajících třídě IV jsou ta, která jsou s největší pravděpodobností schopná vykonávat komplexní výpočty. Věřil, že pokud se pravidlům celulárních automatů dovolí vyvíjet se tak, aby prováděla komplexní výpočty, budou spíše vybrána ta, která jsou v této oblasti. Packardova práce byla okamžitě oslavována vědeckými médii i některými badateli jako přelom ve vědě o komplexitě.

## Nesouhlas na hraně chaosu

Kritika Packardovy a Langtonovy práce se datuje přinejmenším od roku 1988. "Tehdy se poukazovalo na vážné chyby v jejich obecných úvahách a v technických detailech a poukazuje se stále," podotkl Jim Crutchfield, jehož významné příspěvky byly ve většině populárních výkladů přehlédnuty. Langtonova práce o hraně chaosu byla v jednom ohledu kvalitativně odlišná od Crutchfieldovy. Zatímco Crutchfield a Young se zabývali dynamickými systémy se spojitým časem, Langtonem studované celulární automaty existují pouze v diskrétním čase. A co je důležitější, Langton používal ve svých studiích hrubou míru komplexity. "Celkový důsledek," tvrdí Crutchfield, „je ten, že z Langtonovy práce se nedají vyčíst poznatky o tom, jak evoluční proces vytváří strukturu."<sup>248</sup>

V místnosti naproti Langtonovi v původním sídle Santa Fe Institutu se rozhodla také Melanie Mitchellová, že prozkoumá, zda byly mediální výklady "hrany chaosu" nadsazené. I ona byla podrážděna vágností některých Langtonových tvrzení. Se studentským pracovníkem Peterem Hraběrem a s Crutchfieldem se pokusila reprodukovat důležité tvrzení

---

<sup>247</sup> N. H. Packard, *Complexity in Biological Modelling*, J. A. S. Kelso, A. J. Mandeli, and M. F. Schlesinger (eds.) (World Scientific, Singapore 1988).

<sup>248</sup> Dopis J. Crutchfielda Rogeru Highfeldovi, 7. března, 1994. Dnes Langton stále tvrdí, že jeho míra je dost dobrá k odhalení a prozkoumání souvislosti mezi komplexní dynamikou a hranou chaosu, ačkoli připouští, že nedokáže najít všechna komplexní pravidla.

Normana Packarda, že totiž jeho evoluční simulace CA se "adaptovaly na hranu chaosu". Došli k závěru, že neměl pravdu.<sup>249</sup> Jeho "přelomové" zjištění bylo téměř jistě artefaktem, který vypovídal mnohem více o tom, jak byl naprogramován jeho počítač než o čemkoli jiném. Jak říká Mitchellová: "Do té míry, do jaké se dá pochopit, co Packard a Langton mysleli ‚hranou chaosu‘, není jejich interpretace výsledků simulací není ani dostatečně podložena, ani není správná z hlediska matematiky."

Když znovu prováděli Packardovy počítačové experimenty, nenašli Mitchellová a její kolegové žádný důkaz, že by celulární automaty s hodnotami blízkými hranici mezi dynamikou třídy II a třídy III měly nějak zvlášť zvýšené výpočetní schopnosti. Mitchellová a její spolupracovníci došli k důležitému závěru: "Je matematicky důležité vědět, že některé CA jsou v principu schopné dělat univerzální výpočty. Tvrdíme však, že to není vůbec vědecky nejzajímavější vlastností CA. A co víc, tato vlastnost vědcům mnoho nepomůže pochopit vznik komplexity v přírodě ani využít výpočetních schopností CA k řešení reálných problémů."

Nikdy se neprokázalo, že existuje vysoká úroveň výpočetních schopností u celulárních automatů při fázovém přechodu mezi řádem a chaosem.<sup>250</sup> Tato záležitost je obklopena zmatky kvůli sugestivní, avšak dvojaké povaze slova "chaos". V běžném jazyce je chaos synonymem náhodnosti, což vede lidi k tomu, že jej stavějí do protikladu uspořádanému chování, a tak myslí na nějaký druh vratké rovnováhy mezi protiklady. Jeho vědecký význam je však úplně jiný. Ve vědě tento termín, jak jsme ukázali, maskuje fakt, že chaotická dynamika je ve skutečnosti dosti dobře uspořádaná.

---

<sup>249</sup> M. Mitchell, P. T. Hraber, and J. P. Crutchfield, *Complex Systems* 7 89 (1993). C. Langton říká, že tyto studie byly „provedeny nepořádně“. C. Langton, e-mail Peteru Coveneymu, únor 1995.

<sup>250</sup> Langton nepřestává obhajovat své tvrzení o hluboké spojitosti mezi komplexitou, kritickými fázovými přechody, přechody mezi řádem a chaosem a výpočetními možnostmi. A jeho kritikové nepřestávají kritizovat vágnost pojmů používaných v jeho práci o celulárních automatech. Langton souhlasí, že navržené čtyři třídy celulárních automatů „ačkoli jsou užitečným prvním přiblížením, jsou až příliš hrubé.“ Stejně tak říká, že jeho míra komplexity je „příliš hrubá míra na to, aby měla praktické použití pro celulární automaty, s nimiž obvykle chceme pracovat.“

# Zkoumání komplexity

Nakonec tedy dospíváme k závěru, že neexistuje žádná prostá ani žádná velkolepá matematická teorie života, ať skutečného nebo umělého. Můžeme však čerpat posilu ze starého paradoxu, že ačkoli je svět komplexní, pravidla přírody jsou jednoduchá. Vesmír je obydlen bohatou různorodostí fyzikálních forem, od bakterií a deštných pralesů po spirální galaxie. A přece jsou všechny vytvořeny a tvarovány týmiž základními zákony. Díky rychlým a výkonným počítačům biologové, fyzikové a informatici hloubající o komplexitě mohou nyní prozkoumávat komplexitu v celé její slávě a osvětlit otázky, které kdysi ležely výlučně v říši filozofie a mysticismu.

Nejvýznamnější současný systém umělého života, Tierra, má evoluční dynamiku tak vysoké komplexity, že jediným způsobem, jak ji zkoumat, je provádět na ní experimenty v počítači, přesně tak, jako experimentální biologové pracují v terénu. Dalo by se předvídat, že s dostatkem času a s dostatečně výkonným počítačem by mohlo být možné vyvinout v systému podobném Tieře digitální organismy vybavené schopnostmi inteligence a dokonce vědomí. Práce Brookse a dalších podtrhuje tu skutečnost, že aby to bylo možné, musí být digitální život vystaven komplexitě bohatého a měnícího se okolí a musí s ním interagovat.

Chceme-li sledovat hledání ryzí umělé inteligence, musíme se nyní obrátit k nejvyššímu projevu komplexity v přírodě: lidskému mozku. Je to objekt, který fascinoval von Neumanna a Turinga a představoval inspiraci pro mnohá z jejich nejvýznamnějších děl. Nyní více než kdy předtím zaměstnává výzkumné programy vědců po celém světě. Důvod je nasnadě: představuje tu nejzazší výzvu vědě o komplexitě. Abychom odhalili jeho tajemství, budeme se muset vybavit mnoha pojmy a systémy, které jsme prozkoumávali v této a v předešlých kapitolách, od matematické logiky a spinových skel po Bělousovovy-Zabotinského reakce a evoluci.

# 9 Kouzelný stav

Živí světový duch, jest po všech rozlita částech duše,  
jež hýbá hmotou a celý proniká vesmír<sup>251</sup>

VERGILIUS

Je vrásčitý, váží asi půldruhého kila a má konzistenci zralého avokáda. Je dost důmyslný na to, aby si osedlal pohyb atomů a molekul, dával ve zlomku vteřiny příkazy prstům koncertního houslisty nebo vykouzliil trojrozměrné obrazy z paprsků světla tančících v páru dvojrozměrných sítnic. Dokáže také snít, sypat ze sebe verše a vymýšlet vtipy. Je nepřekonatelný ve své schopnosti myslet, komunikovat a logicky uvažovat. Ze všeho nejvíc nás udivuje jeho jedinečná schopnost uvědomovat si sebe sama a své místo v prostoru a čase. Vítejte v lidském mozku, katedrále komplexity.

Mozek představuje barokní hierarchii dynamických a statických struktur. Na jedné úrovni popisu se snažíme pochopit, jak se několik buněk raného embrya dokáže dělit a samoorganizovat tak, že vytvoří živý dospělý mozek. Na jiné úrovni potřebujeme prozkoumat strukturu mozku a to, jak díky vzájemnému působení obrovského množství neuronů vzniká řada emergentních vlastností včetně schopnosti rozlišit jemné červené vino od vinného octa nebo úsměv na dětské tváři od ztuhlého šklebu šéfa oddělení reklamy. Vrcholem všech těchto emergentních vlastností, a vlastně veškeré komplexity, je lidské vědomí. Pokud někdy dospějeme k plnému pochopení komplexity mozku, pak konečným testem takového porozumění bude pokus simulovat jej uvnitř počítačového stroje.

Podstatu problému vědomí obdivuhodně vyjádřil John Searle, filozof z Kalifornské univerzity v Berkeley: "Tajemství porozumění vědomí spočívá v tom, že pochopíme, že je to biologický jev, zcela shodný se všemi ostatními biologickými jevy, jako jsou trávení nebo růst. Mozek je orgánem vědomí, stejně jako je žaludek orgánem trávení a v žádném

---

<sup>251</sup> Spiritus intus alit, totamque infusa per artus. Mens agitat molem et magno se cor-pore miscet. Aeneida, VI, 726-727. český překlad O. Vaňorný, Laichter, Praha 1933.



z těchto případů nemluvíme o ničem duchovním nebo éterickém či mystickém, o něčem, co stojí mimo obvyklé fyzikální procesy ve světě. Dvě největší chyby, a v základě je to jedna a ta samá chyba, je myslet si, že vědomí, jelikož je soukromé, subjektivní, senzitivní, éterické atd., nemůže být součástí obyčejného špinavého fyzického světa, jako je pití piva a požívání párků. Druhá velká chyba je myslet si, že je to všechno záležitost počítačových programů."

V našich vědomostech o mozku již byl učiněn úžasný pokrok, a to z mnoha důvodů. Za prvé jsme vyzbrojeni nevídaným poznáním chemických pochodů v mozku. Za druhé máme nyní široké spektrum nástrojů k pozorování živého mozku při práci. Za třetí dokázaly simulace mozku pomocí neuronových sítí zachytit některé z jeho emergentních vlastností *in silico*: ty sahají od toho, jak se chová poškozený mozek, až k tomu, jak zpracovává vizuální signály ze sítnice. Je čím dál jasnější, že překážky k vytvoření umělého vědomí nemusí být tak hrozné, jak jsme si mysleli.

## Historie mysli

Od té doby, co se svými myšlenkami o mozku přišel otec moderní filozofie René Descartes, prošlo chápání mozku dlouhým vývojem. Descartes se narodil ve francouzském La Haye v oblasti Touraine roku 1596 a říká se o něm, že měl božské zjevení svého životního poslání, rozkrytí obecných principů vědy (*Scientia mirabilis*), když byl jednoho dne zavřený v "přetopené místnosti".<sup>□</sup> O třináct let později, roku 1632, Descartes zahájil vědecké zkoumání mozku sepsáním pojednání *Le Monde ou Traité de la Lumière*.<sup>252</sup> Odmítl převládající názor, že biologie se dá vysvětlit jedině s odvoláním na zvláštní "vitální" principy života, a tvrdil, že v lidském těle není nic, co by se nedalo vysvětlit týmiž zákony, které popisují chování hvězd a vznik duhy.

Descartes věřil, že všechny operace smyslů a nervů začínají i končí v maličkém podvěsku mozkovém na spodní straně mozku. Podvěšek ovlivňuje tok "živočišných duchů",<sup>□</sup> což je termín, který používal pro pročištěnou formu krve, o níž se předpokládalo, že protéká nervy a

---

<sup>□</sup> Bylo to v noci z 10. na 11. 11. 1619 v Ulmu, nedaleko Neuburgu. (pozn. překl.)

<sup>252</sup> Svět byl hotov v roce 1632, Descartes však spis stáhl pod vlivem Galileiho odsouzení, protože spolu s ním hlásal kacířský názor, že Země obíhá kolem Slunce.

<sup>□</sup> Spiritus animales (pozn. překl.)

mozkem. Informace ze smyslů se mezitím přenáší do mozku vlákny, která běží uvnitř týchž nervů. Říznutí do kůže na prstě škusne oním často připomínaným táhlem od zvonku, jež otevře záklopku v hlavě a pošle tak hejno živočišných duchů do svalů, které stáhnou ruku pryč od nebezpečí. Avšak Descartes nedotáhl tento redukcionistický obraz ke konečnému závěru. Tvrdil, že šišinku nakonec ovládá duše. Moderní neurovědci si dovolují nesouhlasit. Je to práce mozku, ne duše. A mozek se neskládá z duchů, armatur a táhel, ale z buněk.

Dnes začínáme chápat jak strukturu a funkci těchto buněk, tak i řadu molekul, které přenášejí signály v mozku tam i zpět. Na obrazovce počítače můžeme vidět pestré schéma rozmístění receptorů na povrchu mozkových buněk a odhalit tak přesné záchytné místo, kde tyto signální molekuly působí. Můžeme dokonce napodobit vlnu elektrické aktivity, vznikající, když jedna mozková buňka vyšle signál. A přece, když se všechny tyto detaily vysvětlí, bude pořád chybět ten nejdůležitější rys: celkový obraz toho, jak ze struktury mozku vyplývají emergentní vlastnosti, jako je paměť. Rozumět molekulárním detailům chemických pochodů v mozku je naprosto nezbytné, avšak pouze věda o komplexitě nám umožňuje pochopit vyšší úroveň organizace, v níž síť miliard a miliard neuronů jako zázrakem spolupracují a zvládají tak nejen paměť, ale i vidění, učení, emoce a vědomí.

Komplexita se v mozku objevuje prostřednictvím samoorganizace na několika úrovních. Za prvé, během vývoje individua samoorganizace pospojuje mozek sérií zpětnovazebních a selekčních procesů mezi neurony. Za druhé, v komplexní chemii živých mozkových buněk se obrovské interagující sítě molekul samoorganizují a tvoří tak prostorový a časový řád, který můžeme pozorovat jako disipativní struktury podobné těm, s nimiž jsme se setkali u Bělousovovy-Žabotinského reakce (viz 6.kapitolu). Za třetí, samoorganizace neustále přepojuje veliké množství neuronů, aby uchovávaly vzpomínky, přizpůsobovaly svůj výkon okolí a vytvářely celou řadu dalších emergentních vlastností. A neměli bychom zapomínat ani na to, že mnoho rysů mozku bylo optimalizováno během milionů let evoluce.

Když fyziolog a laureát Nobelovy ceny sir Charles Sherrington psal knihu *Člověk ve své podstatě*,<sup>□</sup> popsal samoorganizaci mozku svou charakteristicky barvitou prózou: "Je to, jako by se Mléčná dráha dala do jakéhosi kosmického tance. Rázem se z hmoty hlavy stane jakýsi kouzelný stav, kde miliony blyštících se člunků tkají rozplývavý vzor,

---

<sup>□</sup> Man on His Nature (pozn. překl.)

vždy smysluplný vzor, ačkoli nikdy ne trvalý: proměnlivou harmonii vzorů ve vzorech."<sup>253</sup> Atributy jako jsou inteligence a vědomí, s nimiž si lámali filozofové hlavu dávno předtím a stále potom, co Descartes v roce 1650 zemřel, se samy dostávají do sféry vědecké analýzy. Není divu, že jsou dnes vědci naplněni podobným vzrušením, jaké cítili, když Ernest Rutherford odhalil strukturu atomu a když Francis Crick a James Watson objevili molekulární strukturu DNA.

## Evoluční umění konstrukce mozku

Mozek je vychováván bohatým vnějším prostředím, o kterém se dozvídá prostřednictvím svých smyslů. Vznikl díky samoorganizaci centrálního nervového systému v průběhu miliard let evoluce. Tváří v tvář základnímu požadavku přežít, aby mohl vytvořit řád v bzučícím a řvoucím chaosu, jak o tom hovoří americký filozof a psycholog William James, vyvinul se nervový systém tak, že ze svého okolí získává čím dál užitečnější útržky informací. Důsledkem je to, že mezi organizací mozku a strukturou světa, v němž žijeme, existuje hluboká harmonie.

Tato harmonie má svůj původ v nejstarších primitivních sensorických buňkách. Nejprve to byly jednoduché buňky pro detekci rozdílu chemických koncentrací nebo směru ke slunci. Pak se vyvinuly mnohobuněčné organismy, které využívaly několika takových buněk. Nezmar, sladkovodní láčkovec, kterého jsme potkali při popisu samoorganizace během vývoje jedince (viz 6. kapitolu), používá rozptýlenou síť nervových buněk k tomu, aby chytal malé organismy, které zavadí o jeho chapadla. Ploštěnka se už může honosit mnohem složitějším schématem neuronových obvodů. Žebříčková nervová soustava není v jejím plochém černém těle rovnoměrně rozdělena: její smyslový aparát je umístěn na jednom konci a poblíž jsou shluky nervových buněk zvané ganglia. Tyto shluky jsou primitivními předchůdci toho, co budeme považovat za mozek.

Pro vylepšení koordinace smyslových informací se u pokročilejších forem života vyvinuly různé strategie proměn spojů mezi nervovými buňkami uvnitř ganglií a mezi nimi. Zpočátku se stávaly spoje citlivějšími, když byly stimulovány, což je dočasný jev, který se dá pozorovat, když například lechtáme žábry na předním konci mořského plže. Zpočátku toto jednoduché stvoření žábry stáhne, což je reakce

řízená shlukem pouhých šesti neuronů. Pokud ale šimráte znovu a znovu, plž se postupně naučí s touto nepříjemností žít díky jednoduché formě paměti zvané habituace. Naše mozky jsou mnohem víc než miliardy miliard takových shluků neuronů, jaké má mořský plž. Vyvinuly se v nich mnohem důmyslnější možnosti, zejména asociativní paměť, kde byly spoje mezi pevným počtem neuronů utkány jako odpověď na koincidence a korelace mezi vysíláním impulzů nervovými buňkami stimulovanými smyslovými orgány. V tomto dialogu s prostředím dokážou jednoduché procesy učení lépe zužitkovat smyslové podněty: když si zvíře vzpomene na hořkou chuť žluté bobule, dokáže si připomenout bolest břicha, což se mu docela hodí. To mozku umožnilo převzít strategie zvyšující pravděpodobnost přežití. Poháněn dál motorem evoluce stal se mozek orgánem bohatě pospojovaných procesorů, které dokážou předpovídat stejně dobře jako reagovat na podněty přicházející ze smyslů. Jak říká oxfordský neuro-fyziolog Colin Blakemore: "Zajímavé části mozku jsou poháněny smysly, a to až k řeči, která se určitě vyvinula ze smyslové kategorizace."

Během evoluce druhů vzrůstala jak velikost, tak komplikovanost nervového systému zvířat, a vrcholil lidským mozkem, největším, který kdy jaký primát měl.<sup>254</sup> Tajemství pozoruhodné výkonnosti lidského mozku spočívá v jeho neobyčejné složitosti. Mozek obsahuje něco kolem milionu milionů (10<sup>12</sup>) buněk. Většinu tvoří malé gliové buňky, o nichž se tradičně myslelo, že mají za úkol podporu, výživu a ochranu veledůležitých buněk zpracovávajících signály, nervových buněk zvaných neurony. Ačkoli o gliových buňkách se čím dál více domníváme, že mají také svou roli ve zpracování informace, hlavním ohniskem zájmu zůstávají neurony v mozku. Celková délka "vedení" mezi neurony je zhruba sto tisíc kilometrů. Počet spojů mezi neurony je kolem tisíce milionu milionů (10<sup>15</sup>). Celkový počet neuronů je sto tisíc milionů (10<sup>10</sup>). Abychom si udělali představu, toto číslo je srovnatelné s počtem hvězd v naší galaxii.<sup>255</sup>

Mohli bychom si myslet, že postavit orgán takové složitosti by vyžadovalo alespoň milion milionů instrukcí, tedy jednu pro každou mozkovou buňku. Možná by jich bylo potřeba ještě mnohem víc, pokud by se vyžadovaly instrukce k položení každého spoje. Možná mnohem

---

<sup>254</sup> S. Jones, R. Martin, and D. Pilbeam, *The Cambridge Encyclopaedia of Human Evolution* (Cambridge University Press, Cambridge 1992), p. 115. Všimněme si, že neandertálci z Evropy a Středního východu mají také mozek velikosti moderního člověka.

<sup>255</sup> G. Fishbach, *Scientific American*, 267, 25 (1992).

méně, předpokládáme-li, že každá jednotlivá mozková buňka není jiná než všechny ostatní, ale že se vyskytují v různých rodinách. Ukazuje se však, že konstrukce a funkce celého těla je předurčena ne více než 100 000 geny, z nichž jedna třetina poskytuje prostředky ke stavbě toho nejkomplexnějšího známého objektu ve vesmíru. K překlenutí mezery mezi genetickými složkami a výsledným orgánem spoléhají všechna stadia vývinu mozku na prvek náhody stejně jako na samoorganizaci - tedy na kreativitu. Laureát Nobelovy ceny Francis Crick však varuje před prázdny slovy: "Kdo nebo co jiného to organizuje, než že se to dělá samo? Existuje libovolné množství způsobů, jak se mozek může samoorganizovat. Pouze chceme vědět, kterým z těch způsobů to opravdu dělá."

## Stavební plán přírody

Mozek roste podle předpisu, který závisí částečně na jeho genetickém plánu, částečně na prostředí. Začneme tím, že se soustředíme na stavební plán. Kaskáda geneticky naprogramovaných bílkovin působících ve škále zpětnovazebních procesů promění kulovité oplodněné vajíčko v miliardy buněk dospělého jedince a spouští nejen dělení buněk, ale také jejich migraci, vzájemné přilnutí či smrt. Proces diferenciacie, díky němuž se mozkové buňky liší od buněk v játrech, je řízen obdobným způsobem.

Nedávné pokroky molekulární biologie nám umožnily studovat detailní genetické a buněčné mechanismy, které se odehrávají v průběhu vývoje mozku, kdy se každou minutu vytváří až 25 000 buněk. Klíčová stadia vývinu mozku jsou podobná, ať nastávají u kuřete, mouchy nebo u člověka. V první fázi se vytvoří nervové buňky na správných místech. U kuřete se to začíná objevovat během formování blastodermu, plochy složené z asi 100 000 buněk. V procesu zvaném gastrulace se pak vytvoří tři oddělené vrstvy - ektoderm, mezo-derm a endoderm, což je jeden z procesů původně modelovaných Turingem, jak jsme o tom mluvili v 6. a 7.kapitole (viz obr. 9.1). Středová osa roviny odškrucuje strukturu zvanou neurální lišta na vrcholu rovného záhybu zvaného neurální trubice. Z neurální lišty odplývají buňky do série váčků, kterým se říká čelistní oblouky, což jsou evoluční pozůstatky žaberních oblouků, zbytky po našich rybích předcích, které se vyvinou v nejruznější struktury obličeje a krku. Ačkoli některé buňky z lišty a z dalších částí embrya se stanou nervovými buňkami, nejzajímavější

struktury - centrální nervová soustava, mozek a oči - vznikají ze samotné nervové trubice. Do čtyř týdnů se dají rozeznat hlavní oblasti lidského mozku včetně předního mozku, středního a zadního mozku a zrakového váčku, z něhož se vyvine oko. Mozek dostává svůj charakteristický vrásčitý vzhled po zhruba šesti měsících.

Během raného stadia se vyvíjejí různé linie mozkových buněk. Předchozí práce na muškách octomilkách, oblíbeném pokusném zvířeti genetiků, ukázaly, že role všech buněk včetně neuronů ve vyvíjející se mušce je řízena speciální třídou naprogramovaných instrukcí zvaných hox geny. Hox je zkratka pro "homeobox", úsek DNA umožňující jednomu genu "mluvit" s jiným. Tato interakce je klíčem ke genové regulaci, která je životně důležitá pro strukturální samoorganizaci, právě tak, jako tomu bylo u Bělousovovy-Žabotinského reakce.

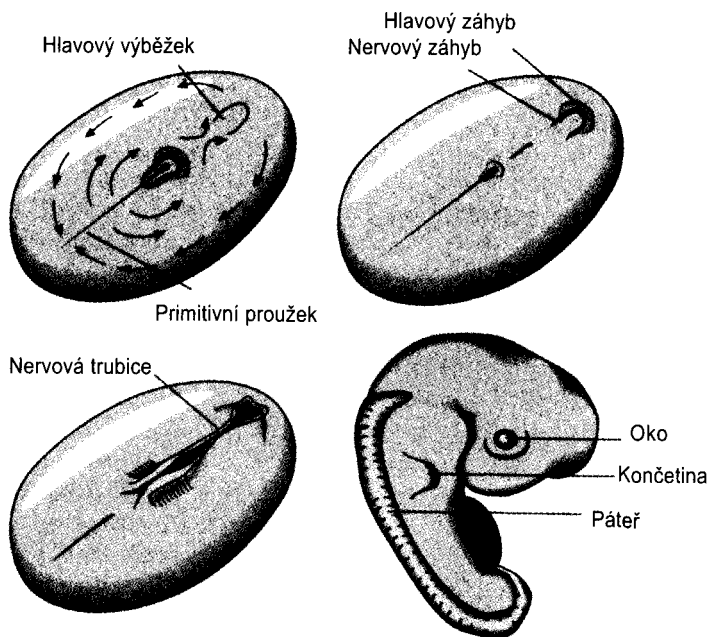
Ke genetické zpětné vazbě dochází proto, že homeoboxové geny kódují bílkoviny, které se váží k jiným specifickým genovým sekvencím, a tak vedou k expresi nebo inhibici blízkých genů na tomtéž chromozomu. Hox geny mohou dát do pohybu provázané kaskády genetické aktivity, které řídí vývojové dráhy. Výsledkem je genetický ekvivalent rozčlenění na úseky: proces nazývaný segmentace, který určuje tvar embrya, ať lidského nebo mušičího. Obecně řečeno jsou výsledkem segmentace všechny opakující se struktury, které se vyskytují podél hlavní osy těla zvířete, od hlavy k ocasu, jako jsou například ganglia. U lidí jsou nejviditelnějšími znaky segmentace žebra, páteřní obratle a kořeny nervů, které běží od páteře k perifernímu nervovému systému. Je to tentýž druh samoorganizace, který pozoroval Jim Tabony v experimentech s tubulinem, které jsme popisovali v 7.kapitole.

Toto genetické řízení organizuje obecné "schéma zapojení" a dává mozku každého živočišného druhu základní strukturální rysy, takže pavouci mohou bez námahy soukat síť, sovy mají ostrý zrak a lidé mají vrozenou schopnost řeči. Růst axonů a dendritů - vláken vypouštěných neurony - je řízen jejich odezvou na změny koncentrace chemických markerů.<sup>256</sup> Některé z těchto markerů přitahují, jiné odpuzují. Konfliktní povaha těchto interakcí je kvalitativně podobná mechanismům, které vedly k organizaci u nezmaru.

---

<sup>256</sup> B. Alberts, D. Bray, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, and J. Watson, *The Molecular Biology of the Cell*, 2nd ed. (Garland, New York, 1989), p. 1123. (Český překlad: *Základy buněčné biologie*, Espero Publishing, Ústí nad Labem 2000.)

Polovina nebo i více z těchto neuronů umírá zhruba v té chvíli, kdy jejich vlákna dosáhnou svého cíle, ačkoli všechny vypadají zdravě. O tomto procesu se předpokládá, že probíhá podle principů přírodního výběru: všechny soutěží o omezené množství chemické sloučeniny potřebné k přežití. Pokud ji nedostanou dostatečné množství, spáchají sebevraždu procesem zvaným apoptóza. Výsledkem všech těchto buněčných obětí pro větší dobro mozku je hrubá "mapa", v níž se sousední nervy ve smyslovém orgánu, jako je sítnice, napojí na sousední oblasti mozku. K jemnému vyladění mapy pak dojde ještě dřív, než sítnice začne odpovídat na světlo. Existující fakta ukazují, že nervovými buňkami sítnice, jejichž vlákna tvoří optický nerv, probíhají vlny samovolné organizační aktivity a pomáhají, aby se konce sousedních sítnicových nervových buněk připojily k sousedním oblastem mozku.<sup>257</sup>



Obrázek 9.1 / Klíčová stadia ve vývoji mozku.

<sup>257</sup> C. Shatz, Scientific American 267, 60 ( 1992).

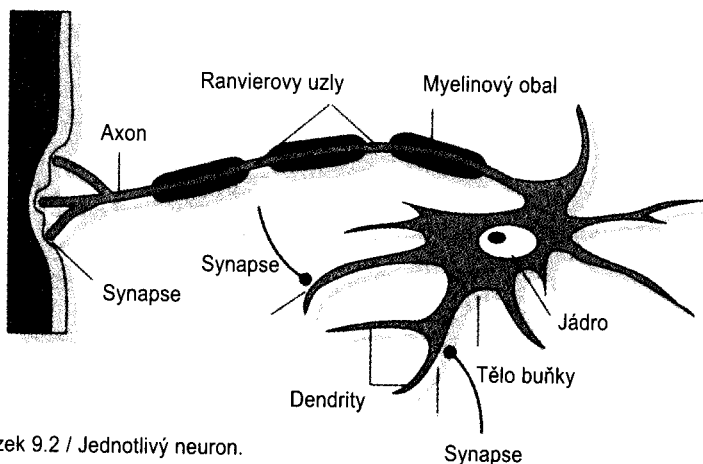
Výsledný dospělý mozek je směs protikladů: neurony obepínají rozsáhlé oblasti a spojují se s tisíci jiných neuronů. Organizují se do funkčních map, takže různé oblasti mozku dělají různé věci. Přesto je výsledkem jediné vědomí. Tento konflikt mezi integrací a segregací je ústředním paradoxem snahy o teoretické pochopení mozku. Jak to komentoval Giulio Tononi z Institutu neurovědy v La Jolle: "Bylo tu neuvěřitelné napětí mezi lokalizacionisty na jedné a holisty na druhé straně." Pro snazší pochopení zdánlivého konfliktu mezi lokálními a globálními funkcemi se Tononi pokusil vyvinout numerickou míru neuronové komplexity, pojmenovanou CN, která funguje podobným způsobem jako statistická míra komplexity zavedená Crutchfieldem a Youngem, o níž jsme se zmínili v předcházející kapitole. Aby ukázal, jak to funguje, používal Tononi příklad vzatý z fyziky: CN bude malé jak pro plyn skládající se z náhodně se pohybujících molekul, tak pro krystal skládající se z nekonečných vyrovnaných šiků atomů. Ale pokud jde o kůru mozkovou, kde se lokální specializace potýká s globální integrací, tam je CN velmi vysoké. Tononi skutečně předpověděl, že tato míra komplexity bude větší pro miliardy neuronů pracujících v mozku při vědomí, než pro ty, které jsou v mozku spícím, nebo během elektrických smrští, které zachvátí mozek při epileptickém záchvatu.

## Biologické neurony

Předtím, než se budeme moci zabývat emergentními vlastnostmi miliard spolupracujících neuronů, a tudíž pochopit, jak se mozek dokáže učit od okolního prostředí a adaptovat se na něj, potřebujeme se dozvědět víc o tom, z čeho se skládají a jak fungují nervové buňky. V celé živočišné říši mají neurony standardní vzhled, což je další potvrzení Darwinovy teze, že pocházíme ze společných předků. Mozky, tak jako počítače, posílají po "drátech" elektrické signály: každé tělo neuronu přijímá vstupní nervové signály z bohatě rozvětvených výběžků zvaných dendrity a posílá signály ženoucí se tlustým výběžkem zvaným axon, který se může táhnout z jednoho konce těla na druhý (viz obr. 9.2). Obecně dostává každá buňka vstupní data od zhruba deseti tisíc dalších buněk, typicky prostřednictvím tří nebo čtyř, ale někdy až stovek kontaktů s každým jednotlivým neuronem. Naopak axon jednotlivého neuronu může být rozvětvený nebo nerozvětvený a pučí z něho stejné množství synaptických "knoflíků". Každý představuje bod, v němž se signál posílá další buňce. Mozek je tak hustou džunglí synapsí.



Ačkoli mají podobnou standardní strukturu, vyskytují se neurony v závratném množství variant, které jsou odrazem specifických rolí, jež jim samoorganizace prostřednictvím vývoje přisoudila. Jejich vzhled lze zviditelnit jako "stromy v zimní mlze" s použitím solí stříbra, což je metoda barvení objevená náhodou na konci 19. století milánským anatomem Camilliem Golgim.<sup>258</sup>



Obrázek 9.2 / Jednotlivý neuron.

Díky obratnému využívání Golgiho metody se stal madridský badatel Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) otcem moderní neuroanatomie. Stříbrné skvrny odhalily, že mozek se skládá z diskrétních jednotek, takže není spojitou sítí. Cajal říkal těmto jednotkám, nervovým buňkám, "tajemní motýli duše". Jsou tak mnohotvárné jako motýli, od Purkyňovy buňky, která vypadá jako koralový vějíř, po jeden typ neuronu, který připomíná lano roztřepené na obou koncích. Jenom v sítnici je nejméně pět typů neuronů, které zpracovávají světlo. Různorodost dále prudce vzrůstá uvnitř mozku, takže celkem tu mohou být stovky typů.

Stejně tak jako je spirální obrazec emergentní vlastností Bělousovy-Zabotinského chemické reakce, tak vysílání signálů nervovou buňkou je emergentní, nelineární vlastností jeho stavby a vzájemného působení s jinými neurony, a závisí na struktuře membrány, která ho obklopuje. Vzpomeňte si na naši diskusi o cross-katalátoru v 6. kapitole, kde jsme viděli, jak jednoduché nelineární chemické schéma dokáže

<sup>258</sup> S. Rose, *The Making of Memory* (Bantam Press, London 1992), str. 259.

generovat oscilace chemické aktivity, ne nepodobné elektrochemickým obrazcům, které bylo možno pozorovat v nervových buňkách vysílajících signál. Membrána, která obklopuje každou buňku v těle, je elektricky nabitá v důsledku různého množství elektricky nabitých atomů - iontů - uvnitř a vně; to zajišťuje, že buňka zůstává daleko od rovnováhy, podobně jako cross-katalátor. Neurony, na rozdíl od jiných buněk, jsou schopné měnit své elektrické vlastnosti. Když přijde signál od jiného neuronu, změní se vlastnosti buněčné membrány, a dovolí tak iontům, aby skrz ni pronikaly. Sodíkové ionty přitékají dovnitř velkými bílkovinnými iontovými kanály a membránový potenciál se rychle změní z -70 tisícín voltu na +40 tisícín voltu. Ačkoli lokální vlastnosti membrány se znovu změní, aby obnovily tak status quo, spustí se tím podobné změny v sousedící membráně, takže je vyslán impuls elektrické aktivity. Tento impuls, nazývaný akční potenciál, běží jako vlnka podél nervu. Aby v těle mohl putovat na libovolnou vzdálenost, musí akční potenciál nabít kapacitu axonu a překonat odpor a úniky do mezibuněčné tekutiny, kterou po cestě potkává. Za tímto účelem je axon důkladně pokryt myelinem, čímž se snižuje kapacita, a slábnoucí akční potenciál je podél axonu zesilován opakovači zvanými Ranvierovy uzly. Nejvyšší rychlost, kterou dokáže akční potenciál cestovat, je 100 metrů za sekundu - jedna milióntina rychlosti, kterou se pohybuje elektrický signál v měděném drátě v počítači.<sup>259</sup>

Zpracování signálů, které neurony přenášejí, je emergentní vlastností jak těchto iontových kanálů, tak stimulace dalších buněk. Některé signály zesilují pravděpodobnost, že neuron vyšle impuls, jiné ji snižují v závislosti na detailech propojení. Axony se připojují nejen k dendritům, ale také k jiným axonům - většinou aby zeslabovaly signály, které druhé axony odesílají. Dendrity nejenže přijímají signály, ale mohou je také vyslat do sousedních dendritů nebo axonů. A úseky dendritů se mohou ovlivňovat navzájem a vetovat soupeřící signály. Pro výstup neuronu je klíčové načasování a typ signálů, které přijímá. Procesy odehrávající se v jednotlivém neuronu jsou při detailním studiu tak komplexní, že mnoho vědců stráví svou celoživotní kariéru pouze studiem těchto zázraků.

---

<sup>259</sup> U číslicových počítačů jsou typickou časovou škálou, na níž se odehrávají události, nanosekundy ( $10^{-9}$  sekundy), zatímco biologické neurony fungují v časových úsecích řádu milisekund ( $10^{-3}$  sekundy).

Jeden příklad předvedl Rodney Douglas, neurofyziolog pracující v Sekci anatomické neurofarmakologie Rady pro lékařský výzkum<sup>□</sup> v Oxfordu. V jeho laboratoři velmi pečlivě vykreslovali nespočetné spoje a mapovali funkce pouze jediného z mnoha neuronů tvořících úsek mozku zpracovávající vizuální informaci. Tento neuron se nazývá J4, podle Johna Andersona, který byl jedním z prvních, kdo ho studovali. J4 byl simulován nesčetnými skupinami po celém světě, protože jeho celkový tvar, jeho chování a způsob, jak je propojen s ostatními neurony, se jen velmi málo mění od případu k případu.<sup>260</sup>

Na obrazovce pracovní stanice v laboratoři vypadá trojrozměrný obraz neuronu J4 trochu jako strom vytržený i s kořeny. Vrcholy jeho dendritických větví jsou ohnuté podél povrchu mozku, zatímco houština kořenových dendritů zasahuje do "bílé hmoty", ně-kolikamilimetrové vrstvy pod povrchem, kde obrovské svazky axonů prohánějí informaci z jedné oblasti mozku do druhé. V simulacích J4 je neuron rozdělen do zhruba 150 diskrétních oddílů a při výpočtu šíření elektrického signálu jeho větvemi, kmenem a kořeny se používají diferenciální rovnice. Počet možných vstupů je ohromující: každý z 5000 i více neuronů může do J4 dodávat signály. Odpověď neuronu je výsledkem války signálů, jejichž amplituda sahá od jedné jednotky po 10 000 jednotek. Typická simulace znázorňuje akční potenciál jako červenožlutou běžící vlnku procházející neuronem.

Jiná simulace ukazuje, jak může signál vyhasnout dřív, než dosáhne axonu. To jsou jen dvě funkce z velkého repertoáru, který J4 používá k zesilování signálů přicházejících ze sítnice.

## Neurony in silico

Vyzbrojeni takovými podrobnostmi se lidé začali pokoušet o konstrukci "neuromorfního" zařízení, o hardwarovou implementaci, která by zpracovávala elektrické signály přesně stejným způsobem, jak to dělají reálné neurony. Ambiciózní idea syntézy, o níž se tato práce opírá, je založena na názoru, že abychom pochopili vlastnosti mozku, musíme vyrobit jednotlivý křemíkový neuron a pak zkonstruovat

---

<sup>□</sup> Medical Research Council's Anatomical Neuropharmacology Unit (pozn překl.)

<sup>260</sup> R. Douglas, interview s Rogerem Highfieldem, červen 1994. Obrázky 9.3 (a) a (b) byly nakresleny podle O. Bernander, R. Douglas, K. Martin, and C. Koch, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 88, 11569 (1991), a J. Anderson, K. Martin, and D. Whitteridge, Cerebral Cortex 412, 1047 (1993).

křemíkový mozek spojením 100 miliard takových neuronů. Přitom doufáme, že jednou dokážeme vyrobit analogová zařízení napodobující biologický hardware, jako je sítnice, která je schopná při zpracování obrazové informace výkonů daleko přesahujících schopnosti těch nejvýkonnějších superpočítačů, jaké máme dnes k dispozici.

Průkopníkem v tomto oboru byl Carver Mead na Caltechu. Jeho skupina začala napodobovat smyslové orgány a postavila umělou verzi koncového orgánu sluchu, hlemýžďe. Jejich hlemýžď na čipu se dá použít k lokalizaci objektu pomocí zvuků, které vydává, a tudíž k simulování toho, jak sova pálená hledající hraboše vnímá šelest v podrostu. Sova si tuto prostorovou informaci odvodí z časového zpoždění mezi zvukem zaregistrovaným v hlemýždích obou uší. Meadova skupina postavila také křemíkový čip inspirovaný neuronovou architekturou a funkcí sítnice vodního mloka, žabronoše skvrnitého, *Necturus maculosus*. Na rozdíl od jediného obrázku zachyceného fotoaparátem, sítnice sděluje změny ve vnímaném obraze<sup>261</sup> (viz obr. 9.4). Výstup z křemíkové sítnice se pozoruhodně podobal realitě, a dokonce vytvářel optické iluze: například šedý čtverec vypadal tmavší, když byl umístěn proti bílému pozadí, než když bylo pozadí černé.

Dalším krokem bylo vyrobit křemíkový neuron, který by zpracovával informaci z křemíkových smyslů.<sup>262</sup> V roce 1991 oznámila úspěch Misha Mahowaldová, bioložka pracující s Meadem a Rodneyem Douglasem. Douglas ve spolupráci s Kevanem Martinem a dalšími v Oxfordu poskytli podrobné informace o chování neuronu J4, o němž jsme se před chvílí zmiňovali. Mahowaldová pak vyvinula analogový křemíkový čip, který ve všech detailech napodobuje postup, jímž

---

<sup>261</sup> Umělá sítnice sestávala z mřížky 64 x 64 receptorů citlivých na světlo - tvořených několika málo tranzistory které ve skutečnosti generovaly takový výstup, jaký bychom očekávali v realitě. Upřeně se zadívejte na váš vlastní obraz přenesený sítnicí a zjistíte, že když znehybníte, zmizíte: tak jako ve skutečnosti extrahují receptory pouze informaci důležitou pro následné zpracování. Celkově byly podobnosti mezi simulací a skutečností pozoruhodné; její úspěch nejenže pomohl zdůraznit obecněji úspěch biologické výpočetní techniky, ale ukázal také, že principy neuronového zpracování informace představují mocné technologické paradigma.

<sup>262</sup> Této práci předcházelo zjednodušené použití sítí k tomu, aby se ukázalo, jak samoorganizace v analogovém systému dokáže pracovat s poškozenou informací. M. Mahowald, Analog VLSI Chip That Computes Stereocorrespondence Using a Cooperative Multiscale Algorithm, American Association for the Advancement of Science, únor 1994. Síť dokáže sbírat informaci ze dvou umělých sítí a vypočítat, jak je předmět daleko, na základě rozdílů v perspektívě. Tato síť úspěšně zvládala jeden z klasických problémů stereokorespondence u strojového vidění, totiž určení odpovídajících si bodů na dvojici obrázků, sejmutých ze dvou pozorovacích bodů.

jednotlivý reálný neuron generuje vstupní a výstupní napětí. To pak zase znamenalo reprodukovat fungování nepatrných proteinových kanálů uchycených v membránách neuronu, které řídí tok elektrického proudu dovnitř buňky a ven, a tedy napětí na membráně neuronu. Odliv a příliv iontů těmito kanály vytváří a formuje výstupní impulzy umožňující neuronu komunikovat s ostatními. Podle Mahowaldové "sám neuron je emergentní vlastností iontových kanálů".



Obrázek 9.4 / Umělý zrak. Tak vypadá Misha Mahowald na umělé sítnici.

Vyrobít něco, co by se podobalo neuronu, vůbec není triviální: tenká membrána kolem každého neuronu obsahuje obrovské množství iontových kanálů. Některé se otevírají jako malá propadliště, aby umožnily projít sodíkovým iontům, jiné aby propustily draslík. Některé se otevírají a zavírají rychle, jiné fungují poměrně pomalu. V rozličných stadiích nervového vzruchu přicházejí do hry rozdílné typy. Některé kanály se otevírají a zavírají v odezvě na změnu napětí na membráně, jiné odpovídají na ionty či signální molekuly, případně obojí. V křemíkovém neuronu je analogová odpověď kanálu reprezentována tranzistorem. Tyto kanály musejí zůstat zavřené, je-li jejich vstupní napětí malé, avšak okamžitě se otevřou a vytvoří proudový náraz, jakmile vstupní napětí dosáhne určité hodnoty. Membrána buňky je

reprezentována kondenzátorem: lipidové molekuly v membráně uchovávají náboj a fungují jako paměť podobným způsobem jako kondenzátor na čipu.

Při testování jejich umělého neuronu se ukázalo, že se chová z hlediska biologie realistickým způsobem. Produkuje například výstupní napěťové pulzy v pravidelných intervalech, dokud se nezruší vstupní napětí. Právě tak počítá skutečný neuron: převádí konstantní vstupní signál - proud - na posloupnost napěťových pulzů. Křemíkový neuron dokázal měnit frekvenci, s jakou vysílá napěťové pulzy; dovedl též rozlišovat mezi různými vstupními úrovněmi a přizpůsobit podle toho svůj výstup. Je také v principu schopen pracovat milionkrát rychleji než buňky, které používáte vy, když čtete tuto větu. Když v časopise *Nature* ohlašovali svůj umělý neuron, dospěli Douglas a Mahowaldová k tomuto závěru: "Křemíkový neuron představuje krok směrem ke konstrukci umělých nervových systémů, které používají realističtější principy neuronové výpočetní techniky než existující elektronické neuronové sítě."

Ukázalo se však, že mimořádně důležitý krok k propojení těchto neuronů je obtížný. Skupina úspěšně pospojovala třicet šest křemíkových neuronů na jediném čipu o velikosti 4 krát 6 milimetrů. Přesto je to jen úplný začátek: jedním z velkých otevřených problémů je určení pravidel, která by dovolovala jednomu neuronu hovořit s druhým. Jiný problém, který před nimi stojí, je vyvinout metodu, jak dynamicky měnit spoje mezi neurony během učení. To je fundamentální překážka. Na spojích se zakládají emergentní vlastnosti sítí neuronů, tedy globální vlastnosti samotného mozku. Alternativní cesta, snažící se sestavit mozek pěstováním sítí živých neuronů v buněčné kultuře, má také extrémně daleko k napodobení komplexity skutečného mozku.<sup>263</sup>

---

<sup>263</sup> O podobný stavebnicový přístup se v pozoruhodném experimentu pokoušejí vědci v Centru biomolekulárních věd a technologií Námořní výzkumné laboratoře ve Washingtonu D.C. ve spolupráci se skupinami z Mezinárodní korporace pro vědecké aplikace ve Virginii, z Národního ústavu zdraví v Marylandu a z Kalifornské university v Irvinu. Původní inspirace pocházela z projektu AT&T Běhových laboratoří v New Jersey, kde se nechaly růst krysí neurony v čarách vytvořených obvyklou technikou pro výrobu čipů. Viz C. Robinson, *Signál*, únor 1994, s. 15. Některé z nejimpozantnějších prací v tomto oboru provedl Peter Fromherz z ústavu Maxe Plancka pro biochemii, poblíž Mnichova. P. Fromherz, A. Offenhäusser, T. Vetter, and J. Weis, *Science* 252, 1290 (1991), a P. Fromherz and H. Schaden, *Eur. J. Neurosci.* 6, 1500 (1994). Fromherzovi se podařilo nechat růst neurony na čipech, dal dohromady dialog mezi neuronem a čipem a přesvědčil neurony, aby jejich tendrily rostly v žádaných geometriích. Když tato kniha šla do tisku, představovala tvorba synapsí mezi vypěstovanými neurony stále obtíže. P. Fromherz, interview s Rogerem Highfieldem, květen 1995.

# Nervoví kurýři

Člověku se musí odpustit, jestliže pochybuje, že někdy budeme schopni pochytit detaily vzájemných mozkových spojení in silico. To proto, že komunikační médium křemíkového neuronu, a ve skutečnosti každého počítače, bledne ve srovnání s komplexitou komunikačního média používaného v mozku. Když akční potenciál posílá signál přes synapsi, nespočívá vysílání pulzu buňkou v elektronech pádících po drátě, ale v molekulách zvaných nervové přenašeče (neu-rotransmitery), které se rozšiřují spoji mezi nervovými buňkami. Od té doby, co byl roku 1921 identifikován první neurotransmitter, jich bylo nalezeno ještě asi padesát dalších.

Pro ilustraci jejich důležitosti si vezměme jeden z nich, dopamin. Tento chemický kurýr byl nejdříve nalezen v oblasti mozku zvané substantia nigra a uplatňuje se během kognitivních procesů, emocionálních stavů, při chůzi a běhu. Jak tomu bylo v případě výzkumu mozku často, byla jeho úloha zdůrazněna individuálním neštěstím. Studie pacientů trpících Parkinsonovou chorobou prováděné v 50. letech ukázaly, že tito pacienti mají neobvykle nízkou hladinu dopaminu. Někjaký faktor z okolního prostředí, snad v kombinaci s nepříznivým obratem v chemii mozku, může spustit úbytek nervových buněk produkujících dopamin v oblasti substantia nigra. Ztráta více než 90 procent těchto buněk začíná zbavovat pacienta pohyblivosti a svalové koordinace.<sup>264</sup>

Komplexitu mozku dále zvyšuje různorodost míst, kde chemičtí kurýři jako dopamin působí: v bílkovinných receptorech ve stěně nervové buňky. Jedna nedávná studie přináší velmi zajímavý důkaz, že schizofrenie, nejrozšířenější psychóza, souvisí s narušením působení dopaminu na receptory.<sup>265</sup> U schizofreniků je hladina dopaminu v

---

<sup>264</sup> Tato choroba by se dala zmírnit podáváním látky zvané L-dopa, která se v mozku mění na dopamin. Tato léčba se dnes stále používá, ačkoli její účinnost dlouhodobě klesá. Nové přístupy se opírají o použití neuronů z embryí, růstových faktorů, které stimulují růst tkáně zvané substantia nigra nebo dokonce o genetické inženýrství, které "naprogramuje" buňky tak, aby tvořily dopamin, T. A. Larson and D. B. Calne, Trends in Neurosciences 5, 10 (1982).

<sup>265</sup> P. Seeman, H-C Guan, and H. Van Tol, Nature 365 441 (1993). Schizofrenie potká asi jednu osobu ze sta a ačkoli se nedá přesně definovat, je charakterizována poruchami myšlení, emočních reakcí a chování. Přeludy, halucinace, zmatené myšlení a mluvení, to vše může následovat poté, co se pacient nejdříve stáhne do sebe a stane se introspektivním. Jistou dobu se předpokládalo, že existuje vztah mezi schizofrenií a dopaminem. Lékaři zjistili, že amfetaminy mohou způsobit psychózu podobnou

mozku normální, mají ale přebytek míst, kde dopamin působí. Zjistilo se, že jedno místo, zvané receptor D4, je šestkrát četnější v mozkové tkáni schizofreniků než u normální populace. Z každé dopaminové vlny obdrží schizofrenici šestkrát více zpráv. Zdá se, že objev, že dopamin nadměrně pacienty stimuluje, souhlasí se symptomy halucinací a přeludů, ačkoli je nepravděpodobné, že toto zjištění samo o sobě vysvětlí tak komplikovanou chorobu.

## Tkaní stavu

Redukcionisté, mezi něž mohou být zařazeni mnozí molekulární biologové, věří heslu "Boha je třeba nalézt v detailech". Pro všeobecný pojem o tom, jak mozek pracuje, naštěstí nemusíme chápat nepředstavitelně složité detaily neurotransmiterů a receptorů. Nejdůležitější emergentní vlastností této detailní mozkové aktivity je to, že zakoušení reálného světa zesiluje a zeslabuje synaptické spoje mezi mozkovými buňkami, tak jak to popsal Donald Hebb, s jehož prací jsme se krátce seznámili v 5. kapitole. Hebb stavěl na idejích Eugenia Tanziho a Ramóna y Cajala a přišel s myšlenkou, že během učení se síla synaptického spoje zvyšuje, pokud neuron vysílá impulzy ve stejném okamžiku jako jeden či více neuronů, které jsou k němu připojeny.

Hebb napsal: "Nejevidentnější a domnívám se, že nejpravděpodobnější hypotéza o tom, jak jedna buňka může zvýšit svou schopnost způsobit aktivaci druhé, je ta, že se vyvinou synaptické spoje a zvyšují tím plochu kontaktu mezi [nervovými buňkami]." <sup>266</sup> 16

Jinými slovy, akční potenciál nejenže přenáší signály mezi neurony, ale jejich metabolické děje mění také obvody, jimiž jsou signály přenášeny. V mozku jsou tisíce milionů nervových spojů s proměnlivou silou, která se tímto způsobem při používání mění. Pokud v důsledku stimulace smyslů nastávají zajímavé věci zároveň, často a na neuronech, které spolu v mozku sousedí, pak mají tyto neurony sklon propojit se v síti. Díky této plasticitě neboli adaptabilitě nervových spojů tyto informace ze světa umožňují mozku, aby si sám uspořádal síť tak, že

---

schizofrenii, a ukazuje se, že amfetaminy stimulují uvolňování dopaminu v mozku. Tato "dopaminová hypotéza" byla podepřena objevem, že farmaka působící proti schizofrenii, která brání amfetaminům ve vyvolávání tohoto psychicky stimulačního efektu, působí jako receptory dopaminu. O účinnosti látek používaných k léčení této nemoci je známo, že se mění podle toho, jak dobře se vážou na receptory. L. Iversen, *Nature* 365 393 (1993).

<sup>266</sup> D. Hebb, *Organization of Behavior* (Wiley, New York 1949), str. 62.



budou rozeznávat předměty (například plnicí pero), ať je vidí zepředu, ze strany nebo z jakéhokoli jiného úhlu. Výsledkem těchto základních molekulárních mechanismů je, že struktura mozku se adaptuje tak, aby odrážela spojení mezi událostmi reálného světa. Proces vytváření vzpomínek představuje dobrý příklad takových sítí.

Srovnáním mozku s kapesní kalkulačkou si lze jen velmi špatně vykládat ohromující paměťové schopnosti mozku. Chce to jenom jednoduché cvičení, při němž se jedincům na krátkou dobu ukáže číslo a pak jsou o pár minut později požádáni, aby je zopakovali. Je to snadné u čtyřmístného čísla, ale obtížnější, když se počet číslic rozšíří na osm, což je pro většinu lidí maximum. Na základě toho má typická lidská paměť pouhých 41,86 bitů informace, zatímco paměť jednoduché kapesní kalkulačky je kolem 1000 bitů. Je překvapivé, že si vůbec něco dokážeme pamatovat. A přesto se dítě učí nová slova průměrnou rychlostí více než deset za den a nakonec si může vytvořit slovní zásobu až o 100 000 slovech. Nejlepší vypravěči u dávných Keltů znali z paměti nějakých 350 epických básní a neurolog Oliver Sacks jednou léčil pacienta, který si zapamatoval všech devět svazků Groveova slovníku hudby a hudebníků<sup>□</sup> ve vydání z roku 1954, nemluvě o hudbě z 2000 oper. Tyto schopnosti jsou méně zázračné, než by si někdo mohl myslet.

Věci si pamatujeme na základě jejich významu - to jest prostřednictvím asociace, procesu popsaného v 5. kapitole. Aby pracovala jako "paměť", musí být síť neuronů schopna na požádání "vyvolat" specifický obrazec elektrické aktivity. Předpokládejme, že každý neuron ve shlukuje spojen se všemi ostatními synapsami, které se mohou zesilovat podle Hebbova pravidla: posiluj spoje s těmi neurony, s nimiž jsi spojen a které jsou aktivní ve stejných okamžicích jako ty. (Ve skutečnosti je to o něco komplikovanější, poněvadž soupeřící sítě soutěží o uložení vzpomínky.) Jakmile všechny synapse v nej-úspěšnější síti uvedly toto pravidlo v život, vzpomínka byla uložena. Neurony, které byly kdysi aktivní společně, jsou nyní spojeny silnějšími synapsami; během vzpomínání budou mít tendenci vysílat impulzy současně a pomáhat tak znovu vytvořit původní obrazec. Neuronová síť tohoto typu může uchovávat mnoho vzpomínek současně, přičemž každá synapse se účastní několika vzpomínek a každá vzpomínka bude "zakódována" mnoha synapsami. Nyní už chápeme, jak může paměť neuronové sítě dosahovat tak oslnivých výkonů. Když jí předložíme

---

<sup>□</sup> Grove's Dictionary of Music and Musicians (pozn. překl.)

pouze malý útržek vzpomínky, její synapse zajistí, aby se tato vzpomínka obnovila ve své úplnosti. Tento jev se nazývá doplnění a je úzce svázán s pojmy ukládání a zpětného výběru informace, které známe u neživých objektů.

Hebbova hypotéza teoreticky vysvětlovala, jak pracuje asociativní paměť na úrovni neuronů. Experimentální důkaz, který ji podpořil, přišel roku 1973 v práci Tima Blisse z Národního ústavu lékařského výzkumu v Londýně a Terje Lomoa z univerzity v Oslo. Ti studovali pomocí mikroelektrod průběh elektrické aktivity v mozku králíků během narkózy, a soustředili se na jednu oblast struktury ve tvaru mořského koníka, která se nazývá hipokampus. Impulzy vstupují do oblasti nazývané gyrus dentatus polem vstupních vláken a pak se šíří synapsami do sítě okolních neuronů. Bliss a Lomo zjistili, že když pošlou po těchto vstupních vláknech krátkou salvu umělých impulzů, síla synapsí se zvětší. Jakmile se tyto změny jednou spustily, mohou vydržet týdny nebo dokonce měsíce. To je dost dlouhá doba, přinejmenším na to, aby učinila z tohoto procesu pravděpodobného kandidáta na fyzikální změny, zodpovědné za tvorbu krátkodobé paměti. Tento proces posilování spoju se běžně nazývá dlouhodobé posilování.

Ačkoli Blisseovy a Lomoovy experimenty byly poněkud umělé, chovaly se pěkně podle Hebbova předpisu, že se změny odehrávají pouze na synapsích spojujících neurony, které jsou současně aktivní. Demonstrovaly také buněčnou analogii klasických reflexů, jaké například pozoroval Pavlov ve svých průkopnických pokusech se psy slintajícími při zaznění zvonku, který pravidelně zvonil těsně předtím, než byli krmeni. (Řečeno psychologickým žargonem, vytvořil se u nich reflex spojující odpověď se specifickým stimulem.) Bliss zjistil, že každý týden aktivované synapse se neposilují. Avšak - a právě tady se analogie s Pavlovovými pokusy stává tak nápadnou - ti, kteří na tuto práci navazovali, ukázali, že pokud jsou slabě stimulované synapse aktivní současně s jiným, silně aktivovaným vstupem, pak slabý vstup je ve skutečnosti posílen.

Práce, která následovala, vyzdvihla význam těchto buněčných změn pro proces učení. Pokud je dlouhodobé posilování farmakologicky blokováno, pak mají krysy potíže naučit se procházet bludištěm, což je úkol, o němž se ví, že zaměstnává hipokampus. Krysy nejsou jedinými tvory, kteří při tomto výzkumu pomáhají. Někteří vědci se pídí po genetické základně paměti u maličké mušky octomilky (kde se používají nervově defektní kmeny, jako jsou Duncce a Rutagaba) a jiní se

specializují na studium mořského plže, jejíž výhodou jsou enormně velké mozkové buňky. Na Open University si tým vedený Stevenem Rosem zvolil za objekt studia kuře.

Kuřata nejsou příliš inteligentní, nicméně mají různé výhody: Začínají se učit, jakmile se vyklubou z vajíčka, učí se spolehlivě a mají velký a snadno dostupný mozek. Nejdůležitější je to, že se jednoduchým testem dá ukázat, že si něco pamatují. Stačí jedno klovnutí do zbarveného zrna pokrytého hořkou látkou a pták začne podobná zrna odmítat, poněvadž si zapamatoval, že zrna této barvy chutnají strašně. Hořká chuť spouští v mozku změny, které zakládají paměť. Tyto změny se týkají tvarů a velikostí nervových buněk, a, což je nejdůležitější, spojují mezi buňkami. V důsledku takového pokusu vyhánějí dendrity určitých klíčových neuronů o 60 procent více spojují, způsobem předpovězeným Hebbem. V tom právě spočívá učení. Tam, kde mělo kuře kdysi nutkání klovnout do světlého zrna - což je jeho normální odezva -, nová síť spojují vytvořená v mozku zaručuje, že se toto chování vypne. Říká: "Ne, neklovej do toho."

Zatímco paměť je pro nás důležitá, stejně důležité je také zapomínání. □ Luriův šokující příběh o člověku, jehož mozek nikdy nic nezapomíná a který končí přetížen vzpomínkami na všechno, co kdy dělal, je přesvědčivou připomínkou této skutečnosti.<sup>267</sup> Zdá se tedy, že zde musí být nějaký mechanismus analogický tomu, který objevili Bliss a Lomo, který je zodpovědný za zmenšování síly synoptických spojují. Tento jev je známý jako dlouhodobý útlum. Dalo by se očekávat, že taková zapomnětlivost se dá vyvolat nastavením nějakých antihebbovských korelací mezi presynaptickými a postsynaptickými aktivačními stavy. Tím se míjí zmenšování síly synaptických spojují, když dva spojené neurony vysílají signály souběžně. Takové jevy se pozorovaly v určitých částech mozku, mezi nimiž nejvýznamnější je část zvaná mozeček.

---

□ Modely neuronových sítí založených na hebbovském učení ukazují, že přidáváním dalších a dalších vzpomínek se dlouho zdánlivě nic neděje, ale když objem paměti přesáhne kritickou mez, dojde k náhlému a okamžitému vymazání všeho, co si síť dosud pamatovala ("blackout"). (pozn. překl.)

<sup>267</sup> A. R. Luria, *The Mind of a Mnemonist: A Little Book About a Vast Memory* (Basic Books, New York 1968). Český překlad A. R. Lurija: *Malá knížka o velké paměti* (Praha 1973).

## Ammónův roh

Většina neurovědců - experimentátorů stejně jako teoretiků - používá Hebbovo pravidlo jako idealizaci posilování synapsí během učení. Jak jsme viděli v 5. kapitole, Hopfield ukázal sílu tohoto pravidla ve svých modelech asociativní paměti založených na umělých neuronových sítích. Problém, před nímž neurovědci stojí, je určit, zda Hebbovo pravidlo a Hopfieldova síť jsou skutečně sjednocujícími principy nebo ne. Další záležitost, která to komplikuje, je fakt, že paměť je různorodá sbírka vloh, z nichž každá závisí na jiných mechanismech učení a zahrnuje různé oblasti mozku.

Abychom pochopili čím se liší jednotlivé složky paměti, představte si, že mluvíte s kolegou o dni, kdy jste se poprvé učil (a) řídit auto. Vaše konverzace zapojuje sémantickou paměť, vaše vědomosti o jazyce a o světě včetně pojmu automobilu a o tom, co víte o autech, a o tom, jak se řídí. Za druhé se spoléháte na epizodickou paměť, vaši vzpomínku na ten samotný den včetně toho, jak jste se těsně vyhnula) chodci, nebo na pocit euforie, když se vám podařilo otočit se do protisměru. Badatelé někdy seskupují epizodickou a sémantickou paměť společně pod deklarativní paměť - to je paměť, kterou dokážeme vyvolat do vědomí a přemýšlet o ní. Vaše konverzace se točí kolem jiného typu paměti: zručnosti při řízení auta. Dovednosti se klasifikují jako složky nedeklarativní paměti, společně s jinými jevy, jako jsou klasické reflexy. A vaše konverzace závisí také na dalším typu paměti: na pracovní paměti, která nám umožňuje udržet materiál v hlavě dostatečně dlouho, abychom si jej dali dohromady a porozuměli složitým větám. Tento typ krátkodobé paměti by se uplatnil i tehdy, kdybyste měl (a) nahlas přečíst výrobní číslo automobilového šasi nebo zopakovat telefonní číslo svého kolegy, abyste si je zapsala).

Hipokampus hraje ústřední roli v různých aspektech paměti. Jeho úlohu poprvé naznačily studie pacientů, jejichž hipokampus byl poškozen. Na základě této práce se zdá pravděpodobné, že hipokampus funguje jako mezisklad a předává krátkodobé vzpomínky částem mozkové kůry, aby během spánku založily dlouhodobou paměť.<sup>268</sup> Už v

---

<sup>268</sup> Elegantní studie o dřímajících krysách, kterou provedli Matthew Wilson a Bruce McNaughton z Arizonské university, ukazuje nám, jak aktivita hipokampu během spánku pomáhá upevňovat vzpomínky. S použitím velmi jemných elektrod studovali elektrickou aktivitu velkého počtu nervových buněk v hipokampu, když krysy prozkoumávaly krabici a pak bludiště. Zjistili, že když krysy pospávaly, opakovaly se tytéž obrazce elektrické aktivity. To naznačuje, že si krysy ve snu oživovaly své zážitky a přesouvaly vzpomínky z

roce 1971 navrhl David Marr v pozoruhodném článku využívajícím mnoho myšlenek převzatých z informatiky, že hipokampus uchovává asociativní paměť a spojuje vstupní data z různých míst, dříve než předá plně zformované vzpomínky kůře mozkové.

Vybaven moderními teoriemi funkce neuronové sítě, vydal se Edmund Rolls z Oxfordské univerzity za pravděpodobnými kandidáty na paměťové síť v hipokampu. Obzvláště slibné výsledky poskytl intenzivní studium neuronové architektury jedné jeho části. Tato oblast se nazývá CA3, kde CA je zkratka pro Cornu Ammonis (Ammó-nův roh), což je archaické jméno pro hipokampus. U krysa dostává každý neuron CA3 vstupy od 12 000 jiných CA3 neuronů. Například složky jedné vzpomínky, vnucené různým CA3 buňkám, mohou být, co měla krysa včera k obědu, kde to bylo a s kterými dalšími krysami. Buňky CA3 pak pospojují tyto složky a vytvoří epizodickou paměť, jejíž celek se dá vyvolat kteroukoli z částí.

Existuje těsná korespondence mezi architekturou Hopfieldovy sítě a strukturou hipokampu. Zdá se skutečně, že axony neuronů v oblasti CA3 mají tak daleký dosah ve všech směrech, že mohou potenciálně vytvořit spoje s téměř všemi ostatními CA3 neurony. (Připomeňme, že u Hopfieldovy sítě jsou neurony plně pospojovány jeden s druhým, bez ohledu na vzdálenost.) Rolls stavěl na anatomických pracích a spolupracoval s fyzikem Alessandrem Trevesem na vývoji matematického modelu oblasti CA3 podle vzoru Hopfieldovy sítě. Výsledky jsou fascinující. Ukazují, že k tomu, aby začaly vznikat asociace, nemusí být konektivita v oblasti CA3 úplná: □ pětiprocentní pravděpodobnost, že každý jednotlivý neuron je spojen s jiným, je dostatečná, aby vedla k paměti. Tato analýza odhalila, že nej důležitějším parametrem ovlivňujícím paměť je počet spojů na jeden neuron od jiných neuronů v síti. To podtrhává roli hipokampu v epizodické paměti, kde musí být schopen svázat různé položky v rámci vzpomínky, například buket bílého burgundského s určitým obědem. To znamená vysokou konektivitu spojení: není k ničemu mít CA3 rozdělenou do oddělených bloků, protože to by znamenalo, že by nikdy nešlo asociovat buket v oblasti A s obědem v oblasti B.

---

krátkodobého uložení v hipokampu a tvořily dlouhodobou paměť v kůře mozkové. M. Wilson, interview s Rogerem Highfieldem, srpen 1994; viz též M. Wilson and B. McNaughton, *Science* 265, 676 (1994).

□ Tedy neurony nemusí být propojeny každým s každým, (pozn. překl.)

Analýza Trevese a Rollse ukázala, že čím je reprezentace řidší -tedy čím je menší podíl neuronů vysílajících signály v libovolném okamžiku -, tím více paměti se dá uložit a vyvolat. Intuitivně se to dá pochopit tak, že mozek musí své synapse využívat efektivně a neinvestovat příliš mnoho na jednu vzpomínku. Tyto analýzy dovedly Rollse k odhadu, že oblast CA3 hipokampu krys by mohla uchovávat 36 000 "vzpomínek". Ačkoli je taková matematická analýza komplexní pavučiny spojů v CA3 přitažlivá, neposkytuje ipso facto důkaz, že shluk neuronů funguje jako paměťová síť.

Aby se osvobodili od nutnosti vytvářet matematické aproximace, začali Rolls a Treves simulovat CA3 na pracovní stanici. S použitím svých znalostí o fungování této struktury aplikovali Rolls a Treves síť Hopfieldovského typu k výzkumu činnosti hipokampu jakožto vyrovnávací paměti. Nejdříve však museli zobecnit Hopfieldův model, aby jej učinili komplexnějším, a tudíž biologicky přijatelnějším.

Problematické na Hopfieldových sítích je, že vykazují symetrické interakce mezi neurony; neuron vysílající impuls je ovlivněn stejně jako neuron impuls přijímající. To je biologicky nerealistické.

V Hopfieldově síti existují i další odchylky od reality. V síti jsou neurony obvykle reprezentovány jako binární uzly (buď vypnuté, nebo zapnuté), zatímco v hipokampu mají neurony spojitě proměnlivé frekvence vysílání impulsů a v každém okamžiku pouze kolem 1 procenta z nich dělá něco smysluplného. Aby přiblížil Hopfieldův model realitě, zavedl oxfordský tým proměnné frekvence vysílání pulzů, asymetrické spoje a také zredukoval míru spojení Hopfieldovy sítě, takže každý její neuron už není spojen se všemi ostatními. Navzdory těmto změnám simulace ukazují, že síť zachovává schopnost ukládat a vyvolávat informaci. Dokáže vytvořit atraktory, údolí, kde sídlí vzpomínky. Z této práce plyne, že z pouhých pěti procent vstupu - řekněme z letmo zahlédnuté tváře - dokážeme rekonstruovat celou vzpomínku. Aby jejich představy o vyvolávání mohly být otestovány, učinili dokonce Treves a Rolls několik předpovědí o tom, jak by se měl hipokampus chovat za některých dosud nepozorovaných okolností, například když se použijí medikamenty k selektivnímu blokování synapsí.

# Počítačová neurověda

Po dvě století byly rozhodující metody pro studium mozku a chování zvířat založeny na přístupu původně vytyčeném filozofy, jako byl Descartes, který věřil, že jediný způsob, jak získat vhled do fungování mozku, vede přes introspekci. Potom zvedli hozenou rukavici neurologové a po nich psychiatři a psychologové, zatímco v současnosti je neurověda do značné míry v rukou biochemiků, buněčných biologů a molekulárních biologů. Jak ilustruje práce Trevese a Rollse, nyní vede jiná cesta vpřed, totiž počítačová neurověda, která se zabývá použitím neuronových sítí k získání informací o struktuře a funkci mozku.

Vlnu zájmu o počítačovou neurovědu do značné míry vyvolala kniha Rumelharta a McClellanda *Paralelní distribuované zpracování*<sup>□</sup> z roku 1986, což je dvousvazkový redigovaný soubor úvah o neuronovém počítání. Byla soustředěna kolem práce prováděné po několik let skupinou zabývající se paralelním distribuovaným zpracováním PDP) na Kalifornské univerzitě v San Diegu, a když byla publikována, stala se akademickým bestsellerem. Ačkoli, jak jsme viděli v 5. kapitole, měla kniha Rumelharta a McClellanda veliký vliv na širší komunitu umělé inteligence, jejich prvořadým cílem bylo vysvětlit zpracování nervové informace prostřednictvím tzv. konekcio-nistického paradigmatu - jinými slovy s použitím principů výpočtů s neuronovými sítěmi. Někteří biologové jsou ostražití, neboť jim v těchto výzkumech chybí biologický realismus. Nevšimli si však jednoho klíčového bodu: v celé této knize jsme ukazovali, jak vysoce komplexní chování může být výsledkem jednoduchých pravidel, působících ve velkých souborech jednoduchých jednotek. Abychom pochopili něco tak složitého, jako jsou emergentní vlastnosti mozku, musíme začít se zjednodušenými systémy, teprve až se nám vyloupnou jejich klíčové rysy, můžeme do nich zabudovávat obrovsky složité detaily z neuroanatomie.

Umělé neuronové sítě napodobují komplexitu mozku prostřednictvím své nelinearity a vysoké úrovně propojenosti mezi uzly. Podobně jako mozek jsou to svou podstatou paralelní zařízení, která mohou dělat mnoho věcí souběžně. Kvalitativně se jejich procesory chovají jako neurony a spoje mezi nimi fungují jako synapse. Každé "programování" takové sítě spočívá v pravidlech, jak měnit tyto velice důležité síly spojů mezi procesory. A "programy", které řeší různé

---

<sup>□</sup> Parallel Distributed Processing (pozn. pfekl.)

problémy, povstávají v takových sítích samy od sebe. Jsou tu však značné rozdíly mezi mnoha typy dnes existujících umělých neuronových sítí. Některé jsou biologicky realističtější než jiné, v závislosti na jejich architektuře a na metodách, které používají při změnách spojení mezi uzly.

Rumelhartovy a McClellandovy mnohvrstvé perceptrony, probírané v 5.kapitole, jsou složeny z dopředu směřujících spojů mezi různými vrstvami neuronů s algoritmem učení s učitelem,<sup>□</sup> který se opírá o proces zvaný zpětné šíření chyb,<sup>□</sup> což je vlastně jakýsi "učitel". Síť mnohvrstvého perceptronu se cvičí na datech - například jak rozlišit kulaté geometrické tvary od hranatých - a její výkony jsou neustále opravovány s použitím algoritmu zpětného šíření, dokud se nedosáhne uspokojivého výsledku. Pak je ve stavu schopném "zobecňovat", takže, například, zařadí kopací míč mezi oblé tvary a dům mezi hranaté. Pojem kontrolovaného učení se je něco, co v přírodě opravdu existuje - podobá se to způsobu, jímž jsme vzdělávání ve kole. Avšak zpětné šíření chyb samo o sobě se ve skutečném mozku nevyskytuje a většina reálných neuronových sítí ani není takto zvrstvená.

Na druhé straně, jak jsme již popisovali, rekurentní síť Johna Hopfielda, která se zrodila z teorie spinových skel a v níž je každý neuron spojen se všemi ostatními, má skutečně určitou omezenou biologickou autentičnost, protože reálné neurony jsou v některých částech mozku také vysoce popropojované přes rozsáhlé oblasti. Tyto sítě jsou obvykle zapojeny do činností spojených s učením s učitelem, zabezpečujících, že chybová krajina (viz 5. kapitolu) je vhodná k úkolu, o který jde.

Existuje však jiný druh neuronové sítě, o němž jsme dosud nemluvili, který však na procesy v mozku vrhá více světla. Je to neuronová síť, v níž je důraz posunut od učení s učitelem k objevování samostudiem. Teuvo Kohonen, informatik z univerzity v Helsinkách, používal tyto typy sítí k výzkumu učení bez učitele. Síť se neposkytne žádná správná odpověď na vytyčený problém, počítačový algoritmus způsobuje, že se při řešení problému síť samoorganizuje, jak vstřebává informace z vnějšího světa. Považuje se to za možný způsob, jakým se v mozku formují různé sítě ke zpracování různých typů úloh, jako jsou vidění, řízení motoriky, čichání a tak dále. Taková samoorganizace je biology často nazývána lokalizace mozkových funkcí.

---

<sup>□</sup> Supervised learning (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Backpropagation of errors (pozn. překl.)



Samoorganizované počítačové sítě byly hlavním zájmem Kohonenova výzkumu dlouho předtím, než došlo k enormnímu nárůstu zájmu o umělé neuronové sítě, který nastal v polovině osmdesátých let a který pozvedl význam jeho práce. Kohonenův přístup vrhá světlo na procesy účastnící se samoorganizace samotného mozku. Dříve než popíšeme Kohonenův počítačový příspěvek, stojí za to rozebrat některé aspekty toho, čemu se říká lokalizace v mozku.

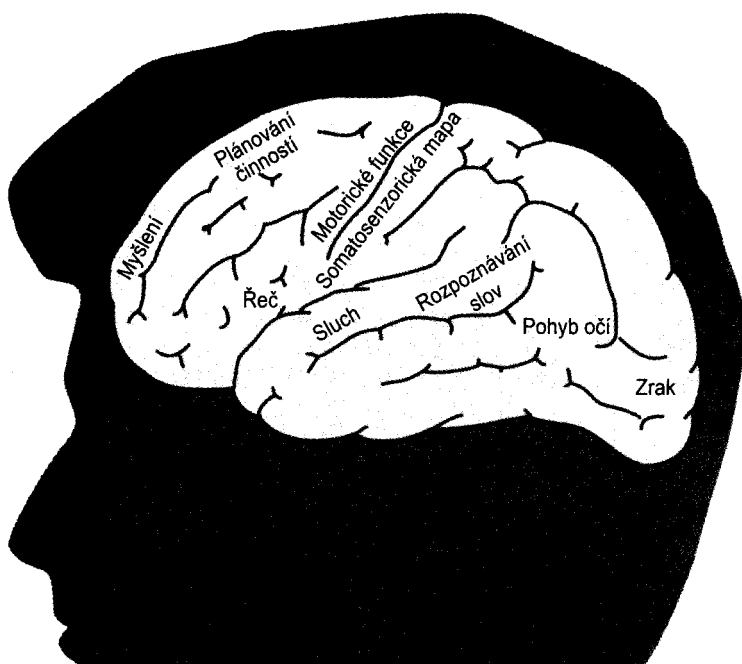
## Kartografie mozku

Společným problémem značné části výzkumu mozku je studium toho, jak mozek přiděluje různé oblasti různým činnostem: anatomové zkoumají struktury mozku a psychologové studují jeho odezvu na různé typy iluzí, patologové mohou upřeně hledět na mikroskopický plátek mozkové tkáně, zatímco fyziologové zkoumají jeho mnohostranné a různorodé mechanismy a molekulární biologové pozorují, jak se geny mění v různé struktury. Všichni se snaží přiřadit funkce mozku určitým místům.

To, čemu se dnes říká lokalizace, objevil v Paříži roku 1861 francouzský lékař Pierre Paul Broca. Popsal tehdy v Sociétés d'Anthropologie studii pacienta nazývaného "Tan", protože to byla jediná slabika, kterou kdy promluvil na nemocniční personál. Pitva u Tana objevila v jeho levém čelním laloku dutinu, dost velkou, aby "pojímala vejce". Broca z toho vyvodil, že "všechno nám tedy dovoluje věřit, že v tomto případě byla příčinou ztráty řeči léze čelního laloku".

Mozková kartografie na takovém neštěstí vzkvétala, a to díky lidem, kteří měli tu smůlu, že přišli o část mozku neboje měli poškozené v důsledku chirurgického zákroku, nemoci nebo úderu do hlavy. Badatele zkoumající lokalizaci paměti fascinoval H. M., americký dělník od pásu, který roku 1953 podstoupil operaci, aby se zbavil epilepsie. Během operace chirurgové odstranili z hloubi jeho mozku oblast hipokampu spolu s okolní tkání. Následkem toho trpěl H. M. těžkou ztrátou dlouhodobé paměti, i když jeho takzvaná "krátkodobá" paměť, definovaná jako vybavení si událostí, které se odehrály během asi tak minuty, byla normální.

Během let se vyjasnilo, že velké syntézy mentálního života se odehrávají ve zvrátněném povrchu dvou symetrických masivních mozkových hemisfér, které vládou vnějšímu vzhledu mozku (viz obr. 9.5).

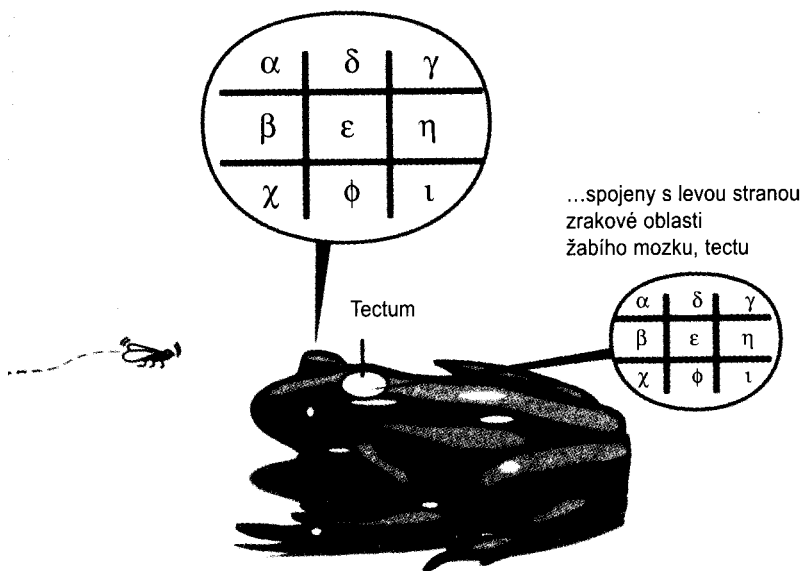


Obrázek 9.5 / Jak jsou mezi různými oblastmi lidského mozku rozděleny úkoly.

Tento povrch plný buněk je pouze dva milimetry tlustý a dostal jméno kůra mozková (cortex, podle latinského slova pro kůru.) Je v ní překvapivě hodně místa pro mozkovou činnost. Kdyby se jeho zvrásněný povrch narovnal, každá hemisféra mozkové kůry by měla povrch velké dětské pleny. Vidění se zpracovává v téměř jedné třetině tenké vrásčité slupky v zadní části mozkové kůry. Povrch levé hemisféry se zabývá řečí. Čelní laloky hrají roli při řízení pozornosti, plánování a u sociálních dovedností. Pod zadní částí mozkových hemisfér je zastrčený mozeček, struktura zabývající se mezi jiným koordinací jemných pohybů. Poblíž hipokampu leží amygdala, zodpovědná za emoční paměť (tedy schopnost rozpoznat strach ve výrazu tváře). Thalamus se nachází na vrcholku mozkového kmene (každá mozková hemisféra má jeden); říká se mu brána k neokortexu a odpovídá za koordinaci všech smyslových vstupů do mozkové kůry a výstupů z ní, kromě čichu. Hypothalamus se nachází pod thalamem a reguluje hlad, žízeň, rozkoš a bolest.

Po řadu let zuřil mezi neurofyziology spor o to, zda jsou jednotlivé neurony v mozku vnitřně zakódovány, snad geneticky, aby prováděly specifické, lokalizované úlohy, nebo zda funkce jednotlivých buněk povstává ze spontánní samoorganizace. První přístup přijímají propagátoři hypotézy "babičkovské buňky" - představy, že existuje specifická buňka, jejímž úkolem je rozpoznat babičku, vedle neuvěřitelně velkého množství buněk podobného typu. Ale v celé této knize jsme potkávali nekončící příklady emergentních kolektivních vlastností, které jsou výsledkem vzájemného působení mezi mnoha jednoduchými jednotkami v podmínkách nerovnováhy. Typ interakcí, který popsal Turing a který vede ke strukturám v Bělousově-Žabotinského reakci, může také produkovat struktury spojů v mozku. Vzhledem k našim znalostem o tom, jak fungují neuronové sítě, se zdá vysoce pravděpodobné, že lokalizace povstává spontánně v samoorganizující se neuronové síti, aniž by bylo potřeba mít nějakou babičkovskou buňku.

Jak jsou oblasti v pravém oku...

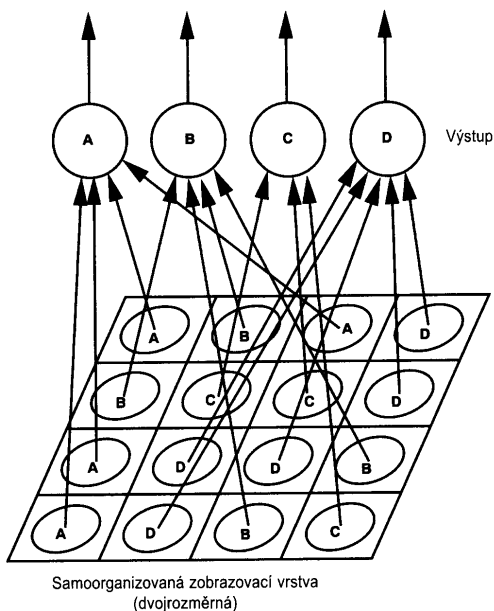


Obrázek 9.6 / Zobrazení oka a jeho vizuálních polí na tectu, části mozku žáby.

Jako první si toho ve své práci z roku 1973 všiml Christoph von der Malsburg, působící v té době na Ústavu Maxe Plancka v německém Göttingenu. Později spolupracoval s Davidem Willshawem v Edinburghu na vývoji počítačových modelů neuronů ve zrakovém centru kůry mozkové. Soustředili se na spoje mezi sítnicí žáby a jejím zrakovým centrem, zvaným tectum.

Zkoumali způsob, jak se neurony v sítnici zobrazí na neurony v tectu (viz obr. 9.6). Objevíli přitom ohromující míru flexibility.

Tato žába nám přinesla fascinující pohledy na to, jak samoorganizace řídí zobrazování smyslových vjemů do mozku. Odstraníme-li například polovinu sítnice v určité chvíli během vývoje, zbývající polovina rozšíří své nervové spoje po tectu, aby nahradila, co chybí. Když však odstraníme polovinu tectu, celá sítnice se zobrazí na zbývající polovinu tectu. Tato spontánní schopnost vyvinout "topografickou mapu" se objevuje u všech smyslů: například lokální oblasti mozku, které dostávají signály od sousedních prstů jedné ruky, se rychle přeskupí, dokonce i u dospělého zvířete, pokud dojde k přeseknutí nervu vedoucího k prstu.



Obrázek 9.7 / Typická architektura samoorganizované Kohonenovy neuronové sítě. Kroužky představují neurony, šipky jejich spoje.

Naučíme-li opici rozlišovat hrubý povrch špičkou určitého prstu, rozšíří se podle toho mozková mapa tohoto prstu. Na buněčné úrovni dojde k tomu, že neurony zbavené vstupu budou vyrábět široké spektrum receptorů ženoucích se za novým přísunem neurotransmiterů.

Willshaw a von der Malsburg vyvinuli přístupem "shora dolů" algoritmus typu umělé neuronové sítě, který vykazoval podobné flexibilní chování směrem k samoorganizované kůře mozkové. Tento jev samoorganizace byl dále studován v práci Kohonena, který fakticky používal zjednodušenou verzi Willshawova a von der Malsburgova algoritmu.

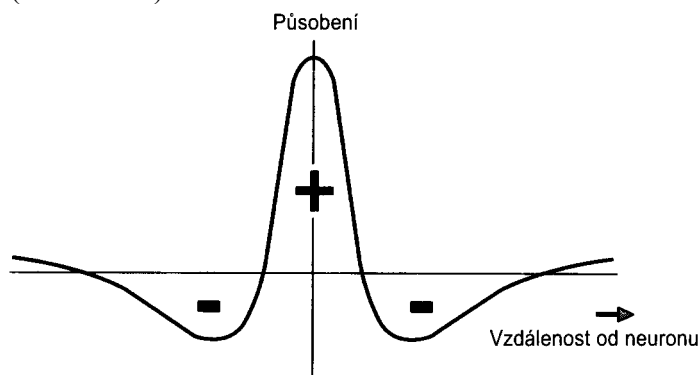
## Samoorganizované mapy mozku

Kohonenova samoorganizovaná neuronová síť se liší od mnoho-  
vrstvého perceptronu a Hopfieldových sítí, protože je to dvojrozměrný  
soubor neuronů v jedné vrstvě. Každý vstupní neuron je plně propojen s  
ostatními neurony v této vrstvě (viz obr. 9.7). Když se učí provádět  
nějaký úkol, jako je převedení řeči na text, automaticky si v síti generuje  
mapu význačných rysů.

Samoorganizace v této síti má stejný původ jako u prostorové  
organizace v Raleighově-Bénardově konvektivní buňce a u  
Bělousovy-Žabotinského chemické reakce: je jím nelineární zpětná  
vazba. Avšak zatímco molekuly v konvektivní buňce nebo BŽ reakci  
intera-gují jen se svými sousedy, neurony mohou navzájem interagovat  
na veliké vzdálenosti. Kohonenova síť nemá extrémní míru zapojení  
Hopfieldových sítí: zpětná vazba je omezena na interakce mezi  
procesory v malé vzdálenosti od sebe ve dvojrozměrné vrstvě. Uzly v  
této vrstvě generují výstupní informaci a účastní se také utváření  
samoorganizovaného zobrazení vstupních dat.

Kohonen použil pravidlo, které se inspirovalo biologií a které  
zajišťuje, že se síť dokáže učit bez dohledu. Ve skutečnosti existuje  
dostí těsná analogie mezi jeho ideou a prací, týkající se morfogeneze u  
nezmara, kterou jsme rozebírali v 7. kapitole. Stejně jako tam, leží i zde  
klíč k rozvoji samoorganizovaných nervových struktur v kombinaci  
povzbuzujících a tlumících vlivů, v tomto případě spojů mezi neurony.  
Ty, které jsou poblíž aktivní (impulzy vysílající) buňky, jsou také samy  
povzbuzovány k vysílání impulzů, zatímco ty, které jsou ve větší  
vzdálenosti, jsou ve skutečnosti tlumeny.

Kohonen ospravedlňoval svou volbu architektury a pravidel učení tím, že většina neuronových sítí v mozku, zvláště v kůře mozkové, jsou v podstatě dvojrozměrné vrstvy výpočetních jednotek, v nichž jsou jednotky hustě propojované bočními zpětnými vazbami. Na vysvětlení míry zapojení svého modelu zdůrazňoval, že, jak jsme již dříve poznamenali, v neokortexu vchází ven a dovnitř každé hlavní buňky 10 000 spojů. Existuje také experimentální důkaz těchto důležitých soupeřících interakcí, například ze studia primátů: jsou tu krát-kodosahové laterální excitace, dosahující do vzdálenosti 50 až 100 mikronů. Tato excitační oblast je pak obklopena přitím tlumivého působení, dosahujícího až do vzdálenosti 200 až 500 mikronů. Tato závislost aktivace nervové buňky na vzdálenosti se tvarem podobá sombrero (viz obr. 9.8).



Obrázek 9.8 / Funkce ve tvaru sombrero. Oblasti excitačního a tlumivého působení jsou zobrazeny v závislosti na vzdálenosti od daného neuronu. Takovéto schéma je typické pro mozek savců.

Taková lokalizace funkce, jakou pozorujeme ve skutečných mozcích, povstává v tomto modelu přirozeně. Kohonenovy sítě byly dosud využívány mnoha způsoby. On sám se především zajímal o konstrukci "fonetického psacího stroje", elektronického textového procesoru, který by dokázal vytvářet text podle diktátu v reálném čase. To představuje obzvlášť těžký problém z oboru rozpoznávání řeči. Jak jsme se zmínili v 5. kapitole, simulovat zpracování přirozeného jazyka je velice těžké. Není to jen základní interpretace tvarů zvukových vln. Jakožto lidské bytosti si snadno uvědomíme, že rozeznávání řeči představuje celou spoustu dalších aspektů, jako jsou kontext, syntax, analýza vět a vyvozování významu. Náš sluchový aparát dokáže důmyslným

způsobem odfiltrovat řeč v hlučném prostředí, jako jsou koktejlové dýchánky. Řeč se liší od člověka k člověku a mnoho úsilí bylo vynaloženo na pokusy přistoupit ke vší této komplexitě s použitím konvenčních metod, které se opírají o specifické modely.

Kohonenovo řešení kombinuje nejlepší známé metody zpracování řeči. Jeho neuronová síť provádí pouze nekontrolované rozpoznávání zvukových jednotek - fonémů. Po výcviku na souvislém proudu řeči je výkon tohoto "psacího stroje" mezi 92 a 97 procenty správně napsaného diktátu (ve finštině, Kohonenově mateřském jazyce, která se píše převážně foneticky). Později byl adaptován tak, aby porozuměl řečníkům, kteří se neúčastnili výcviku sítě. Kohonen vyvinul variantu samoorganizované mapy význačných rysů, která nacvičenou mapu doladila. Takovéto doučování sítí, tak aby akceptovaly nového řečníka, vyžaduje kolem 100 slov a je hotové do deseti minut.

Tato práce velmi ovlivnila růst zájmu o neuronové sítě při analýze komplexních problémů, jak v biologii, tak mimo ni. Síť založené na teorii adaptivní rezonance, které jsme popisovali v 5. kapitole a které překonávají dilema mezi stabilitou a plasticitou, jsou rozšířením Kohonenova pojmu samoorganizované sítě.

## Chytré algoritmy

Tyto "nekontrolované" neuronové sítě mají přirozeně také své slabiny. Mnohým z nich chybějí další vrstvy, jak to vidíme ve skutečnosti. Ještě horší je, že mohou být pomalé a nepřesné. Podle Geoffrey-e Hintona, informatika z univerzity v Torontu, všechno, co víme o době odezvy neuronů, které vysílají impulzy, když rozpoznáváme hloubku, šepot v hlučné místnosti nebo skryté významy v politickém prohlášení, naznačuje, že stávající umělé sítě jsou příliš líné. Je pravděpodobné, že, obecně vzato, biologické sítě používají algoritmy učení, které jsou kombinací kontrolované a nekontrolované metodiky. Nekontrolovaná složka umožňuje, aby byly rozpoznány nejobecnější rysy daného souboru dat; učení s učitelem vypiluje strukturu tím, že určuje, které rysy jsou ty důležité, jimiž se musí zabývat.

V dlouhodobé perspektivě však budeme pravděpodobně potřebovat nové algoritmy. Je tu jeden aspekt neurobiologie, který povzbudil Hintonu: nejzajímavější část mozku, kůra mozková, má homogenní strukturu, na rozdíl od primitivnějších center. To naznačuje, že pravidla řídicí funkci kůry mozkové jsou podobná, ať jde o zpracování řeči,

jazyk nebo sociální dovedností. "Vsadím se, že to tam dělá jeden nebo dva algoritmy," říká Hinton. "Jeden na konstrukci modelů světa a další na přiřazování odezvy ke každému z těchto modelů." Uvažuje o tom, že snad záhadné činnosti mozku, jako je snění, mohou být přirozeným důsledkem jejich role při sestavování struktury a funkce mozku. Hinton je přesvědčen, že sblížení vývoje algoritmů s empirickými daty povede v nejbližších desetiletích k rozřešení tohoto problému. Tyto snahy budou těžit z dialogu mezi těmi, kdo se domnívají, že mozek podléhá pouze hlubokým, fundamentálním a zcela obecným principům, a těmi, kteří chtějí dokumentovat pouze ty nejjemnější podrobnosti jeho fungování.

## Sítě pro zrak

Díky tomu, že Hinton porozuměl základům zpracování informace, dokázal navrhnout jeden z možných algoritmů vidění. Uvažuje o neuronové síti, která přijímá hrubé údaje o světě, například obraz na sítnici, a převádí je pro mozek na minimální reprezentaci, kterou lze stále ještě použít k opětovnému vytvoření původního obrazu. Podobá se to komprimaci dat nebo tomu typu zpracování signálu, který používají telekomunikační společnosti, když chtějí stlačit více stanic do téže šířky pásma: přenáší se pouze informace o měnících se částech obrazu, takže se dá popsat kompaktnějším způsobem. Podobá se to práci Meadovy skupiny na umělé sítnici. Na tomto přístupu založil Hinton algoritmus pro samoorganizující se síť, který používá informaci o očekávané chybě v komprimované reprezentaci jako vnitřní měřítko výkonnosti, a tak posuzuje, jak úspěšná tato reprezentace je. Výsledné síti dal jméno Helmholtzův stroj, podle německého fyziologa a průkopníka termodynamiky Herrmanna von Helmholtze (1821— -94). Je to následník Boltzmannova stroje, který jsme poznali v 5. kapitole a vychází z práce Ralpa Linskera z IBM, která již prokázala jisté úspěchy při modelování vidění. Spojením dvou Helmholtzových sítí dohromady dostal Hinton fascinující výsledek, který naznačuje, jak zpětné spoje v mozku mohou generovat sny a přeludy, jež pomáhají mozku cvičit se v rozpoznávání obrazů.

Vizuální plasticita mozku je nej větší těsně po narození, jak ukázaly pokusy na kočkách. Kočata se rodí slepá a otvírají oči po sedmi dnech; během následujících tří týdnů života se jejich zrak zdokonaluje jakýmsi



rozhovorem mezi viditelným světem a mozkiem.<sup>269</sup> David Hubel a Torsten Wiesel přišli jako první s objevem (za který dostali v šedesátých letech Nobelovu cenu), že většina neuronů v primární zrakové oblasti mozkové kůry dospělých koček (a opic) vytváří odezvu tehdy, když se ve zrakovém poli objeví hrana určité orientace. Rozdílné buňky odpovídají na různé orientace, jako by celá populace dělila obraz tak, aby zobrazila tvary předmětů na základě orientace jejich komponent. Avšak když se oči kotěte poprvé otevřou, pouze asi jedna pětina těchto nervových buněk kůry mozkové už dokáže rozpoznávat hrany a většina z nich má nej lepší odezvu buď na vodorovné, nebo na svislé orientace. Předpokládá se, že spoje, které těmto předem specializovaným buňkám poskytují tuto vlastnost, jsou založeny dříve, než začne oko reagovat na světlo, a to buď na základě přesných genetických instrukcí, nebo prostřednictvím samoorganiza-ce stimulované spontánní aktivitou zasahující do mozkové kůry ze sítnice.

Poté, co se oči otevřou, předem specializované buňky, které mají tendenci vyskytovat se ve shlucích ve středních vrstvách kůry mozkové, možná začnou fungovat jako "učitelé", jak tvrdí Colin Blake-more z univerzity v Oxfordu. Během pár týdnů začnou téměř všechny buňky odpovídají selektivně na orientaci a ztvorí systém "sloupců": všechny buňky nad a pod každým předem specializovaným shlukem začínají preferovat tutéž orientaci. V tomto případě dohled nebude spočívat ve zpětném šíření chyb, ale v tom, že předem specializované buňky poskytují "podmíněný podnět", umožňující buňkám, které nejsou zpočátku specializované, získat tutéž schopnost rozlišovat orientaci. Dosáhnou toho tím, že se detekuje současný příchod jak aktivity ze sítnice, tak podmíněného podnětu, který dorazí ve stejnou dobu z předem specializovaných buněk.

Používání očí brzy po narození je rozhodující pro vývoj mozkové kůry. Vliv zrakových vjemů je jasně doložen faktem, že proces učení nenastane u zvířete, které oslepne a dá se negativně ovlivnit omezením vizuálních podnětů. Colin Blakemore a jeho kolegové ukázali před

---

<sup>269</sup> Ostrost vidění u dětí se zlepšuje během prvních měsíců života. Zrakové centrum kůry mozkové má u dospělého šest vrstev neuronů. Trvá to první rok života nemluvněte, než se všechny tyto vrstvy poskládají, přičemž vnitřní se vyvíjí nejdříve, vnější naposled. V posledních letech se ukázalo, že je možné vyhodnotit účinek tohoto nervového vývoje na zrakové schopnosti dítěte prostřednictvím studia pohybu očí. Ve věku jednoho měsíce umožňuje nejnižší položená vrstva zrakového centra mozkové kůry řídit fixaci - záměrné udržování pohledu na stimulující předmět. Fixovaný pohled na předměty trvající dlouhou dobu se objevuje od jednoho do čtyř měsíců. Poté se čím dál více zlepšují schopnosti kojenců ovládat svou vlastní orientaci směrem k viděným událostem.

pětadvaceti lety, že kořata vystavená v počátcích života vizuálnímu poli obsahujícímu pouze svislé černé a bílé pruhy měla později potíže vidět vodorovné čáry, což se vysvětlovalo tím, že většina buněk v primární kůře mozkové získala preferenci ke svislé orientaci. Pokud je vidění během rozhodujícího prvního měsíce raného vývoje omezeno pouze najedno oko, i třeba jen najeden nebo dva dny, přestává druhé oko fungovat, protože většina buněk v mozkové kůře úplně přestane reagovat na stimulaci tohoto oka. Tyto trvalé změny ve zrakovém centru mozkové kůry jsou formou paměti: mohou skutečně využívat tytéž molekulární a buněčné mechanismy dlouhodobého posilování, které lze pozorovat v hipokampu.

Je tu však rozdíl mezi přístupem ke zpracování obrazové informace založeným na paměti a samotnou pamětí: zatímco paměť používá neuronovou síť k tomu, aby znova vyvolala vstup, neuronové sítě ve zrakovém centru mozkové kůry využívají tuto formu paměti - ranou plasticitu - k tomu, aby se naučily, jak převést obraz na sítnici na příslušnost reprezentaci. Jedna skupina mozkových buněk by si mohla například "pamatovat" složku pohybu obrysu směrem vzhůru. U reálného předmětu, řekněme letadla, by byl pohyb hladkého povrchu křídel vzhůru rozpoznán zároveň se stoupáním ocasních ploch. Postupně by začala vznikat citlivost k rohům, zaobleným kolům a válcovitým motorům, která by vytvořila reprezentaci předmětu v kůře mozkové.

Tento druh "paměťového" jevu nastává také u jiných smyslů a u širokého spektra zvířat. Opice se rodí s větším počtem předem specializovaných trénujících buněk v primární kůře mozkové než kočky, takže přicházejí na svět se zralejším zrakem, také jsou však závislé na rané vizuální stimulaci. To naznačuje, že "aktivní" změny spojují ve zrakovém centru mozkové kůry, když je zvíře při vědomí, je bdělé a snaží se orientovat se ve světě, jsou stejně důležité jako pasivní změny spojují, které se odehrávají v děloze. Zdá se, že takováto samo-organizace závislejší na aktivitě potvrzuje, že existují obecné principy, jimiž se řídí síly synapsí, takové, s jakými přišel Hebb.

Aby si vyzkoušel, jak se kůra mozková těmito paměťovými jevy samoorganizuje, za účelem zpracování zrakových vjemů, vyvinul Ralph Linsker z laboratoře IBM v Yorktown Heights v New Jersey orientovanou síť sestávající z několika vrstev, z nichž každá je složena ze stovek až tisíců umělých neuronů. Pro srovnání, zrakový systém mozku se skládá z mnoha milionů neuronů.

Každý neuron komunikoval se stovkami jiných, většinou se svými sousedy. Linsker začal s překvapivě malým počtem biologicky přijatelných pravidel, která určovala, jak jsou neurony v síti propojeny, například modifikace Hebbova typu, a sledoval, jak se tyto spoje vyvíjejí, když síť optimalizuje své globální vlastnosti, svůj "zrak". Chtěl zjistit, zda síť rozvine vlastnosti, které jsou biologicky významné pro analýzu světelných obrazců vržených na sítnici. Odpověď zněla "ano": síť se v průběhu toho, jak neurony přebíraly specifické úkoly, samoorganizovala ze stavu, který měl spoje náhodné síly, do stavu, v němž jí spoje propůjčovaly do jisté míry podobné vlastnosti, jaké má zrakové centrum kůry mozkové. K tomu docházelo i tehdy, když neexistoval žádný vizuální vstup.

Nedávné studie umělých neuronových sítí naznačily možné důvody estetické přitažlivosti, ať se jedná o půvab drahokamu, nohy Marilyn Monroeové nebo malby Clauda Moneta. Práce Anthonyho Araka a Magnuse Enquista naznačují, že příčinou toho, že nám něco připadá přitažlivé, je vedlejší účinek námahy, kterou naše mozky vynakládají na každodenní rozpoznávání obrazů. V případě neuronové sítě navržené tak, aby reprezentovala zrakový rozpoznávací systém ptačí samičky, Arak a Enquist zjistili, že tento umělý "mozek" vykazoval silnější odezvu na jisté nové obrázky ptačích sameček než na samečky, které byla naučena rozpoznávat. Samičí mozek zvláště silně odpovídal na samečky s delším ocasem, než měli ti, kteří byli k vidění během učení. Kromě toho, když se umožnila evoluce délky samčího ocasu a samičího zrakového systému mutacemi, dávala samička přednost stále delším ocasům, kdežto odezva na původní délku ocasu slábla. Přednost, kterou samičky dávají přehnanému znaku (v tomto případě dlouhým ocasům), může pohánět jeho evoluční růst, až nakonec začne vážně ohrožovat schopnost sameček přežít. Tato zjištění podporují Darwinův původní názor, citovaný Arakem a Enquistem, že "zříme-li ptačího samečka, jak umně předvádí svou půvabnou chocholku nebo skvostné zbarvení... není možné pochybovat, že [samička] obdivuje krásu svého partnera".<sup>270</sup> Odvážíme-li se jít v myšlenkách ještě o něco dále, naznačuje tento výzkum, že vrozené preference, ať už v osobních vztazích nebo v umění, mohou být nepřímým výsledkem toho, jak se mozek vyvinul ve své schopnosti interpretovat smyslové informace.

---

<sup>270</sup> C. Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex* (Murray, London 1871).

Skutečně, zdá se, že naše opovržení ke všemu nepravidelnému, pokřivenému a nesouměrnému vnitřně souvisí se způsobem, jak naše mozky rozpoznávají obrazovou informaci. Můžeme přinejmenším pochopit, proč máme rádi symetrii sněhové vločky, půvabné tváře nebo Tygra od Williama Blakea s jeho "děšivou symetrií". Další dílo Araka a Enquista, doplněné nezávislou prací Rufuse Johnstona, ukázalo, že když se neuronové sítě učí rozpoznávat vizuální obrazce, mají v sobě zabudovanou preferenci symetrie, protože symetrické obrazce se snáze poznají z různých úhlů pohledu - představte si kouli ve srovnání s krychlí. Tato zjištění byla ve shodě s objevem, že naši vlastní lásku k symetrii sdílíme s jinými tvory - například s vránami a opicemi.

## Integrace

Existují ještě další příklady, jak lze rozumět našim emocím na základě simulací umělých neuronových sítí. Nicméně stále stojíme před důležitou, ale obtížnou otázkou, jak tyto sítě spolu vzájemně intera-gují. Přesněji řečeno je nezbytné řešit úlohu integrace oproti specializaci a spolu s tím související problém synchronizace jedné sítě s druhou. Tuto otázku jsme již v této kapitole nakousli, když jsme hovořili o zvláštním, i když omezeném, způsobu, jak měřit neuronovou komplexitu, který vyvinuli v Ústavu neurovědy v La Jolle, kde se pokoušejí vyjádřit a kvantifikovat složitou vazbu mezi lokálními a globálními funkcemi.

V mozku jsou centra, která dokážou rozpoznat obličej, zatímco jiná rozpoznávají pohyb, barvy a výraz. Jak si máme srovnat to, že naše mysl představuje jedno jeviště a naše vědomí tvoří jeden celek, se zarážející specializací mozku (často se tomu říká problém vazby)! Může to znít ezotericky, ale má to svůj význam při stavech, jako je schizofrenie, které se objeví, jakmile něco přestane fungovat.<sup>271</sup> Tatáž

---

<sup>271</sup> Podle Karla Fristona z Neurologického ústavu v Londýně dochází u pacientů s touto poruchou k selhání komunikace mezi přední a zadní částí mozku. Předchozí studie naznačovaly, že k selhání dochází v dialogu mezi levou a pravou polovinou mozku. Ve smyslu pochopení nemoci je však "pozoruhodnější a více vzrušující" objev, že je tu nedostatek komunikace (viz Dodatek) mezi čelními oblastmi mozku, které se zabývají úmysly, a spánkovými laloky směrem k zadní části mozku, odpovědnými za jazyk, zpracování řeči a představy. Selhání bylo zjištěno pozitronovou emisní tomografií (PET) v Hammersmithově nemocnici v Londýně a analytickými metodami vyvinutými Fristonem. "Chcete-li, je to selhání v integraci toho, co děláme s okolním světem, s vnímáním důsledků toho, co jsme udělali, což vede k mnoha symptomům, které schizofrenici zakoušejí," říká Friston. Toto selhání při spojování úmyslu něco říci s následným rozpoznáváním řeči je důvod, proč schizofrenici tvrdí, že slyší hlasy.

skupina v La Jolle - Olaf Sporns, Leif Finkel, Giulio Tononi a americký laureát Nobelovy ceny Gerald Edelman - se soustředila na vazby ve zrakovém centru kůry mozkové. Když například hledíme na červený laťový plot, jak vědí buňky zaznamenávající v kůře mozkové svislý směr kůlů v plotě, že jde o jednu a tutéž věc (plot), kterou jiné buňky vnímají jako cosi červeného?

Tým se opíral o práci Charlese Graye a Wolfa Singera z Ústavu Maxe Plancka pro výzkum mozku ve Frankfurtu, kde byl objeven vysoký stupeň synchronizace při studiu zrakového centra u koček. Experimenty Graye a Singera naznačovaly, že různé procesy v mozku jsou svázány dohromady jemnou časovou strukturou nervové aktivity. To inspirovalo model typu "zdola nahoru", zkoumaný Spornsem a jeho kolegy na superpočítači, který využíval časování impulzů posílaných mezi sítěmi o zhruba 200 000 umělých neuronů. Neurony byly uspořádány do tří oddělených proudů pro tvar, barvu a pohyb, podobných těm, které jsou ve zrakovém systému savců. Pro zpracování obrazů z videokamery spojil tým jednotky biologicky smysluplným způsobem prostřednictvím několika milionů spojů, z nichž většina byla uspořádána tak, aby navzájem spojovala jednotlivé vizuální mapy. Z tohoto a následujících modelů, které integrovaly až devět oblastí mozkové kůry, povstala dynamická alternativa tradiční myšlenky statické babičkovské konektivní buňky. Tato skupina svůj přístup použila k oddělení pohybujícího se tvaru od různých pozadí a použila jej k vysvětlení optických klamů a Gestalt-fenoménu: obraz z tvarů a symbolů, který vypadá nesmyslně při pohledu zblízka, odhaluje tvář, krychli nebo nějaký vzor, když poodstoupíme a spatříme obraz v jeho celistvosti.

S použitím idealizovanější sítě modeloval John Taylor z Kings College v Londýně část mozku, zvanou nucleus reticularis thalami neboli NRT, která funguje jako hřiště pro soupeření mnoha rozdílných aktivit v oddělených oblastech mozkové kůry. Taylor v ní vidí bránu spojující základní centra, která řídí emoce, stejně jako vstupy z očí a uší, s mozkovou kůrou, vnější vrstvou mozku, zodpovědnou za paměť, jazyk, myšlení a intelekt. Ve svém neuronovém modelu napodobil Taylor tento proces tím, že dovolil různým aktivitám v umělé síti tlumících neuronů spolu soutěžit. To, co z toho vzešlo, byla jediná vlna elektrické aktivity v celé síti, která, jak tvrdí, poskytuje globální korelaci aktivity kůry mozkové. Podobné vlny aktivity byly pozorovány v živých organismech s použitím magnetoencefalografie, techniky zobrazování mozku, kterou

rozebíráme v Dodatku. "Odpovídá to přesně tomu, co jsem od svého modelu očekával," říká Taylor.

Význam jeho práce je stále ještě předmětem diskusí, ačkoli v některých ohledech doplňuje Edelmanův darwinovský model myšlenkových procesů, v němž myšlenky soutěží o "pracovní prostor" uvnitř mozku. Vjemy z okamžitého okolí myslícího člověka a vzpomínky na minulé vlivy z okolí mohou vnést do této soutěže nerovnováhu a zformovat vznikající myšlenku. Neměli bychom však zapomínat, že se dosud nikomu nepodařilo poskytnout přijatelný popis kognitivních funkcí vyšší úrovně, jako je pozornost - základ vědomí -, nemluvě ani o množství emočních stavů, jako jsou štěstí, rozkoš, bolest a smutek.

## Neuronové sítě a poškozené mozky

Umělé neuronové sítě prokázaly svou blízkost realitě také tím, že pomohly lépe porozumět účinkům poškození mozku. Tim Shallice z University College v Londýně společně s Geoffreyem Hintonem a Davidem Plautem použili neuronovou síť k modelování situace, v níž poškození následkem úderu může vést ke zhoršení zraku a k potížím s některými abstraktními slovy, což na první pohled vypadá jako náhodný soubor projevů. Když se snažíme poraněnou neuronovou síť znovu učit, ukazuje se, že některé strategie jsou lepší než jiné. Lékaři nyní mohou začít zkoušet rehabilitační postupy vycházející z těchto poznatků.

Neuronové sítě se používaly také k modelování jedné formy ztráty paměti zvané prozopagnozie, způsobené lézemi s hranicemi mezi týlní a spánkovou oblastí kůry mozkové. Postižený ztrácí schopnost rozpoznávat tváře přátel a rodinných příslušníků a dokonce fotografie své vlastní tváře. Tito pacienti mají často potíže rozlišovat mezi jednotlivými členy dané třídy objektů. Například obvykle dokážou správně třídít předměty jako jsou auta, psi, kočky a čajové konvice, zatímco identifikovat jednotlivé věci v těchto třídách nedovedou. Jelikož prozopagnozie postihuje pouze zrakové rozeznávání tváří a vzpomínky na další třídy předmětů, může být pořád možné, že postižený jedinec identifikuje osobu nebo předmět podle jiných znaků, jako jsou držení těla a způsob chůze, nebo s použitím jiných smyslů, třeba podle charakteristického zvuku. Postižený možná neumí rozpoznat tvář svého domácího miláčka, kocoura Puškina, ale když uslyší jeho žalostné mňoukání, může okamžitě poznat, které zvíře to je.

Jako v jiných případech, i tito nešťastní pacienti pomáhají odhalovat, jak se v mozku ukládají informace o jednotlivcích a o předmětech. Existuje mnoho reprezentací jednotlivého objektu, z nichž každá se odvozuje z jiného smyslu, ať je to čich, sluch nebo zrak? Možná, že k jedné abstraktní reprezentaci lze dospět řadou cest prostřednictvím různých smyslů. Tato myšlenka se dá okamžitě pochopit z toho, co jsme poznali v 5. kapitole o tom, jak fungují rekurentní neuronové sítě. Vstupy z různých smyslů se mohou všechny sbíhat k nějakému globálnímu stavu sítě, který představuje kocoura Puškina. Globální povaha tohoto stavu znamená, že je velmi pravděpodobné, že je v prostoru široce distribuovaný - čili že neurony, jejichž kolektivní aktivita slouží k reprezentaci Puškina, jsou v mozku rozptýleny. Pokud je tato interpretace prozopagnozie správná, pak to tedy znamená, že lézemi je přerušena pouze zraková cesta k představě Puškina, neboť se k němu lze dostat jinými cestami jiných smyslů. Je skutečně možné, že pacient, pokud takové alternativní cesty k neuronové reprezentaci Puškina existují, může být dokonce schopen přesně popsat i jeho vzhled.

Hypotéza zní, že existuje hierarchie rekurentních sítí zahrnutých v rámci rekurentních sítí, zahrnutých v dalších rekurentních sítích. Z této hierarchie plyne očekávání, že když synaptické spoje - váhy spojují, vyjádřeno slovníkem 5. kapitoly - jsou zničeny lézemi, budou z naučených obrazců degradovat nejprve ty jemnozrné (specifičtější, individuální poznávací znaky), zatímco širší třídy budou přežívat déle.

Vyvolávání uložených tříd objektů (například tváří) z neuronových sítí, oproti jednotlivcům uvnitř každé z tříd (tvář jednotlivé osoby), bylo studováno na univerzitě La Sapienza v Římě argentinským fyzikem Miguelem Virasorem, který je nyní ředitelem Mezinárodního centra teoretické fyziky<sup>□</sup> v italském Terstu. S použitím modelu neuronové sítě Hopfieldova typu zjistil, že stabilita třídy je mnohem větší než stabilita jednotlivců. Jinými slovy, poškození mozku bude skutečně mít tendenci vymazat místa, která od sebe rozlišují tváře jednotlivců, což je přesně jev pozorovaný při prozopagnozii.<sup>□</sup>

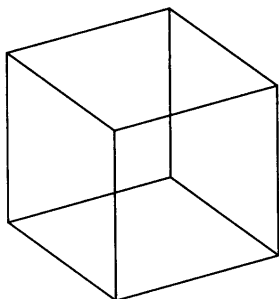
---

<sup>□</sup> International Center for Theoretical Physics založil a až do své smrti řídil laureát Nobelovy ceny za fyziku elementárních částic, Pákistánec Abdus Salám. (pozn. překl.)

<sup>□</sup> Nicméně sám M. A. Virasoro kdysi prohlásil, že ve světle nových experimentů není zcela přesvědčen o správnosti této interpretace svého modelu, (pozn. překl.)

# Vědomí

Studiu vědomí se učené vědecké kruhy donedávna vyhýbaly. Všeobecně se věřilo - a mnozí si to myslí stále -, že tento jev leží mimo dosah vědeckého vysvětlení. Jedním z klíčových prvků vědomí je jeho subjektivita: každý z nás může vědět jen o svém vlastním stavu vědomí. Sféra subjektivních zážitků se běžně považuje za přísně soukromou záležitost. Avšak techniky zobrazování mozku (viz Dodatek) dokážou do tohoto soukromého světa nahlédnout a umělé neuronové sítě nabízejí prostředky k jeho modelování. Realizace umělého vědomí je tvrdý oříšek a nikomu se to ještě nepodařilo; měla by nás nicméně povzbudit spousta příkladů popsanych v této knize, jak dovedeme zopakovat neobyčejnou komplexitu reálného světa v počítači. Jestliže existují pokroky takového druhu, pak není divu, že přírodovědci a filozofové se v živé diskusi pokoušejí společně zjistit, co to je, co v půldruhakilové hroudě šedých a růžových buněk v našich hlavách zodpovídá za vědomí.<sup>272</sup>



Obrázek 9.9 / Iluze vědomí. Neckerova krychle.

---

<sup>272</sup> Christopher Longuet-Higgins ze Sussexské university předkládá zábavný pohled na věc. Podle něj je nejméně pět různých problémů vědomí: "Zaprvé: Jaká je jeho biologická funkce? Odpověď: Je bezpečnější být občas naprosto bdělý, než celou dobu zdravě spát. Zadruhé: Jsou některé oblasti mozku zvlášť aktivní, když jsme při vědomí? Odpověď: Nepochybně. Zatřetí: Mají červi nebo rostliny nebo roboti vědomí? To se nedá říct, protože vědomí je svou podstatou soukromá záležitost. (Rád si myslím, že mí přátelé mají vědomí, ale člověk nikdy neví.) Začtvrté: není snad vědomí jen další přírodní jev, jako je gravitace, který nyní dozrál k vědeckému vysvětlení? Odpověď: Ne, je to úplně naopak. Věda, příběh, který vyprávíme o přírodě, by nemohla vzniknout ve světě bez bytostí s vědomím. Zapáté: proč tedy dnes vědomí tak frčí? Odpověď: Protože neurovědci a neurofilozofové přišli před časem na to, jaká je to legrace zmítat sebou na území toho druhého." C. Longuet-Higgins, dopis Rogeru Highfieldovi prosinec 1993.



Většina z nich se shodne v jedné věci: toto úsilí je jedno z nejnáročnějších a nejvíce vzrušujících ze všeho, do čeho se kdy člověk pustil. Těžkosti pramení z komplexity nekonečných změtí neuronů a synapsí. Vzrušení z hledání spočívá v tom, že někteří tvrdí, že naše budoucí přežití a přežití planety možná závisí na úplnějším poznání lidského mozku. Tuto naléhavost ještě zvyšuje stoupající počet vědců, kteří věří, že vysvětlení vědomí, ať neurobiologické nebo neuropočítačové, je dnes na dosah. Jak prohlašoval Francis Crick: "Myslím si, že problém vědomí se nyní otvírá vědeckému bádání. ... Po-čítky (qualia) z toho, co vidíme (jako je červenost červené), mohou být soukromé, ale mělo by být možné objevit obecný typ mozkové aktivity, který odpovídá vědomí." Aby zjistili, jaký druh aktivity to může být, studují Crick a jeho spolupracovník Christof Koch optický klam představovaný Neckerovou krychlí, kresbou, která vypadá, jako by buď vylézala z papíru, nebo se do něj propadala, podle toho, jak dlouho na ni upřeně hledíte (viz obr. 9.9). "Odhlédneme-li od pohybu očí, pak to, co přichází do vašeho oka, je stálé, ale váš vjem se mění," říká Crick. "Chceme vědět, které neurony v mozku mění svůj stav při změně vjemu."

Protože neexistuje žádná konkrétní definice vědomí, vzniká velké množství sporů. Vědomí je vlastností zdravého lidského mozku, právě tak jako zvláštní druh žlutého výboje je vlastností sodíkového atomu. Na rozdíl od vlnové délky žlutého světla vysílaného sodíkovými atomy však vědomí není vlastnost pozorovatelná konvenčními prostředky. Není ale zase rozhodně neviditelná pro tu formu pozorování, které říkáme introspekce. Tato prchavá vlastnost, na níž se většina z nás shodne, je zachycena v typické slovníkové definici vědomí, jako "bdělého stavu myslí; vědění, které o něčem myslí má; sebeuvědomění; myšlení". Samotná "mysl" je však naneštěstí prchavý nehmotný pojem, hrozí nám tedy začarovaný kruh, pokud nepřijmeme karteziánský dualismus - přísné rozlišování mezi myslí a hmotou. Určitý vědecký smysl můžeme podržet, nahradíme-li v této definici "mysl" slovem "mozek". Stále však čelíme problému, zda přisoudit vědomí nějakému typu homunkula ("človíčka") v našem mozku, kterému se všechny zážitky přehrávají v jakémsi "karteziánském divadle", anebo zda je možné popsat vědomí jako fyziologicky konzistentní a jednotný pojem.

Gerald Edelman je přesvědčen, že tajemství vědomí nebude nikdy rozluštno na žádné jednotlivé úrovni popisu, ať je molekulární, nervová nebo psychologická. Místo toho klade velký důraz na účinky

evoluční selekce v širokém spektru úrovní, počínaje nesčetnými nervovými spoji v mozku. Poněvadž mozek čelí nutnosti přežít a z chaotického světa vytvořit řád, je vysoce tvárný a přizpůsobuje se zobrazováním vjemů, jejich neustálým a znovu opakovaným tříděním. "Nervy, které společně pracují, se spolu spojují," říká. Každá neuronová mapa, každá část mozku je dynamicky, nebo, použijeme-li Edelmanův termín, "reentrantně" spojována se všemi ostatními a vyvíjí se a integruje do souvislého rychlého dialogu.<sup>□</sup> A tak mozek aktivně reprezentuje zobrazení světa a srovnává tato zobrazení navzájem. Rozhodující je však to, že tato evoluce vlastního já je umožněna selekcí, posilováním existujících skupin neuronů a neustálým vznikáním nových neuronových sítí na základě "systémů hodnot", odvozených z evoluce, jako jsou reflexy, žádosti a chuť k jídlu. Všechny tyto procesy přirozeně vedou k vývoji různorodého a mnohoznačného repertoáru spojů, z nichž žádné dva se nepodobají, a to ani u identických dvojčat. Pochopení toho, jak mozek řadí svět do kategorií, je klíčovým problémem ve snaze vysvětlit vědomí. Jak to formuluje Edelman: "Svět se neskládá z úhledných malých balíčků označených nálepkami."

V mnoha současných pokusech zachytit jev zvaný vědomí se soustavně objevují umělé neuronové sítě a paralelní zpracování dat. Díváme-li se na mozek jako na masivně paralelní zařízení, vůbec nepotřebujeme karteziánské divadlo, v němž se všechny události předvádějí vševidoucímu homunkulovi. Protože žádný homunkulus neexistuje, nemusíme udržovat onu představu karteziánského dualismu, že mysl je oddělena od hmoty. Například filozof Daniel Dennett zastává názor, že "nelze vážně pochybovat o tom, že mozek je počítač. Není to sériový počítač obvyklého typu, nýbrž paralelní počítač s architekturou, na niž naráží název mé teorie vědomí, model mnohonásobných náčrtů. Já vidím mysl tak, že funguje spíše jako Reaganova administrativa - spousty pododdělení, koalic a soupeřících funkcionářů pracuje souběžně a vytváří iluzi, že to vše řídí jeden Šéf."<sup>273</sup> Tento konekcionistický obraz vědomí činí problémy tradičnímu re-dukcionistickému úsilí rozčlenit funkce mozku. "Věda vždycky dosáhla svých velkých triumfů tehdy a tam, kde se jí podařilo rozdělovat komplexní jevy na velmi jednoduchá paradigmatata. Když děláme totéž s mozkiem, jsme v nebezpečí, že se nám

---

<sup>□</sup> Stojí možná za zmínku souvislost s pracemi Michela Foucaulta: Řád diskursu, v souboru "Diskurs, autor, genealogie", Svoboda, Praha 1994. (pozn. překl.)

<sup>273</sup> D. Dennett, dopis Rogeru Highfieldovi prosinec 1993. Viz také D. Dennett, *Consciousness Explained* (Penguin. London 1991).

pod rukama rozpadne na kusy. Řečeno obrazně, abychom pochopili cenu peněz, nestačí zírat na dolarové bankovky," napsal von der Malsburg. "Spíše bychom se měli snažit pochopit systém věr a zvyků, které z peněz dělají to, čím jsou. Tvrdím, že se nedá čekat, že kterákoli z izolovaných komponent mozku bude v sobě obsahovat podstatu vědomí. Ta spočívá ve způsobech vzájemného působení všech částí mozku, a možná dokonce v tom, jak je mozek začleněn do sociálního světa a do světa vůbec."<sup>274</sup>24

## Umělé vědomí

Jak daleko jsme v pochopení mozku dospěli, se nakonec ukáže, až budeme navrhovat a simulovat mozek umělý, který se bude vyznačovat takovými rysy, jako jsou inteligence a vědomí. Viděli jsme, jak nám dnes neuronové sítě pomáhají chápat paměť, rozpoznávání obrazů a vnitřní organizaci mozku. Až budeme mít realističtější modely funkce mozku, doplněné o poznatky o umělém životě, můžeme začít chápat, proč inteligentní chování - a vědomí - nemusí být nutně omezeno na biologické bytosti.

Když se kdysi začínalo diskutovat o umělé inteligenci, snad nej-užitečnější příspěvek přinesl její otec zakladatel Alan Turing, který přijal pragmatický "operacionistický" pohled. Operacionista řekne, že počítač se v určitém ohledu podobá člověku, jsou-li pokusy počítače napodobit tento lidský rys nerozlišitelné od skutečnosti. Turing tuto situaci, vyjádřenou tzv. Turingovým testem, popsal v článku nazvaném "Počítací stroje a inteligence", který vyšel ve filozofickém časopise *Mind* v roce 1950. Turing uvažoval, že počítač musí být označen za schopný myšlení, pokud lidská bytost, která s ním vede dialog prostřednictvím zpráv psaných elektronickým psacím strojem, nedokáže rozlišit, zda komunikuje se strojem nebo s jinou osobou.

Takové otázky mají zásadní filozofický obsah a podnítily vznik velkého množství literatury.

Matematik sir Roger Penrose ve své myšlenkově provokující a v širokých kruzích čtené knize *Císařova nová mysl* přednesl zajímavou kritiku celého podniku zvaného umělá inteligence. Svě názory rozvinul v nedávno vyšlém volném pokračování *Stíny mysli*. Jeho argumenty se obracejí k významu Gödelových vět o nerozhodnutelnosti v

---

<sup>274</sup> C. von red Malsburg, HAS Symposium on Cognition, Computation and Consciousness, Kyoto, August/September 1994.

matematické logice, s nimiž jsme se seznámili v 2. kapitole. Penrose zastává názor, že lidský mozek má schopnost "vidět" pravdivost či nepravdivost Gödelových tvrzení, jejichž pravdivostní hodnoty nelze rozhodnout v rámci formálního axiomatického rámce logického systému, v němž se pohybujeme. To neznamená, že by věřil, že lidské mozky jsou svou podstatou odlišné od mozků mnoha jiných zvířat. Podstatné je na tom to, že tato schopnost je podle Penrose "zcela jasnou realizací nevyčíslitelnosti - nevyčíslitelnosti, která musí být přítomna všeobecně ve vědomých procesech a vůbec není specifická pro lidské mozky". Podle Rogera Penrose můžeme vystoupit z formálních axiomatických schémat a získávat poznání pravdivostních hodnot takovýchto nerozhodnutelných výroků uvažováním, které je přes to všechno matematické. Z toho plyne, že naše mozky nemohou pracovat podle nějakého algoritmu. Protože počítače jednoduše vykonávají naprogramované instrukce, jsou algoritmické; počítače tudíž nemohou být tak chytré, jako jsme my.

Kdyby byl Penroseův argument správný, rozpadl by se v prach ambiciózní cíl umělé inteligence v silném slova smyslu - totiž postavit výpočetní zařízení nadané vědomím. Tento argument má povážlivou sílu a také jistou mystickou přitažlivost. To proto, že podobně jako mnoho dalších matematiků je i Penrose oddán představě platónské reality, existující nezávisle na nás a přece takové, že se jí můžeme dotýkat matematickým poznáním. Díky Gödelovi je alespoň část této abstraktní reality provždy zahalena před zraky "tupých" algoritmických výpočtů. Abychom dosáhli do platónského kosmu, kde se vznášejí božské odpovědi na tyto nevyčíslitelné problémy, potřebujeme své mozky nadané vědomím nebo přinejmenším mozky matematiků.

Roger Penrose jde ve své argumentaci ještě dál. Jak jsme viděli ve 2. kapitole, je možné, že fyzikální zákony - nebo přinejmenším jejich matematická reprezentace - mohou mít důsledky, které nejsou vyčíslitelné. Tuto eventualitu jsme popisovali, když jsme rozebírali matematické výsledky Pour-Ela a Richardse, jejichž význam pro přírodní vědy zůstává nejasný. Z důvodů naprosto nesouvisejících s umělou inteligencí Penrose tvrdí, že spousta problémů, které sužují kvantovou mechaniku a gravitaci, budou vyřešeny explicitním vtělením nevyčíslitelných prvků do nějaké úspěšnější, ale dosud neznámé teorie kvantové gravitace. Z toho usuzuje, že je to právě ona předpokládaná nová nealgoritmická fyzika, která stojí za inteligentními rysy mozku nadaného vědomím.

Jako most mezi dosud neznámou kvantovou gravitací a neurony v mozku vybaveném vědomím staví Penrose představu Stuarta Hameroffa o mikrotubulech.<sup>275</sup> Většina neurovědců souhlasí s názorem, že mikrotubuly představují "kostru" neuronu a že mají dvě funkce: ovládat tvar neuronu a přepravovat molekuly tam a zpět mezi tělem neuronu a synapsemi. Penrose jde dál za tento sdílený názor a tvrdí, že síť mikrotubulů může vykazovat chování, které bude odpovídat kvantovému měření a bude zdrojem nevyčíslitelnosti, o níž, jak věří, dokázal, že je nezbytná pro vědomí. Mikrotubuly by však představovaly jen jednu část celkového schématu, které má Penrose na mysli a které by ještě vyžadovalo mnoho buněk pracujících společně ve shodě. "Popis na úrovni neuronů, který představuje v současnosti módní obraz mozku a myslí, je pouhým stínem hlubší úrovně, totiž činnosti cytoskeletu - a právě na této hlubší úrovni musíme hledat fyzikální základy myslil"

Základní Gödelovský argument, který použili Penrose a jiní, když napadali umělou inteligenci, byl široce kritizován. Crick se domnívá, že když dnes rozšiřuje své myšlenky na mikrotubuly, posunul se Penrose daleko od své původní hloubky. Na vědce, který objasnil trojrozměrnou strukturu mikrotubulů, sira Aarona Kluga, neudělala nová role, která se jim přisuzuje při formování vědomí, žádný dojem, zatímco Gerald Edelman namítá: "Existuje starý dobrý lék pro léčbu dny a artritidy, který vám rozpouští mikrotubuly - co se pak děje s vaší duší?" Přesto, navzdory četným kritikám, je argument sira Roger Penrose o nedosažitelnosti vědomí vytvářeného počítačem důležitý a nemůžeme jej snadno pominout.

Dá se však argumentovat, že Penroseova pozice je založena na poněkud omezeném pohledu na to, co je podstatou počítače. To proto, že Gödelova věta je větou logiky, týkající se matematických axiomatických soustav; na stroje se nehodí. Michael Arbib, informatik z Ji-hokalfornské univerzity, dospěl, podobně jako mnoho jiných, už dávno k závěru, že ačkoli je Gödelova věta fascinující, je to irelevantní technické tvrzení. "Ti z nás, kdo modelují lidskou inteligenci, vědí, že lidské argumenty nezačínají stále znovu z axiomů," říká Arbib. Gödelova věta by skutečně umělou inteligenci omezovala, kdyby umělá inteligence nesahala dál než k systémům typu GOFAI. Penrose považuje možnosti moderních strojů naučit se matematické axiomy a pravidla za

---

<sup>275</sup> R. Penrose, *Shadows of the Mind* (Oxford University Press 1994), str. 358. Hameroff a jeho kolegové argumentují, že mikrotubuly mohou hrát roli celulárních automatů, které přenášejí a zpracovávají komplexní signály.

irelevantní pro cesty, jimiž docházejí k matematickému pochopení lidí.

<sup>276</sup> Avšak pro většinu lidí je to právě schopnost učit se, která dovoluje moderní umělé inteligenci uniknout Gödelovým cha-padlům, jak už dávno tvrdil Turing. Každé umělé vědomí bude mít schopnost začleňovat do své struktury nové "axiomy" v důsledku zkušeností se smyslovými i jinými údaji. Neuronové výpočetní stroje inspirované mozkiem nejsou nakonec zamýšleny jako stroje na logické dedukce, ale jako stroje, které interagují se světem a prozkoumávají jej a které se dokážou učit ze svých chyb. V profesionální hantýrce se říká, že tyto stroje jsou "situované", takže mohou neustále porovnávat své chování s chováním světa. Podle Arbibova názoru "Gödelova věta k tomu nemá vůbec co říci". Je to falešná stopa.

Většina z těch, kdo v současnosti pracují na simulacích inteligence a vědomí, cítí, že opravdová výzva spočívá v biochemickém stroji, který nazýváme mozek. Ústup hegemonie GOFAI vedl k rozmnožení výpočetních strategií, které jsme rozebírali v průběhu této knihy. V současnosti vidíme, jak se vyvíjí celá plejáda soupeřících výpočetních přístupů, které mohou jedině obohatit výzkum umělé inteligence. V tomto raném stadiu budou tyto snahy nadále vzkvétat, bez ohledu na argumenty Rogera Penrose proti umělé inteligenci v silném slova smyslu. Ačkoli například v mnoha podrobnostech jsou mozky člověka a mořské okurky podobné, mají diametrálně odlišné schopnosti, což odráží různou úroveň jejich komplexity. Zdá se velmi pravděpodobně, že různé úrovně komplexity vedou k různým stupňům vědomí. Hledání umělé inteligence je tedy hledáním komplexity. Před chvílí jsme v této kapitole popisovali snahy zkonstruovat komplexní "wetware", z něhož se skládají mozky; tyto -pokusy jsou stále v plenkách. Jiné přístupy se pokoušejí vytvořit tuto komplexitu znovu v umělé neuronové síti pomocí počítačového hardwaru, softwaru nebo kombinací obou. Ačkoli reprezentace umělými neurony je mnohem jednodušší než jejich realizace ve wetwaru, zachycují přinejmenším několik důležitých rysů, rozhodujících pro fungování mozku. Nejdůležitější je přitom to, že komplexita takovýchto sítí je důsledkem kolektivní akce velkého

---

<sup>276</sup> R. Penrose, *Shadows of the Mind* (Oxford University Press 1994), str. 201. Penrose tvrdí, že "lidské matematické vědění se nedá redukovat na (poznatelné) výpočetní mechanismy, kde takové mechanismy mohou zahrnovat jakoukoli kombinaci postupů shora dolů, zdola nahoru nebo náhodných. Zdá se, že jsme tlačeni k jednoznačnému závěru, že v lidském vědění je cosi podstatného, co se nedá simulovat výpočetními prostředky."

množství jednoduchých jednotek, stejně tak jako komplexita mozku spočívá v jeho nespočetných neuronech.

Na přístupu používajícím neuronové sítě je nové to, že neobsahuje výslovně programování. Samozřejmě, nějaký typ algoritmu je vždy přítomen ve všech softwarových simulacích neuronových sítí, poněvadž se musí předepsat dynamika učení. Je to stejné, jako když kód DNA "programuje" architekturu mozku a procesy učení v něm. Ale jakmile jsou takové sítě uvedeny do chodu, učí se tím, jak poznávají svět, s nímž jsou ve styku. Zdá se tedy zcela myslitelné, že dostatečně komplexní typy strojů se mohou naučit i "vidět" řešení některých typů Gödelovských nerozhodnutelných výroků. Skutečně, je to tentýž proces, jímž si někteří lidé osvojí schopnost řešit Gödelovské problémy - dostatečně hlubokým vzděláním (tedy zdoluhavým a vysoce specializovaným procesem učení), které jim umožňuje stát vně jakéhokoli formálního logického systému. A i kdyby se opravdu ukázalo, jak to tvrdí Roger Penrose, že tu jsou zásadní omezení inteligentních schopností digitálních neuronových sítí, analogové rekurentní neuronové sítě mají schopnost vykonávat "super-turingovské" výpočty a z toho, co by pro stroj s konečným počtem stavů (Turingův stroj) bylo nevyčísitelné, dělají vyčísitelné.

Ať se mozek řídí jakýmkoli fyzikálními zákony, jedna věc je jistá: jsou to zákony řídící chování jakéhokoli fyzického objektu, ať je to neuron nebo křemíkový čip. Většina vědců cítí, že ještě zbývá spousta nezužitkovaných možností při studiu komplexity mozku s použitím zavedených idejí. Jak jsme neustále zdůrazňovali, stávající fyzika dokáže generovat dostatečně exotické emergentní chování, které vysvětluje mnohé ze základních procesů života a práce mozku. "Nikdo netvrdí, že při svém studiu hipokampu uvízl na mrtvém bodě proto, že ho omezují základní fyzikální zákony," poznamenal Arbib. To neznamena, že by se měla vyloučit možnost budoucích revolucí. Právě tak jako nám zkoumání velmi malého dalo kvantovou mechaniku a zkoumání velmi velkého vedlo k obecné relativitě, přijde snad něco nového ze studia vysoce komplexního. Převážná většina kognitivních vědců by však souhlasila s Arbibem, když říká: "Překvapilo by mě, kdyby Penrose našel odpověď v kvantové gravitaci," a dodává: "a pokud ano, pak jen šťastnou náhodou."

## Stroj na sny

Od provádění počítačových simulací plně funkčního lidského mozku jsme ještě na hony vzdáleni. Přesto se neustále objevují překvapení i ve vysoce zjednodušených simulacích. Jedním příkladem je počítačový model hipokampu, který je zcela jiný než model Trevese a Rollse. Pro studium elektrických rytmů mozku jej vyvinul Roger Traub u IBM, ve spolupráci s Kolumbijskou univerzitou. Model spojoval 10 000 simulovaných neuronů, z nichž každý byl popisován do značných mikroskopických detailů, takže reaguje podobně, jako je tomu ve skutečnosti. Byl to přístup ke komplexitě zdola nahoru, podobný svou povahou tomu, co jsme viděli v práci Denise Nobleho o srdci. Výsledek byl neočekávaný: Traubova síť produkovala elektrické vlny podobné těm, které vznikají ve velkých souborech mozkových buněk a které se dají detekovat elektroencefalografií. Emergentní chování modelu odpovídalo "rytmu theta", který se dostavuje, když ve spánku sníme. Původ těchto vln, zvaných též populační oscilace, není vysvětlen ani v mozku, ani v počítači IBM 3090. "Je to naprosté překvapení," řekl Roger Traub z IBM. "Když jsem začínal, používali jsme model jen k tomu, abychom si ověřili věci, které jsme viděli v laboratoři. Nyní s ním začínáme experimentovat, jako by to byl samostatný organismus."

Ve spolupráci s Johnem Jefferysem z St. Mary's Hospital Medical School v Londýně rozšířil Traub svou práci tak, že modeluje nejvýbušnější záchvaty elektrické aktivity, ke kterým v mozku dochází, když se vlny aktivity šíří z jednoho místa během epileptického záchvatu. Na jeho simulacích takzvaných "následných výbojů" obzvláště překvapuje, že dobře souhlasí s experimenty na vzorcích hipokampu morčete. (Následný výboj je abnormální elektrický potenciál, který trvá po určitou dobu a obvykle se objevuje jako sled oscilací.) Jak prostorové, tak časové vlastnosti těchto elektrických výbojů byly úspěšně reprodukovány v počítačovém modelu, sestávajícím ze 100 až 8000 pyramidálních neuronů, z nichž každý byl rozdělen na devatenáct segmentů, takže jejich elektrické vlastnosti byly přiměřeně realistické.

Tento tým simuloval v síti umělých neuronů i ten nejzajímavější mozkový rytmus. Vyskytuje se pouze při vědomí nebo ve snu, kmitne čtyřicetkrát za vteřinu a dá se zjistit pouze snímáním elektrické nebo magnetické aktivity mozku. Někteří tvrdí, že funguje stejně jako hodiny v počítači a slouží ke koordinaci aktivity v mnoha specializovaných oblastech. Jinými slovy, tento čtyřicetihertzový rytmus může být právě



tou metodou, jak se mozek vypořádává s "problémem vazby", který je základem jednotného vědomí a na který jsme již v této kapitole narazili. Byla navržena různá vysvětlení pro tento tep: snad mají jednotlivé buňky svůj vnitřní čtyřicetihertzový rytmus;

snad tento rytmus povstává ze zpětnovazební smyčky mezi tlumivými neurony a pyramidálními buňkami, nebo dokonce mezi mozkovými strukturami, jako jsou kůra mozková a thalamus. S Jefferysem a Milesem Whittingtonem vytvořil Roger Traub čtyřicetihertzový rytmus ve virtuálním vzorku hipokampu, který sestává ze 128 tlumivých neuronů, z nichž každý je modelován jako rozvětvená buňka, skládající se ze čtyřiceti osmi oddílů. A skutečně, v experimentech, kde se používají medikamenty k vypnutí pyramidálních buněk ve vzorku hipokampu, přetrvával rytmus ve zbývajících aktivních tlumivých buňkách. Ukazuje se, že rytmus je emergentní vlastností sítě sestávající pouze z tlumivých neuronů. "Získali jsme nástroj ke studiu úlohy čtyřicetihertzového rytmu v problému vazby," říká Traub.

Největší mozková síť, kterou Traub simuloval, napodobovala činnost pouhých 10 000 buněk. Hardwarová verze mozku, založená na umělých neuronových sítích, by vyžadovala řádově 10<sup>9</sup> neuronů či procesorů. Masivně paralelní počítač CM-2 od Thinking Machines Corporation má kolem 65 000 procesorů; kdyby každý z nich měl fungovat jako jednotlivý neuron, museli bychom zapojit spojenou sílu deseti milionů takových Connection Machines, než bychom dosáhli něčeho, co by se mohlo srovnávat s mozkem. Ale jak jsme viděli, důležitý není jen pouhý počet neuronů. Záleží na způsobu, jakým jsou pospojovány dohromady, s komplexní hierarchií sítí uvnitř sítí a sítí svázaných se sítěmi. Tato provázanost je společným výsledkem biologického genetického programování a adaptivního učení: není omezená tím, jak byly neurony propojeny na začátku.

I když bude nakonec možné simulovat až stovky miliard neuronů, výsledné sítě a jejich emergentní vlastnosti nebudou vykazovat inteligenci a vědomí podobné tomu, jaké má lidský mozek, nebudou-li vystaveny podobným smyslovým podnětům a zážitkům. To jasně vyplývá z práce Rodneyho Brookse, popisované v minulé kapitole, kde se počítač připojuje k velkému množství složitých senzorů. Konvenční umělá inteligence selhala, protože přehlédla zásadní důležitost znalostí závislých na kontextu a schopnosti učit se při práci. Místo toho se zakládala na nepravděpodobné představě, že programátor by měl navrhnout a vložit do stroje cosi tak delikátního a komplexního, jako je

vědomí. Inteligence je atributem, který odráží tvárnost mozku a přímou zkušenost s tím, jak svět funguje. Aby tudíž byl stroj inteligentní, musí být schopen interagovat se světem a zároveň se od něho učit. Tento stav věcí je výsledkem biologické evoluce: to je klíčová a přece často pomíjená složka inteligence.

Celou naší knihou procházelo jedno ústřední téma: snaha pochopit komplexitu prostřednictvím symbiózy mezi přírodou, vědou a počítači. V předchozí kapitole jsme viděli pozoruhodný pokrok, který byl učiněn v oblasti umělého života. V této kapitole jsme ukázali, jak počítačové modely neuronových sítí poskytují mnoho poznatků o komplexitě struktury a funkce mozku. Tyto znalosti se budou rozšiřovat a prohlubovat, jak poroste výkon počítačů a jak budou v počítačových modelech úplněji znovuvytvářeny důležité biologické detaily. Věříme, že máme dobré důvody předpokládat, že dostatečně komplexní stroj by mohl jednou napodobit inteligenci a vědomí, ty nejso-fistikovanější rysy nejvyvinutějšího biologického druhu. Věříme nikoli lidským programátorům, ale doplňujícím se tvůrčích silám samoorganizace a evoluce. Jak jsme zdůraznili v 8. kapitole, i o lidském oku, které prověřovalo Darwinovu víru o svém vlastním stvoření, a které často citují ti, kdo útočí na biologickou evoluci, se nedávno ukázalo, že je s nej větší pravděpodobností výtvořem slepé evoluce.<sup>277</sup> Mnohé lidi mohou úspěchy takového přístupu zarmoutit a mohou tvrdit, že to snižuje hodnotu naší existence tím, že se nám podsouvá plytká shoda okolností a náhoda namísto hlubokého metafyzického smyslu. Poznátky o tvořivosti, životě a vědomí odvozené z pochopení jejich vnitřní komplexity však v žádném případě neohrožují, ba naopak obohacují pojmy příležitosti, nepředurčenosti a svobodné vůle, které jsou nám tak drahé.

---

<sup>277</sup> D. Nilsson and S. Pelger, Proc. R. Soc. London. B 256. 53 (1994). Autoři citují Darwinova slova: myšlenka, "že oko ... bylo zformováno přírodním výběrem, se zdá, upřímně doznávám, nanejvýš absurdní."

# 10 Panoráma

Ač prach jsme, duch nesmrtelný povstává jak harmonie hudby; je tu temné neproniknutelné soudružství, jež smiřuje svářící se prvky, spojuje je spolu v jedno společenství.

WILLIAM WORDSWORTH

Dějiny vesmíru jsou příběhem o vývoji komplexity. Napodobováním procesů vytvářejících kosmické tvary a rytmy se věda dokáže vypořádat s problémy, považovanými za nezvládnutelné, simulovat organizaci a aktivitu mozku a dokonce tvořit umělé světy. Přišel čas udělat inventuru a pokusit se dojít k nějakým závěrům. Nabízí se několik širších otázek. Jaký význam má studium komplexity pro metody vědecké práce a pro její budoucí směřování? A co vztah mezi komplexitou a jinými lidskými aktivitami? Jak se komplexita dotýká přímo našich životů?

Mnoho lidí přijalo redukcionistické poselství dnešní vědy. Ačkoliv má někdy redukcionismus velké schopnosti, může být také destruktivně banalizující. Když matka ztratí syna kvůli rakovině, zoufale se pídí po vysvětlení: bylo to těmi umělými barvivy v jeho oblíbené pomerančové šťávě? Byl to elektrický kabel poblíž jeho ložnice? Byl to cigaretový dým, který vdechoval? Někdy se dá určit jednoduchá příčina, ale často se nedá zjistit nic. Často zase narazíme na průzkumy spojující stravovací návyky se zdravím, které nám říkají, který konkrétní druh jídla bychom měli jíst a čemu bychom se měli vyhnout. Tyto studie někdy poskytují vzájemně si odporující výsledky. Avšak komplexita nás učí, že účinky mohou mít spleť příčin, kterou nelze zjednodušit. Tak jako vlastnosti cementové kaše ovlivňuje obrovský počet přispívajících faktorů, tak je tomu také s naším zdravotním stavem.

Prostoduchý redukcionismus tvrdí, že celek není víc než součet svých částí, z nichž každá se dá studovat izolovaně. Avšak tato forma redukcionismu má vážná omezení. Vezměme si globální úsilí rozluštit celý lidský genetický kód, program lidského genomu. Přinese to mnoho chvályhodného užitku pro medicínu, protože odhalíme genetické vady, které vedou k dědičným chorobám, a nalezneme souvislost mezi dispozicemi k nejvýznamnějším příčinám smrti, jako jsou choroby

srdce, rakovina a demence. Přesto se tu skrývá vážné nebezpečí, a ze všeho nejvíce tam, kde jde o vliv genů na lidské chování.

Komplexní sociální chování, související s osobností, inteligencí, alkoholismem, schizofrenií, homosexualitou a maniodepresivní psychózou, se čím dál víc vydává za geneticky predestinované rysy, výsledek "špatných" genů. Studium dvojčat, rodin a adoptovaných dětí skutečně naznačuje, že některé typy chování jsou přinejmenším částečně dědičné: problémem je uvědomit si, které rysy jsou zděděné a které se prostě vyvinuly v důsledku sdíleného rodinného prostředí. Avšak mnohé studie, které tvrdily, že spojily rysy chování s genetikou, byly žalostně nedostatečné na mnoha úrovních a odváděly pozornost lidí od vlivů prostředí a společnosti, které stojí v pozadí.<sup>278</sup>1 "Existuje mnoho falešných pozitivních zpráv: tvrdí se, že jediný gen způsobuje schizofrenii, maniodepresivní psychózu, máme gen alkoholismu, gen rozvodovosti a tak dále," říká Doug Wahlsten z univerzity v Albertě. "Pokud budeme pokračovat stejnou cestou, jakou jdeme dosud, hrozí nám rozsáhlé zneužívání tohoto výzkumu."

Jsme možná mnohem blíže, než si uvědomujeme, víře, že všechny sociální problémy mají své kořeny ve vadných genech. Garland Allen z Washingtonovy univerzity v St. Louis varuje, že snaha spojit genetiku s tak komplexním chováním by mohla znamenat novou kapitolu ve "zdrucující historii" zneužívání těchto poznatků.<sup>279</sup>2 Ve 20. a 30. letech vedla podobná tvrzení ke vzestupu eugenického hnutí ve Spojených státech, k nucené sterilizaci a k restriktivním imigračním zákonům. □ "Tento typ myšlení vedl i k nacistickému eu-genickému hnutí a k vyhlazení Židů v Evropě," tvrdí. "Současné studie nejsou ničím novým a jsou stejně zjednodušující jako studie z 19. století, které se snažily spojit fyzické rysy s kriminalitou. □ A přece, a to je znepokojující, tyto názory v naší vyspělé společnosti stále více převažují. Fixace na geny klade vinu za opakující se sociální a ekonomické problémy biologii jednotlivců, nikoli sociálním okolnostem."

---

<sup>278</sup> D. Wahlsten, American Association for the Advancement of Science, únor 1995. Stále se vracející téma v těchto studiích je absence dobře definovaného rysu. Inteligence, alkoholismus nebo kriminalita nejsou jednotlivé entity a nikdo nikdy nepřišel s jejich přesnou definicí.

<sup>279</sup> G. Allen, American Association for the Advancement of Science, únor 1995.

□ Viz S. J. Gould, Jak neměřit člověka, Lidové noviny, Praha 1998. (pozn. překl.)

□ Míni se zejména Césare Lombroso a jeho kriminální anatomie, (pozn. překl.)

Stejně omezený je redukcionismus v abstraktních světech matematiky. Gödelova věta definitivně ukázala, že platónské světy matematiky se nedají redukovat na konečnou abecedu symbolů, konečný počet axiomů a odvozovacích pravidel. "Kromě triviálních případů můžete rozhodnout o pravdivosti nějakého výroku pouze studiem jeho významu a jeho kontextu v širším světě matematických idejí," poznamenal Freeman Dyson z Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu.<sup>280</sup> Popisoval Gödelovu větu jako velké umělecké dílo, spíš jako konstrukci než redukcí: "Gödel ukázal, že v matematice je celek vždy více než souhrn částí." A aby k ráně, kterou redukcionisté utrpěli, přibyl další políček, Gregor Chaitin rozšířením Gödelových výsledků ukázal, že fyzikové nikdy nebudou schopni dokázat, že teorie všeho - komprese světa - je skutečně teorie konečná.

Komplexní systémy reálného světa se nechovají s hodinovou pravidelností a přesné dlouhodobé předpovědi o nich jsou často nesmyslné plácání. Komplexita moderní industrializované ekonomiky je taková, že nebude nikdy poslouchat prostoduché manipulace ministrů financí. Komplexita globálního klimatu je taková, že postupný nárůst úrovně skleníkových plynů nemá vždy za následek jeho postupný posun: může spustit náhlý obrat klimatu během jednoho lidského života.<sup>281</sup> Ani chování některých z těch nejjednodušších mechanických systémů se nedá popsat úplným a deterministickým newtonovským způsobem, což se dříve považovalo za možné. Neexistuje žádný jednoduchý algoritmus, k němuž bychom se mohli obrátit. Místo toho se musíme pokusit pochopit svět globálnějšíм způsobem, prostřednictvím vzájemného působení mezi jeho komponentami. Místo abychom se pokoušeli o deterministický, mechanický pohled na svět, potřebujeme k jeho pochopení širší perspektivu.

---

<sup>280</sup> F. Dyson, in *Nature's Imagination*, J. Cornwell (ed.) (Oxford University Press, Oxford 1995), str. 6.

<sup>281</sup> Protože náhlé klimatické změny během posledních 10 000 let nenastaly, vzkvétala lidská společnost s falešným pocitem bezpečí, jak tvrdí Wallace Broecker z Lamont Doherty Earth Observatory na Kolumbijské universitě. "Systém zemského klimatu má v sobě zneklidňující rys: je schopen přeskočit z jednoho modu fungování do jiného," říká. Důkazy z mořského dna, jezerních usazenin, z hlubin ledovců, z fosilních pylových zrn, korálů, pohybů v zalednění And a další záznamy shodně ukazují, že během poslední doby ledové, před 70 000 až 10 000 lety se klimatický systém země často měnil, a to často v rozmezí lidského života. Posuvy měly celosvětové důsledky: v severním Atlantiku teploty narůstaly a klesaly o 5°C i více, tropické srážky se dramaticky měnily, světové oceány cirkulovaly jinak, ledovce a zamrzlá moře se rozšiřovaly a měnila se koncentrace plynů v atmosféře." American Association for the Advancement of Science, únor 1995. Viz též Broecker, *Nature* 372, 421 (1994).

I život je emergentní vlastnost, to je taková, jaká se objevuje, když se fyzikálně chemické systémy uspořádávají a jistými způsoby na sebe vzájemně působí. Podobně je lidská bytost emergentní vlastností obrovského množství buněk, firma je víc než souhrn svých tužek, papírů, nemovitého majetku a personálu a město je emergentní vlastností tisíců nebo milionů lidských bytostí. A nikdo by neměl pochybovat, že naše nejnvtřnější myšlenky, naše emoce, láska a nenávisť jsou víc než vylučování nějakých hormonů nebo vysílání signálů jednotlivými neurony v mozku. Studium komplexity, díky důrazu na emergentní vlastnosti, se poněkud přibližuje k obnově rovnováhy mezi duchovní a materiální stránkou naší podstaty.

Můžeme vůbec doufat, že pochopíme takovéto vysoce komplexní emergentní vlastnosti? Někteří vědci se už vidí, jak si "hrají na Boha" s počítačem, například když konstruují uzavřené "vesmíry" celulárních automatů nebo provozují "řízenou" evoluci s použitím genetických programů, v nichž pravidla a míry zdatnosti jsou stanoveny zvnějšku. Není snad možné, že my sami tančíme podle nějaké neznámé melodie? Snad. Avšak každý jednotlivý nápěv je příliš komplexní, příliš neopakovatelný a příliš citlivý na minulost a na vnější události, aby se dal pochopit lépe než v hrubých obrysech.

Může to znít poraženecky. Poznání komplexity však může dojít docela daleko a pomáhá nám udělat si představu o světě tím, že poskytuje globálnější pohled na naši roli v něm. Ačkoli možná nejsme schopni přesně předpovídat dlouhodobé chování komplexního systému, nelineární dynamika ukazuje, že můžeme získat určitý vhlad do jeho globálnního chování - například prostřednictvím znalosti souboru atraktorů systému. Tyto poznatky mohou být základem znalostí pro budoucí rozhodovací procesy.

Náš vliv na planetu nebyl nikdy větší a potřeba rozumět tomuto vlivu nebyla nikdy tak neodbytná. Lidské aktivity dnes ohrožují a likvidují celé rostlinné a živočišné druhy, o nichž víme málo nebo vůbec nic. Kolik špatného zacházení ještě Země snese? Ekosystémy -jichž jsme součástí - jsou vysoce provázané sítě života, ovládané jemnými zpětnovazebními efekty. Možná, že již sedíme na ekologické časované bombě: destrukce přirozeného prostředí na celém světě, od deštného pralesa po tundru, může mít důsledky, které se nemusejí projevovat zvolna a plynule, ale přijdou náhle a skokem, a možná k tomu dojde rychleji než během pár desítek let.

1 druhy, které zdánlivě prospívají, jsou již možná odsouzeny k záhubě. Naznačuje to nelineární matematický model, který vyvinuli Robert May, Martin Nowak a David Tilman, kteří studovali rozmanitost rostlin, jež se vyvinuly v podmínkách travních porostů, konkrétně na starých polích a prériích přírodní rezervace Cedar Creek v Minnesotě.<sup>282</sup> Tito biologové rozpoznali, že být úspěšným druhem znamená více než být nejpočetnější. Být úspěšný v přežívání, to znamená mít schopnost využít novou lokalitu a adaptovat se na ni, když hrozí nebezpečí.

Model popisuje každý druh v této oblasti jako "metapopulaci", soubor malých, lokálních populací rostlin, které sice žijí na rozptýlených lokalitách, ale jsou propojeny svou schopností rozšiřovat semena a klíčit na vzdálenějších místech. Pozorování prováděná v Cedar Creeku naznačovala, že rostliny, které si vedly nejlépe v soutěži o zdroje, byly nejslabší z hlediska rozšiřování. Například prérijní trávy *Schizochyrium*<sup>□</sup> investují tolik úsilí do tvorby kořenů, že plodí poměrně málo semen. Tím, že tuto představu kompromisu mezi úspěšností v soutěži a rozšiřováním zabudovali do svého matematického modelu, dokázali autoři vypočítat vliv ztráty stanoviště na vymírání.

Model předpovídá, že ztráta rozmanitosti (tedy počtu druhů) bude malá, i když je zničena polovina přirozeného životního prostoru. Avšak jakkoli malý další úbytek životního prostoru přesahující 60 procent způsobuje velmi prudký nárůst počtu druhů, které zahynou. Přesto je tu také časový odstup několika generací mezi ztrátou životního prostoru a vyhynutím druhů. Když se to aplikuje obecněji, znamená to, že by to mohlo trvat desetiletí, než budeme svědky účinků dnešního úbytku deštného pralesa: zakládáme "dluh na vymírání". Částečným důvodem je to, že destrukce přirozeného prostředí nevyhladí jen existující populace, ale odstraňuje také potenciální místa pro kolonizaci. Nejpřekvapivější je předpověď, že ti neúspěšnější v soutěžení - organismy, které hrají v ekosystémech často dominantní roli -, mají největší pravděpodobnost, že vymizí. To jsou organismy, které předtím neměly potřebu přemísťovat se ze svého stávajícího životního prostoru.

Studium komplexity ukázalo také důležitost rozmanitosti a náhody při udržování schopnosti adaptivní inovace. Možná na tom závisí naše vlastní budoucnost i budoucnost planety. Lovelockova představa Gaie je tady užitečná: představuje metaforu, která výmluvně ukazuje, že

<sup>282</sup> D. Tilman, R. M. May, and M. Nowak, *Nature* 371, 65 (1994).

<sup>□</sup> Bluestem grass. Jedná se o typickou travu americké prerie, (pozn. překl.)

destrukce životního prostředí je totéž jako destrukce nás samých. Proto se musíme zabývat úbytkem deštných pralesů, zničujícím poklesem počtu druhů, ztenčováním ozonové vrstvy a globální změnou klimatu. Sjednocující vědecké studie komplexních živých systémů by měly pomoci podpořit nutnost globální akce na racionálním základě.

Počítačové simulace vedly k lepšímu pochopení komplexity klimatu, vymírání a ekosystémů. Podobně poskytují modely založené na počítačích vzhled do komplexních "ekologií" buněk, které chrání tělo před infekcí, a do toho, co se děje, když čelí takovému dravci, jakým je virus HIV. Během posledních pěti let byl zahájen ambiciózní projekt, který znamená v tomto přístupu skok vpřed, se značným pokrokem směrem k počítačové simulaci evoluce a tvorbě umělého života. Zároveň s tím, jak tak říkájící "provozuje biologickou evoluci ve sklenici od okurek", nám umělý život nastavuje pokřivené zrcadlo, v němž vidíme sebe sama. Hovoří k nám o životě, který by mohl být, spíše než o tom, jaký momentálně na Zemi existuje. Skutečně, jak jsme viděli, dá se již tvrdit, že jsme byli svědky zrodu alternativní, digitální životní formy vykulující z hlubin virtuálního světa zvaného Tierra.

Pohledy do nitra mozku, které jsme nastínili v předchozí kapitole, patří mezi nejvíce fascinující příklady efektivnosti moderních přístupů ke komplexitě. Dosavadní výsledky skýtají důvody pro opatrný optimismus, pokud jde o možnosti evoluce inteligentních strojů. Je ale důležité nenechat se příliš strhnout. Vše, čeho bylo dosud dosaženo, zdaleka nedokáže pojmut vrchol komplexity, kterým je vědomý myslící objekt. Zůstávají tu značné překážky. Základní atributy, jako jsou vidění, jazyk a strojový překlad, teprve čekají, až budou plně reprodukovány, natož aby byly sjednoceny do jediného zařízení. V příštích desetiletích značně pokročíme. Genetické programovací techniky budou splétat neuronové sítě do stále složitějších architektur. Dialog s vnějším světem prostřednictvím smyslů, tak jak to dělá Cog, tyto umělé mozky vytříbí. Nezadržitelný růst výpočetního výkonu se nakonec vyrovná výkonu mozku, ať už přijdou kvantové počítače nebo ne. A bude učiněn veliký skok v hledání správného prostředí, skutečné kultury, v níž by se živily a rostly umělé mozky tak, aby se jednoho dne mohly vyrovnat dynamické a fascinující komplexitě našeho vlastního mozku.

Můžeme očekávat, že se budou čím dál častěji používat evoluční metody založené na počítačích a směřované k určitému cíli, a to k vývoji "inteligentních" zařízení, která by vyhovovala našim potřebám.



Ale kdo rozhodne, co nám bude "vyhovovat"? Naše morální a etické standardy chování, nemluvě ani o samotné vědě, se vyvinuly a budou se vyvíjet nadále ve světle politických, sociálních a ekonomických okolností. Tyto faktory představují "seleční tlak" a do značné míry rozhodují o tom, co vyhovuje a co ne.

Takové "meta" procesy se odehrávají v myslích vědomých jedinců, tak jak ideje soutěží s jinými o nadvládu. V tomto kontextu jsou ideje tím, čemu Richard Dawkins říká mémy, zhruba řečeno jednotky, jimiž se přenáší kultura.<sup>283</sup> Mémy mají schopnost seberekopie, jak se šíří z jednoho mozku do druhého. Mezi mémy patří myšlenky, melodie a módní výstřelky. "Když školu zachvátí šílení po, řekněme, skákacích tyčích, papírových šipkách, Dračím doupeti nebo Pokémonech, má to docela podobný průběh jako epidemie spalniček," napsal Dawkins. "Módy a posedlosti následují jedna za druhou ne proto, že pozdější je správnější nebo lepší než ty dřívější, ale prostě jako každá epidemie, která školu postihne."<sup>284</sup> Jak poznamenal filozof Daniel Dennett, pojem mému je dobrý nápad, jak přemýšlet o myšlenkách, ale perspektiva, kterou nabízí, je poněkud znervózňující, ba dokonce děsivá. "Nevím, jak vy, ale od začátku mě moc neláká představa mého mozku jako hromady hnoje, v níž se líhnou larvy myšlenek jiných lidí, aby pak rozesílaly kopie sebe sama do informační diaspory."<sup>285</sup>

Dawkins nechce aplikovat svoji virovou metaforu na celou kulturu, veškeré vědění a všechny myšlenky. "Ne všechny počítačové programy se šíří proto, že jsou to viry," myslí si. "Dobré programy - textové editory, tabulkové kalkulátory a programy pro numerické výpočty - se šíří, protože je lidé chtějí. Počítačové viry se šíří téměř výhradně proto, že jejich programový kód říká ‚Rozšiřuj mě‘. Není pochyb o tom, že existuje spektrum, na jehož jednom konci je čistý virus, na druhém užitečný a vyloženě žádoucí program a někde mezi tím jsou snad návykové počítačové hry." Dawkinsova teorie sobeckého genu rozeznává podobné spektrum, od virových genů k užitečným genům, které umožňují zvířatům zdárně přežít. "Genetické instrukce ‚Postav rychlou, sexuálně přitažlivou antilopu s pevnou kostrou a bystrými

---

<sup>□</sup> Bylo již konstatováno, že velmi úspěšným sobeckým memem je pojem "sobecký gen", (pozn. překl.)

<sup>283</sup> R. Dawkins, *Sobeký gen*, Mladá fronta, Praha 1998.

<sup>284</sup> R. Dawkins, "Je náboženství pouhá choroba?", *The Daily Telegraph*, 15. prosince 1993.

<sup>285</sup> D. Dennett. *Consciousness Explained* (Allen Lane, London 1991), str. 202.

smysly' říkají ‚Rozmnož mě' jen ve velmi nepřímém smyslu, který se nám zdá mnohem méně myšlenkovitě jalový než jednoduché a přímočaré ‚Rozmnož mě' programů na virovém konci spektra,“ napsal. Věří, že v oblasti kultury se šíří novátorské myšlenky a překrásná hudební díla ne proto, že obsahují instrukce, které jsou otrocky prováděny, ale protože jsou báječná. "Díla Darwina a Bacha nejsou víry. Na druhém konci spektra volání televizního evangelizátora, ať mu lidé dají peníze na financování jeho volání po ještě větších penězích, je dost přímočaře přeložitelné jako ‚Rozmnož mě'."

Dawkins šel ve svých myšlenkách dále a pokusil se stanovit solidní rozlišovací znak mezi náboženskými idejemi, které považuje za "dost blízko virovému konci spektra", a idejemi vědeckými. Argumentuje, že náboženství přežívají ne kvůli cynické manipulaci kněží a rozhodně ne proto, že by byla pravdivá, protože přežívají stejně dobře různá náboženství, která si přitom navzájem odporují. "Náboženské doktríny přežívají, protože se o nich vypráví dětem ve věku, kdy jsou vnímavé, a tak, když děti vyrostou, postarají se o to, aby se zase jejich dětem říkalo totéž." Jinými slovy jsou podle Dawkinsova názoru náboženské představy zastávány z čistě epidemiologických důvodů.

Dawkinsův argument však naráží na obtíže. Je jistě pravda, že zatímco v oblasti náboženství spolu koexistuje a soupeří několik úspěšných odrůd, od judaismu, křesťanství a islámu po buddhismus a hin-duismus, k vědeckým mémům máme spíše vztah "všechno, nebo nic", a jedna ustálená teorie vylučuje po většinu času v dané oblasti více či méně všechny ostatní. Náboženské víry, tak jako politické ideje, jsou posuzovány každým jednotlivcem podle jeho či její předchozí zkušenosti, názorů a předsudků. Podle tohoto argumentu se očekává, že vědci budou věřit některým věcem spíše než jiným, protože pro ně mají lepší důkazy. Vědecké mémy budou úspěšnější tím spíš, čím víc dokážou správně vysvětlit a předvídat výsledky experimentů a pozorování - krátce, tato kritéria představují míru "zdatnosti" mému. V případě "nevědeckých" pojmů, jako je náboženství, neexistuje žádný objektivní metr nebo míra zdatnosti, podle kterého by se dalo provádět srovnání, a tak to, které ideje zvítězí, závisí na souboru nahodilých a subjektivních kritérii. Musíme tedy očekávat, že náboženství budou zahrnovat více nedokazatelných tvrzení než věda, zatímco takové disciplíny jako ekonomie leží někde mezi těmito krajnostmi.

Ekonomie je rozkročena nad předělem mezi přírodními a humanitními vědami. Ekonomické systémy mají nelineární rysy,

charakteristické pro komplexní dynamické systémy, ačkoli trh se velmi silně spojuje s nějakou formou finančního "přežití nejzdatnějšího". Existují objektivní měřítka ekonomického a finančního úspěchu, ať už států nebo firem, jako je hrubý domácí produkt, rozpočtový deficit, podíl na trhu, zisky a ztráty, výnosy a ceny akcií. A přesto je mnoho faktorů, na nichž tyto veličiny závisí, samo o sobě špatně definovaných. Katastrofa na Wall Street může být spuštěna finančním zemětřesením nebo pomlouvačnou kampaní. Víry a pověsti generované majiteli akcií, analytiky a spekulanty mohou přivodit fluktuace cen, akciových a devizových trhů, které se zase vrátí zpátky do objektivních měřítek "zdatnosti".

Je zajímavé všimnout si, že to ekonomům trvalo dlouhou dobu, než si uvědomili vnitřní podstatnou komplexitu svého předmětu. Po desetiletí se točilo ústřední dogma ekonomie kolem principů stabilní rovnováhy, způsobem naprosto analogickým aplikaci rovnovážné termodynamiky ve fyzice, chemii a dokonce biologii. Z týchž důvodů jako přírodovědci se mnoho ekonomů snažilo narazit veškerou ekonomiku na kopyto teorií, jejichž ctností je jejich matematická jednoduchost a elegance, spíše než jejich schopnost říci cokoli o tom, jak funguje ekonomie ve skutečném světě. Tímto způsobem infikovaly mémy klasických pojmů, založených na rovnováze, myšlení generací studentů přírodních věd a ekonomie dogmatem, že chování komplexního systému se dá vydedukovat prostým sečtením jeho součástí.<sup>286</sup>

Není to dávno, co lidé začali sledovat nový přístup k ekonomice, založený na evolučních a nelineárních principech. Robert May, mezi jinými, přizpůsobil své nástroje, které používá pro analýzu nelineárních dynamických jevů v biologii, k vyšetřování fluktuací cenných papírů, akciových trhů a směnných kurzů. Část triku v určování, zda jsou možné předpovědi, spočívá ve vývoji metod na zjištění charakteristických známek chaosu ve zdánlivě náhodných datech. Taková práce pomohla získat velmi důležitý důkaz, že komplexní chování finančních trhů je do jisté míry předvídatelné. Nelineární analýza a celé spektrum dalších technik, od neuronových sítí a fuzzy logiky k nelineární statistice, hledají ve finančních trzích zpeněžitelné pravidelnosti. V roce 1993 se odhadovalo, že až tucet firem vydělá

---

<sup>286</sup> P. Omerod, *The Death of Economics* (Faber and Faber, London 1994), str. 178.

každá více než 100 milionu dolarů na základě poradenství generovaného těmito metodami za použití počítačů. □

Nobelova cena za ekonomii za rok 1994 byla udělena za práci vykonanou v teorii her, padesát let poté, co von Neumann a Morgenstern publikovali svou knihu *Teorie her a ekonomické chování*. Noví laureáti Nobelovy ceny, Američané John Harsanyi a John Nash, spolu s Reinhardem Seltenem z Německa, hráli ústřední roli v zavedení teorie her jako mocného nástroje s aplikacemi sahajícími od ekonomie průmyslových jednotek přes mezinárodní obchod po teorii měnové politiky. Jeden příklad se týká strategií, které musí monopolní firma uvážit, když se pokouší zabránit potenciálnímu soupeři, aby pronikl na její trh. Jedna monopolní strategie by mohla spočívat v hrozbě cenové války, s cílem způsobit soupeři těžké ztráty. To se však může ukázat jako škodlivé i pro monopolistu, pokud nemá k dispozici důkladné finanční rezervy. A tak musí soupeř odhadnout, do jaké míry se dá této hrozbě věřit. A nebo může monopolista sledovat vstřícnější strategii. Nabídnutím vzájemné spolupráce se může vyvinout nějaký druh kartelu, který by udržoval zisky pro obě firmy prostřednictvím vysokých cen. Výhody matematického přístupu k takovým problémům dnes vstupují do širšího povědomí. Ve Spojených státech nyní připravuje Federální komise pro komunikace aukce radiových frekvencí na základě principů teorie her.<sup>287</sup>10

Jiné společenské "vědy" se obvykle neoznačují za vědecké, navzdory svému názvu. Nicméně sociální jevy jsou vtahovány do sféry vědecké analýzy díky metodám, vyvinutým pro studium komplexity. Dá se říci, že zájem sociálních věd o nelineární problémy se datuje od roku 1844, kdy Verhulst napsal logistickou rovnici pro rychlost růstu lidské populace, přičemž stavěl na Malthusových myšlenkách. Zvířecí a lidská společenstva jsou opravdu prosycená komplexní organizací, od mravenišť a včelích úlů po burzovní halu. Tyto sociální struktury můžeme považovat za otevřené a nelineární, plné zpětných vazeb a soutěžení. V mravenišťích se dělaly rozsáhlé studie strategií vyhledávání potravy a jejího následného sbírání a ukládání v zásobárnách. Dělal se

---

□ Skutečný vpád přírodních věd do ekonomie nastal kolem roku 1997. Explozivní růst nyní zaznamenává obor zvaný "ekonofyzika", který, jak název napovídá, spojuje metody teoretické fyziky s ekonomickými aplikacemi. Viz např. J.-P. Bouchaud and M. Potters, *Theory of Financial Risks*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000; H. E. Stanley and R. N. Mantegna, *Introduction to Econophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999. (pozn. překl.)

<sup>287</sup> The Economist, 15. října 1994.

pokusy modelovat "organický" růst živelně se zvětšujících měst na základě pojmu disipativních struktur, rozebíraného v 6. kapitole. Pro snazší pochopení našeho vlivu na životní prostředí se na počítači modeloval kompromis mezi levnou, vysoce znečišťující dopravou a nákladnými zelenými alternativami." Jiní používali nelineární modely k analýze vlivu přesunů obyvatelstva a zjistili, že dokážou vysvětlit formování rovnoměrných rozdělení skupin, ghett a neustálých migrací.

Dokážeme stanovit analogie mezi kritickými body spojenými se samoorganizací a chaosem, které se objevují v neživých procesech, jako je Bělousovova-Žabotinského rovnice, a určitými jevy, jež vznikají v lidských společnostech, jako jsou revoluce a zhroucení veřejného pořádku. Komplexní problémy lidského plánování často spočívají v určování priorit mezi úkoly o různém stupni naléhavosti a důležitosti: strategie byly v takových případech reprezentovány docela jednoduchým souborem pravidel; sama tato pravidla se mohou vylepšovat evolučními technikami, které používají metody genetického programování.

Komplexita lidské společnosti a jejích organizací je nesmírná. Efektivnost podnikatelských korporací a vládních agentur závisí na spolupráci jejich zaměstnanců. Avšak struktura a povaha nějaké organizace může vytvořit konflikt mezi zájmy instituce a zájmy jednotlivců uvnitř ní. Tento konflikt se dá pochopit na základě strategií používaných zúčastněnými stranami. V mnoha organizacích jsou lidé přemísťováni z jednoho pracovního zařazení do jiného během krátkého časového horizontu, možná tří let nebo méně. Jsou tedy tlačeni, aby podávali okamžité "výsledky", bez ohledu na dlouhodobější efekt pro organizaci. Mezi jiným to znamená, že nemusí být v zájmu jednotlivce za účelem osobního vzestupu spolupracovat s někým, s kým v budoucnosti s velkou pravděpodobností už nebude mít co do činění. Ale když se tak chovají, mohou jednotlivci způsobovat nevýslovné obtíže organizaci jako celku. Tady teorie her ukazuje, že by bylo lepší, aby lidé buď strávili delší dobu na určitém místě, nebo aby se udržovaly záznamy o tom, co se děje v oblasti jejich dřívější působnosti poté, co byli převedeni jinam (nebo aby se oba přístupy kombinovaly). Vedle svých aplikací ke specifickým otázkám teorie her obecně podtrhuje, kolik je v lidském chování iracionálního.

Komplexita lidských interakcí byla celé věky podporována technikami komunikace, které usnadňují výměnu informací na všech úrovních, od jednotlivců po vlády. Čím více se vyměňuje informací, tím

více se objevuje zpětnovazebních procesů, a tudíž obecně více komplexity. Počítačové sítě dnes proměňují povahu a rychlost takové komunikace a čistý objem přístupných informací. Abychom použili Dawkinsovu terminologii, tyto sítě povzbuzují rozmnožování mémů. Internet je dominantní superstrukturou spojující miliony osobních počítačů po celém světě. Jeden odhad se pokusil v polovině roku 1993 stanovit počet sesíťovaných počítačů na něco kolem 1,7 milionu, přičemž 17 milionů lidí užívá této služby. V době, kdy toto píšeme, vzrostlo uvedené číslo na 23 milionů. Z několika pohledů je aktivita na internetu velmi podobná paradigmátům, která jsme v této knize sledovali: vyvíjí se vysoce distribuovaná a nemá žádné centrální řízení. Má ale tu schopnost, že v ní vznikají emergentní jevy -struktury vzniklé díky výměně informací. Jak narůstá pohyblivost lidí a ekonomická aktivita se rozšiřuje po celém světě, nepotlačovaná fyzickými hranicemi, pokračuje štěpení zeměpisně lokalizovaných společností podle mnoha hledisek, podnikatelských, náboženských, kulturních, vědeckých, podle sociálních zájmů a způsobů trávení volného času. To činí z internetu významný prostředek k udržování identity - i když identity, která nemá tvář - v bažinách konfliktních činností. "Informační superdálnice", jak se tomu dnes říká, zažila během několika posledních let náhlý skok, se zavedením grafického rozhraní k World Wide Webu, které umožňuje multimedialní přístup k téměř neomezeným zásobám dat včetně vizuálních obrazů. □ Tyto lektroické pavučiny v pavučinách změni jednou provždy způsob života a fungování technicky pokročilých společností.

Často se má za to, že tradičnější a univerzálnější způsoby komunikace - prostřednictvím umění - jsou od vědy izolovány nebo stojí v zatvrzelé opozici. Všeobecně se má za to, že věda má sotva co říci o estetice malby, literatury nebo divadla jinak než ve strohém smyslu geometrických proporcí, textových editorů a jevištní techniky. Je to proto, že v newtonovské tradici se věda zabývala abstrahováním od vnějšího vzhledu "neredukovatelných matematických podstat" věcí a redukcionistickým způsobem se zaměstnávala nikoli celkem, ale spíše tím, z čeho se celek skládá. Poslední dobou pomáhá věda o komplexitě změnit toto nazírání.

---

□ Pokud jde o počet webových stránek, koncem roku 2000 se odhadoval na 2 miliardy, (pozn. překl.)

Setkali jsme se se zneklidněním básníka nad arogancí newtonovské fyziky ve verších Alexandra Popea, které uváděly 2.kapitolu. Redukcionistický materialistický světonázor vyprovokoval hluboké pohrdání ze strany lidí, jako byli Blake a Keats, ačkoli to nebylo vždy pravidlem. Když Mary Shelleyová napsala dílo, které je bezpochyby nejznámějším románem o umělém životě, Frankenstein, bylo to v kontextu debaty o vitalismu, která hýbala veřejností od roku 1814.<sup>288</sup> Co by se mohlo lépe vysmívat spiritualistům a podporovat materialistický světonázor než nedodělaný pokus Viktora Frankenstein oživit mrtvé tělo čímsi "přidaným navíc", analogickým elektřině?

Ve skutečnosti zůstalo vzájemné působení mezi uměním a vědou ve 20. století stejně silné jako dřív. V literatuře najdeme mnohé ozvěny Einsteinovy teorie relativity, například v Alexandrijském kvartetu Lawrence Durrella nebo ve Finnegan s Wake, kde si Joyce pohrává s Einsteinovým (Winesteinovým, jak mu říká) zjištěním, že světlo putující zakřiveným prostorem se může nakonec vrátit ke svému zdroji, takže se můžeme sami vidět zezadu.

Komplexita dnes ovlivňuje umění na několika úrovních. Jedna z hlavních postav této knihy, Alan Turing, poskytl inspiraci pro divadelní hru Hughu Whitemorea z roku 1986 Rozluštění kódu. Komplexita nabídl "kosmogenický" koktejl, namíchaný z fraktálních motivů, teorie katastrofa chaosu, který uchvátil představivost architektů.<sup>289</sup> Dokáže

---

<sup>288</sup> Gerard Weisbuch používal počítačový model zvaný Swarm, vyvinutý v Sante Fe Chrisem Langtonem. Počítač modeluje chování "agentů", ať už jsou to krvinky, státní podniky nebo jednotlivci. V tomto případě jsou to jednotlivci řízení neuronovou sítí. Trocha náhodnosti činí model ještě realističtější. Rozhodování agentů se zakládá na jejich zájmech a na získané informaci. Weisbuch ve své simulaci zkoumal komplikovanou rovnováhu mezi levnými znečišťujícími formami dopravy a dražšími "zelenými" variantami. Jednou z proměnných je, jak dlouho si lidé pamatují předcházející případy velkého znečištění. Jinou proměnnou je cena - každý bude používat zelenou technologii, pokud bude dostatečně levná. Model také dokáže indikovat, kdy je cenový rozdíl dostatečně velký na to, aby se rozběhlo podvádění: používání levných znečišťujících aut tam, kde je velká většina zelených. "Důležité je to, aby nastala situace s velkým nárůstem znečištění, aby lidé dokázali rozlišit dobré od zlého." G. Weisbuch, rozhovor s Rogerem Highfieldem, únor 1995.

<sup>289</sup> M. Butler, úvod k M. Shelley, Frankenstein or The Modern Prometheus ve vydání z roku 1818 (Oxford University Press, Oxford 1994). Butler se odvolává na to, jak se Shelleyová dozvěděla o debatě o vitalismu mezi dvěma praktickými lékaři, Johnem Abernethem a Williamem Lawrencem. Butler připouští, že náznaky, že Victor Frankenstein částečně paroduje Abernetha, zůstávají v říši dohadů.

Přináší však silné argumenty a zdůrazňuje, že jak Percy tak Mary Shellyová znali oba diskutující a že Lawrence byl jejich blízký přítel. Ve třetím vydání románu, roku 1831,

dotat zajímavý švih beletrii a poezii. Objevila se kreslená karikatura "chaotického matematika", který varoval před nebezpečím hrabáním se v DNA dinosaurů v Jurském parku Michaela Crichtona. Lorenzův motýl se třepetal v poezii Paula Muldoona. Komplexita pomohla také ztvárnit postavu Lemuela Falka, ruského chaologa s "tlustými mozolovitými prsty" a "změtí vlasů umazaných od popela, které dokážou vypadat jako šlehané větrem, i když žádný vítr není".<sup>290</sup> Vystupuje v Hostujícím profesorovi Roberta Littella, kde okouzloval sympozium konané v Praze svým usilovným hledáním čisté, nefalšované náhody: "Lemuel naprogramoval východoněmecký sálový počítač a vypočetl číslo pi na šedesát pět milionů, tři sta třicet tři tisíc, sedm set čtyřicet čtyři platných cifer (tehdy světový rekord), aniž by objevil jakýkoli náznak řádu v desítkovém rozvoji."<sup>291</sup> 14

*Arcadia*, divadelní hra Toma Stopparda z roku 1993, která obdržela literární cenu, byla také částečně inspirovaná nelineárními idejemi chaosu a fraktálu. Stoppard dokonce skutečně považoval proces psaní hry za proces literární samoorganizace. Akce ve hře přeskakují mezi dvěma stoletími a drží se detektivního příběhu, který se odvíjí od sítě korespondence mezi osobami žijícími v minulosti, kterou v současnosti špehuje jeden akademik bez skrupulí, rozhodnutý vypracovat o lordu Byronovi dostatečně senzační teorii, aby si vysloužila místo na stránkách bulvárních novin. Kombinuje také rozklady o pěstění anglických parků a počátcích romantismu s debatami o pokroku, zdokonalování, determinismu a svobodné vůli.

Nejbohatší myšlenky povstávají z vědeckých objevů, které nazřela mladá hrdinka hry, Thomasina Coverlyová, u nohou svého vychovatele roku 1809. Náhodou tak narazila na "geometrii nepravidelných tvarů", což je nejasná narážka na Mandelbrotovu fraktální geometrii, která je pro vědce synonymem podivných atraktorů. Jako divadelní kus skutečně vykazuje *Arcadia* do sebe poskládané odkazy na fraktální obrazce, jak v souhře mezi postavou a rekvizitou, tak v rezonanci mezi dialogem a doprovodnou hudbou. Stoppard přirovnává strukturu hry, kde akce přeskakují cikcak mezi minulostí a přítomností, k "nejprostšímu

---

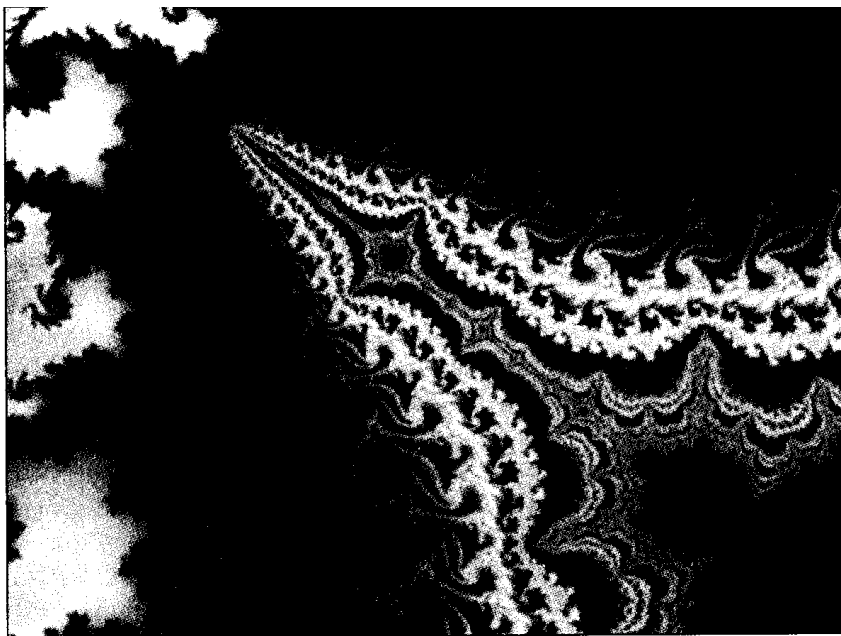
udělala Mary Shellyová z Frankensteinova nábožnější a sympatičtější postavu, kdežto jeho vědecké vzdělání představila jako cosi nebezpečného. Právě tuto verzi obvykle čtou dnešní čtenáři a právě z ní se vyvinul franken-steinovský mýtus o šíleném vědci a jeho strašlivém netvoru.

<sup>290</sup> Ch. Jencks, *The Architecture of the Jumping Universe* (Academy Editions. London 1995).

<sup>291</sup> R. Littell, *The Visiting Professor* (Faber and Faber, London 1993), str. 8.



možnému znázornění zdvojování periody". Poslední scéna je chaotická, a to v tom smyslu, že obě periody se projevují současně.



Obrázek 10.1 / Populární chaos. Mandelbrotova množina vytvořená v Chaos Laboratory ve Scarborough.

Stoppard vyvinul témata chaosu po konzultacích s Robertem Mayem, ředitelem Trevorem Nunnem a původním souborem Národního divadla. Jeden z Mayových doktorandů, Alun Lloyd, vyvinul pro postavu Thomasiny z Arcadie "množinu Coverlyové" pomocí jednoduché matematické formule, která generuje komplexní a "listovité" fraktální obrazce, po nichž se hrdinka pídila.<sup>292</sup> Počítačem generované fraktální obrazy, sahající od ultraabstraktních reprezentací objektů, jako jsou Mandelbrotovy a Juliovy množiny, až po realisticky vyhlížející biologické a fyzikální tvary, zdobí dnes plakáty a pohlednice, protože se lidem líbí (viz obr. 10.1). Mají svoji vnitřní krásu, která u mnohých vzbuzuje pocity podobné tomu, co zakoušejí, když pozorují přírodu a lidská umělecká díla, ať už realistická nebo abstraktní.

---

<sup>292</sup> T. Stoppard, *Arcadia* (Faber and Faber, London 1993), str. 47.

Na scénu přichází také digitální darwinismus: nová generace počítačově vzdělaných umělců používá techniky evolučního programování k vytváření nových forem umění. Jedním z vedoucích představitelů tohoto přistupuje William Latham, britský umělec, který pracoval ve výzkumu u IBM a je zakladatelem firmy Computer Artworks Ltd. Použil evoluční metody pro vypěstování mimozemských forem na počítači (viz obr. 11 barevné přílohy). Výběrem a šlechtěním těch, které jsou strašidelně přitažlivé vytvořil to, čemu říká "zahradu nezemských rozkoší". V jeho práci se nejen stírá rozdíl mezi tím, co je příroda a co je umění, ale ilustruje rovněž bohatou současnou symbiózu mezi uměním a vědou: program "Mutátor", který Latham vyvinul s matematikem od IBM Stephenem Toddem, je nejen schopen vytvářet umění evolucí, ale také navrhnout dům nebo parametry komerčně využívaných tabulkových kalkulátorů. Můžete pak zahrnout varianty, které se vám nelíbí, a vybrat ty, které chcete, a tak šlechtit vylepšené konstrukce. Latham například použil tento program k tomu, aby vypěstoval bohatý výběr obrázků budov pro virtuální předměstí v počítačových hrách nebo k vytvoření návrhu lahvičky od šamponu. "Mutátor navrhuje extrémní a subtilní tvary, na které by člověk možná nepřišel," poznamenal.

Obrazy, které vidíme v barevné příloze (obr. 12), vytvořil Karel Sims s použitím populace genetických programů vyvinutých "interaktivní evolucí". Počítač se užívá ke generování náhodných mutací v matematických rovnicích, o nichž se ví, že produkují pestré obrázky, a umělec pak aplikuje "estetický selekční tlak" a vybere pro přežití a následné množení ty, které považuje za nejpřitažlivější. Je to procedura dosti podobná té, kterou použil Richard Dawkins k vývoji svých biomorfů, jak jsme rozebírali v 8. kapitole. Po velkém počtu opakování této procedury se objevují pozoruhodně komplexní a spletité obrázky.

Na výstavě Genetic Images, která se konala v roce 1993 v Centre Pompidou v Paříži, použil Sims počítač Connection Machine k vyšlechtění náhodného výběru obrázků na oblouku tvořeném šestnácti velkými obrazovkami. Před obrazovkami byla umístěna speciální nášlapná čidla, která dovolovala návštěvníkům vybírat si obrázky, kterým dávali nejvíce přednost. Ty obrázky, které nebyly vybrány, byly pozabíjeny a nahrazeny mutanty vybraných pozůstalých. "Lidé v muzeu řídili evoluci," říká. "Byl to případ přežití esteticky nejzajímavějšího."

Sims dále pokročil ve své práci tím, že vyvíjel tvory, kteří mají jak formu, tak funkci. Jisté řídicí "geny" určují tvar, který je sestaven ze

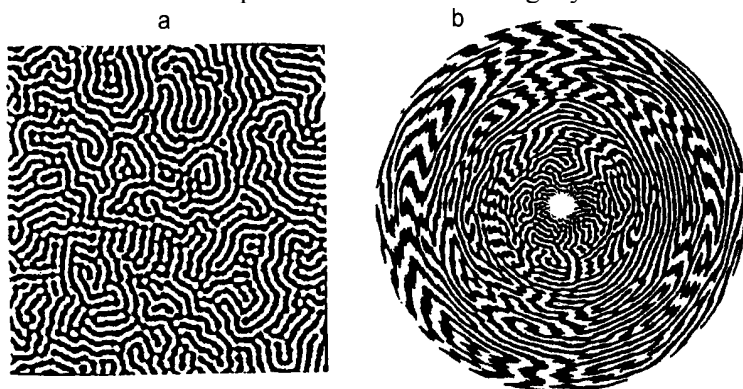
segmentů ve tvaru kvádrů, jako podobná, avšak vysoce zjednodušená verze toho, jak je utvářeno naše tělo. Další geny popisují zjednodušený program - mozek tvora -, který řídí jeho pohyb nebo reaguje na čidla, jež vnímají světlo, dotyk nebo úhel kloubu.

Simulovaná evoluce začíná populací 300 "tvorů", z nichž každý je sestaven náhodně z barevných kvádrů. Některé vypadají nudně. Několik z nich je bizarních, zatímco něco málo se jich křečovitě svíjí. Sims dokáže na superpočítači nechat vyvíjet mnoho generací tvorů a vybírá ty, které mají žádoucí charakteristiky, například schopnost bojovat, plavat nebo se přemisťovat (viz obr. 13 barevné přílohy). Je velice zajímavé, že během jeho prvních pokusů tvorové "podváděli". "Dělali to, co jsem po nich požadoval, ale ne tak, jak jsem chtěl," poznamenal Sims smutně. Vyvinuli se tak, že využívají chyb v programu, který byl zamýšlen tak, že se tvorové budou řídit zákony fyziky reálného světa. Jedna závada dovoľovala narušení Newtonova zákona zachování hybnosti. Po několika generacích se vyvinuli tvorové, kteří se sunou tak, že sami sebe tloučou některou končetinou. Jiní našli chybu v "integrátoru" - který řešil Newtonovy pohybové rovnice - a to jim umožňovalo pohánět sebe sama k fyzikálně nemožnému spěchu.

Sims užívá animovaného videa například k ukázce výsledku 100 generací sexuální reprodukce, jež dosáhl evolučního cíle stát se "dobrým plavcem". Někteří digitální tvorové se vyvinuli ve stvoření podobná hadům, kteří rejdují vodou. Jiní si osvojili vývrtkovitý pohyb nebo pohon ploutvovitými končetinami, "Jedním ze zajímavých aspektů simulované evoluce je to, že můžete udělat komplikovanější věci, než si dokážete představit," říká. "To naštěstí nemusíte." Sims spekuluje o tom, že by možná byl schopen vyšlechtit ještě podivnější tvory, kdyby je mohl vybavit smyslem pro krásu.

I zkušenosti "blízké smrti" se zkoumají za použití vědy o komplexitě. Jeden vysoce spekulativní pokus simulovat neuronové sítě umělé zážitky blízké smrti spočíval v tom, že síť vyvrhovala informace, které do ní vložili, nebo něco velmi podobného. Síti proběhl před očima její virtuální život. Jiné studie umělé smrti používaly počítačové nelineární dynamické modely pro výzkum zážitků, o nichž vyprávěla řada lidí a které sahají od vířících světelných tunelů k mimotělním zážitkům jedinečné intenzity, o nichž se často tvrdí, že nahlédly do života po životě. V Ústavu Maxe Plancka pro molekulární fyziologii v Dortmundu se Mario Markus pokoušel o formování organizovaných Turingových struktur ve zrakovém centru kůry mozkové s očekáváním, že tyto

obrazce mohou vést ke geometrickým vizím toho typu, jaký se objevuje v blízkosti smrti a během halucinací. S použitím vztahu mezi geometrií mozkové kůry a tím, jak je mapována na sítnici oka, je možné ze simulovaných obrazců odvodit, jak se budou člověku jevit. Markus analyzoval kresby vizí, zakoušených pod vlivem LSD, které vyjevují podivné spirály a čáry sbíhající se v jednom bodě. Počítač vydedukoval, že tyto vize by byly vytvořeny jednoduchými, zebru připomínajícími pruhy aktivity v kůře mozkové (viz obr. 10.2). Podobně tvrdil Markus, že vize tunelů se silným - někdo by řekl nebeským - světlem zářícím z protějšího konce, zakoušené v blízkosti smrti, jsou v souladu s tím, že nemoc nebo zranění poskládá v mozku Turingovy obrazce.<sup>293</sup> 16



Obrázek 10.2 / Halucinace. Obrazec na kůře mozkové vlevo (a) odpovídá viděnému obrazci vpravo (b).

Který jiný obor než komplexita má co říci o tak rozdílném spektru otázek od emergence, života, inteligence přes krásu a umění po smrt a zánik? Pouze filozofie. Je pravděpodobné, že věda o komplexních systémech bude mít velmi významný dopad na mnoho oblastí filozofického zkoumání, týkajících se našich vlastních životů. Jak jsme průběžně viděli, pojmy jako život, inteligence a vědomí je obtížné zachytit abstraktně. V minulosti byla těmto tématům věnována spousta dosti mlhavých spekulací. Avšak počítačové studie nyní nabízejí rámec, v němž můžeme vědecky studovat různé komplexní modely. Ty mají tu výhodu, že jsou přesně definované a výslovně uvádějí všechny učiněné předpoklady. Například současná filozofie má tendenci vyhýbat se

<sup>293</sup> M. Markus, "Hallucinations: Their Formation on the Cortex Can Be Simulated by a Computer," in: *Caos e Meta-Psicologia*, C. Dias and L. Ribeiro (ed.) (Fenda, Lis-bon 1994), str. 65.

pojmu emergentních jevů, ale modely umělých neuronových sítí ve stylu "zdola nahoru" jasně ukazují, že pozoruhodné schopnosti těchto sítí zpracovat informace jsou skutečně výsledkem jejich široce rozprostřené, masivně paralelní globální dynamiky.

Pak je zde velmi zajímavá otázka týkající se rozdílu mezi počítačovou simulací a realitou. V mnoha případech bychom si nespčetli simulaci fyzikálního nebo chemického procesu na počítači s procesem samotným. Počítačová simulace houpajícího se mostu není most. A přece jsou případy, kdy simulace opravdu produkuje výsledky, které vytvářejí jednu realizaci procesu, jenž je simulován. Jako jednoduchý příklad můžeme uvést počítačovou simulaci hudby. Argumentovali jsme, že není důvod, proč by za jistých podmínek počítače nemohly předvést i rysy inteligence a života.

Přijmeme-li fakt, že skutečný umělý život je možný, musíme uvážit významné morální a etické otázky týkající se lidstva jako celku. Co kdyby digitální organismy v simulaci umělého života skutečně byly živé? Máme právo těmto organismům ublížit nebo je zabít? Měli bychom mít právo provádět nepřirodní výběr pro konstruování žádaných forem života? A k jakým účelům?

Pro vědce je důležité, že komplexita obnovuje důraz na interdisciplinární výzkum v renesančním stylu a podtrhuje symbiózu vědy a techniky. Předložili jsme mnoho příkladů ilustrujících, jak plodný dovede tento přístup být, a rozhodně očekáváme, že tento trend bude pokračovat. Jeden ze snad nejvíce vzrušujících ukazatelů budoucího směru vědy přišel z prvních biochemických výpočtů, které možná znamenají zrození nového typu počítače. Kdyby byli naživu, aby u toho mohli být, byli by Alan Turing a John von Neumann určitě nadšeni pohledem na molekuly řešící složitý výpočetní problém. Protože molekula, o níž se jednalo, byla DNA, znamená tato práce také další setření rozdílu mezi počítači a živými bytostmi, což je další aspekt, který by schvalovali.

Myšlenka molekulárních výpočtů se táhne přinejmenším od roku 1959, kdy laureát Nobelovy ceny Richard Feynman pronesl přednášku o možnosti vytvoření submikroskopických počítačů. V předchozích kapitolách jsme diskutovali o dvou větvích této práce, jedné týkající se použití BŽ reakce k řešení problémů a druhé o teorii, návrhu a konstrukci kvantových počítačů. Nyní vyvinul počítačový expert Leonard Adleman z Jihokaliifornské univerzity novou cestu, jak využít další aspekt přírodě vrozeného paralelismu. V jeho experimentu se

používal masivní molekulární paralelismus k rozluštění jednoho případu problému zvaného "orientovaná hamiltonovská cesta", což je problém obtížnosti NP, který představuje nalezení speciální dráhy sítí pospojovaných vrcholů.

Hamiltonovská cesta prochází každým vrcholem právě jednou. Uvažme například tento soubor amerických měst: Atlanta, Baltimore, Chicago a Detroit. Předpokládejme, že přímé lety se konají pouze z Atlanty do Chicaga, z Chicaga do Detroitu, z Chicaga do Baltimoru a z Baltimoru do Detroitu. Problém orientované hamiltonovské cesty se dá formulovat takto: může si cestující rezervovat právě tři po sobě jdoucí lety - začínající v Atlante a končící v Detroitu -, které by jej dovedly do každého z těchto čtyř měst? V tomto případě snadno uvidíme, že řešením je letět z Atlanty do Chicaga, z Chicaga do Baltimoru a pak z Baltimoru do Detroitu. Ale jak je pro NP problémy typické, když počet měst a letů jen o málo vzroste, počet itinerářů, které je třeba vyzkoušet, se stává skutečně nepředstavitelným.

Molekulární počítač vyřešil tento problém hrubou silou a paralelismem. "Počítačový" kód sestával ze směsi bilionů kousků jednořetězcové DNA, z nichž každý kus představuje město nebo cestu. Mezi ohromným množstvím kombinací, které byly výsledkem pospojování komplementárních řetězců DNA, bylo nanejvýš pravděpodobné, že jedna kombinace odpovídá hledanému řešení. Na vylovení takové molekuly se pak použily standardní techniky molekulární biologie. "Řešení" se mezi ostatními molekulami dalo snadno rozeznat podle své délky a detailů svého složení.<sup>294</sup>17

Od té doby se ukázalo, že DNA dovede řešit další problémy, které vyžadují prohledávání velikého prostoru řešení, což je úkol, jenž by umohl každý konvenční počítač. A dnes se hledá praktický univerzální molekulární počítač, který by dokázal řešit jakýkoli vyčíslitelný problém. Jelikož DNA dokáže samozřejmě ukládat data a vyvolávat je, bude možná jednou navržena obecná molekulární metoda pro interakci s ní a pro interpretaci jejích dat. Taková práce by mohla lépe osvětlit, zda jsou biologické systémy skutečně komplikovanými výpočetními zařízeními, která zpracovávají informaci uloženou ve svých genech. Mohli bychom odhalit další podrobnosti o evoluci a získat větší vhled do vývoje komplexních biologických procesů, jako jsou ty, které běhají

---

<sup>294</sup> Počítače založené na výpočetních schopnostech DNA se budou skládat z mikročipu, který ponese tisíce jednoduchých sekvencí DNA, k nimž se budou vázat komplementární sekvence. Navázání lze detekovat, protože se tím 10 000 krát zvýší elektrická vodivost.

v našem mozku. A z technického hlediska, zatímco současné superpočítače jsou schopné provádět bilion operací za vteřinu, je myslitelné, že molekulární počítače mohou běžet mi-liardkrát rychleji. Stejně jako jsou o mnoho řádů energeticky účinnější, vyžaduje ukládání informace v DNA asi jednu biliontinu prostoru vyžadovaného dnešními záznamovými médii, jako jsou videokazety nebo CD-ROM.

Kdo ví, jaká úžasná symbióza vzejde z tohoto nového spojení přírodních věd a počítačů? Budoucnost bude čím dál tím víc sbližovat dvě témata, na nichž stojí tato kniha: sílu počítačů při simulaci komplexity a schopnost komplexních systémů, které se vyskytují v biologickém světě, řešit problémy. Představte si supermozek, sestavený z globální sítě DNA počítačů. Kdybychom ho nechali vyvíjet, vedl by takový mozek ke zrodu globální inteligence? Pokud ano, začala by nová éra evoluce.

# Dodatek: Čtení myšlenek

Počítač nám nejen dovoluje modelovat komplexitu mozku, ale také ho studovat do předtím nevidaných detailů. Doplňuje tak pokusy na zvířatech a výzkumy na lidech s poškozeným mozkem. Schopnost zpracovávat obrovská množství dat z řady čidel bylo součástí revolučního vývoje celého spektra účinných neinvazivních zobrazovacích technik. Zobrazovače mozku dosáhly nyní takové úrovně dokonalosti, že lze zachytit činnost obrovské sítě lidských neuronů až do poslední tisícininy sekundy. Technologie zobrazování nahlíží skrz lebku a odkrývá myšlenkovou krajinu mozku. Ačkoli takové metody nedokážou přesně říci, o čem daná osoba přemýšlí, mohou vidět, kde se myšlení odehrává a zda v něm není závada. O tyto funkcionální studie mozku se budou opírat neuronové sítě, a tak osvětlí jeho celkovou organizaci.

Nejstarší a nejrozšířenější metodou, která také nejméně spoléhá na počítač, je elektroencefalografie (EEG), snímaná elektrodami připojenými na temeno hlavy. Nedokáže ale přesně stanovit rozdělení elektrických proudů v mozku, protože okolní tkáň signál rozmazává. Nicméně EEG stále poskytuje cenné a často velmi zajímavé výsledky, poněvadž analyzuje obrazce nervové aktivity v časovém měřítku milisekund. Například výsledky pocházející ze studia EEG, provedeného Nathanem Foxem z Marylandské univerzity, ukazují, že elektrická aktivita v pravé hemisféře dětského mozku dokáže odhalit, zda z něho pravděpodobně vyroste člověk plachý a uzavřený. Je to poprvé, co se sociální chování spojuje přímo s fyziologickým faktorem.

Ve srovnání s novou generací zobrazovacích technik široce založených na počítačích je EEG poměrně hrubou formou čtení myšlenek. Dnes se používají dvě rozšířené techniky, zvané pozitronová emisní tomografie (PET) a funkcionální zobrazování magnetickou rezonancí (fMRI). Obě monitorují úroveň aktivity mozku tak, že měří hlad mozkových buněk po krvi.



Metoda PET je rozšířenější a poskytla některé z prvních pohledů na pracující mozková centra zvýrazněním nepatrných změn průtoku krve, k nimž dochází při myšlení nebo po požití drogy, jako je alkohol.<sup>295</sup>

V typickém uspořádání osoba, jejíž hlava je umístěna v detektoru radiace ve tvaru americké koblihy, dostane injekci malého množství vody označené rychle se rozpadajícím a neškodným radioaktivním izotopem kyslíku,  $^{15}\text{O}$  (viz obr. A.1). Při rozpadu nestabilního jádra  $^{15}\text{O}$  je emitován pozitron (kladně nabitá antičástice k elektronu); tento pozitron se okamžitě srazí s elektronem, což vede k anihilaci částice a k produkci dvojice silně korelovaných fotonů, které opouštějí místo srážky v přesně opačných směrech. Během minuty se tato voda dostane do mozku rychlostí, která závisí na lokálním přísunu krve. Čím silnější je tok krve, tím větší je úroveň radioaktivity krve v mozku, a tedy tím více elektromagnetického záření snímaného PET detektorem.

Metoda PET zvýraznila neobyčejnou schopnost mozku prosít a odfiltrovat informace o stálých a neměnných rysech vnějšího světa získávaných z posouvajících se světelných obrazců vrhaných na sítnici. Podle jednoho z předních vědců zkoumajících vidění, Semira Zeki z University College z Londýna, takové otázky dělají z tohoto oboru stejně tak filozofickou jako přírodovědeckou záležitost.

Vlnové délky světla odraženého od povrchu předmětu se nesmírně mění v závislosti na tom, zdaje osvětlen padesátiwattovou žárovkou, denním světlem, světlem soumraku či jinak. Přesto většinu předmětů přisuzujeme stálou barvu: tráva, která byla zelená ráno, se večer zdá pořád zelená. Tento paradox zaměstnával velké postavy vědy a filozofie, jako byli Newton, Young, Maxwell, Helmholtz, Goethe, Schrödinger a Wittgenstein. Když se na počátku 20. století studovali pacienti s poškozeným mozkiem, kteří ztratili barevné vidění, spekovalo se o tom, že mozek má "centrum barvy". Až donedávna byl tento názor odmítán, avšak Semir Zeki našel takové centrum při studiu maki a později to bylo potvrzeno doplňkovými studiemi vnitřního fungování lidského mozku pomocí PET. Ve spolupráci s Richardem Frackowiakem z cyklotronového oddělení Rady pro lékařský výzkum v Hammersmithově nemocnici v západním Londýně srovnával Zeki

---

<sup>295</sup> PET byla použita při zkoumání vlivu alkoholu na činnost mozku a na rozdíly v mozkové aktivitě těch, kteří alkoholu holdovali, a těch, kdo nikoli. "Ti, kdo tíhli k alkoholu, měli aktivnější levou stranu mozku, zejména spánkový lalok," říká Malcolm Cooper, ředitel PET centra v Chicagu. Zjistil se také prudký nárůst me-tabolické aktivity v řečovém centru, což naznačuje, proč pijáci tolik mluví, a me-tabolický útlum v mozečku, který koordinuje pohyby, což je důvod, proč se opilci potácejí.

aktivitu mozku, když se osoba dívala na abstraktní Mondrianovu malbu, která byla pestrá, ale neobsahovala rozeznatelné formy, a když se dívala na jeho černobílou reprodukci. Tímto způsobem bylo objeveno centrum

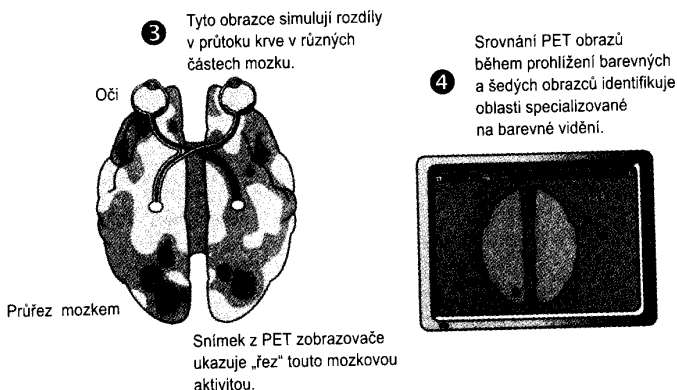
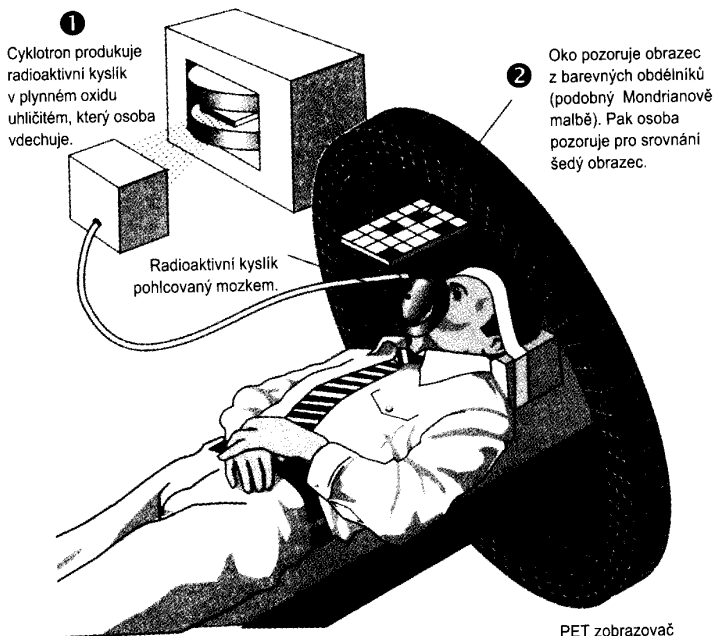
barvy, oblast v zadní části mozku, která slouží očím jako laboratoř na zpracování barvy. Zeki pak pokračoval tím, že demonstroval oddělené oblasti pro zpracování pohybu, čímž potvrdil svou domněnku, že barva, tvar, pohyb a možná další atributy viditelného světa se v mozku zpracovávají odděleně.

Tyto studie představují spoustu tvrdé experimentální práce, mají ale své nevýhody: měření s použitím PET probíhá pomalu a člověk je přitom vystaven radiaci.

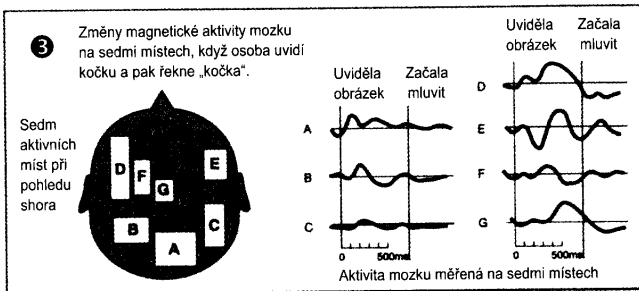
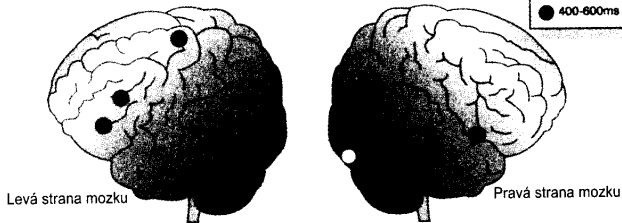
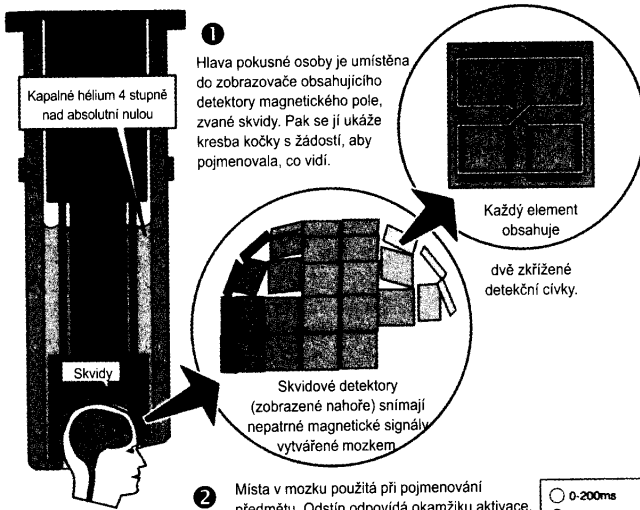
Štafetu určitě převezme metoda MRI, protože poskytuje poměrně vysoké prostorové a časové rozlišení. Zobrazování magnetickou rezonancí (MRI = Magnetic Resonance Imaging) se používá ke studiu struktury lidského těla již více než deset let. Aplikovalo se se značným úspěchem při vyhledávání nádorů a studiu měkkých tkání, na rozdíl od kostí, zviditelňovaných obyčejnými rentgenovými paprsky. K provádění experimentů s MRI je nezbytné magnetické pole, které je desítkatisíckrát silnější než magnetické pole Země. V tomto poli se atomová jádra nesoucí magnetický moment srovnají stejným směrem. Když na tento vzorek pošleme rádiové vlny o správné frekvenci, dá se dosáhnout toho, že tato atomová jádra převrátí svou orientaci vzhledem k magnetickému poli. Jádra vodíku neboli protony, kterých je přirozeně spousta jak ve vodě, tak v organických molekulách po celém těle, jsou mezi těmito rezonátory jedny z nejcennějších. Když se vodíkové jádro převrací, absorbuje rádiové vlny. Přesná frekvence této absorpce poskytuje informaci o vlastnostech molekuly, v níž se proton nachází. Kromě toho intenzita signálu je úměrná koncentraci protonů v daném prostředí.

Prvním, kdo si v roce 1937 všiml, že přítomnost kyslíku dramaticky mění magnetické vlastnosti krve, byl již zesnulý Linus Pauling. Skupina vedená Seiji Ogawou v Bellových laboratořích v New Jersey roku 1990 ukázala, že tyto změny se dají v mozku mapovat s použitím MRI. Silné vnější magnetické pole použité při měření způsobuje srovnání atomových magnetů železa v hemoglobinu, červeném krevním barvivu, které roznáší kyslík po těle. Lokální magnetické pole v okolí hemoglobinu způsobuje charakteristickou změnu rádiového signálu vysílaného blízkými protony, což se pak projeví při měření. Protože pouze hemoglobin, který je zbavený kyslíku, může být takto

zmagnetován, je tento efekt vidět především u krve vracející se k srdci a ne u krve, která směřuje do mozku. Tyto komplikované jevy mohou odhalit změny v přísunu krve do oblastí v mozku měřících pouhý jeden milimetr, ačkoli stejně jako u PET je časové rozlišení příliš pomalé na to, aby byla vidět dynamika činnosti neuronů.



Obrázek A.1 / Na cyklotronové jednotce Rady pro lékařský výzkum v Hammersmithu v západním Londýně se používá PET zobrazovač k odkrývání "laboratoře na zpracování barev" v mozku.



Obrázek A.2 / Než řeknete "kočka", b  j v m  as. Zatímco pokusn  osoba spatřila kočku a vyslovila slovo "kočka", pozorovali Finové prostřednictvím svého zobrazovače procesy odehrávajících se v mozku:

0 sekund: pokusn  osobě se uk ze obr bek kočky; 0-200 milisekund: aktivují se ře ov  oblasti mozku, stále poblíž zadní části hlavy; 500 milisekund:  eln  ře ov  oblasti se aktivují, zejména ty, které se zam stn v j  formováním jména, kter  lze vyslovit (ačkoli se předpokládá, že p  zpracování řeči převažuje levá strana mozku, zjistilo se, že jsou aktivn  obě strany); 500-800 milisekund: jsou aktivovány motorick  oblasti mozku, kter  řid  svaly hlasivek a  st; 830 milisekund: osoba řik  "kočka".

S použitím této techniky odhalil jeden velký americký tým, že pokud jde o zpracování řeči, jsou mozky mužů organizovány jinak než mozky žen. V jiné práci byli Xiaoping Hu a jeho kolegové v Centru pro výzkum magnetické rezonance Minnesotské univerzity svědky toho, jak pracuje představivost. Měření ukázalo, že centra v mozku zodpovědná za vidění byla aktivována, když osoba zapojila svou představivost, ačkoli mozková aktivita byla přibližně poloviční oproti tomu, když se skutečně dívala. Tentýž tým odhalil podobný jev v mozkových centrech zpracovávajících zvuk, když osobu požádali, aby si představila, že slyší slova. A našli také část mozku, která se účastní tvorby myšlenkového obrazu nebo mapy, umístěné ve štěrbině mezi temenním a týlním lalokem. Tato oblast mozku byla objevena, když byly osoby žádány, aby si představily, že procházejí svým vlastním domovem. V jednom případě se zjistilo, že japonský řidič taxi, který ztratil schopnost orientace po utrpěném zranění mozku, má tento orgán poškozený v téže oblasti.

Mozková aktivita naskakuje fantasticky rychle. Například od okamžiku, kdy je obrázek promítnut na plátno, to trvá kolem třiceti milisekund, než dospěje do oblastí mozkové kůry specializovaných na zpracování vizuální informace. Do nynějška byla většina přístrojů příliš pomalých, než aby chytila myšlenku v letu. Už tomu tak není. Riitta Salmelinová a její kolegové z Technické univerzity v Helsinkách předvedli převratnou ukázkou toho, jak můžeme vidět myšlenku jako vlnu neuronové aktivity běžící ze zadní strany mozku k čelu po obou hemisférách (viz obr. A.2). V jejich studii provádělo šest osob činnost, kterou všichni dobře známe, totiž pojmenovávání obrázků - například říci "kočka", když vidíme kresbu kočky. Měření se opírá o rychle se měnící magnetické pole generované elektrickou aktivitou v mozku člověka, který je při vědomí. Metodě se říká magnetoencefalografie, MEG, a byla ve svém principu poprvé předvedena roku 1968, když David Cohen z Massachusettské techniky ukázal, že je možné zaznamenat magnetické signály generované elektrickými proudy tekoucími v mozku. Tato technika obchází hlavní problém při použití EEG, kterým je rozmytí elektrického signálu způsobené rušící tkání. Magnetické pole prochází nemagnetickým materiálem, jako je mozek, bez jakékoli deformace, a tak umožňuje monitorovat rychlé změny nervové aktivity během až jedné milisekundy.

Tato technika již naviguje ruku chirurgů v oddělení fyziologie a biofyziky v Lékařském centru Newyorské univerzity, které vede

Rodolfo Llinas. Doufají, že v nejbližší budoucnosti budou chirurgové schopni odhalit umístění center řeči a mnoha dalších funkcí mozku a pak provozovat své techniky s "digitálním skalpelem", aniž by doslova pacientovi zkřivili vlas na hlavě. Zprohýbané záhyby živoucího mozku se obnaží konvenčním měřičem MRI. Pak se použije MEG k odhalení center, která v mozku pracují, v tomto případě těch, jež ovládají prsty. MEG může ukázat, jak několik tisícín vteřiny předtím, než pacient začne pohybovat svým pravým ukazováčkem, nervové buňky v pohybové oblasti mozku posílají příkazy k pohybu zúčastněným svalům. Druhý obrázek, sejmutý čtyřicet tisícín vteřiny později, odhaluje, že další oblast zpracovává informace ze svalů a kloubů o tom, že prst se hýbe. "Je to absolutně fascinující," říká Llinas. "Vidíme v reálném čase, jak mozek pracuje."

# Slovníček pojmů

**Adaptace** Jakákoli změna struktury nebo funkce organismu, která mu umožňuje přežít a efektivněji se rozmnožovat ve svém prostředí.

**Adaptivní krajina** Představa navržená biologem S. Wrightem, zviditelňující závislost stupně adaptace na parametrech organismu, jako jsou délka nohou, hustota srsti a podobně. Odpovídá pojmu krajiny zdatnosti.

**Algoritmická složitost** Míra složitosti či komplexity problému, daná velikostí nejmenšího programu, který jej vypočte, nebo jeho úplného popisu. Jednodušší věci vyžadují kratší programy.

**Algoritmus** Procedura nebo posloupnost kroků, kterou lze použít k řešení vyčíslitelného problému. V informatice popisuje logickou posloupnost operací, jež mají být provedeny nějakým softwarovým programem. Ne všechny matematické problémy mají vyčíslitelná řešení.

**Aminokyseliny** Molekulární stavební jednotky bílkovin.

**Animáti** Umělá zvířata, skládající se ze softwaru a hardwaru.

**Aritmetika** Odvětví matematiky, které se zabývá studiem čísel a jejich vlastností.

**Asociace** Schopnost nacházet vztah mezi různými informacemi. Asociativní paměť je taková, která když dostane ne zcela úplný vstup, dokáže jej přiřadit odpovídajícímu úplnému souboru uložených dat. Umělé neuronové sítě vykazují tuto schopnost.

**Assembler** Přesněji jazyk assembleru, je jazyk, který je v počítači obvykle na nejnižší přístupné úrovni a ve své nejjednodušší formě odpovídá jednoznačně strojovému kódu, který vydává instrukce přímo mikroprocesoru, má však i další schopnosti. Je převáděn do strojového kódu programem zvaným assembler.

**Atraktor** Popisuje dlouhodobé chování systému. Rovnovážné a stacionární stavy odpovídají atraktorům, které jsou pevnými body, periodické stavy atraktorům, jež jsou limitními cykly, a chaotické stavy podivným atraktorům.

**Autokatalýza** Katalýza reakce jedním z jejích vlastních produktů.

**Axon** Dlouhé vlákno vybíhající z neuronu a přenášející signál k jiným neuronům.

**Bělousovova-Žabotinského reakce** Chemická reakce pojmenovaná po dvou ruských vědcích, která vykazuje pozoruhodné bohatství samoorganizovaných rysů.

**Bifurkace** Větvení, při němž má systém k dispozici dvě různé volby. V případě reakce u chemických hodin může bifurkace označovat takovou koncentraci reagentů, při jejímž překročení se objeví periodické změny barev odpovídající chemickým hodinám.

**Bílkovina** Třída velkých molekul vyskytujících se v živých organismech, skládající se z řetězce aminokyselin, svinutých do složité, avšak dobře definované prostorové struktury.

**Binární klasifikátor** pro genetické algoritmy, kde se řešení problému klasifikace vyjadřuje jako binární řetězec informace. Každý bit představuje přítomnost (1) nebo nepřítomnost (0) určité vlastnosti stejným způsobem, jako chromozom obsahuje geny odpovídající přítomnosti bílkoviny v těle.

**Bit** Složenina z binary digit. Jeden bit je nejmenší jednotkou informace ve dvojkové číselné soustavě. Hodnota jednoho bitu je obvykle udávána jako jednička nebo nula.

**Bruselátor** Zjednodušený teoretický model chemické reakce vykazující samoorganizované struktury - jako například pravidelné barevné změny v průběhu času.

**Buňka** Oddělená část živé hmoty, uzavřená membránou. Nejmenší jednotka schopná nezávislé existence.

**Byte** Skupina osmi bitů, která tvoří základní jednotku počítačové paměti.

**Celulární automat** Počítačový program nebo hardwarové zařízení, skládající se z pravidelné mřížky či pole buněk. Každé buňce je přiřazen soubor instrukcí prostřednictvím algoritmu, který říká, jak odpovídat na chování sousedících buněk, jak automat postupuje od jednoho okamžiku diskrétního času k následujícímu.



- Centrální výpočetní jednotka (CPU)** Nejdůležitější součást počítače, v níž se vykonávají instrukce.
- Detektor význačného rysu** Skupina neuronů, která se aktivizuje pouze tehdy, když je ve smyslovém vstupu přítomen určitý rys.
- Determinismus** Doktrína učící, že události jsou plně určeny předcházejícími příčinami a nejsou ovlivněny svobodnou vůlí nebo náhodnými faktory.
- Diferenciální rovnice** Rovnice obsahující okamžitou rychlost změny jedné veličiny vzhledem k druhé. Například Newtonovy pohybové rovnice jsou diferenciální rovnice spojující sílu působící na těleso s okamžitou rychlostí změny jeho rychlosti s časem.
- Disipativní struktura** Organizovaný stav hmoty, vznikající za prvním bodem bifurkace, když je systém udržován daleko od termodynamické rovnováhy.
- DNA (kyselina deoxyribonukleová)** Velmi velká molekula nukleové kyseliny, nesoucí genetický stavební plán pro konstruování a sestavení bílkovin, základních stavebních bloků života.
- Dopamin** Nervový přenašeč (neurotransmitter), který přenáší impulzy mezi neurony v mozku.
- Dopředně neuronové sítě** Sítě, jejichž architektury jsou takové, že neurony se dají rozdělit na vrstvy, kde nervová aktivita v jedné vrstvě může ovlivňovat aktivitu pouze v následující (nikoli předcházející) vrstvě. Říká se jim také mnohvrstvé perceptrony.
- Dvojková (binární) logika** Systém, v němž proměnné mohou nabývat pouze dvou různých hodnot, které se obvykle berou jako nula a jednička.
- Dynamické systémy** Obecný výraz pro systémy, jejichž vlastnosti se mohou měnit s časem.
- Efekt motýlího křídla** Vyskytuje se u dynamických systémů v chaotickém režimu. Spočívá v tom, že nepatrná změna výchozích podmínek vede zakrátko k obrovské změně chování. V důsledku toho se systém chová prakticky nepředvídatelně.

- Ekonofyzika** Aplikace metod teoretické fyziky k řešení problémů v ekonomii. Využívá mezi jiným teorii spinových skel, umělých neuronových sítí, kritických jevů a samoorganizovaného kritična.
- Emergence** Povstávání, vznik nové kvality v důsledku samoorganizace rozsáhlého souboru jednoduchých jednotek.
- Emergentní vlastnost** Vlastnost souboru neodvoditelná z vlastností jednoduchých stavebních součástí, ale povstávající prostřednictvím samoorganizace. Např. inteligence je emergentní vlastností souboru neuronů.
- Entropie** Veličina, která určuje schopnost systému vyvíjet se nevratně v čase. Volně řečeno můžeme považovat entropii za míru náhodnosti či nepořádku v systému.
- Enzym** Biologický katalyzátor, skládající se obvykle z velké molekuly bílkoviny, která urychluje zásadní chemické reakce v živé buňce.
- Epilepsie** Funkce poruchy mozku, charakterizované občasnými, vracejícími se záchvaty, způsobenými lavinovitým aktivováním velkého množství neuronů.
- Eugenika (řecky dobře narozený)** Studium způsobů, jak se fyzické a duševní kvality lidí dají řídit a vylepšovat selektivním šlechtěním.
- Evoluce** Obecný termín pro rozvoj chování v průběhu času. V biologii je to darwinovská teorie, podle níž vyšší formy života povstaly v průběhu času z forem nižších.
- Evolučně stabilní strategie** Sestava fyzických a behaviorálních charakteristik (souhrnně strategie v teorii her) populace, která je rezistentní vůči nahrazení jakoukoli jinou formou nesoucí jiné znaky, protože tyto nové znaky nebudou schopné úspěšného rozmnožování.
- Expertní systém** Počítačový program, který používá přímo zakódované lidské znalosti k tomu, aby řešil komplexní problémy, jako je diagnóza nemoci nebo interpretace zákonů. Také se nazývá systém se znalostní bází.
- Fázový přechod** Typickým příkladem je změna fyzikálního stavu látky z tuhé látky v kapalinu, z kapaliny v plyn nebo z tuhé látky v plyn.
- Fenotyp** Celkové vlastnosti organismu, vznikající vzájemným působením jeho genotypu s okolním prostředím.

**Feromagnetický materiál** Materiál, který se silně zmagnetuje, když je vložen do vnějšího magnetického pole. Příklady jsou železo, kobalt, nikl a jejich slitiny.

**Flop** U počítače jedna operace s čísly s plovoucí desetinnou čárkou - tedy operace, která se dá aplikovat na reálná čísla, jejichž desetinná čárka může být v jakékoli pozici. Numerický výpočetní výkon počítače se dá měřit ve flopech - počtu operací s čísly s plovoucí desetinnou čárkou, které dokáže vykonat za vteřinu.

**Formalismus** Filozofická doktrína přijatá německým matematikem Davidem Hilbertem, podle níž symboly obsažené v matematických výrocích mají strukturu s užitečnými aplikacemi. Srovnej s intuitionismem, logicismem a platonismem.

**Fraktální geometrie** Z latinského slova fractus, zlomený. Geometrie používaná k popisu nepravidelných obrazců. Fraktály vykazují charakteristickou soběpodobnost, nekonečnou posloupnost motivů v motivech, opakovaných na všech délkových škálách.

**Frustrace** Termín používaný ve fyzice spinových skel a používaný také u interakcí v některých typech neuronových sítí, označující tendenci k tomu, že v interakcích spinu či neuronů se vyskytují konfliktní požadavky. V prvním případě vzniká kvůli existenci jak feromagnetických, tak antiferomagnetických interakcí mezi spiny.

**Funkce nákladů** U komplexních optimalizačních problémů měří, jak dobré je každé jednotlivé řešení - čím nižší je hodnota této funkce, tím je řešení lepší. Funkce nákladů převrácená vzhůru nohama, takže výše znamená nyní lépe, se také nazývá funkce zdatnosti.

**Fuzzy logika** V matematice a výpočetní technice je to forma reprezentace znalostí, vhodná pro svou podstatou nepřesné pojmy, jako jsou teplý a studený nebo dobrý a špatný, které mohou záviset na tom, v jakém kontextu se používají.

**Gaia** Řecká bohyně Země. Pramatka.

**Gen** Jednotka dědičnosti, tvořená částí molekuly DNA, zodpovědná za předávání specifických rysů z rodičů na potomstvo. Genetický algoritmus Adaptivní výpočetní metoda, která vyhledává dobrá řešení komplexních problémů (typu NP), s použitím představ založených na darwinovské evoluci.

- Genetický kód** Posloupnost chemických stavebních jednotek DNA (bází), které vyjadřují instrukce ke tvorbě bílkovin z aminokyselin. Genotyp Genetická výbava jednotlivce.
- Geologický čas** Časová škála zahrnující historii Země, od jejích fyzikálních počátků po dnešek.
- Geometrie** Odvětví matematiky, zabývající se vlastnostmi prostoru.
- Giga** Předpona znamenající násobení 1 000 000 000.
- Glukóza** Cukr přítomný v krvi, který je zdrojem energie pro tělo.
- Gödelova věta** Jedna z nejdůležitějších vět matematické logiky, tvrdící, že je nemožné redukovat matematiku na konečný soubor axiomů a pravidel.
- GOFAI** Zkratka pro Good Old-Fashioned Artificial Intelligence neboli stará dobrá umělá inteligence, což je přístup typu shora dolů, který se snaží rozčlenit inteligenci do oddělených modulů, zabývajících se specifickými typy vědomostí a informací, jako jsou vnímání, plánování a provádění akcí. Každý z těchto modulů je vybaven explicitními modely vnějšího světa a předpokládá se, že interagují prostřednictvím logických pravidel v rámci "odvozovacího stroje", takže vytvářejí inteligentní chování. Expertní systémy jsou výtvozem GOFAI filozofie.
- Gradient** koncentrace Změna koncentrace látky od jednoho místa k druhému, dělená vzdáleností těchto míst.
- Hardware** Fyzické části počítačového systému, obvykle sestávající z mechanických, elektronických a optických komponent.
- Hebbovské pravidlo učení** Pravidlo, podle něhož je synaptický spoj zesilován všude tam, kde dva spojované neurony vysílají současně signály. Používá se jak v biologických, tak v umělých neuronových sítích.
- Hemisféra** Jedna strana, levá či pravá, kůry mozkové.
- Homunkulus** Vnitřní človíček, o němž se kdysi dohadovali, že sídlí v hlavě, pozoruje okolí prostřednictvím smyslů a vhodně reaguje. Je mu přehráváno takzvané karteziánské divadlo myslí.
- Hydrodynamika** Věda o makroskopickém chování tekutin, synonymum pro mechaniku tekutin.

**Hypercyklus** Hypotetický scénář původu sebereplikujících se soustav molekul. Tyto replikační cykly řízené chemickými schémata obsahují katalytické zpětnovazební smyčky, v nichž molekula A vyprodukuje molekulu B, která vyprodukuje molekulu C, jež vyprodukuje molekulu A a tak dále.

**Hypotéza Gaia** Předkládá představu, že živé a neživé součásti Země tvoří neoddělitelný celek, který je regulován a neustále se adaptuje k životu složitými zpětnovazebními procesy.

**Chaos** Termín používaný k popisu nepředvídatelného a zdánlivě náhodného chování v dynamických systémech. Jeho nejdůležitější známkou je extrémní citlivost k počátečním podmínkám neboli tzv. efekt motýlího křídla.

**Chromozom** Dlouhý úsek nukleové kyseliny, většinou DNA, obsahující tisíce genů, uzavřený v ochranném obalu. V lidských buňkách, kromě vajíček a spermií, je jich třiadvacet párů.

**Integrovaný obvod** křemíkový čip, malý kousek polovodiče, jako je křemík, který je vyroben tak, že obsahuje úplný elektronický obvod.

**Intuicionismus** Filozofická doktrína říkající, že matematika se nedokáže zabývat vlastnostmi těch nejnekonečnějších množin a že jen taková tvrzení, která se dají dokázat konečnými metodami, lze oprávněně zastávat.

**Iracionální číslo** Číslo, které se nedá vyjádřit jako přesný zlomek. Jedním příkladem je číslo  $n$ .

**Iterace** Metoda řešení problému tím, že se tytéž kroky provádějí opakovaně, dokud není splněna určitá podmínka.

**Jazyk vyšší úrovně** Ve výpočetní technice je to programovací jazyk navržený tak, aby vyhovoval potřebám programátora: je nezávislý na vnitřním strojovém kódu každého jednotlivého počítače.

**Katalyzátor** Látka schopná urychlit chemickou reakci a přitom v procesu zůstává nezměněna.

**Kognitivní věda** Studium inteligence, zahrnující různorodé akademické disciplíny: lingvistiku, experimentální psychologii, informatiku, filozofii, neurovědu.

- Kompilátor** Počítačový program, který překládá soubor instrukcí napsaných v jazyce vyšší úrovně, jako jsou Fortran nebo jazyk C do tvaru, který je přímo srozumitelný pro počítač (do strojového kódu).
- Komplexita** Studium chování makroskopických souborů jednoduchých jednotek (např. atomů, molekul, bitů, neuronů), které jsou vybaveny předpoklady vyvíjet se v čase.
- Kondenzátor** Elektronická součástka sloužící pro uchovávání elektrického náboje.
- Konekcionismus** Jiný název pro studium umělých neuronových sítí, odvozený od toho, že mezi výpočetními jednotkami v síti je nesmírné množství spojů.
- Krajina zdatnosti** Krajina představující míru zdatnosti neboli také funkce nákladů nějakého problému, jak je tomu u problému obchodního cestujícího, u spinových skel nebo u reprodukční schopnosti skutečného nebo virtuálního organismu.
- Kritické jevy** Chování v bodě fázového přechodu a v jeho okolí. Při nastavení parametru systému, např. teploty, přesně do kritického bodu dochází často ke vzniku fraktálních struktur.
- Kůra mozková** Vnější vrstva (šedá hmota) mozkových hemisfér, nejnovější inovace, kterou evoluce připojila k nervovému systému.
- Kvantová mechanika** Mechanika, kterou se řídí mikrosvět, kde se energetické změny odehrávají v náhlých, malých kvantových skocích.
- Kvantový počítač** Zařízení, existující dosud jen teoreticky, které by dokázalo vypočítat rozličné věci, jež nejsou vyčíslitelné s použitím univerzálního Turingova stroje.
- Limitní cyklus** Je atraktor popisující pravidelné (periodické nebo kvaziperiodické) chování v čase, například v chemických hodinách, kde dochází k pravidelným změnám barvy.
- Lineární rovnice** Vztah mezi dvěma proměnnými, který tvoří přímku, když se zobrazí do kartézských os.
- Logicismus** Doktrína, jež říká, že veškerá matematika se dá vydedukovat z logiky. Dosáhnout toho se pokusil Frege, logicismus

byl ale vyvrácen Russellovým paradoxem, což vedlo ke vzniku formalismu a intuicionismu.

**Logické hradlo** Jeden ze základních logických prvků užívaných v elektronických zařízeních. Například výstup hradla AND bude 1 jen tehdy, když oba jeho vstupy budou 1 a výstup hradla OR bude 1, pokud aspoň jeden ze vstupů bude 1.

**Mega** Předpona označující násobení milionem.

**Mechanika tekutin** Studium makroskopického chování proudících tekutin (kapalin a plynů).

**Mem** Termín vytvořený Richardem Dawkinsem jako analogie genu. Jako se v genech uchovává a šíří genetická informace, tak se v mémech uchovává a šíří kulturní informace: zvyky, předsudky, módy, názory atd.

**Mikroskopický** Termín popisující nepatrné rozměry, ve srovnání s každodenními či makroskopickými rozměry světa, který lze přímo vnímat smysly. Rozdíly přicházejí ke slovu, když se srovnává popis světa spočívající na jednotlivých atomech a molekulách s tím, který spoléhá na globální vlastnosti obrovského množství atomů a molekul.

**Mikrotubuly** Nepatrné duté trubičky vytvořené z bílkoviny zvané tubulin, které se vyskytují téměř ve všech buňkách s jádrem. Mikrotubuly pomáhají určovat tvar buňky tím, že vytvářejí kostru, která je součástí cytoskeletu. Jsou také jakýmsi kolejemi, po nichž se posouvají molekuly, které tvoří molekulární motory pohánějící bičíky, stahující svalová vlákna atd.

**MIPS** Zkratka za milion instrukcí za vteřinu. Jedna z veličin měřících rychlost procesoru počítače.

**Molekulární biologie** Studium molekulárních základů života včetně biochemie molekul, jako jsou DNA a RNA.

**Morfogeneze** Vývoj tvarů živých bytostí.

**Mutace** Změna genů vytvořená náhodnou nebo záměrnou změnou v DNA, která tvoří dědičný materiál organismu.

**Náhodné číslo** Jedno z posloupnosti čísel, v níž se nedá zjistit žádná pravidelnost. Žádný univerzální Turingův stroj (tedy počítač)

nedokáže generovat skutečně náhodná čísla, protože ta jsou nevyčíslitelná, avšak univerzální kvantový počítač by to měl v principu dokázat.

**Nanotechnologie** Konstrukce zařízení velikosti molekul.

**Nelineární** Matematická vlastnost spočívající v kombinování veličin složitějším způsobem než jednoduchým sčítáním. Nelineární chování je typické pro reálný svět a v kvalitativním smyslu znamená, že dostanete více, než jste čekali, na rozdíl od lineárních systémů, které nevytvářejí žádná překvapení. Například disipativní nelineární systémy mohou vykazovat samoorganizaci a chaos.

**Nerovnováha** Stav makroskopického systému, který nedosáhl termodynamické rovnováhy, a má tedy stále možnost měnit se v průběhu času.

**Neuron** Nervová buňka, která je základní jednotkou vysílající signály v nervové soustavě.

**Neuronová síť** Síť navzájem pospojovaných neuronů v mozku.

**Neurotransmitter** Molekula, která proniká skrze synapsi a tím přenáší signály mezi nervovými buňkami.

**Nevratnost** Jednosměrná evoluce reálných systémů, která vede k šípu času.

**Nevypočitatelně číslo** Číslo, které nelze vypočítat žádným Turingovým strojem včetně univerzálního.

**Nezvládnutelný problém** Natolik výpočetně náročný, že čas nutný k jeho řešení je neúnosně dlouhý. O takových problémech, které nejsou řešitelné v polynomiálním čase, se říká, že patří do třídy NP.

**NP problém** Problém, jehož řešení vyžaduje čas, který závisí exponenciálně na jeho velikosti (něco na  $N$ -tou, kde  $N$  představuje velikost problému). Tyto problémy se nazývají nezvládnutelné, protože čas potřebný k jejich řešení rychle přesáhne všechny meze, jak velikost problému narůstá. Ani hrubá síla počítače nemá velký účinek. Tyto problémy, které nejsou řešitelné v polynomiálním čase, tvoří třídu NP.

**NP-úplný** Nejobtížnější ze všech NP problémů.



**Nukleová kyselina** Složitá organická kyselina, tvořená dlouhým řetězcem jednotek zvaných nukleotidy. Její dva typy, známé jako DNA a RNA, představují základ dědičnosti.

**Optimalizace** Proces zlepšování používaný k nalezení nejlepšího řešení nějakého problému. K počítačovému řešení nějakého optimalizačního problému se napíše program tak, aby maximalizoval či minimalizoval funkci nákladů.

**Optoelektronika** Odvětví elektroniky zabývající se vývojem zařízení, která reagují nejen na elektrony, ale i na fotony.

**Organická chemie** Odvětví chemie, které se zabývá sloučeninami uhlíku.

**Paměť** V informatice část počítače, kde se ukládá informace během aktivního zpracování.

**Paměť adresovatelná obsahem** Schopnost vyvolat položku z paměti s použitím pouze neúplného souboru rysů zapamatované položky místo toho, aby se pro přístup použila explicitní adresa.

**Paralelismus** Nejpokročilejší počítačová technologie, která umožňuje, aby se prováděl více než jeden výpočet najednou při použití několika různých výpočetních jednotek, které pracují souběžně. Nej-krajnější formou je masivní paralelismus, kde tisíce individuálních procesorů pracují zároveň na různých částech téhož obrovského problému. Souběžné zpracování (sdílení času) se dosahuje na sériových strojích tak, že jednotlivá CPU přepíná mezi několika úlohami.

**Perceptron** Jednoduchý počítačový model biologického neuronu, zahrnující několik vstupních kanálů, výpočetní jednotku a jeden výstup. Každá vstupní hodnota je vynásobena vahou kanálu, sečtou se ve výpočetní jednotce, výsledek projde nelineárním filtrem a je poslán do výstupního kanálu.

**Pixel** Zkratka za picture element neboli obrazový prvek, jednotlivá tečka na obrazovce počítače (trojrozměrný ekvivalent se nazývá voxel).

**Platonismus** Filozofická doktrína, podle níž matematické objekty existují před a nezávisle na našich vědomostech o nich a na jakékoli jejich fyzické realizaci, náš vhled do matematických pravd je

získáván konstruováním důkazů. Srovnej s logicismem, intuicionismem a formalismem.

**Počítač** Zařízení, které zpracovává data (vstup) podle zadaných instrukcí (programu), který je obvykle uchováván v počítači a produkuje jako výstup výsledky. V číslicovém počítači se všechny úkony provádějí pomocí čísel kódovaných jako binární signály-jako jsou nuly a jedničky - oproti analogovému stroji, který pracuje s použitím spojitě proměnných signálů.

**Podivný atraktor** Je atraktor, který má fraktální (zlomkovou) dimenzi. Popisuje chaotickou dynamiku v disipativních dynamických systémech.

**Polymer** Chemická látka tvořená zřetěžením jednodušších molekul.

**Postsynaptický** Týkající se přijímací strany synapse. Naproti tomu termín presynaptický se vztahuje k vysílací straně synapse.

**Princip neurčitosti** Princip v kvantové mechanice, který říká, že nemá smysl mluvit o poloze, hybnosti nebo jiných parametrech částice jinak než jako o výsledku měření. Udává teoretickou mez přesnosti, s níž se dají současně měřit hybnost a poloha částice. Čím přesnější je jedna, tím více neurčitosti je v druhé.

**Problém měření** V kvantové teorii je to problém, jak vysvětlit výsledek měření v experimentu s mikroskopickými systémy.

**Problém zastavení** Výsledek získaný Alanem Turingem, který říká, že je nemožné vymyslet mechanickou proceduru, neboli algoritmus, která dokáže rozhodnout, zda libovolně zvolený počítačový program se zastaví po konečném počtu kroků. Příčinou je existence nevyčíslitelných čísel, a dá se sledovat až ke Gödelově větě.

**Program** Soubor instrukcí, které realizují algoritmus srozumitelný pro počítač.

**Prostor možností** Změny funkce nákladu se nejlépe zviditelňují jako krajina možných řešení, kde výška každého krajinného rysuje mírou jeho nákladů. Tato zvlněná krajina se někdy nazývá prostor možností.

**Přerušovaná rovnováha** Evoluční teorie vytvořená k vysvětlení nespojitostí ve fosilním záznamu.

**Přírodní výběr** Proces, jímž se mění četnost genů v populaci tím, že jistí jednotlivci produkují více potomstva než jiní, protože jsou lépe schopni přežít a reprodukovat se ve svém prostředí. Celkový účinek přírodního výběru je tvorba adaptací. Dá se použít i u jistých umělých systémů.

**Racionální číslo** Každé číslo, které se dá vyjádřit jako přesný zlomek.

**RAM** Zkratka za Random Access Memory. Paměťová zařízení používané téměř ve všech moderních počítačích.

**Reakce** V chemii srážka atomů nebo molekul, která má za následek, že dojde k chemické změně.

**Reálné číslo** Bud' racionální, nebo iracionální číslo.

**Redukcionismus** Doktrína, podle níž se komplexní jevy dají vysvětlit pomocí něčeho jednoduššího. Speciálně atomistický redukcionismus tvrdí, že makroskopické jevy lze vysvětlit pomocí vlastností atomů a molekul.

**Reynoldsovo číslo** Číslo užívané v mechanice tekutin, které říká, zda je proudění tekutiny v dané situaci laminární nebo turbulentní.

**RISC** Zkratka za Reduced Instruction Set Computer. Mikroprocesor, který provádí menší počet instrukcí než tradiční mikroprocesory, takže může pracovat rychleji.

**RNA (kyselina ribonukleová)** Genetický materiál používaný k překlada DNA do bílkovin. V některých organismech může být i prvotním genetickým materiálem.

**ROM** Zkratka za Read Only Memory. Na rozdíl od RAM se z čipů ROM dá pouze číst a ne do nich zapisovat.

**Rovnováha v termodynamice** je konečný stav časového vývoje, v němž je utlumena veškerá možnost změny. Rovnovážná termodynamika se zabývá výlučně vlastnostmi takovéhoto statických stavů.

**Rozpoznávání řeči** Kterákoli technika, kterou počítač dokáže porozumět běžné řeči.

**Sálový počítač** Pojem nyní již zastaralý. Velký počítač, používaný pro náročné výpočty. Díky exponenciálnímu nárůstu počítačového

výkonu v posledních letech je většina sálových počítačů méně výkonná než dnešní stolní počítače a pracovní stanice.

**Samorganizace** Samovolné povstávání nerovnovážných organizovaných struktur na makroskopické úrovni v důsledku kolektivních interakcí mezi velkým počtem jednoduchých, obvykle mikroskopických objektů.

**Samorganizované kritično** Obecné schéma samoorganizovaného nerovnovážného chování, pro něž je charakteristický samovolný vznik fraktálních prostorových a/nebo časových struktur. N a rozdíl od obyčejných kritických jevů nevznikají zde fraktály nastavením nějakého parametru zvnějšku na kritickou hodnotu, nýbrž zcela spontánně. Nejtypičtější příklad je vznik keříčkovitých agregátů v mineralogii, dále pak říční sítě, zemětřesení nebo biologická evoluce. Vysvětluje se tím jev zvaný přerušovaná rovnováha.

**Simulované žihání** Metoda prohledávání krajiny možností za účelem nalezení nej lepšího řešení komplexního problému, znázorněného nejnižším (resp. nejvyšším) bodem v této krajině. Jméno pochází z procesu žihání (popouštění), během něhož se materiál nejprve zahřeje a pak pomalu chladí, aby se zvýšila pevnost a tuhost. Během žihání se dovolí atomům, z nichž se kov skládá, aby se usadily ve stabilnějším uspořádání s nižší energií než před procesem. Skalár Veličina, která má velikost, ale ne směr. Příklady jsou hmotnost a teplota.

**Rastrovací tunelovací mikroskop** Mikroskop, který vytváří zvětšený obraz tak, že pohybuje nepatrným wolframovým hrotem nad vzorkem. Z velikosti elektrického proudu mezi hrotem a vzorkem se dají odvodit obrysy povrchu.

**Software** Programy spouštěné na počítači, na rozdíl od hardwaru.

**Strojový kód** Posloupnost binárních kódů, která je prováděna počítačovým hardwarem.

**Spinové sklo** Magnetický materiál (typicky slitina), jehož atomární magnety podléhají směsi feromagnetických a antiferomagnetických interakcí, způsobujících frustraci, takže ne všechny podmínky nezbytné k minimalizaci celkové energie systému se dají splnit současně. Existuje exponenciálně mnoho stavů a nalezení globálního základního stavu je optimalizační problém typu *NP*. Spinová skla

mají mnoho společných vlastností s asociativními Hopfieldovými neuronovými sítěmi.

**Stacionární stav** Nerovnovážený stav, který se nemění s časem.

**Statistická mechanika** Disciplína, která se snaží vztáhnout vlastnosti makroskopických systémů k jejich atomárním či molekulárním stavebním prvkům.

**Superpočítač** Nejrychlejší, největší a nejvýkonnější typ počítače. Typicky využívá paralelní a vektorové zpracování.

**Synapse** Spojení dvou nervových buněk, jímž se přenášejí nervové impulzy.

**Teleologie** Studium (respektive doktrína) konečných příčin, zejména v souvislosti s konstruováním či účelností v přírodě.

**Tělo** U neuronu hlavní část buňky. Jako výpočetní prvek pracuje přibližně jako nelineární prahový filtr.

**Teorie automatů** Matematické studium strojů a jejich schopností řešit problémy pomocí algoritmů.

**Teorie čísel** Abstraktní studium struktury číselných systémů a vlastností kladných celých čísel.

**Teorie her** Odvětví matematiky, které se zabývá problémy s výběrem strategií, jaké se objevují v podnikání, obchodu, evoluci a válečnictví, za předpokladu, že soupeřící strany se neustále snaží maximalizovat osobní zisk.

**Tera** Předpona označující milion milionů.

**Termodynamika** Věda o teple a práci.

**Vybuditelné prostředí** Prostředí - jako je směs chemických sloučenin v Bělousovově-Žabotinského reakci -, které mění svůj stav, když je vystaveno stimulu přesahujícímu určitou prahovou hodnotu. Po vybudění se takové prostředí stane netečným.

**Tranzistor** Kompaktní elektronická součástka tvořená polovodičem se třemi či více elektrodami, která dokáže regulovat proud, jenž jí prochází. Používá se jako zesilovač, oscilátor nebo spínač.

**Turingův stroj** V moderní terminologii je to počítačový program. Abstraktní počítač čtoucí a zapisující na nekonečnou pásku.

- Umělá inteligence** Obor informatiky, jehož cílem je konstrukce strojů, které mají rysy spojované s lidskou inteligencí, jako jsou učení, přemýšlení, vidění, porozumění mluvené řeči a nakonec vědomí.
- Umělá neuronová síť** Druh počítačového modelu, volně inspirovaný strukturou neuronové sítě v mozku, skládající se ze vzájemně propojených výpočetních jednotek, které si navzájem posílají signály a zapínají se a vypínají v závislosti na součtu signálů, jež do nich přicházejí. Umělé neuronové sítě mohou sestávat buď z počítačového softwaru, hardwaru nebo obojího.
- Umělý život** Obor bádání, který má za cíl objevit podstatu přirozenosti a univerzální rysy "života": nejen života, jak jej známe, ale jak by mohl vypadat, ať už na Zemi, v počítači nebo jinde a ať se v našem vesmíru vyskytuje neboje vytvořen v jakékoli formě a tvaru.
- Univerzalita** Nezávislost chování systému na detailních vlastnostech mikroskopických částí, z nichž se skládá. Pravidelně se vyskytuje u kritických jevů. Existence univerzality bývá někdy argumentem proti redukcionismu.
- Univerzální Turingův stroj** V moderní terminologii je to programovatelný počítač obecného určení, který dokáže provádět jakoukoli vyčíslitelnou posloupnost operací.
- Vektor** Každá veličina, která má velikost a směr. Příklady jsou rychlost a zrychlení.
- Věžňovo dilema** Abstrakce vytvořená v teorii her, popisující situaci, v níž strategie spolupráce je nej výnosnější, je ale evolučně nestabilní, takže nemá naději na přežití.
- Virtuální realita** Pokročilá forma trojrozměrné grafické simulace pomocí počítače, při níž je účastník pohroužen do umělého multimediálního prostředí.
- Virus** Krátký úsek počítačového kódu, který se po aktivaci dokáže přikopírovat jednomu či více větším hostitelským počítačovým programům. V biologii je virus útržek genetického materiálu, obvykle zabalený do bílkovinného pláště, který k rozmnožení potřebuje hostitelskou buňku a který se dokáže také vyvíjet.

**Vlnová funkce** Ústřední objekt v kvantové teorii, používá se k výpočtu pravděpodobnosti, že nastane nějaká událost - například že atom vyše foton -, dojde-li k měření.

**Vyčíslení** Výpočet (většinou nějakého čísla) provedený pomocí algoritmu.

**Vypočítatelná čísla** Čísla, která lze vypočítat jednotlivým Turingovým strojem.

**Vyčísitelnost** V matematice je to vlastnost být vypočítatelný na základě algoritmu, a tudíž pomocí počítače (nebo univerzálního Turingova stroje). Přirozená čísla, na nichž matematika stojí, se skládají ze dvou skupin, z vypočítatelných a nevypočítatelných čísel.

**Základní stav** Stav s nejnižší energií systému. Ve fyzice elementárních částic odpovídá vakuu.

**Zpětná vazba** Obecný termín pro mechanismus, v němž se důsledky probíhajícího procesu stávají faktorem, který tento proces modifikuje nebo mění. Původní proces je zesilován v pozitivní zpětné vazbě a potlačován v negativní zpětné vazbě.

**Život** Říká se tak systémům schopným evoluce v darwinovském stylu prostřednictvím přírodního výběru.

# Literatura

## Kapitola 1

Appleyard, B., *Understanding the Present* (Pan Books, London 1992).

Cohen, J. - Stewart I., *The Collapse of Chaos* (Viking, London 1994).

Coveney, P. - Highfield R., *Šíp času*, (OLDAG, Ostrava 1995).

Crick, R., *The Astonishing Hypothesis* (Simon & Schuster, London 1994).

Darwin, C., *The Origin of Species by Means of Natural Selection* (Penguin, Harmondsworth 1968).

Emmeche, C., *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life* (Princeton University Press, Princeton 1994).

Langton, C. - Taylor C. - Farmer J. D. - Rasmussen S. (eds.), *Artificial Life II* (Addison-Wesley, Redwood City CA 1992).

Lewin, R., *Complexity* (Macmillan, New York 1992). Lewontin, R. C., *The Doctrine of DNA* (Penguin, London 1993).

Peitgen, H - O., Richter P., *The Beauty of Fractals* (Springer-Verlag, Berlin 1986).

Prigogine, I., *From Being to Becoming: Time and Komplexity in the Physical Sciences* (Freeman, San Francisco 1980).

Ridley, M., *Červená královna*, Mladá fronta, Praha 1999.

Vonneumann, N., *John von Neumann, as Seen By His Brother* (O N. Vonneumann, 1396 Lindsay Lane, Meadowbrook, PA 1946/1833 1992).

Waldrop, M., *Complexity* (Simon & Schuster, New York 1992).

Weinberg, S., *První tři minuty*, Mladá fronta, Praha.

## Kapitola 2

Barrow, J., *Teorie všeho*, Mladá fronta, Praha 1996.

—, *Pí na nebesích*, Mladá fronta, Praha 2000.

Borowski, E. J. - Borwein J. M., *Dictionary of Mathematics* (Collins, London 1989).



- Časti, J. L., *Searching for Certainty: What Science Can Know About the Future* (Scribners, London 1992).
- Chaitin, G. J., *Algorithmic Information Theory* (Cambridge University Press, Cambridge 1987).
- , *Information-theoretic Incompleteness* (World Scientific, Singapore 1992).
- , *Information, Randomness and Incompleteness* (World Scientific, Singapore, 2nd ed., 1990).
- , in: *The New Scientist Guide to Chaos*, Hall N., ed. (Ballantine, New York 1991, Penguin, London 1991).
- Cornwell, J. (ed.), *Nature's Imagination* (Oxford University Press, Oxford 1995).
- Coveney, P. - Highfield R., *Šíp času*, OLDAG, Ostrava 1995.
- Davies, C. W., *The Cosmic Blueprint* (Heinemann, 1987).
- , *The Mind of God* (Simon & Schuster, New York, 1992).
- Davis, M. (ed.), *The Undecidable* (Raven, New York 1965).
- Garey, M. - Johnson D. S., *Computers and Intractability* (W. H. Freeman, New York 1979).
- Herken, R., *The Universal Turing Machine* (Oxford University Press, Oxford 1988).
- Hodges, A.- Alan Turing: *The Enigma* (Vintage, London 1983).
- Hofstadter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Harper&Row, New York 1979).
- Hughes, P. - Brecht G., *Vicious Circles and Infinity: An Anthology of Paradoxes* (Penguin, London 1978).
- Kline, M., *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times* (Oxford University Press, Oxford 1972).
- Lakatos, I., *Proofs and Refutations* (Cambridge University Press, Cambridge 1976).
- Penrose, R., *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford 1989).
- , *Shadows of the Mind* (Oxford University Press, Oxford 1994).
- Popper, K., *Conjectures and Refutations* (Routledge and Kegan Paul, London 1963).
- , *Logika vědeckého zkoumání*, OIKOYMENH, Praha 1998.
- , *Realism and the Aim of Science* (Hutchinson, London 1993).
- Reid, C., *Hilbert* (George Allen and Unwin, London 1970).

- Rucker, R., *Infinity and the Mind* (Bantam Books, London 1982).
- , *Mind Tools* (Houghton-Mifflin, Boston 1987).
- Webb, J., *Mechanism, Mentalism, and Metamathematics* (Reidel, Dordrecht 1980).
- Weinberg, S., *Snění o finální teorii*, Hynek, Praha 1996.

## Kapitola 3

- Augarten, S., *Bit by Bit: An Illustrated History of Computers* (Ticknor and Fields, New York 1984).
- Babbage, C., *Passages from the Life of a Philosopher* (Longman, Green, Longman, Roberts, & Green, 1864).
- Barrow, i., *Teorie všeho*, Mladá fronta, Praha 1996.
- , *Pí na nebesích*, Mladá fronta, Praha 2000.
- Boole, G., *The Claims of Science, Especially as Founded in Its Relations to Human Nature* (Taylor and Walton, London 1851).
- , *An Investigation of the Laws of Thought* (Dover, New York 1958).
- , *The Mathematical Analysis of Logic, Being an Essay Towards a Calculus of Deductive Reasoning* (Macmillan, Barclay and Macmillan, Cambridge 1847).
- Campbell-Kelly, M. (ed.), *The Works of Charles Babbage* (Pickering &Chatto, London 1989).
- Chandy, K. M. - Taylor S., *An Introduction to Parallel Processing* (Jones and Bartlett, Boston 1992).
- Coveney, P. - Highfield R., *Šíp času*, OLDAG, Ostrava 1995.
- Donnelly, J., *A Modern Difference Engine: Software Simulators for Charles Babbage's Difference Engine No. 2* (Armstrong Publishing Co., 1992).
- Garey, M. - D. S. Johnson, *Computers and Intractability* (W. H. Freeman, New York 1979).
- Goldstine, H., *The Computer from Pascal to von Neumann* (Princeton University Press, Princeton 1972).
- Heims, S., *John von Neumann and Norbert Wiener: From Mathematics to the Technologies of Life and Death* (MIT Press, Cambridge, MA 1980).
- Hillis, D., *The Connection Machine* (MIT Press, Cambridge, MA 1989).

Hillis, D. - Boghosian B., "Parallel Scientific Computation", *Science* 261, 856 (1993).

Hodges, A., *Alan Turing: The Enigma* (Burnett Books, London 1983).

Hyman, A., *Charles Babbage, Pioneer of the Computer* (Princeton University Press, Princeton 1982).

Kahn, D., *The Codebreakers: The Story of Secret Writing* (Macmillan, London 1967).

Kaufmann, W. J. - Smarr L. L., *Supercomputing and the Transformation of Science* (Scientific American Library, New York 1993).

Klir, G. J. - Folger T. A., *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1992).

Kosko, B., *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic* (HarperCollins, New York 1994).

Lindgren, M., *Glory and Failure: The Difference Engines of Johann Miiller, Charles Babbage and Georg and Edvard Scheutz* (MIT Press, Cambridge, MA 1990).

MacHale, D., *George Boole: His Life and Work* (Boole Press, Dublin 1985).

Macrae, N., *John von Neumann* (Pantheon Books, New York 1992).

Moseley, M., *Irascible Genius: A Life of Charles Babbage, Inventor* (Hutchinson, London 1964).

Penrose, R., *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford 1989).

Rheingold, H., *Tools for Thought* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1986).

Swade, D., *Charles Babbage and His Calculating Engines* (Science Museum, London 1991).

Swade, D. - J. Palfreman, *The Dream Machine: Exploring the Computer Age* (BBC Books, 1991).

Thinking Machines Corporation, *Connection Machine CM-200 Series Technical Summary* (Thinking Machines Corporation, Cambridge, MA 1991).

Trew, A.- Wilson G. (eds.), *Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computing Systems* (Springer-Verlag, Berlin 1991).

Neumann von, J., *The Computer and the Brain* (Yale University Press, New Haven 1958).

Zurek, W., *Complexity, Entropy and the Physics of Information* (Santa Fe Institute Series, Vol. 8, Addison-Wesley, Redwood City, CA 1991).

# Kapitola 4

Baxter, R., *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics* (Academie Press, London 1982).

Coveney, P. - Highfield R., *Šip času, OLDAG, Ostrava 1995.*

Doolen, G. (ed.), *Lattice Gas Methods for Partial Differential Equations, Vol. IV in the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1990).

Fischer, K. H. - Hertz J. A., *Spin Glasses* (Cambridge University Press, Cambridge 1991).

Hillis, W. D., "The Connection Machine: A Computer Architecrure Based on Cellular Automata", *Physica 10D*, 213 (1984). Hofstadter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Harper&Row, New York 1979).

Mézard, M. - Parisi G. - Virasoro M., *Spin Glass Theory and Beyond* (World

Scientific, Singapore 1987). Minsky, M., *ComPutation: Finite and Infinite Machines* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1967).

Mydosh, J., *Spin Glass Physics: An Experimental Approach* (Taylor and

Francis, London 1993). Sherrington, D., "Magnets, Microchips and Memories: From Spin Glasses to the Brain", *Speculations in Science and Technology* 14, 316 (1991).

—, "Complexity Due to Disorder and Frustration", in *1989 Lectures onComplex Systems*, E. Jen (ed.) (Addison-Wesley, Reading, MA 1990).

Toffoli, T. - Margolus N., *Cellular Automata Machines* (MIT Press, Cambridge, MA 1987).

Neumann von, J., *The Computer and the Brain* (Yale University Press, New Haven 1958).

Wolfram, S., "Cellular Automata as Models of Complexity", *Nature* 311, 419 (1984).

Wolfram, S. (ed.), *Theory and Applications of Cellular Automata* (World Scientific, Singapore 1986).

Wuensche, A. - Lesser M. J., *The Global Dynamics of Cellular Automata: An Atlas of Basin of Attraction Fields of One-Dimensional Cellular Automata* (Addison-Wesley, Reading, MA 1992).

# Kapitola 5

Aleksander, I.- Morton H., *An Introduction to Neural Computing* (Chapman and Hall, London 1990).

Amari, S. - Arbib A., *Competition and Cooperation in Neural Nets*, Lecture Notes in Biomathematics, Vol. 45 (Springer-Verlag, Berlin 1982).

Amit, D., *Modelling Brain Function* (Cambridge University Press, Cambridge 1989).

Beale, R. - Jackson T., *Neural Computing* (Adam Hilger, Bristol 1990).

Broadbent, D. (ed.), *The Simulation of Human Intelligence* (Blackwell, Oxford 1993).

Davis, L., *Genetic Algorithms and Simulated Annealing* (Pitman, London 1987).

—, *Handbook of Genetic Algorithms* (van Nostrand-Rheinhold, New York 1991).

Dreyfus, H. L., *What Computers Still Can't Do: The Limits of Artificial Intelligence* (MIT Press, Cambridge, MA, 1992).

Freeman, J. A. - Skapura D. M., *Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming Techniques* (Addison-Wesley, Reading, MA 1991).

Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (Addison-Wesley, Reading, MA 1989).

Grossberg, S., *Neural Networks and Natural Intelligence* (MIT Bradford Press, Cambridge, MA 1988).

Hebb, D. O., *The Organization of Behavior* (Wiley, New York 1949).

Hertz, J. A. - Krogh A., and Palmer R. G., *Introduction to the Theory of Neural Computation* (Addison-Wesley, Reading, MA 1991).

Hofstadter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Harper & Row, New York 1979).

Hofstadter, D. - Dennett D. (eds.), *The Minds I* (Basic Books, New York 1981).

Holland, J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (University of Michigan Press, Ann Arbor 1975).

Holland, J. et alii, *Induction: Processes of Inference, Learning and Discovery* (MIT Press, Cambridge, MA 1986).

Kohonen, T., *Self-Organisation and Associative Memory* (Springer-Verlag, Berlin 1989).

Koza, J. R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection* (MIT Press, Cambridge MA 1992).

Koza, J. R. - Rice J. P., Genetic Programming: The Movie (MIT Press, Cambridge MA 1992).

Minsky, M., Computation: Finite and Infinite Machines (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1967).

—, The Society of Mind (Simon & Schuster, New York 1986).

Minsky, M - Papert S., Perceptrons (MIT Press, Cambridge, MA 1969).

Penrose, R., The Emperors New Mind (Oxford University Press, Oxford 1989).

Rosenblatt, F., Principles of Neurodynamics (Spartan Books, Washington, D.C. 1962).

Rumelhart, D. - McClelland, J. L. (eds.), Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, Vol. I and II (MIT Press, Cambridge MA 1986).

Neumann von, J., The Computer and the Brain (Yale University Press, New Haven 1958).

Whitley, L. D. - Schaffer, J. D., 1COGANN-92 International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks (IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1992).

## Kapitola 6

Babloyantz, A., Molecules, Dynamics and Life (Wiley-Interscience, New York 1986).

Bmsh, S., The Kind of Motion We Call Heat (North-Holland, Amsterdam 1976).

Casti, J. L., Searching for Certainty (Scribners, London 1992).

Coveney, P., "The Second Law of Thermodynamics: Entropy, Irreversibility and Dynamics", Nature 333, 409 (1988).

—, "Lirréversibilité du Temps", La Recherche 20, 190 ( 1989).

Coveney, P. - Highfield R., Šíp času, OLDAG, Ostrava 1995.

Doolen, G. (ed.), Lattice Gas Methods for Partial Differential Equations (AddisonWesley, Redwood City, CA 1990).

Gaynord, R. J. - Wellin P. R., Computer Simulations with Mathematica: Explorations in Complex Physical and Biological Systems (Springer-Verlag, Berlin 1995).

Glansdorff, P. - Prigogine I., Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations (Wiley, New York 1971). Gleick, J., Chaos, Ando Publishing, Brno 1996.

Gray, P. - Scott S., Chemical Oscillations and Instabilities (Oxford University Press, Oxford 1990).

- Groot de, S. - Mazur P, Non-Equilibrium Thermodynamics (Dover, New York 1984).
- Hall, N. (ed.), The New Scientist Guide to Chaos (Penguin Books, Harmondsworth 1991).
- Lorenz, E., The Essence of Chaos (UCL Press, London 1993). Mandelbrot, B., The Fractal Geometry of Nature (W. H. Freeman, New York 1977).
- Nicolis, G. - Prigogine I., Exploring Complexity (W. H. Freeman, New York 1989).
- , Self Organisation in Non-Equilibrium Systems (Wiley-Interscience, New York 1977).
- Prigogine, I., From Being to Becoming (W. H. Freeman, New York, 1980).
- Ruelle, D., Chaotic Evolution and Strange Attractors (Cambridge University Press, Cambridge 1989).
- , Chance and Chaos (Princeton University Press, Princeton 1991).
- Scott, S., Chemical Chaos (Oxford University Press, Oxford 1992).
- Stewart, I. - M. Golubitsky, Fearful Symmetry (Penguin, London 1992).
- Wolfram, S. (ed.), Theory and Applications of Cellular Automata (World Scientific, Singapore 1986).
- Zurek, W. (ed.), Complexity, Entropy and the Physics of Information (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1988).

## Kapitola 7

- Alberts, B. et alii, The Molecular Biology of the Cell, 2nd ed. (Garland, New York 1989).
- Axelrod, R., The Evolution of Co-operation (Penguin Books, London 1990).
- Babloyantz, A., Molecules, Dynamics and Life (Wiley-Interscience, New York 1986).
- Balí, P., Designing the Molecular World (Princeton University Press, Princeton 1994).
- Bendall, D. (ed.), Evolution from Molecules to Men (Cambridge University Press, Cambridge 1982).
- Coveney, P. - Highfield R., Šíp času, OLDAG, Ostrava 1995. Cramer, F., Chaos und Ordnung. Die komplexe Struktur des Lebendigen (Deutsche-Verlags-Anstalt, Stuttgart 1988). Crick, R., Life Itself (Macdonald, London 1981).
- Cronin, H., The Ant and the Peacock (Cambridge University Press, Cambridge 1991).
- Dawkins, R., Řeka z ráje, Archa, Bratislava 1996.
- , Sobecký gen, Mladá fronta, Praha 1998.

- Deamer, D. - Fleischaker G., *Origins of Life: The Central Concepts* (Jones and Bartlett, Boston 1994).
- Eigen, M., *Steps Towards Life* (Oxford University Press, Oxford 1992).
- Eigen, M. - P. Schuster, *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization* (Springer-Verlag, New York 1979).
- Fleischaker G. - Colonna S. - Luisi P. L. (eds.), *Self Production of Supramolecular Structures, Proceedings of a NATO Advanced Research Workshop held in Maratea, Italy, September 1993* (Kluwer, Dordrecht 1994).
- Goodwin, B., *How the Leopard Changed Its Spots* (Weidenfeld & Nicholson, London 1994).
- Gould, S. J., *Ever Since Darwin* (Penguin, Harmondsworth 1980).
- , *Pandin palec, Mladá fronta, Praha.*
- , *Wonderful Life* (Hutchinson Rádus, London 1980).
- Grene, M. (ed.), *Dimensions of Darwinism* (Cambridge University Press, 1983).
- Kauffman, S. A., *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution* (Oxford University Press, Oxford 1993).
- Langton, C. (ed.), *Artificial Life: Proceedings of an Interdisciplinary Work-shop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (Addison-Wesley, Redwood City. CA, 1989).
- Langton, C. et alii (eds.), *Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life held February, 1990, in Santa Fe, New Mexico* (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1992).
- Lewontin, R. C., *The Doctrine of DNA* (Penguin, London 1993).
- Lovelock, J. E., *Gaia: živoucí planeta, Mladá fronta, Praha 1994.*
- Maynard Smith, J., *Did Darwin Get It Right?* (Penguin Books, London 1993).
- Orgel, L., *The Origins of Life* (Wiley, New York 1973).
- Peacocke, A., *An Introduction to the Physical Chemistry of Biological Organisation* (Oxford University Press, Oxford 1983).
- Ridley, M., *Červená královna, Mladá fronta, Praha 1999.*
- Schrödinger, E., *What Is Life?* (Cambridge University Press, Cambridge 1944).
- Sigmund, K., *Games of Life* (Oxford University Press, Oxford 1993).
- Varela, F., *Principles of Biological Autonomy* (North-Holland, Amsterdam 1979).



Varela, F. - Stein W. (eds.), *Thinking About Biology* (Addison-Wesley, Redwood City, CA 1992).

## Kapitola 8

Bendall, D. (ed.), *Evolution from Molecules to Men* (Cambridge University Press, Cambridge 1982). Brooks, R. - Maes P. (eds.), *Artificial Life IV* (MIT Press, Cambridge, MA 1994).

Dawkins, R., *Sobecký gen, Mladá fronta, Praha 1998.*

Eigen, M., *Steps Towards Life* (Oxford University Press, Oxford 1992).

Emmeche, C., *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life* (Princeton University Press; Princeton 1994).

Goodwin, B., *How the Leopard Changed Its Spots* (Weidenfeld & Nicholson, London 1994).

Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, Revised ed. (MIT Press, Cambridge, MA 1992).

—, "Genetic Algorithms", *Sci Amer* 267, 44-50 (1992).

Koza, J., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection* (MIT Press, Cambridge, MA, 1992).

Langton, C. (ed.), *Artificial Life: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1989).

Langton, C, et alii (eds.), *Artificial Life II: Proceedings of the Workshop on Artificial Life held February 1990, in Santa Fe, New Mexico* (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1992).

Langton, C. (ed.), *Artificial Life III* (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1989).

Levy, S., *Artificial Life* (Pantheon, New York 1992).

Michalski, R.S. - Carbonell J. G. - Mitchell T. M., *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*, Vol. I and II (Morgan Kaufman, LosAltos 1986).

Pagels, H. R., *The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity* (Bantam, New York 1988).

Prusinkiewicz, P. - Lindenmayer A., *The Algorithmic Beauty of Plants* (Springer-Verlag, Berlin 1990).

Ridley, M., Červená královna, Mladá fronta, Praha 1999.

Sober, E., The Nature of Selection: Evolutionary Theory in Philosophical Focus (University of Chicago Press, Chicago 1984).

Thompson, D., On Growth and Form (Cambridge University Press, Cambridge 1942).

## Kapitola 9

Blakemore, C, The Mind Machine (BBC Books, London 1991, and Penguin Books 1994).

Blakemore, C. - Greenfield S. (eds.), Mindwaves (Blackwell, Oxford 1987).

Boden, M., The Creative Mind (Sphere Books, London 1992).

—, Artificial Intelligence and Natural Man (MIT Press, London 1987).

—, The Philosophy of Artificial Intelligence (Oxford University Press, Oxford 1990).

Boden, M. - Bundy A - Needham R. M. (eds.), "From Artificial Intelligence to the Mind", Philosophical Transactions of the Royal Society 349 (15 October 1994).

Changeux, J.-P., Neuronal Man (Pantheon, New York 1985).

Chomsky, N., Barriers (MIT Press, Cambridge, MA 1986).

—, Language and Mind (Harcourt Brače and World, 1968).

—, Reflections on Language (Pantheon, New York 1975). Churchland,

P, Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/Brain (MIT Press, London 1986).

Churchland, P. - Sejnowski T, The Computational Brain (MIT Press, Cambridge, MA 1992).

Cotterill, R., No Ghost in the Machine (Heinemann, London 1989).

Crick, F., The Astonishing Hypothesis (Simon & Schuster, London 1994).

Damasio, H. - Damasio A., Lesion Analysis in Neuropsychology (Oxford University Press, Oxford 1989).

Dennett, D., Consciousness Explained (Penguin, London 1991).

Denton, D., The Pinnacle of Life (Cassels, Allen & Unwin, London, and HarperCollins, San Francisco 1993).

Dreyfus, H. L., What Computers Still Can't Do: A Critique of Artificial Reason (MIT Press, London 1993).

Edelman, G., *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection* (Oxford University Press, Oxford 1989).

—, *Bright Air, Brilliant Fire* (The Penguin Press, London 1992).

Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning* (Addison-Wesley, Reading, MA 1989). Grossberg, S., *Neural Networks and Natural Intelligence* (MIT Bradford Press, Cambridge, MA 1988). Hanson, S. J. - Olson C. R. (eds.), *Connectionist Modelling and Brain Function: The Developing Interface* (MIT Press, Cambridge, MA 1990).

Hebb, D. O., *Organization of Behavior* (Wiley, New York 1949).

Heidegger, M., *Basic Writings* (Harper & Row, New York 1977).

Hofstadter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Harper&Row, New York 1979).

Hofstadter, D. - Dennett D. (eds.), *The Mind's I* (Basic Books, New York 1981).

Hubel, D. H., *Eye, Brain and Vision* (Scientific American Library, W. H. Freeman, 1988).

Kohonen, T., *Self-Organization and Associative Memory*, 3rd ed. (Springer Verlag, Berlin 1989).

Lewontin, R. C., *The Doctrine of DNA: Biology as Ideology* (Penguin, London 1993).

Marcel, A. J., - Bisiach E. (eds.), *Consciousness in Contemporary Science* (Oxford University Press, Oxford 1992).

Marr, D., *Vision* (Freeman, New York 1982).

Minsky, M., *The Society of Mind* (Simon & Schuster, New York 1986).

Moravec, H., *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1988).

Morris, R. G. M. (ed.), *Parallel Distributed Processing: Implications for Psychology and Neuroscience* (Oxford University Press, 1989).

Penrose, R., *The Emperoris New Mind* (Oxford University Press, Oxford 1989).

—, *Shadows of the Mind* (Oxford University Press, Oxford 1994).

Pinker, S., *The Language Instinct* (Morrow, New York 1994).

Posner, M. I. - Raichle M. E., *Images of Mind* (Scientific American Library, W. H. Freeman, 1994).

Rose, S., *The Making of Memory* (Bantam Press, London 1992).

Rumelhart, D. E. - McClelland J. L. (eds.), *Parallel Distributed Processing*, Vol. 1 and 2 (MIT Press, London 1986).

Skinner, B. F., *About Behaviorism* (Penguin, London 1993).

Traub, R. D., and R. Miles, *Neuronal Networks of the Hippocampus* (Cambridge University Press, Cambridge 1991).

Wills, C., *The Runaway Brain* (HarperCollins, London 1994).

Wolpert, L., *Triumf embrya*, Academia, Praha 1995.

Zeki, S., *A Vision of the Brain* (Blackwell Scientific Publications, Oxford 1993).

## Kapitola 10

Anderson, P. W. - Arrow K. - Pines D., *The Economy as an Evolving Complex System* (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. 5, Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1989).

Arthur, B., *Sci Amer*, 92-99 (February 1990).

Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation* (Penguin, London 1990).

Coveney, P. - Highfield R., *Šíp času*, OLDAG, Ostrava 1995.

Crichton, M., *Jurassic Park* (Century, London 1992).

Dawkins, R., *Sobecký gen*, Mladá fronta, Praha 1998.

Dennett, D. C., *Brainstorms* (Bradford Books, Montgomery, VT, 1978).

Dennett, D., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life* (Simon & Schuster, New York 1995).

Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar* (Little, Brown, London and Boston 1994).

Hofstadter, D., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Penguin

Books, London 1979). Hofstadter, D. - Dennett D., *The Mind's I: Fantasies and Reflections on Self and Soul* (Penguin Books, London 1982).

Jencks, Ch., *The Architecture of the Jumping Universe* (Academy Editions,

London 1995). Kelly, K., *Out of Control* (Fourth Estate, London 1994).

Kelves, D. J. - Hood L. (eds.), *The Code of Codes: Scientific and Social Issues in the Human Genome Project* (Harvard University Press, Cambridge, MA 1992).

Lewontin, R. C., *The Doctrine of DNA* (Penguin, London 1993).

Mainzer, M., *Thinking in Complexity* (Springer-Verlag, Berlin 1994).

Ormerod, P, The Death of Economics (Faber and Faber, London 1994).

Prigogine, I. - Sanglier M. (eds.), The Laws of Nature and Human Conduct (Brussels Task Force of Research Information and Study on Science, Brussels 1985).

Todd, S. - W. Latham, Evolutionary Art and Computers (Academie Press, London 1992).

## Dodatek

Posner, M. - Raichle M., Images of Mind (Scientific American Library, New York 1994).

Zeki, S. A., A Vision of the Brain (Blackwell Scientific Publications, Oxford 1993).

## Výtvarný doprovod k českému vydání

Frontispice: František Lesák - Svazek chřestu (studie), 1985

Přední strana přebalu: František Lesák - Svazek chřestu (podle Adriaena Coorteho), 1985, dřevo, guma

Zadní strana přebalu: Adriaen Coorte - Svazek chřestu, 1703, olej, 29,8 x 22,8 cm, Fitzwilliam Museum, Cambridge

# Obsah

## [Předmluva 6](#)

## [Poděkování 10](#)

## [Prolog 13](#)

## [1 Tajné umění 17](#)

[Jak se tvoří komplexita 21](#)

[Původ komplexity 22](#)

[Vychutnat si jednoduchost 23](#)

[Jazyk komplexity 26](#)

[Symbióza 28](#)

## [2 Umělcův kód 30](#)

[Matematické náboženství 32](#)

[Brána věd 33](#)

[Matematika a skutečnost 36](#)

[Srpen 1900: Hilbert v Paříži 38](#)

[Neúplnost a nerozhodnutelnost 41](#)

[Univerzální počítač 42](#)

[Ne zcela univerzální počítač 45](#)

[Diofantické rovnice 46](#)

[Zvládnutelnost 48](#)

[Vyčíslitelná matematika 51](#)

[Teorie nikoli všeho 54](#)

[Turingova kletba 55](#)

## [3 Umělcova paleta 58](#)

[Počátky 60](#)

[Počítač parou poháněný 61](#)

[Booleovy zákony myšlení 68](#)

[Babbage a Boole v pravém světle 71](#)

[Von Neumannova inspirace 71](#)

[Turbulentní bomba 72](#)

[Von Neumannův odkaz 79](#)

[Od flopů k teraflopům 81](#)

[Čas turbulence 83](#)

[Architektury 86](#)

[Odhad RISCu 89](#)

[Fuzzy □ logika 91](#)

[Zářné zitrky 94](#)

[Kvantové počítače 96](#)

[Kvantový paralelismus 101](#)

[Stavba kvantového stroje 103](#)

[Budoucnost výpočetní techniky 105](#)

#### **4 Přírodní inspirace 107**

[Celulární automaty 109](#)

[Pád a vzestup automatů 112](#)

[Turbulentní automaty 115](#)

[Wolframovy třídy 117](#)

[Programovatelná hmota 120](#)

[Cement: tvrdý oříšek 122](#)

[Žihání 126](#)

[Spinová skla 129](#)

[Hra se skleněnými perlami 136](#)

#### **5 Odpovědi ve vývoji 137**

[Nejzdatnější přežije 138](#)

[Genetický algoritmus 139](#)

[Digitální Darwin 143](#)

[Umělá inteligence 146](#)

[Neuronové sítě 150](#)

[Od spinových skel k neuronovým sítím 156](#)

[Šok z novinek 161](#)

[Neuronové sítě pro kutily 162](#)

[Neuronová síť 167](#)

[Přírodní lekce 169](#)

## **6 Umění přírody 170**

[Globální pohled 173](#)

[Termodynamika reálného světa 175](#)

[Vaření komplexity 176](#)

[Samoorganizace v chemii 178](#)

[Bruselátor 181](#)

[Chemické obrazce a vlny 184](#)

[Cross-katalátor 185](#)

[Oblasti přitažlivosti, stavební kameny paměti 187](#)

[Cross-katalátor a chaos 189](#)

[Počítače a chaos 190](#)

[Podivné atraktory, chaos a fraktály 193](#)

[Bélousovova a Žabotinského magie 197](#)

[Chemický počítač 200](#)

[Chemie celulárních automatů 203](#)

[Spatřit svět v zrnku písku 205](#)

[Umělcův motiv 211](#)

## **7 Život, jak jej známe 213**

[Co je život? 216](#)

[Chybějící článek 217](#)

[Nahý gen 222](#)

[Evoluce ve zkumavce 224](#)

[Teorie, počítače a původ života 228](#)



*Samoorganizace uvnitř buněk 231*

*Buňky se sdružují 234*

*Tlukot srdce 240*

*Pravidla chování 244*

*Vývoj strategie 249*

*Neurčitost a Pavlov 251*

*Prostor, náhodnost a věžňovo dilema 253*

*Katastrofy 255*

*Globální ekosystém 257*

## **8 Život, jaký by mohl být 261**

*Slabý a silný umělý život 263*

*Viry 264*

*Umělý růst 267*

*Nepřírodní výběr 269*

*Evoluční algoritmy 271*

*Evoluce s otevřeným koncem 275*

*Virtuální život: Tierra 277*

*Plateau a C-Zoo 284*

*Virtuální včely a ryby 286*

*Animáti 288*

*Evoluce lepších programů 293*

*Celulární automaty a hrana chaosu 295*

*Jin a jang 297*

*Evoluce a univerzální výpočty 298*

*Nesouhlas na hraně chaosu 301*

*Zkoumání komplexity 303*

## **9 Kouzelný stav 304**

*Historie mysli 305*

*Evoluční umění konstrukce mozku 307*

[Stavební plán přírody 309](#)

[Biologické neuronry 312](#)

[Neuronry in silico 315](#)

[Nervoví kurýři 319](#)

[Tkaní stavu 320](#)

[Ammónův roh 324](#)

[Počítačová neurověda 327](#)

[Kartografie mozku 329](#)

[Samoorganizované mapy mozku 333](#)

[Chytré algoritmy 335](#)

[Sítě pro zrak 336](#)

[Integrace 340](#)

[Neuronové sítě a poškozené mozky 342](#)

[Vědomí 344](#)

[Umělé vědomí 347](#)

[Stroj na sny 352](#)

## **10 Panoráma 355**

**Dodatek: Čtení myšlenek 376**

**Slovníček pojmů 383**

**Literatura 400**

[Kapitola 1 400](#)

[Kapitola 2 400](#)

[Kapitola 3 402](#)

[Kapitola 4 404](#)

[Kapitola 5 405](#)

[Kapitola 6 406](#)

[Kapitola 7 407](#)

[Kapitola 8 409](#)

[Kapitola 9 410](#)

*Kapitola 10 412*

*Dodatek 413*

*Výtvarný doprovod k českému vydání 413*

**Obsah 414**

Peter Coveney  
Roger Highfield

# Mezi chaosem a řádem

**Hranice komplexity:  
hledání řádu  
v chaotickém světě**

Z anglického originálu *Frontiers of Complexity*,  
vydaného nakladatelstvím Faber and Faber v Londýně roku  
1995, přeložil František Slanina.

Odpovědní redaktoři Andrea Cejnarová a Michal Janata.

Typografie a technická redakce Jana Vysoká.

Vydala Mladá fronta jako 6 076. svoji publikaci.

Edice Kolumbus, svazek 160.

Vytiskl S-TISK Vimperk, Husova 1881, 385 01 Vimperk.

432 stran textu a 8 stran obrazové přílohy.

Vydání první. Praha 2003.

Knihy Mladé fronty si můžete objednat na adrese:

Mladá fronta, a. s., prodej nakladatelství,

Radlická 61, 150 00 Praha 5

e-mail: prodej@mf.cz, www.mf.cz