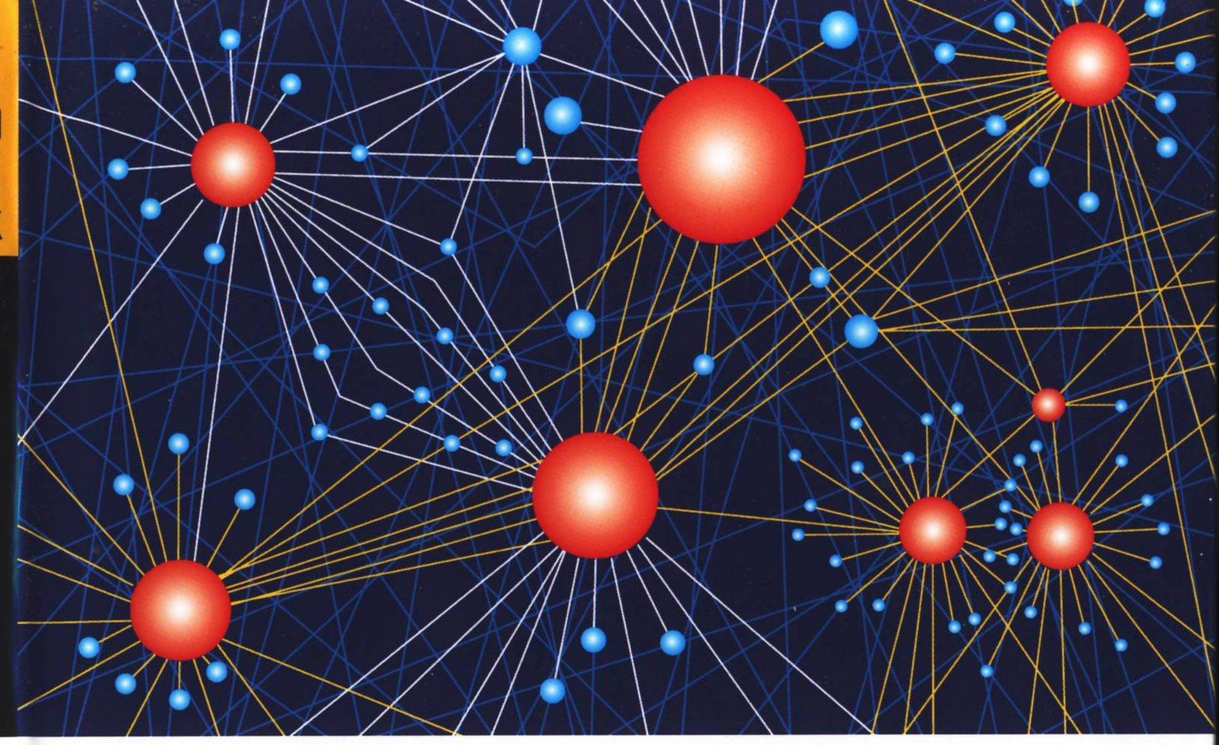
Ústřední knihovna FSS MU Brno
4240751761

V pavučině sítí

FÉNIX



MafiaBoy a spoušť na internetu – Apoštol Pavel a síť světa 1. století – Redukcionismus versus komplexita – Euler, královecký hlavolam a teorie grafů – Matematičtí géniové z Budapešti – Náhodný svět Erdöse a Rényiho – Všichni jsme jen šest kroků od sebe – Malé světy – Kolik dokumentů se skrývá na webu – Síla slabých vazeb – Shlukování v sociálních sítích – Mocninný zákon a zvonovitá křivka – Pareto a princip 80/20 – Fázový přechod a mocninné zákony – Sítě, uzly, centra – Zdatnost a ranní ptáčata – Uzel jménem Microsoft – Zrod sítě zvané internet a jeho Achillova pata – Kdy si internet uvědomí sama sebe? – Kaskádová selhání, síla center a odolnost sítě – Zastavíme epidemii AIDS? – Jak se šíří inovace aneb novátoři a centra – Topologie sexuální sítě – Lvi salonů a centra internetu – „Katastrofální úspěch" webu – Webové komunity – Architektura kyberprostoru – Postgenomová biologie a sítě – Sítě a budoucnost medicíny – Síť skandálu „šest kroků od Moniky" – Sociální a mocenské sítě v pozadí ekonomiky – Virový marketing – Co je to parazitní počítání – Al-Káida: pavučina bez pavouka – 21. století – století komplexity a biologických sítí?

ALBERT-LÁSZLÓ
BARABÁSI

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI

V pavučině sítí

PASEKA

ISBN 80-7185-751-3



FÉNIX

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI (1967) po studiu v Budapešti a na Bostonské univerzitě působí jako profesor fyziky na Univerzitě Notre Dame. Předmětem jeho zájmu jsou sítě. Je autorem monografie *Fractal Concepts in Surface Growth*.

Edice Fénix

Poslední vyšlé svazky:
Karel Sklenář: Obraz vlasti
J. M. W. Slack: O vejcích a vědcích
Richard Dawkins: Slepý hodinář
Erik Hornung: Tajemný Egypt
Jaroslav Petr: Klonování
Kevin Davies: Rozluštěný genom
Daniel L. Schacter: Sedm hříchů paměti
Bryan Sykes: Sedm dcer Eviných
J. Zrzavý, D. Storch, S. Mihulka: Jak se dělá evoluce
Jared Diamond: Třetí šimpanz
Carl Zimmer: Vládce parazit

Připravuje se:
John D. Barrow: Konstanty přírody
Robert P. Kirshner: Výstřední vesmír

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI

V pavučině sítí

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI V pavučině sítí

FENIX

FÉNIX

PASEKA

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI

V pavučině sítí

ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI

V pavučině sítí

FÉNIX

PASEKA

MASARYKOVA UNIVERZITA
Fakulta sociálních studií
Joštova 10
602 00 BRNO
8B

Copyright © 2002 by Albert-László Barabási
All rights reserved

Translation © František Slanina, 2005

ISBN 80-7185-751-3

Szüleimnek

Rodičům

Vlákno první

Úvodem

Bylo 7. února 2002 a pro internetového giganta Yahoo! to mohl být skvělý den. Místo obvyklých pár milionů zákazníků, kteří se každý den seběhnou k tomuto internetovému vyhledávači, tlačily se jich tu najednou miliardy. Po takovém návalu zájemců by se z firmy měla stát ta nejlepší investice celé „nové ekonomiky". Něco tu však nehrálo. Všichni přišli přesně ve stejný okamžik a nikdo z nich se neptal po cenách na burze ani nehledal recept na ořechový koláč. Místo toho všichni posílali zprávu, která v nářečí počítačů znamená: „Ano, slyším tě." Počítače Yahoo!, nakolik jim bylo známo, nic předtím neříkaly. A přesto v centrále Yahoo! v kalifornské Santa Claře měly stovky počítačů plné ruce práce, aby odpovídaly těmto vřískajícím duchům, zatímco miliony oprávněných zákazníků, žádajících název filmu nebo letenku, musely čekat. Já byl jedním z nich. Neměl jsem samozřejmě tušení, že Yahoo! šílí námahou, jak se snaží vyhovět deseti miliardám duchů. Tak tři minuty jsem vydržel čekat a pak jsem přešel k vyhledávači, který odpovídal ochotněji. Nazítří potkalo totéž další vládce internetu, Amazon.com, eBay, CNN.com, E*Trade a Excite: i oni museli obsluhovat miliardy duchů, kteří kladli tytéž nesmyslné dotazy, jaké předtím paralyzovaly Yahoo! Skutečným zákazníkům s blyštivými kreditními kartami dychtivým nakupovat nezbývalo než se spokojit s rolí diváků.

Je přirozeně nemožné, aby miliardy skutečných uživatelů počítačů naťukaly současně do svého prohlížeče Yahoo.com přesně v 10 hodin 20 minut. Tolik počítačů prostě neexistuje. První agenturní zprávy obviňovaly z vyřazení největších center elektronického obchodování profesionální hackery. Všichni byli zajedno, že se tito nebezpeční šílenci, fascinovaní problémem, jak přechytračit důmyslné bezpečnostní systémy, zmocnili stovek počítačů ve školách, výzkumných laboratořích a kancelářích a udělali z nich poslušné otroky, tisíckrát opakující na adresu Yahoo! to své „Ano, slyším tě". Každou vteřinu byly tyto prominentní webové stránky bombardovány nesmírným objemem dat, mnohem větším, než by kdy dokázaly

zvládnout. Masivní útok typu odepření služby, jakému byl ochromený Yahoo! vystaven, uvedl do pohybu rozsáhle mediálně přetřásaný mezinárodní hon na hackery, kteří za ním stáli.

Vysoce sledovaná operace FBI kupodivu neodhalila tolik očekávanou kyberteroristickou organizaci. Místo toho se agenti FBI ocitli v předměstském bytě jistého kanadského středoškoláka. Detektivové odposlouchávající internetové diskusní skupiny zaslechli, jak teenageři žádají, aby jim poradil, kam by mohli zaútočit příště. Byl chycen, jak se chvástá.

Patnáctiletý mladík skrývající se pod pseudonymem *MafiaBoy* úspěšně zastavil provoz společností o hodnotě miliard dolarů, disponujících těmi nejlepšími bezpečnostními experty na světě. Byl snad něco jako současný David, který vyzbrojen nejobyčejnějším podomácku vyrobeným prakem skolil Megagoliáše informačního věku? Ve zpětném pohledu se experti shodují v jednom: nešlo o dílo génia. Útoky byly provedeny nástroji dostupnými každému na různých hackerských webových stránkách. Šprýmy, které MafiaBoy na internetu trousil, ukazují, že šlo o vyloženého amatéra, a lajdácké stopy, jež za sebou zanechával, dovedly policii rovnou ke dveřím domu jeho rodičů. Jeho akce ve skutečnosti připomínaly spíše Goliáše než Davida. K proniknutí do serveru, na nějž útočil, mu chyběly znalosti, a jak se neobratně a pomalu pohyboval, dokázal pokořit jen snadné cíle, přirozeně zranitelné počítače na univerzitách a v malých firmách, jimž prostě přikázal, aby bombardovaly Yahoo! zprávami.

Dokážeme si představit patnáctiletého kluka za dveřmi jeho pokoje, v záři obrazovky, hledajícího sladkou odplatu v táhlém „Ano, slyším tě", které křičí na Yahoo! Určitě sám vřískal tuhle větu milionkrát, když ho máma nebo táta volali k večeři či chtěli, aby vynesl smetí. Úspěch útoku spočíval v hrubé síle, spoustě odvahy a troše důmyslu. Ale právě proto se musíme ptát, jak mohla akce tohoto teenagera odrovnat největší korporace nové ekonomiky? Jestliže obyčejný mladík dokáže udělat na internetu spoušť, co by mohla provést malá skupinka zkušených a zručných profesionálů? Nakolik nás mohou podobné útoky ohrozit?

* * *

První křesťané nebyli ničím víc než sektou židovských odpadlíků. Byli považováni za výstřední a dělali problémy, a proto je pronásledovaly jak židovské, tak římské úřady. Nejsou žádné historické doklady o tom, že by jejich duchovní vůdce, Ježíš z Nazareta, někdy zamýšlel rozšířit svůj vliv za rámec judaismu. Jeho myšlenky byly dost obtížně stravitelné i pro Židy a oslovit jiné národy se zdálo ještě beznadějnější. Nežidé, kteří se chtěli vydat po jeho stopách, museli především podstoupit obřízku, dodržovat předpisy tehdejšího judaismu a byli vyloučeni z Chrámu, duchovního centra raného židokřesťanství. Jen velmi málo jich šlo touto cestou. Ve skutečnosti bylo téměř nemožné, aby se k nim toto poselství dostalo. V roztříštěné společnosti připoutané k zemi bloudily nové myšlenky pěšky a všude bylo daleko. Křesťanství, podobně jako mnoho jiných náboženských hnutí v historii lidstva, se zdálo být odsouzeno k zapomenutí. Navzdory očekávání se dnes téměř dvě miliardy lidí považují za křesťany. Jak k tomu došlo? Čím to, že neortodoxní názory malé a opovrhované židovské sekty vytvořily základ dominantního náboženství celého západního světa?

Mnozí přisuzují triumf křesťanství poselství předkládanému historickou postavou, Ježíšem z Nazareta. Marketingoví experti by dnes řekli, že jeho poselství je „chytlavé" - dobře rezonovalo a přenášelo se z generace na generaci, zatímco jiná náboženská hnutí skomírala a hynula. Zásluha za úspěch křesťanství patří však ve skutečnosti pravověrnému a zbožnému Židovi, který se s Ježíšem nikdy nesetkal. Jeho židovské jméno bylo Saul, ale známe ho spíše pod jeho římským jménem Pavel. Životním posláním tohoto muže bylo *zkrotit* křesťanství. Jezdil od jednoho sboru k druhému a všude pronásledoval křesťany, protože stavěli Ježíše, odsouzeného úřady coby rouhače, na stejnou úroveň s Bohem. Pro udržení tradic, a aby donutil ty, kdo sešli ze správné cesty, přimknout se k židovskému Zákonu, používal bičování, zákazy a exkomunikace. Nicméně podle historických dokladů tento horlivý pronásledovatel křesťanství zažil roku 34 náhlé obrácení a stal se nejzapálenějším příznivcem nové víry. Díky němu se z malé židovské sekty stalo v následujících dvou tisíciletích dominantní náboženství západního světa.

Jak se to Pavlovi podařilo? Pochopil, že má-li se křesťanství rozšířit za rámec judaismu, musí se zrušit vysoké bariéry stojící před zájemci o křesťanství. A přísná nařízení o obřízce a stravovací předpisy se musí uvolnit. Se svým poselstvím šel do Jeruzaléma za prvotními Ježíšovými učedníky a získal mandát pokračovat v evangelizaci, aniž by od nových věřících vyžadoval obřízku.

Pavel však pochopil, že ani to nestačí: že se poselství musí šířit. A tak využil své vlastní znalosti sociální sítě civilizovaného světa 1. století, od Říma po Jeruzalém, a navštívil a obrátil na novou víru tolik lidí, kolik jen dokázal. V následujících dvanácti letech života procestoval téměř 20 000 kilometrů. Netoulal se však náhodně; mířil do největších obcí své doby, k těm lidem a na ta místa, kde mohla nová víra nejúčinněji růst a šířit se. Byl prvním a zdaleka nejúspěšnějším propagátorem křesťanství a teologii používal stejně účinně jako sociální sítě. Komu tedy máme děkovat za úspěch křesťanství: Pavlovi, Ježíšovi, nebo křesťanskému poselství samotnému? A mohlo by se něco podobného opakovat?

* * *

Mezi Pavlem a MafiaBoyem jsou obrovské rozdíly: MafiaBoy, to je akt destrukce, Pavel, navzdory počátečním záměrům, se stal budovatelem mostů mezi prvními křesťanskými obcemi. Tito dva muži mají ale jeden důležitý společný rys: oba mistrně ovládali síť. Ačkoli žádný z nich o tom takto nepřemýšlel, klíčem k jejich úspěchu byla existence komplexní sítě, která jim pro jejich činnost poskytla příznivé prostředí. MafiaBoy působil v síti počítačů - internet je na přelomu tisíciletí nejrychlejší a nejefektivnější způsob, jak se dostat k největšímu počtu lidí. Pavel ovládal vlákna sociální a náboženské sítě 1. století, jediné sítě, která na počátku našeho letopočtu mohla přenášet a šířit víru. Žádný z nich plně nepochopil síly, které jim pomáhaly v jejich činnosti. Ale téměř 2 000 let po Pavlovi začínáme krok za krokem chápat, proč byli oba tak úspěšní. Dnes už víme, že odpověď se skrývá jak ve struktuře a topologii sítí, tak v jejich schopnosti se v síti pohybovat.

Pavel a MafiaBoy byli úspěšní, protože nás všechny pojí vlákna mezilidských vztahů. Naše biologická existence, sociální svět, ekonomie a náboženské tradice vyprávějí podmanivý příběh o vzájemné provázanosti. Jak říkal velký argentinský spisovatel Jorge Luis Borges, „všechno se dotýká všeho".

* * *

„Zde jsou lvi," psávali dávní tvůrci map, když chtěli vyznačit děsivé neznámo. Jak do všech koutů planety pronikali nebojácní cestovatelé, podobně označované oblasti postupně mizely. V naší mentální mapě znázorňující, jak navzájem souvisí různé části světa, od mikroskopického vesmíru uvězněného v buňce po neohraničený svět internetu, však stále zůstává spousta míst obydlených lvy. Naštěstí poslední dobou se vědci učí naše vzájemná propojení mapovat. Jejich mapy vrhají nové světlo na náš pavučině podobný vesmír a nabízejí problémy a překvapení, o jakých se nám před pár lety ani nesnilo. Podrobné mapy internetu vyjevily jeho zranitelnost při hackerském útoku. Mapy firem spojených vzájemným obchodem a vlastnickými vztahy vysledovaly stezky moci a peněz v Silicon Valley* a mapy vzájemného působení mezi jednotlivými druhy v ekosystému nám umožňují zahlédnout ničivý dopad lidské činnosti na životní prostředí. Mapy spolupracujících genů v buňce nám poskytly informace o tom, co se děje při rakovinném bujení. Skutečné překvapení však přišlo, když se tyto mapy položily jedna vedle druhé. Tak jako různí lidé mají kostry, které se od sebe téměř nedají odlišit, i tyto nejrůznější mapy sledují společný stavební plán. Série nedávných úchvatných objevů nás přivedla k pochopení, že struktura a vývoj složitých sítí, které nás obklopují, se řídí úžasně jednoduchými a obecně platnými přírodními zákony.

* * *

Viděli jste někdy dítě rozebírat svou oblíbenou hračku? A viděli jste pak toho mrňouse, jak brečí, protože zjistil, že součástky ne a ne složit zase dohromady? Tak tady máte tajemství, které se nikdy neobjeví na prvních stránkách novin: rozebrali jsme svět na části a nemáme představu, jak ho zase složit zpět. Poté co jsme ve 20. století utratili biliony dolarů, abychom přírodu rozkouskovali, dnes poznáváme, že vůbec nevíme, co dělat dál - jedině rozebrat ji ještě víc.

Redukcionismus byl ve 20. století hnací silou velké části vědeckého výzkumu. Redukcionismus nám říká, že pokud chceme přírodu pochopit, musíme nejdříve rozšifrovat, z čeho se skládá. Předpokládá se, že jakmile pochopíme části, bude jednoduché uchopit celek. Rozděl a panuj; ďábel je v detailech. A tak jsme celá desetiletí pozorovali svět skrze jeho skladebné části. Učili nás studovat atomy a su-

* Silicon Valley v Kalifornii je proslavené koncentrací elektrotechnického a počítačového průmyslu (pozn. překl.).

perstruny, abychom chápali vesmír, molekuly, abychom pochopili život, jednotlivé geny, abychom pochopili komplexní lidské chování, a proroky, abychom poznali původ náboženství a kultů.

Dnes jsme se sice přiblížili téměř úplnému poznání toho, co se lze dozvědět o částech, ale od pochopení přírody jako celku máme stejně daleko jako kdykoli předtím. Ukázalo se, že skládání dílů dohromady je úkol mnohem těžší, než vědci předpokládali. A to z prostého důvodu: redukcionistický rozjezd narazil na tvrdou zeď komplexity. Poučili jsme se, že příroda není chytře vymyšlená skládačka, která se dá složit jen jedním způsobem. V komplexních systémech se součástky dají sestavit tolika různými způsoby, že by nám trvalo miliardy let, než bychom je všechny vyzkoušeli. A přece příroda skládá dílky s lehkostí a přesností, zdokonalovanou miliony let. Využívá při tom všeobsáhlé zákony samoorganizace, jejichž původ je pro nás stále do značné míry tajemstvím.

Dnes se stále víc a více přesvědčujeme o tom, že nic se neděje izolovaně od celku. Většina událostí a jevů má svůj původ v nesmírných množstvích jiných kostiček komplexní vesmírné skládačky, souvisí s nimi a je jimi ovlivňována. Dospěli jsme k poznání, že žijeme v malém světě, kde vše je spojeno se vším ostatním. Jsme svědky probíhající revoluce, při níž vědci z nejrůznějších oborů objevují, že komplexita má svou přísnou architekturu. Došli jsme k poznání, jak důležité jsou sítě.

Jak naše životy stále víc ovládá internet, bere si slovo *síť* do úst kdekdo a skvěje se i v názvech firem a titulech časopisů. Po 11. září 2002, které ukázalo vražednou moc teroristických sítí, jsme si zvykli na další význam tohoto slova. Jen málokdo si však uvědomuje, že rychle se rozvíjející věda o sítích odhaluje jevy, které jsou mnohem víc vzrušující a objevné, než dovede běžně užívaný termín *síť* vůbec vyjádřit. Některé z těchto objevů jsou tak čerstvé, že mnoho klíčových výsledků koluje mezi odborníky ještě ve formě nepublikovaných rukopisů. Otvírají zcela novou perspektivu vzájemně propojeného světa kolem nás a dávají tušit, že sítě budou ovládat nové století mnohem výrazněji, než je většina lidí ochotna připustit. Budou motorem základních otázek, které formují náš světový názor v nadcházejícím věku.

Cíl této knihy je prostý. Přimět vás, abyste mysleli v jazyce sítí. Seznámit vás s tím, jak sítě vznikají, jak vypadají a jak se vyvíjejí. Ukáže vám pohled na přírodu, společnost a ekonomiku jako velkou

pavučinu, nový rámec pro chápání věcí sahající od demokracie na webu po zranitelnost internetu a šíření zákeřných virů.

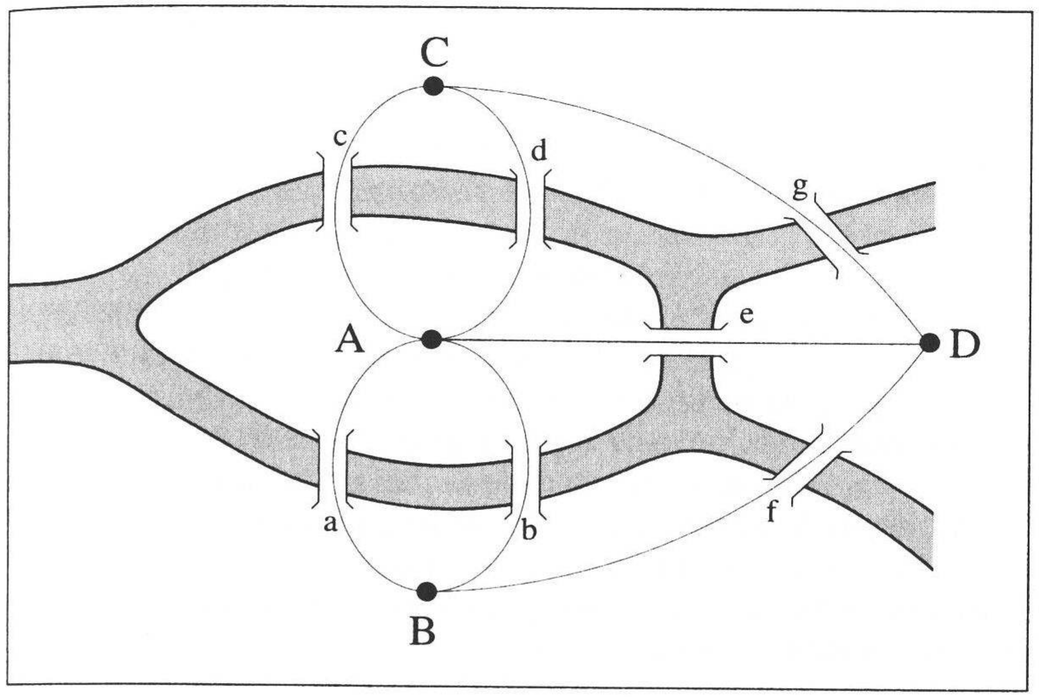
Sítě najdete doslova všude. Stačí se správně dívat. Jak budete procházet touto knihou od jednoho vlákna k druhému, naučíte se pohlížet na společnost jako na komplexní sociální pavučinu a uvědomíte si malost toho velkého světa, v němž žijeme. Postupně pochopíte, jak a proč uspěl apoštol Pavel a že - navzdory zřejmým rozdílům - působil v podobných společenských podmínkách jako my dnes. Uvidíte, s jakými problémy se potýkají lékaři, když se snaží vyléčit chorobu tak, že se soustředí na jednu molekulu nebo gen, a neberou v úvahu složitou vzájemnou propojenost živoucí hmoty. Ukážeme vám, že to není jen MafiaBoy, kdo útočí na sítě. Postupně oceníte, jak se internet, často považovaný za čistě lidský výtvor, začal podobat spíše jakémusi organismu či ekosystému; demonstruje tak sílu základních zákonů řídících veškeré sítě. Uvidíte, jak se i terorismus objevuje podle zákonů formování sítí a jak tyto vražedné pavučiny zneužívají přirozenou robustnost sítí vytvořených přírodou. Podivíte se úžasné podobnosti systémů tak odlišných, jako je ekonomika, buňka a internet, a jeden vám poslouží k pochopení druhého. Tento výlet napříč různými obory vám doufám otevře oči a povzbudí vás, abyste vystoupili ze zajetí redukcionismu a vlákno po vláknu se seznámili s nejnovější vědeckou revolucí: novou vědou o sítích.

Vlákno druhé

V říši náhody

Toho 18. září 1783 začínal Leonhardu Eulerovi v Petěrburgu den jako každý jiný. Dal lekci matematiky jednomu ze svých vnoučat a pustil se do výpočtů týkajících se letu balonu. Před pouhými třemi měsíci vypustili jižně od Lyonu bratři Montgolfierové obrovský měch, který vystoupal 1 200 metrů do povětří a bezpečně přistál asi kilometr opodál. Euler počítal mechaniku pohybu balonu, protože bratři Montgolfierové se chystali předvést králi Ludvíku XVI. v Paříži let balonu s ovcí, což se také následujícího dne, 19. září, stalo. O této události se však Euler neměl nikdy dozvědět. Po obědě pracoval se svými asistenty na výpočtech oběžné dráhy nedávno objevené planety Uran. Rovnice, které zavedl a které vystihovaly zvláštní oběžnou dráhu této planety, povedou o několik desítek let později k objevu planety Neptun. Ani tohoto objevu se Euler nedožil. Kolem páté hodiny odpoledne jej postihlo krvácení do mozku, a než ztratil vědomí, stačil pronést jen: „Umírám." Ještě téhož večera se kariéra nejplodnějšího matematika všech dob završila.

Euler, původem Švýcar, který strávil svou profesionální dráhu v Berlíně a v Petěrburgu, měl zcela výjimečný vliv na všechny oblasti matematiky, fyziky a techniky. Nejenže význam jeho objevů nemá obdoby, ale už pouhé jejich množství je nesmírné. Eulerovy sebrané spisy, jejichž vydávání ještě nebylo dokončeno, obnášejí dnes 73 stostránkových svazků. Posledních sedmnáct let jeho života, od návratu do Petěrburgu roku 1766 do jeho smrti ve věku šestasedmdesáti let, představovalo dosti neklidné období. A přesto, navzdory mnoha osobním tragédiím, vytvořil v těchto letech zhruba polovinu svého díla, například pojednání o pohybu Měsíce v rozsahu 775 stran, široce užívanou učebnici algebry, třísvazkové pojednání o integrálním počtu, a při tom všem stále publikoval průměrně jeden matematický článek týdně v časopise petěrburské Akademie věd. Úžasné na tom je, že v té době stěží napsal nebo přečetl řádek textu. Brzy po svém návratu do Petěrburgu v roce 1766 přišel částečně o zrak a po neúspěšné operaci šedého



Královecké mosty. Plánek Královce před rokem 1875, s ostrovem Kneiphofem (*A*) a oblastí souše *D* sevřené dvěma rameny řeky Pregel. Vyřešit královecký problém znamenalo najít okružní trasu městem, která člověka převede přes každý z mostů právě jednou. Leonhard Euler nahradil každou z oblastí souše uzlem (*A* až *D*) a každý most hranou (*a* až *g*) a dostal tak graf se 4 uzly a 7 hranami a pak dokázal, že na královeckém grafu neexistuje žádná cesta, která by procházela každou hranou právě jednou. Tak se v roce 1736 zrodila teorie grafů..

zákalu roku 1771 oslepl úplně. Všechny ty tisíce stran matematických formulí diktoval zpaměti.

O třicet let dříve, když mu zrak ještě sloužil, sepsal krátký článek, v němž se zabýval zábavným problémem, který vznikl v Královci, městě nepříliš vzdáleném od Petěrburgu.* Královec, kvetoucí metropole Východního Pruska, nemohl na počátku 18. století vědět, jaký smutný a válkou poznamenaný osud jej čeká jakožto dějiště jedné z nejkrutějších bitev 2. světové války. Na soudobých leptech vidíme prosperující město na březích řeky Pregel (Pregola), kde čilý námořní ruch a směna zboží poskytovaly pohodlné živobytí místním obchodníkům a jejich rodinám. Zdravé hospodářství umožnilo městské radě postavit přes řeku hned sedm mostů. Většina z nich spojo-

* Frázi „nepříliš vzdálené" musíme chápat z perspektivy obyvatele USA. Královec je ve skutečnosti vzdušnou čarou blíž k Praze než k Petěrburgu (pozn. překl.).

MASARYKOVA UNIVERZITA
Fakulta sociálních studií
Joštova 10
602 00 BRNO
8B

vala elegantní ostrov Kneiphof, vklíněný mezi dvěma rameny řeky, s ostatními částmi města. Další dva mosty překračovaly dvě říční ramena (viz obr. na str. 17). Obyvatelé Královce, ukolébaní obdobím míru a prosperity, se rádi bavili různými hlavolamy, a jeden z nich zněl takto: „Je možné přejít všech sedm mostů a nejít po žádném z nich dvakrát?“ Nikomu se nepodařilo takovou cestu najít, dokud v roce 1875 nepostavili ještě další most.

Téměř 150 let před stavbou nového mostu, roku 1736, předložil Euler přesný matematický důkaz, že v případě sedmi mostů žádná taková cesta neexistuje. Nejenže vyřešil královecký hlavolam, ale ve svém krátkém článku i nevědomky založil nesmírně rozsáhlý matematický obor, teorii grafů. Dnes je teorie grafů základem našich úvah o sítích. Ve staletích po Eulerovi se z ní stala vyspělá disciplína, k níž přispěla většina velkých matematiků. Jako úvod do světa sítí si krátce připomeňme postup Eulerových myšlenek, které vedly k zavedení vůbec prvního grafu.

* * *

Eulerův důkaz je jednoduchý a elegantní a pochopí ho i ten, kdo nestudoval matematiku. Do historie se však nezapsal ani tak samotný důkaz, jako spíš jeden jeho krok, který Euler učinil, aby dospěl k řešení. Eulerova převratná idea spočívala v tom, že si představil Královec s jeho mosty jako *graf* neboli soubor *uzlů* spojených vlákny neboli *hranami.** Provedl to tak, že každou ze čtyř oblastí pevniny, oddělených řekou, reprezentoval jedním uzlem, a označil si je písmeny *A*, *B*, *C* a *D*. Pak nakreslil mosty jakožto hrany a spojil jimi ty oblasti souše, které navzájem spojoval most. Tak dostal graf, v němž uzly byly oblasti souše a hrany byly mosty.

Eulerův důkaz, že v Královci není žádná cesta, která by procházela všemi mosty a každým právě jednou, se zakládal na jednoduchém pozorování. Uzly, z nichž vychází lichý počet hran, musí být buď počátečním, nebo koncovým bodem procházky. Souvislá cesta, která prochází všemi mosty, může mít pouze jeden počáteční a jeden koncový bod. Taková cesta tedy nemůže existovat v grafu, který

* Anglický termín *link* překládáme podle kontextu různým způsobem, jako *hrana*, *vazba*, *odkaz* nebo *vlákno*. Česká matematická literatura používá výhradně termín *hrana* (pozn. překl.).

má více než dva uzly s lichým počtem hran. A protože graf města Královce má takové uzly čtyři, požadovanou cestu není možné najít.

Pro nás je na Eulerově důkazu nejdůležitější to, že existence cesty nezávisí na tom, jak důmyslně ji hledáme – jde o *vlastnost samotného grafu*. Jakmile je jednou dáno schéma královeckých mostů, pak i kdybychom byli sebechytřejší, nepodaří se nám nikdy žádanou cestu najít. Obyvatelé Královce nakonec dali Eulerovi za pravdu, zanechali neplodných pokusů a roku 1875 postavili mezi oblastmi *B* a *C* nový most, čímž zvýšili počet hran u těchto uzlů na čtyři. Nyní zbývaly už jen dva uzly (*A* a *D*) s lichým počtem hran. Pak už bylo docela snadné najít požadovanou cestu. Možná že skrytým důvodem ke stavbě mostu bylo právě obohatit město o tuto procházkovou trasu.

Podíváme-li se zpět, uvidíme poučení, které sám Euler nezamýšlel: v konstrukci grafů či sítí se skrývají některé vlastnosti, které nás omezují či nám naopak pomáhají, když tyto sítě chceme k něčemu používat. Více než dvě století omezovalo schéma královeckého grafu možnosti občanů města vyřešit jejich kavárenský problém. Teprve změna schématu, jedna hrana navíc, toto omezení okamžitě odstranila.

V mnoha ohledech symbolizuje Eulerův výsledek důležité poselství obsažené v této knize: stavba a struktura grafů či sítí je klíčem k pochopení komplexního světa kolem nás. Malá změna topologie, týkající se pouze několika málo uzlů nebo hran, může otevřít skryté dveře a uvolnit prostor novým možnostem.

Teorie grafů po Eulerovi zažila prudký rozmach a přispěli k ní takoví matematičtí velikáni, jako byli Augustin-Louis Cauchy, William Hamilton, Arthur Cayley, Gustav Kirchhoff a George Pólya. Objevili skoro všechno, co je dnes známo o velkých uspořádaných grafech, jako jsou mřížky vytvářené atomy v krystalu či šestiúhelníkové mřížky, které skládají včely, když dělají plástev. Až do poloviny 20. století byl cíl teorie grafů jednoduchý: snažila se objevit a katalogizovat vlastnosti různých typů grafů. Mezi slavné problémy patřilo hledání únikové cesty z bludiště či labyrintu, což bylo poprvé vyřešeno roku 1873, nebo hledání posloupnosti kroků jezdce na šachovnici tak, aby každé políčko bylo navštíveno právě jednou a aby se jezdec vrátil zpět do své výchozí pozice. Některé z obtížnějších problémů zůstávaly oříškem celá staletí.

Od Eulerovy inspirující práce uběhla dvě století, než matematici přešli od studia vlastností nejrůznějších grafů k tomu, že si položili naprosto zásadní otázku, jak grafy, či obecněji sítě, vznikají. Tyto otázky, a také první odpovědi na ně, se objevily teprve v padesátých letech 20. století, když dva maďarští matematici provedli v teorii grafů revoluci.

* * *

Jednoho odpoledne na sklonku dvacátých let 20. století kluše ulicemi Budapešti sedmnáctiletý mladík s výstředním držením těla a zastaví se před módním obchodem s obuví, kde se prodávají boty šité na míru. Se svou nohou neobvyklého tvaru, na niž žádné normální boty nepadnou, by skutečně mohl vzít zavděk ševcem. On ale nepřišel kvůli novým botám. Poté co zaklepal na dveře obchodu – což vypadalo stejně podivně tehdy jako dnes – vstoupil, minul bez povšimnutí prodavačku za pultem a šinul si to za čtrnáctiletým chlapcem v zadní části obchodu.

„Řekni čtyřciferné číslo," vybafl na něj.

„2 532," vyhrkl chlapec, civěje na podivného návštěvníka. Ten ho však nenechal zírat příliš dlouho.

„Jeho druhá mocnina je 6 411 024," pokračoval. „Promiň, ale stárnu a třetí mocninu ti říct nedokážu. Kolik znáš důkazů Pythagorovy věty?"

„Jeden," odvětil mladík.

„Já jich znám třicet sedm," řekl a bez oddechu pokračoval. „Věděl jsi, že body úsečky netvoří spočetnou množinu?" Poté co pozornému chlapci vyložil Cantorův důkaz, zakončil návštěvu slovy „Už musím běžet", otočil se na podpatku a pádil z krámu pryč.

Paul Erdős pádil ke své budoucnosti vůdčího génia a člověka, který se naprosto nehodil do 20. století. Do své smrti v roce 1996 napsal více než 1 500 matematických článků. Mezi těmito výsledky, které svým objemem nemají obdoby od Eulerových časů, je osm článků, které publikoval společně s dalším maďarským matematikem, Alfrédem Rényim.* Těchto osm článků se poprvé v historii zabývalo stěžejní otázkou našeho vzájemně provázaného světa, otázkou, jak vůbec vznikají sítě. Řešení v nich obsažené položilo základy teorie

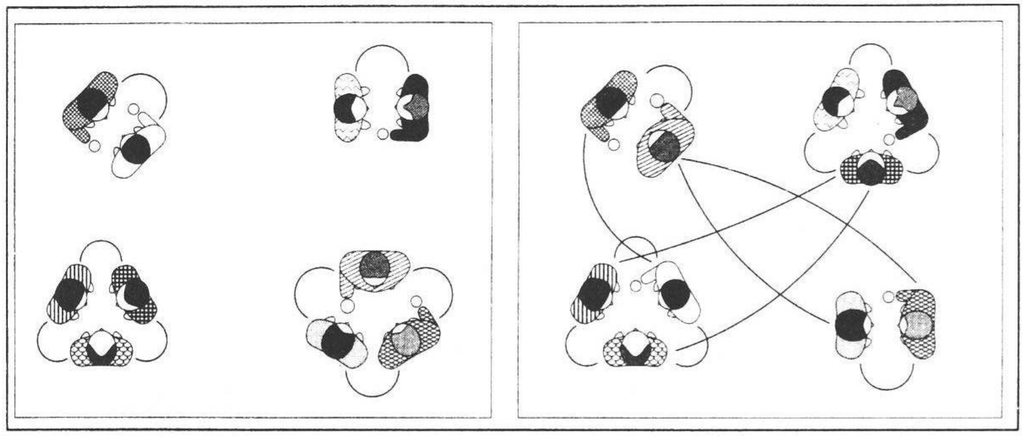
* Česky vyšla jeho populární kniha *Dialogy o matematice*, Praha 1980.

náhodných sítí. Tato elegantní teorie ovlivnila natolik hluboce naše myšlení o sítích, že se z jejího objetí ještě stále vymaňujeme.

* * *

Představte si, že pořádáte večírek pro sto hostů, které jste vybrali a pozvali právě proto, že žádný z nich nikoho dalšího z pozvaných nezná. Nabídněte této skupině neznámých lidí víno a něco k zakousnutí, a oni si okamžitě začnou povídat, protože vrozená touha setkávat se a poznávat jeden druhého je nutně svede dohromady. Společnost se brzy rozpadne na třicet až čtyřicet skupinek po dvou či po třech. V té chvíli zkuste utrousit před jedním z hostů, že to červené víno v neoznačených tmavozelených lahvích je vzácné dvacetileté prvotřídní portské, mnohem lepší, než to s tou červenou etiketou. Zároveň ho ale požádejte, aby to neříkal nikomu jinému než svým novým blízkým známým. Víte, že vaše drahé portské je docela v bezpečí, protože dotyčný návštěvník neměl čas se seznámit s více než dvěma či třemi lidmi v místnosti. Hosty však nevyhnutelně začne nudit bavit se příliš dlouho s týmž člověkem, takže se budou přesouvat od jedné skupiny k druhé. Vnější pozorovatel si ničeho zvláštního nevšimne. Mezi lidmi, kteří se potkali už dříve, ale teď patří k různým skupinkám, se však stačily vytvořit neviditelné sociální vazby. V důsledku toho začínají osoby, které se stále ještě navzájem neznají, spojovat komplikované řetězce. Například ačkoli Petr ještě neměl příležitost poznat Jiřinu, oba dva se znají s Pavlem a existuje tedy cesta od Petra k Jiřině přes Pavla. Kdyby se Petr dozvěděl o onom kvalitním víně, je dost dobře možné, že to bude zakrátko vědět i Jiřina, protože to mohla slyšet od Pavla, kterému to možná prozradil Petr. Postupem času budou hosté čím dál víc opřádáni těmito nehmotnými vlákny sociálních vazeb a tak vznikne mezi značnou částí hostů jemná pavučina známostí. Jak zvěst o vzácném víně, známá předtím jen nepatrné skupině znalců, proniká k dalším a dalším diskutujícím hloučkům, dostává se víno do stále většího ohrožení (obr. na str. 22).

Budeme-li předpokládat, že každý z hostů předá informaci každému ze svých nových známých, dostane se zvěst o výtečném portském ke všem hostům ještě před koncem oslavy? Je jasné, že kdyby každý znal každého, všichni by si nalévali to skvělé víno z neoznačené láhve. Ale i kdyby každé setkání trvalo pouze 10 minut, poznat všech de-



Večírek. Když se na večírek dostaví deset hostů, kteří se na začátku navzájem neznají, začínají se tvořit sociální vazby při rozhovorech v malých skupinkách. Nejdříve jsou skupinky navzájem izolované (levý panel). Ačkoli mezi členy téže skupinky existují sociální vazby (naznačené souvislými čarami), všichni, kdo jsou mimo skupinku, jsou si stále cizí. Jak plyne čas (pravý panel), tři hosté se přesunují k jiným skupinkám a vytváří se gigantický shluk. Třebaže nezná každý každého, existuje nyní jednotná sociální síť, která zahrnuje všechny hosty. Když postupujeme podél sociálních vazeb, můžeme teď najít cestu mezi kterýmikoli dvěma hosty.

větadevadesát ostatních by zabralo asi tak 16 hodin. Večírky zřídka trvají tak dlouho. Proto si možná myslíte, že když prozradíte tajemství onoho vína svému příteli, na konci večírku vám ještě něco zbude.

Paul Erdős a Alfréd Rényi si dovolili nesouhlasit. „Matematik je stroj, který z kávy vyrábí teorémy," citoval s oblibou Erdős Rényiho. Jeden zvlášť šťastný šálek kávy se proměnil v často citovaný teorém: Jestliže se každá osoba seznámí nejméně s *jedním* dalším hostem, pak brzy budou všichni pít vzácné portské. Podle Erdőse a Rényiho postačí jen 30 minut, než se vytvoří jediná neviditelná sociální pavučina, zahrnující všechny hosty v místnosti, a pár minut poté, co vám někdo to víno doporučí, už možná budete do své přichystané skleničky vylévat poslední kapky z prázdné láhve.

* * *

Hosté na našem večírku souvisejí s problémem teorie grafů, odvětvím matematiky, u jehož zrodu stál Euler. Hosté jsou uzly a jejich vzájemná setkání vytvářejí sociální vazby neboli hrany. Vzniká tedy pavučina známostí, graf, v němž je skupina uzlů spojena hranami. Počítače propojené telefonními linkami, molekuly v našem těle spo-

jené navzájem prostřednictvím biochemických reakcí, firmy a zákazníci spojení obchodem, nervové buňky spojené axony, ostrovy propojené mosty, to všechno jsou příklady grafů. Ať je identita a podstata uzlů a hran jakákoli, pro matematika je to pořád stejná písnička: jde o *graf* či *síť*.

Zjednodušení všech reálných sítí na grafy nás přes svou eleganci staví před obrovské problémy. Ačkoli lidská společnost, internet, buňka či mozek mohou být stejně dobře reprezentovány pomocí grafů, rozhodně se navzájem velmi liší. Je těžké si představit, v čem se shoduje lidská společnost, kde se navazují přátelství a známosti kombinací náhodných setkání a uvážených rozhodnutí, s buňkou, v níž veškeré reakce mezi molekulami řídí nemilosrdné zákony chemie a fyziky. Musí existovat jasný rozdíl mezi pravidly, podle nichž se rozmísťují vazby v různých sítích, s nimiž se setkáváme v přírodě. Najít model, který by popisoval všechny takové systémy, se navenek jeví jako nepřekonatelný problém.

Přesto je konečným cílem všech vědců najít nejjednodušší možné vysvětlení velmi složitých jevů. Erdős a Rényi se do řešení této otázky pustili a navrhli elegantní matematickou odpověď, která by popisovala všechny složité grafy v rámci jednoho schématu. Právě proto, že se rozličné systémy při budování svých sítí řídí velmi odlišnými pravidly, Erdős a Rényi tuto rozmanitost zanedbali a přišli s nejjednodušším řešením, které *by mohla* příroda použít: spojovat uzly náhodně. Rozhodli se, že *nejjednodušší* způsob, jak vytvořit síť, je házet kostkou. Pravidlo zní takto: Vyber dva uzly, a když ti padne šestka, spoj je hranou. Když ti padne cokoli jiného, uzly nespojuj. Pak si zvol další dvojici uzlů a pokračuj. Erdős s Rényim tedy viděli grafy a svět, který reprezentují, jako zásadně náhodné.

„Lidé se odedávna přou," říkával s oblibou Erdős, „zda matematiku vytváříme, nebo prostě jen objevujeme. Jinými slovy, existují matematické pravdy, i když o nich ještě nevíme?" Erdős měl na tuto otázku jasnou odpověď: Tak jako jiné absolutní pravdy existují i pravdy matematické a my je pouze znovu objevujeme. Zdálo se mu, že teorie náhodných grafů, tak elegantní a jednoduchá, patří k věčným pravdám. Dnes však víme, že náhodné sítě hrají při stavbě našeho světa jen nepatrnou roli. Příroda se místo toho uchýlila k několik málo základním zákonitostem, které odhalíme v následujících kapitolách. Sám Erdős byl tvůrcem matematických pravd a autorem alternativního pohledu na náš svět, vtěleného do teorie

náhodných grafů. Jelikož neznal přírodní zákony řídící stavbu mozku či lidské společnosti, udělal Erdős ten nejlepší možný odhad: předpokládal, že se Bůh baví hrou v kostky. To jeho princetonský přítel Albert Einstein měl opačný názor: „Bůh nehraje s vesmírem v kostky," říkával.

* * *

Vraťme se k našemu koktejlovému večírku a přibližme si teorii grafů prakticky. Začněme s velkým počtem izolovaných uzlů. Pak uzly náhodně spojujme vazbami čili hranami, což bude představovat náhodná setkání hostů. Přidáme-li jen několik málo spojů, dosáhneme pouze toho, že některé uzly budou spojeny po dvou. Budeme-li dodávat další hrany, nutně spojíme navzájem některé z těchto párů a vytvoříme tak shluky několika uzlů. Když však přidáme tolik hran, že na každý uzel bude připadat v průměru *jedna* hrana, stane se zázrak: objeví se jediný gigantický shluk. Většina uzlů se stane součástí jediného shluku, takže když vyjdeme z libovolného uzlu a budeme procházet podél hran, které je spojují, můžeme se dostat do kteréhokoli jiného uzlu. V tomto okamžiku se také vaše drahé víno ocitne v nebezpečí, protože jakákoli zvěst se může dostat ke každému, kdo patří ke gigantickému shluku. Matematici tomuto jevu říkají, že se objevila gigantická komponenta, tedy taková, která zahrnuje značnou část všech uzlů. Fyzici pro to mají termín perkolace a vysvětlí vám, že jste byli právě svědky fázového přechodu, podobného zmrznutí vody. Sociologové vám řeknou, že vaše subjekty právě vytvořily společenství. Ačkoli různé obory mohou pracovat s různou terminologií, všechny jsou zajedno v tom, že když v síti náhodně vybíráme a spojujeme dvojice uzlů, děje se něco zvláštního: poté co rozmístíme kritické množství hran, síť se dramaticky změní. *Předtím* jsme měli hromadu malých izolovaných shluků uzlů, oddělených skupin lidí komunikujících pouze uvnitř jednoho shluku, *potom* máme gigantický shluk, v němž se propojili téměř všichni.

* * *

Každý z nás je součástí jednoho velkého shluku, celosvětové sociální sítě, z níž nikdo nemůže uniknout. Neznáme všechny lidi na planetě, ale je jisté, že v této lidské pavučině existuje spojnice mezi každými dvěma z nás. Podobně existuje cesta mezi každými dvěma neurony v našem mozku, mezi každými dvěma firmami na světě, mezi každými dvěma chemickými sloučeninami v našem těle. Nic není ponecháno mimo tuto vysoce provázanou síť života. Paul Erdős a Alfréd Rényi nám říkají, proč je tomu tak: stačí *jen jedna vazba na jeden uzel*, a všichni jsou spojeni. Jedna známost na osobu, od každého neuronu jedno vlákno alespoň k jednomu dalšímu neuronu, schopnost účastnit se alespoň jedné reakce na každou chemikálii v našem těle, obchod alespoň s jednou společností ve světě byznysu. Jednička představuje mezní hodnotu. Mají-li uzly v průměru méně než jeden spoj, pak se naše síť rozpadá v drobné nekomunikující shluky. Máme-li více než jedno spojení na jeden uzel, pak nám takové nebezpečí nehrozí.

Příroda neustále a výstředně překračuje toto minimum jedné vazby. Sociologové odhadují, že známe jménem něco mezi 200 a 5 000 lidmi. Průměrný neuron je spojen s desítkami jiných, některé s tisíci. Každá firma je zákonitě spojena se stovkami dodavatelů a zákazníků. Většina molekul v našem těle se účastní mnohem více než jen jedné reakce; některé, jako třeba voda, až stovek reakcí. Reálné sítě nejenže jsou propojené, ale jsou i daleko za hranicí jedné vazby. Teorie náhodných sítí nám říká, že když průměrný počet hran na jeden uzel roste nad kritickou hodnotu jedna, počet uzlů, které zůstávají mimo gigantický shluk, exponenciálně klesá. To znamená, že čím více hran přidáváme, tím je těžší najít izolovaný uzel. Příroda neriskuje pobyt blízko mezní hodnoty. Jde daleko za ni. Z toho plyne, že sítě kolem nás nejsou obyčejné pavučiny. Jsou to velice husté sítě, z nichž nic nemůže uniknout a v nichž se můžeme dostat ke kterémukoli z uzlů. Právě proto neexistují ostrovy s lidmi naprosto izolovanými od zbytku společnosti a právě proto jsou všechny molekuly v našem těle zapojeny do jednotné komplexní buněčné mapy. Proto také zvěst apoštola Pavla dostihla lidi, s nimiž se on sám nikdy nepotkal, a proto se MafiaBoy dostal do titulků novin: podél vláken sítě jejich aktivita snadno zasáhla miliony.

* * *

Objev Erdőse a Rényiho, že existuje tento velice zvláštní okamžik, kdy se při fázovém či perkolačním přechodu vytvoří gigantický shluk, byl pro teorii grafů zásadní. Ne však kvůli neuvěřitelné před-

povědi, že stačí jediná známost k tomu, aby se vytvořila komunita, ale spíš proto, že před Erdősem a Rényim se teorie grafů nezabývala koktejlovými dýchánky, sociálními sítěmi nebo náhodnými grafy. Zaměřovala se téměř výlučně na pravidelné grafy, jejichž struktura je zcela jednoznačná. Když se však dostaneme k takovým komplexním systémům, jako je internet či buňka, pravidelné grafy budou spíše výjimkou než pravidlem. A právě Erdős a Rényi jako první rozpoznali, že reálné grafy, od sociálních sítí po telefonní linky, nejsou úhledně pravidelné, ale naopak beznadějně komplikované. V pokoře před jejich složitostí předpokládali, že tyto sítě jsou náhodné.

Ve zpětném pohledu nepřekvapuje, že právě tato neobvyklá dvojice matematiků provedla převrat v zavedeném odvětví matematiky, když do něho vložila náhodnost. Náhoda a nahodilost se v jejich životech uplatňovala velmi často. Ačkoli Rényi byl o sedm let mladší než Erdős, poznali se v Budapešti díky přátelství svých rodičů. Než po setkání roku 1948 v Amsterdamu začali pracovat společně, zažívali oba dosti bouřlivé období. Kvůli zákonům o směrných číslech, které omezovaly počet Židů přijatých na vysokou školu, pracoval Rényi po střední škole v loděnici. Poté co vyhrál soutěž v matematice a řečtině, dovolili mu v roce 1939 zapsat se na univerzitu. Brzy poté co ukončil studia matematiky, byl poslán do tábora nucených prací, odkud se mu nějak podařilo uprchnout.

Erdős a jeho kolegové, kteří věděli o Rényiho činnosti v odboji během války, jej hluboce obdivovali a vážili si ho. Rényi se neohroženě převlékal do uniformy Šípových křížů, maďarských fašistů, aby pomáhal svým přátelům k útěku z koncentračního tábora. Podle jednoho svědectví pronikl do budapešťského ghetta oblečený jako voják Šípových křížů a podařilo se mu odtamtud dostat své rodiče. Léta žil v nacisty ovládané Budapešti s falešnými doklady. Jen ti, kdo dobře znali realitu nacistického teroru, mohli dostatečně ocenit odvahu, kterou takové činy vyžadovaly. Není divu, že až do konce války byly Rényiho možnosti věnovat se matematice velmi omezené. Teprve roku 1946 odcestoval do Leningradu, aby pokračoval ve svých studiích. Tam jeho tvůrčí aktivita explodovala. Nejenže se naučil a vstřebal v rekordním čase teorii čísel, ačkoli uměl jen špatně rusky, ale dokázal také několik základních vět týkajících se prosluléhо obtížného problému teorie čísel, takzvané Goldbachovy hypotézy.* A tak když se o dva roky později setkal v Amsterdamu s Erdősem, nebyl už jen mladým nadějným matematikem a rodinným přítelem, ale známým vědcem s mezinárodním věhlasem.

Erdős už v té době proslul svým životním stylem kočovného matematika. Objevoval se v domovních dveřích kolegů s prohlášením „Můj mozek je připraven", čímž je vyzýval, aby se připojili k jeho neúnavnému hledání matematické pravdy. Jediná nabídka stálého pracovního místa přišla z Univerzity Notre Dame v South Bendu v Indianě. Arnold Ross, který byl v té době vedoucím katedry matematiky, nabídl Erdősovi místo hostujícího profesora za velmi velkorysých podmínek: mohl si odjet a přijet, jak se mu zlíbilo, protože dostal k ruce asistenta, který mohl převzít jeho přednášky v tom místě, kde je přerušil.

Katolická Univerzita Notre Dame nebyla tehdy ještě tou slavnou univerzitou, jíž se stala o několik desetiletí později, poskytla však Erdősovi klidné a příjemné prostředí k práci a možnost často diskutovat s kolegy kněžími, v čemž si Erdős, který zastával svérázné názory na vesmír a božství, obzvlášť liboval. Když se ho jednou ptali na toto období života, žertem prohodil: „Bylo tam příliš mnoho plusů," v narážce na početné krucifixy v univerzitním areálu. Když mu pak na Notre Dame nabídli místo stálého profesora za stejně příznivých podmínek, zdvořile odmítl. Možná nedokázal přenést přes srdce ztrátu nahodilosti a nepředvídatelnosti, pro něho tak příznačných.

* * *

Amsterdamské setkání Erdőse a Rényiho bylo začátkem velmi těsného přátelství a spolupráci, která vyústila ve více než třicet společných publikací, ukončila až Rényiho předčasná smrt roku 1970 ve věku čtyřiceti devíti let. Mezi těmito publikacemi bylo i oněch osm legendárních článků o teorii grafů. První z nich, který vyšel více než deset let po setkání v Amsterdamu, se poprvé zabýval důležitou otázkou vzniku grafů. Jak do problémů teorie grafů zakomponovali náhodnost, nejlépe uvidíme, když se podíváme na počet hran, kte-

* Goldbachova hypotéza říká, že každé sudé číslo větší nebo rovné 4 se dá napsat jako součet dvou prvočísel, například 8 = 5 + 3, 20 = 7 + 13 atd. Dosud nebyla ani dokázána, ani vyvrácena (pozn. překl.).

ré vycházejí z uzlů grafu či sítě. Pravidelné grafy se vyznačují tím, že každý uzel má *přesně* týž počet hran. U dvourozměrné pravidelné sítě navzájem kolmých čar, tvořících jednoduchou čtvercovou mřížku, vycházejí samozřejmě z každého uzlu přesně čtyři hrany. U šestiúhelníkové mřížky včelí plástve je zase každý uzel spojen s právě třemi jinými uzly.

Náhodné grafy přirozeně postrádají takovou pravidelnost. Výchozí bod modelu náhodné sítě je nanejvýš rovnostářský: hrany se rozmísťují zcela náhodně. Všechny uzly mají tedy stejnou šanci se připojit – právě tak jako v Las Vegas předpokládáme, že máme všichni stejnou pravděpodobnost vyhrát jackpot. Když ale herna zavírá, jen hrstka gamblerů odchází bohatší. Podobně když náhodně umísťujeme hrany v grafu, některé uzly jich obdrží víc než jiné. Některé uzly mohou dokonce mít tu smůlu, že nějakou dobu nedostanou nic. Náhodný svět Erdőse a Rényiho dokáže být zároveň nespravedlivý i štědrý: někoho může přivést na mizinu, z jiného zas udělá boháče. Přesto však dalekosáhlá předpověď Erdősovy a Rényiho teorie říká, že navzdory naprosto náhodnému rozmísťování hran budou téměř *všechny uzly mít přibližně stejný počet hran*.

Jednou z metod, jak se o tom lze přesvědčit, je zeptat se všech hostů odcházejících z večírku, s kolika lidmi se tam seznámili. Až všichni odejdou, můžeme si narýsovat histogram neboli sloupcový diagram, znázorňující, kolik hostů má jednoho, dva či přesně k nových známých. Tvar tohoto histogramu pro Erdősův a Rényiho model náhodné sítě odvodil a matematicky dokázal roku 1982 jeden z Erdősových studentů, Béla Bollobás, profesor matematiky na univerzitě v Memphisu ve Spojených státech a na Trinity College ve Velké Británii. Výsledek ukazuje, že histogram se řídí Poissonovým rozdělením, vyznačujícím se některými význačnými vlastnostmi, které nás budou provázet v této knize. Poissonovo rozdělení má výrazné maximum, což znamená, že většina uzlů má právě průměrný počet hran. Po obou stranách maxima rozdělení rychle klesá a v důsledku toho jsou odchylky od průměru extrémně vzácné.

Vrátíme-li se k příkladu společnosti obnášející 6 miliard lidí, říká nám Poissonovo rozdělení to, že většina z nás má zhruba stejný počet přátel a známých. Předpovídá, že pravděpodobnost nalezení někoho, kdo se odchyluje od průměru tím, že má podstatně více nebo podstatně méně vazeb než průměrný člověk, je exponenciálně malá. Teorie náhodných grafů tedy předpovídá, že když rozdělíme sociální vazby náhodně, dostaneme extrémně demokratickou společnost, kde jsme všichni průměrní a kde je velmi málo těch, kdo se odchylují od normy svým nadmíru společenským nebo krajně asociálním chováním. Získáme síť s velmi stejnorodou tkaninou, v níž je normální být průměrný.

V náhodném vesmíru Erdőse a Rényiho vládnou střední hodnoty. Většina lidí má zhruba stejný počet známých, většina neuronů je spojená se zhruba stejným počtem jiných neuronů, většina firem obchoduje se zhruba stejným počtem jiných firem a většinu webových stránek navštěvuje zhruba stejný počet zájemců. Když příroda rozhazuje vazby slepě sem a tam, nakonec není žádný uzel zvýhodněn a žádný není vyvolený.

* * *

Od svého zrodu v roce 1959 ovládala Erdősova a Rényiho teorie náhodných grafů vědecké úvahy o sítích. Vytvořila několik paradigmat, která jsou vědomě či nevědomě vryta v myslích všech, kdo se sítěmi zabývají. Položila rovnítko mezi komplexitou a náhodností. Byla-li síť příliš složitá na to, aby se dala vystihnout jednoduchými prostředky, žádalo se po nás, abychom ji popisovali jako náhodnou. A není pochyb o tom, že společnost, buňka, komunikační sítě a ekonomie jsou systémy dostatečně složité, aby se na ně tato úvaha vztahovala.

Možná si už říkáte, že v tomto náhodném světě, kde jsou si všechny uzly rovny, cosi nehraje. Jak bych asi dopadl při psaní této knihy, kdyby se najednou molekuly mého těla rozhodly reagovat jedna s druhou náhodně? Existovaly by národy, státy, školy, církve nebo jakékoli jiné projevy společenského uspořádání, kdyby lidé na sebe vzájemně působili zcela náhodně? Byla by nějaká ekonomika, kdyby si firmy vybíraly své zákazníky náhodně a pracovníci odbytu by byli nahrazeni milionem hodů kostkou? Většina z nás *cítí*, že nežijeme v takovém náhodném světě a že v pozadí těchto komplexních systémů musí být nějaký řád.

Proč se potom takové mimořádné intelektuální kapacity, jako byl Erdős s Rényim, rozhodly modelovat vznik sítí jako zcela náhodný proces? Odpověď je nabíledni. Nikdy neplánovali vytvořit univerzální teorii formování sítí. Mnohem více je přitahovala matematická krása náhodných sítí než schopnost modelu věrně zachytit pavuči-

ny, které kolem nich utkala příroda. Ve svém zakladatelském článku z roku 1959 se sice zmínili, že „evoluci grafů lze považovat za poněkud zjednodušený model evoluce určitých komunikačních sítí (železnic, silnic či elektrických rozvodů apod.)“, ale navzdory této krátké exkurzi do reálného světa motivovalo jejich práci v této oblasti spíše hluboké zaujetí matematickou hloubkou problému než jeho aplikace.

Erdős by byl první, kdo by s námi souhlasil, že reálné sítě se musí organizovat podle odlišných principů než model náhodné sítě, který zavedli roku 1959. Pro něj by to ale bylo vedlejší. S pomocí předpokladu náhodnosti otevřel okno do nového světa, jehož matematická krása a jednolitost byly hlavní hnací silou následující práce v teorii grafů.

Až do nedávné doby jsme neměli jinou alternativu pro popis našeho vzájemně provázaného světa. A tak začaly náhodné sítě ovládat naše myšlení při modelování sítí. Komplexní sítě v reálném světě jsme chápali jako v podstatě náhodné.

Erdős byl přeborníkem v předkládání dobrých problémů a dokázal přimět ostatní, aby je vyřešili. Ačkoli nikdy neměl víc majetku než jen tu trochu šatstva, která se mu vešla do malého koženého kufříku, s nímž vždycky cestoval, často nabízel peněžní odměny za řešení či důkaz problémů, které mu připadaly zajímavé: 5 dolarů za problém, který považoval za snadný, 500 za nějaký skutečně těžký. Nezáleží na tom, že často se problém za dolar ukázal mnohem složitější než pětisetdolarový. Šťastní matematici, kteří získali některou z jeho cen, stejně nikdy nešli s jeho šekem do banky. Většina z nich si ho nechala zarámovat. Výhra totiž znamenala uznání od vůdčího matematického génia století. Žádný peněžní obnos se nemohl vyrovnat jeho duchovní ceně.

Následujme Erdősova příkladu a položme si otázku, které se on nedotkl. Jak vypadají *reálné* sítě? Taková vágní formulace problému by ho nebyla nikdy uspokojila. Je příliš široká. Možná ani nemá jednoznačnou odpověď. A s největší pravděpodobností nemůžeme nikdy poskytnout matematicky přesný důkaz. A tak by se nejspíš nemohla objevit v *Transfinitní knize*, konečném depozitáři v Erdősově světě všech dobrých matematických důkazů a teorémů. Ale i kdyby tato otázka nezískala jeho uznání, uvidíme v následujících kapitolách, že mimo svět matematiky je tomu úplně jinak.

Vlákno třetí

Šest kroků od sebe

V roce 1912, právě když Anna Erdősová zjistila, že čeká třetí dítě, Paula, byly budapešťské ulice plné vzrušených hovorů o nové sbírce básní a prózy od nejlepších maďarských i cizích spisovatelů. První vydání zmizelo z pultů ještě dřív, než se k němu vůbec dostali literární kritici, a druhé vydání se už doprodávalo, když se objevily první seriózní kritiky v národních denících. Mezitím porodila Anna Erdősová Paula a po svém návratu z porodnice zjistila, že její dvě starší dcery padly za oběť epidemii spály, která tehdy v Budapešti řádila.

Navzdory mnoha osobním tragédiím, které město zažívalo, nadšení pro nový literární zjev neutuchalo. Popularita knihy se zakládala na jednom malém detailu: všechny básně a povídky byly podvrhy. V knížce *Tak píšete vy** objevil pětadvacetiletý téměř neznámý básník a spisovatel Frigyes Karinthy to, čemu říkal *literární karikatura*. Je to soubor básní a povídek, které jako by vyšly z pera nejvýznamnějších postav světové literatury. Ten, kdo tyto autory zná, snadno rozpozná jejich styl. Každý kousek je prohnaná parodie, která jako nějaké křivé zrcadlo mění veškeré proporce, přičemž ale napodobený autor zůstává rozpoznatelný. Karinthy svým sžíravým a ničivým humorem stejně snadno karikoval mrtvé velikány jako své blízké přátele. A jeho střely měly často smrtící účinek: autory, které parodoval nejjedovatěji, známe jenom díky jeho knize. Jejich skutečná díla zmizela v nelítostné výlevce literárního vkusu a historie.

Tak píšete vy je jedna z nejčtenějších knih maďarské historie. Okamžitě udělala z Karinthyho slavného člověka. Už nikdy nemusel čekat na autobus na zastávce. Prostě jen na něj mávl, kdekoli právě byl, a řidiči mu se širokým úsměvem zastavovali. Většinu času psal za širokými skleněnými okny kavárny Central ve středu Budapešti. Kolemjdoucí často jako by provozovali jakýsi podivný tanec. Jak procházeli kolem oken kavárny, zničehonic se zastavili, otočili se a zíra-

* *Igy írtok ti.*

li oknem na pracujícího spisovatele, jako by šlo o nějakou exotickou rybu v novém akváriu.

Téměř dvě desítky let po knize *Tak píšete vy*, roku 1929, zhruba ve stejnou dobu, kdy sedmnáctiletý Erdős přednášel o Pythagorově větě v obuvnickém krámku pár ulic od kavárny Central, vydal Karinthy svou čtyřicátou šestou knihu, *Všechno je jinak*,* sbírku dvaapadesáti povídek. V té době byl už uznávaným géniem maďarské literatury, ale všichni stále čekali na nějaké veledílo, román, který by mu zajistil místo mezi nesmrtelnými literáty. Kritici dávali otevřeně najevo své obavy, že Karinthy rozmělňuje svůj jedinečný talent psaním povídek pro rychlý honorář. Karinthy, který svůj neuvěřitelně neuspořádaný a chaotický život trávil mezi kavárnami a hektickým a hlučným domovem, dlouho očekávanou knihu nikdy nenapsal. Sbírka krátkých povídek naprosto propadla a brzy zmizela v zapomnění. Od té doby se už neprodávala. Navštívil jsem většinu knihkupectví a antikvariátů v Budapešti a nenašel jsem po ní ani stopu. Jedna povídka, která se jmenuje „Články řetězu",** si však zaslouží naši pozornost.

„Aby dokázal, že lidé jsou si dnes na Zemi blíž než kdy dřív, jeden z naší skupiny navrhl test. Vsadil se, že mu můžeme jmenovat kohokoli z půldruhé miliardy obyvatel zeměkoule, a že se skrze *nanejvýš pět* známých, z nichž jednoho on sám zná osobně, dokáže spojit se zvolenou osobou," píše Karinthy v povídce „Články řetězu". A Karinthyho postava se skutečně okamžitě spojuje s nositelem Nobelovy ceny, neboť podle něj nobelista určitě zná krále Gustava, švédského monarchu, který předává Nobelovy ceny, a ten je zase vášnivým hráčem tenisu a občas si zahraje s tenisovým přeborníkem, který je náhodou dobrým přítelem hrdiny Karinthyho povídky. Karinthyho hrdina poznamenává, že spojit se s významnými osobami je snadné, a žádá něco těžšího. Pak se pokouší spojit sebe s dělníkem Fordových závodů: „Dělník zná vedoucího dílny a ten se zná s Fordem; Ford udržuje přátelské styky s generálním ředitelem Hearstova nakladatelství, který je od loňska dobrým přítelem Árpáda Pásztora, kterého já nejenom znám, ale podle mého nejlepšího vědomí je to můj dobrý přítel - takže ho můžu snadno požádat, aby prostřednictvím generálního ředitele poslal Fordovi telegram s žádostí, aby promluvil s vedoucím dílny, ať pro mě dotyčný dělník co nejrychleji stluče jedno auto, protože je náhodou právě potřebuji." Tyto krátké povídky sice upadly v zapomnění, ale v Karinthyho tušení z roku 1929, že lidé jsou spojeni nanejvýše pěti vazbami, se objevuje první publikovaná formulace principu známého dnes jako šest kroků od sebe.

* * *

Šest kroků znovu objevil o tři desetiletí později, roku 1967, Stanley Milgram, profesor na Harvardu, který z tohoto principu udělal velmi slavnou, průlomovou, studii toho, jak jsme všichni navzájem provázáni. Je úžasné, jak Milgramův první článek na toto téma občas vyznívá jako anglický překlad Karinthyho povídky „Články řetězu", přepsané pro sociologické publikum. Milgram, patrně nejtvořivější praktik experimentální psychologie, proslul zejména svými široce diskutovanými pokusy zkoumajícími konflikt mezi poslušností k autoritě a vlastním svědomím. Jeho intelekt však měl široký záběr a brzy ho začala zajímat struktura sociální sítě, což bylo téma, o němž se na sklonku šedesátých let často diskutovalo mezi sociology na Harvardu a na Massachusettském technickém institutu (MIT).

Milgram si stanovil cíl zjistit „vzdálenost" mezi libovolnými dvěma lidmi ve Spojených státech. V pozadí experimentu stála otázka, kolik známostí by bylo potřeba, abychom spojili dva náhodně zvolené jedince. V prvním pokusu zvolil nejdříve dvě cílové osoby, manželku studenta bohosloví z Sharonu v Massachusetts a burzovního makléře z Bostonu. Za startovní body svého výzkumu vybral Wichitu v Kansasu a Omahu v Nebrasce, protože „z Cambridge se tato města vybavují jako ‚tam kdesi' na Velkých planinách nebo něco takového". O tom, kolik vazeb bude potřeba ke spojení s lidmi v těchto vzdálených oblastech, nepanovala vůbec shoda. Sám Milgram v roce 1969 poznamenal: „Nedávno jsem se ptal inteligentního člověka, kolik si myslí, že bude třeba spojení, a on řekl, že spojit se z Nebrasky do Sharonu si vyžádá sto nebo i víc prostředníků."

Milgramův experiment spočíval v rozesílání dopisů náhodně zvoleným obyvatelům Wichity a Omahy s žádostí, aby se zúčastnili výzkumu sociálních kontaktů v americké společnosti. Dopis obsahoval krátké shrnutí účelu studie, fotografii, jméno, adresu a další informace o jedné z cílových osob a k tomu následující čtyři instrukce:

* *Minden masképpen van.*
** *Láncszemek.*

JAK SE ZÚČASTNIT TOHOTO VÝZKUMU

1. PŘIPIŠTE SVÉ JMÉNO DO SEZNAMU DOLE NA TOMTO FORMULÁŘI, takže další osoba, která dostane tento dopis, bude vědět, od koho přišel.
2. ODLEPTE JEDNU DOPISNICI. VYPLŇTE JI A POŠLETE ZPĚT NA HARVARDOVU UNIVERZITU. Nemusíte lepit známku. Dopisnice je velice důležitá. Umožní nám sledovat, jak spis putuje k cílové osobě.
3. ZNÁTE-LI OSOBNĚ CÍLOVOU OSOBU, POŠLETE TENTO SPIS PŘÍMO JÍ. To udělejte jen v tom případě, že jste se s cílovou osobou už předtím setkal(a) a tykáte si s ní.
4. POKUD NEZNÁTE CÍLOVOU OSOBU OSOBNĚ, NEZKOUŠEJTE JI KONTAKTOVAT PŘÍMO. MÍSTO TOHO POŠLETE TENTO SPIS (I S DOPISNICEMI A SE VŠÍM OSTATNÍM) SVÉMU ZNÁMÉMU, KTERÝ MÁ VĚTŠÍ ŠANCI NEŽ VY CÍLOVOU OSOBU ZNÁT. Spis můžete poslat příteli, příbuznému nebo známému, musí to však být někdo, s kým si tykáte.

Jedna věc nedávala Milgramovi spát: Dostane se vůbec některý dopis k cíli? Pokud by se počet vazeb skutečně pohyboval kolem stovky, jak hádal jeho přítel, pak by jeho experiment pravděpodobně selhal, protože v tak dlouhém řetězci se vždycky najde někdo, kdo nespolupracuje. Příjemně ho tedy překvapilo, když za pár dnů došel první dopis, a to přes pouhé dva mezičlánky! To se ukázalo jako vůbec nejkratší zaznamenaná dráha, ale nakonec se vrátilo 42 z celkového počtu 160 dopisů, z nichž některé vyžadovaly až tucet prostředníků. Tyto dokončené řetězce dovolily Milgramovi určit počet lidí, kteří jsou potřeba k doručení dopisu k cíli. Zjistil, že průměrný počet prostředníků je 5,5, tedy opravdu velmi malé číslo, shodou okolností úžasně blízké tomu, co navrhoval Karinthy. Po zaokrouhlení na 6 pak dostanete slavných šest kroků od sebe.

Jak mi řekl Thomas Blass, sociální psycholog, který se v posledních patnácti letech věnoval důkladnému studiu života a díla Stanleyho Milgrama, sám Milgram výraz šest kroků od sebe nikdy nepoužil. To udělal americký dramatik John Guare ve své brilantní divadelní hře s názvem *Šest stupňů odloučení*. Po neobyčejně úspěšné sezoně na Broadwayi byla hra zfilmována pod stejným názvem. V této hře Ousa (ve filmu ztvárněná Stockard Channingovou), když

přemítá o tom, jak jsme navzájem propojení, říká své dceři: „Každý na této planetě je oddělen jen šesti jinými lidmi. Šest kroků od sebe. Mezi námi a kýmkoli jiným na této planetě. Prezident Spojených států. Benátský gondoliér... Nejsou to jen známá jména. Jsou to všichni. Domorodec v tropickém pralese. Obyvatel Ohňové země. Eskymák. Ke každému na této planetě vede ode mě stezka skládající se z šesti lidí. Je to hluboká myšlenka.... Jak každý člověk představuje nové dveře otevírající se do jiných světů."

Milgramova studie se omezovala na Spojené státy a spojovala lidi „tam kdesi" ve Wichitě a Omaze s těmi, co jsou „tady u nás" v Bostonu. Pro Guareho hrdinku Ousu však šest kroků platilo pro celý svět. Tak se zrodil mýtus. Protože víc lidí se dívá na filmy než čte sociologické články, Guareho verze v obecném povědomí převážila.

Šest kroků od sebe je velice zajímavá myšlenka, protože znamená, že navzdory enormnímu rozsahu naší společnosti se v ní dá proplouvat tak, že sledujeme sociální vazby od jedné osoby k druhé - síť o *šesti miliardách* uzlů, v níž každou dvojici uzlů dělí od sebe průměrně *šest* vazeb. Snad bychom měli být překvapení, že cesta mezi libovolnými dvěma lidmi vůbec *existuje*. Viděli jsme však v předchozí kapitole, že k propojení stačí velmi málo - sotva více než jedna sociální vazba na osobu. Protože všichni disponujeme mnohem více než jednou vazbou, stává se každý z nás součástí gigantické sítě zvané lidská společnost.

Stanley Milgram nám postavil před oči fakt, že jsme nejenom navzájem propojení, ale že navíc žijeme ve světě, kde nikdo není dál než jen pár podání ruky od kohokoli jiného. To znamená, že žijeme v *malém světě*. Náš svět je malý, protože lidská společnost tvoří velmi hustou pavučinu. Máme mnohem více přátel než jednoho, což je ona kritická hodnota nezbytná k tomu, abychom zůstali spojení. Je ale těch šest kroků něco typicky lidského, co jaksi vyvěrá z naší touhy po sociálních vazbách? Vypadají jiné typy sítí stejně? Odpovědi na tyto otázky se objevily teprve před několika málo lety. Dnes víme, že sociální sítě nejsou jedinými malými světy.

* * *

„Předpokládejme, že veškerá informace uložená na kdekoli umístěných počítačích je propojená... Veškeré kvalitní informace na všech počítačích v CERN a na celé planetě by byly k dispozici pro

mě i pro kohokoli jiného. Existoval by jednotný globální informační prostor." Tak snil Tim Berners-Lee roku 1980, když pracoval jako programátor v Evropském centru jaderného výzkumu, známém obecně pod svou francouzskou zkratkou CERN, v Ženevě. Aby svůj sen uskutečnil, napsal program, který dovolil počítačům sdílet informaci - spojit se navzájem. Vynález takového propojení vypustil z láhve džina, o jehož existenci jsme neměli potuchy. Ani ne za deset let z džina vyrostl world wide web, jedna z vůbec největších sítí vytvořených člověkem. Je to virtuální síť, jejímiž uzly jsou webové stránky, na nichž najdete všecko: zprávy, filmy, klepy, mapy, obrázky, recepty, životopisy a knihy. Cokoli se dá napsat, nakreslit nebo vyfotografovat, je už s velkou pravděpodobností v nějaké podobě umístěno na některém webovém uzlu.

Síla webu spočívá v odkazech, URL,* které nám umožňují na kliknutí myši přecházet od jedné stránky k druhé. Dovolují nám brouzdat internetem a hledat a skládat dohromady informace. Tyto odkazy dělají ze sbírky jednotlivých dokumentů obrovskou síť protkanou klikáním myši. Jsou to stehy, které drží předivo naší moderní informační společnosti pohromadě. Smažte odkazy, a džin je tentam. Zbudou po něm obrovské nedostupné databáze, moderní ruiny světa komunikací.

Jak velký je web dnes? Kolik webových dokumentů a odkazů se v něm nachází? Donedávna to nikdo s jistotou nevěděl - žádná jednotlivá organizace nesleduje všechny uzly a všechny odkazy. Až Steve Lawrence a Lee Giles z Výzkumného institutu firmy NEC v Princetonu se roku 1998 do tohoto jedinečného problému pustili. Jejich měření naznačovala, že roku 1999 obsahoval web téměř miliardu dokumentů - na virtuální společnost vzniklou ani ne před deseti lety to není špatné. Uvážíme-li, že roste mnohem rychleji než lidská společnost, s dost velkou pravděpodobností až tato kniha vyjde, bude více webovských dokumentů než lidí na Zemi.**

Skutečným problémem však není celková velikost webu, ale vzdálenost mezi libovolnými dvěma dokumenty. Kolikrát musíte kliknout, abyste se dostali z domovské stránky sběratele starých motorek na

* URL je zkratka termínu Uniform Resource Locator (pozn. překl.).

** Vyhledávač Google sděluje, že ke dni 17. února 2004 překročil počet nalezených položek 6 miliard, z toho bylo 4,28 miliardy webovských stránek a 880 milionů obrázků (pozn. překl.).

server planetárního čokoládového magnáta? Může být web malý svět, i když má miliardu uzlů? Odpověď na tuto otázku není lhostejná nikomu, kdo surfuje internetem. Jsou-li webové stránky tisíce kliků od sebe, je beznadějné najít jakýkoli dokument bez vyhledávače. Zjištění, že web není malý svět, by také znamenalo, že sítě skrývající se v lidské společnosti a v počítačovém vesmíru se diametrálně liší. Kdyby tomu tak bylo, pak bychom sítě nemohli pochopit, aniž bychom věděli, proč a jak k této odlišnosti dochází. A tak jsem se na konci roku 1998, spolu s doktorandkou Rékou Albertovu a s postdokem Hawoongem Jeongem, kteří tehdy oba pracovali v mé výzkumné skupině na katedře fyziky na Univerzitě Notre Dame, pustil do zkoumání velikosti světa skrývajícího se ve webu.

Naším prvním cílem bylo získat mapu webu, v podstatě seznam všech webových stránek a odkazů, které je spojují. Informace obsažená v takové mapě by skutečně neměla obdoby. Kdybychom měli sestavit takovou mapu pro lidskou společnost, musela by zahrnovat pracovní a osobní zájmy všech osob a zakreslit každého, koho zná. Díky takové mapě by Milgramův experiment najednou vypadal neohrabaný a zastaralý, protože by nám umožnila najít v několika vteřinách nejkratší cestu k libovolné osobě na světě. Byla by to nepostradatelná pomůcka pro každého, počínaje politiky a konče obchodními agenty a epidemiology. Takový sociální vyhledávač se samozřejmě nedá realizovat, protože vyslechnout všech 6 miliard obyvatel Země, abychom se dozvěděli o jejich přátelích a známých, by zabralo celý život, ne-li víc. Web má však v sobě cosi magického, co jej odlišuje od lidské společnosti. Po jeho vláknech se můžete pohybovat během okamžiku. Chce to jen klikat.

Na rozdíl od naší současné společnosti je web digitální. To nám umožňuje napsat software, který stáhne kterýkoli dokument, najde v něm všechny odkazy, pak přeskočí na dokumenty, na něž odkazují, a stáhne je, a tak pokračuje, dokud nedostane všechny stránky, které na webu jsou. Počítačoví odborníci takovému softwaru říkají *robot* nebo *plavec* (crawler), protože proplouvá webem bez neustálého dohledu člověka. Velké vyhledávače, jako jsou AltaVista nebo Google, obsahují tisíce počítačů, na nichž běží spousta robotů, kteří neustále šmejdí po nových dokumentech na webu. Naše malá výzkumná skupina samozřejmě nemůže soupeřit s jejich velikostí. A tak Jeong vytvořil robota s méně ambiciózním úkolem. Nejdříve nám poskytl mapu domény nd.edu, což znamená, že zmapoval oko-

lo 300 000 dokumentů v okruhu Univerzity Notre Dame. Byla to dosti různorodá sbírka - od stránek týkajících se přednášek z filozofie po stránky fanoušků irské hudby. O obsah stránek jsme se však nestarali; zajímaly nás jen odkazy, které nám říkaly, jak cestovat od jedné stránky k druhé. Když máme v ruce takovou mapu, můžeme měřit vzdálenost mezi libovolnými dvěma stránkami v rámci univerzity.

Právě tak jako Milgram pozoroval, že některé z jeho dopisů dostihly cílovou osobu ve dvou krocích, zatímco jiné jich potřebovaly až jedenáct, i my jsme zaznamenali velké rozdíly co do vzdálenosti mezi webovými dokumenty. Například moji doktorandi mají odkazy na mou stránku, jsou tedy ode mě vzdáleni jen jedno kliknutí, ale přejít od mé stránky na domovskou stránku někoho se zaměřením na filozofii by už často vyžadovalo kliknutí dvacet.* Podivuhodné však bylo, že celkem vzato tyto cesty nebyly tak dlouhé, jak by se mohlo zdát podle nesmírného rozsahu webu. Měření naznačovala, že stránky byly průměrně jedenáct kliknutí od sebe. Máme-li parafrázovat Guareho, mohli bychom říct, že na Notre Dame jsme od sebe jedenáct kroků.

Webové stránky na naší univerzitě, v doméně nd.edu, ale představují jen nepatrnou podmnožinu celého world wide webu. Celý web byl v roce 1999 nejméně 3 000krát rozsáhlejší. Znamená to, že by vzdálenost mezi dvěma náhodně zvolenými uzly webu byla také 3 000krát větší než oněch jedenáct kliknutí, která vyplynula z našich měření? Jinými slovy, abychom se dostali na webu od jedné stránky k druhé, museli bychom kliknout 33 000krát? Odpověď na tuto otázku by vyžadovala mapu celého webu. Problém byl v tom, že nikdo takovou mapu neměl. I ty největší vyhledávače, které neúnavně procházely webem s pomocí tisíců počítačů, dokázaly pokrýt necelých 15 % celkové velikosti webu. Mohli bychom určit vzdálenost v celém webu, aniž bychom měli takovou mapu? Odpověď zní ano. Musíme však použít jednu běžnou metodu statistické mechaniky - což je oblast fyziky, která se běžně zabývá náhodnými systémy s nepředvídatelnými rysy či důsledky.

Náš přístup má jednoduché východisko: Je-li web příliš velký na to, aby se směstnal do našeho počítače, pak nám nezbývá než stu-

* Je to možná zbytečně pesimistický odhad. Například na stránku o filozofu Michelu Foucaultovi se ze stránky A.-L. Barabásiho dostaneme po 8 kliknutích (pozn. překl.).

dovat mnoho menších výseků z webu, které už se do počítače vejdou. Vzali jsme například poněkud větší výsek, kolem 10 000 uzlů, a opět určili vzdálenost. Opakovali jsme to pro ty největší systémy, které nám ještě náš počítač dovoloval, a hledali jsme trend, jemuž se získané vzdálenosti mezi uzly podřizují. Výsledky ukázaly, že průměrná odlehlost uzlů vzrůstala podstatně pomaleji než počet dokumentů, a řídila se jednoduchým a reprodukovatelným výrazem.* Toto zjištění nám umožňuje předpovědět vzdálenosti na celém webu, jakmile známe celkový počet dokumentů v něm. A ten nám poskytla společnost NEC. Na konci roku 1998 její odborníci odhadli velikost veřejně dostupného webu zhruba na 800 milionů uzlů. Naše formule tedy předpovídala, že průměr webu byl v té době 18,59, tedy skoro 19. Jak by patrně řekl Guare, jsme devatenáct kroků od sebe. Při surfování po webu můžete mít možná jiný pocit, ale ve skutečnosti je web malý svět. Každý dokument je v průměru pouze devatenáct kliknutí od kteréhokoli jiného.

* * *

Když to shrneme, Milgramových šest kroků a webovských devatenáct kroků naznačuje, že za těmito krátkými pozorovanými vzdálenostmi se skrývá cosi zásadnějšího než jen touha lidstva rozšiřovat sociální vazby po celé planetě. Toto podezření potvrdily další objevy: prokázaly, že malé vzdálenosti jsou běžné téměř ve všech sítích, které měli vědci příležitost zkoumat. Tak třeba druhy v potravních řetězcích jsou zřejmě v průměru dva kroky od sebe. Molekuly v buňce jsou od sebe vzdáleny v průměru tři chemické reakce. Vědci v rozličných oblastech bádání jsou od sebe vzdáleni čtyřmi až šesti vazbami vyjadřujícími spoluautorství. Neurony v mozku hlístice *Caenorhabditis elegans* jsou od sebe čtrnáct synapsí.** Zdá se, že web se svými devatenácti kroky drží rekord, neboť u všech ostatních dosud studovaných sítí byly zjištěny vzdálenosti od dvou do čtrnácti kroků.

* Zjistili jsme, že vzdálenost je úměrná logaritmu počtu uzlů sítě. To znamená, že označíme-li d průměrnou vzdálenost mezi uzly na webu s N webovskými stránkami, pak se tato vzdálenost řídila rovnicí $d = 0{,}35 + 2 \log N$, kde $\log N$ značí desítkový logaritmus čísla N (pozn. aut.).

** Synapse = místo, kde se spojují dva neurony a kudy se mezi nimi přenáší elektrický signál (pozn. překl.).

Mohlo by se zdát, že devatenáct kroků je něco úplně jiného než šest kroků, ale není tomu tak. Důležité na tom je to, že obrovské sítě, se stovkami milionů nebo miliardami uzlů, se smršťují a vykazují vzdálenosti neporovnatelně menší, než je počet uzlů v nich. V naší společnosti, síti složené z 6 miliard uzlů, je typická vzdálenost šest. Pro web, s jeho téměř miliardou uzlů, je charakteristická vzdálenost devatenáct. Internet, síť stovek tisíc směrovačů, má průměrnou vzdálenost deset. Z této perspektivy je rozdíl mezi šesti a devatenácti zanedbatelný.

Přirozená otázka zní: Proč? Jak dosahují sítě takto pravidelně krátkých cest, navzdory tomu, že se skládají z miliard uzlů? Odpověď spočívá v tom, že tyto sítě jsou svou podstatou vysoce vnitřně propojené. V předchozí kapitole jsme viděli, že k tomu, aby vytvořily gigantický shluk, vyžadují náhodné sítě pouze jednu vazbu na uzel. Otázkou je, co se stane, když, jak tomu v reálných sítích obvykle bývá, mají uzly mnohem více vazeb než jednu? V kritickém bodě, kde je průměrná konektivita blízká jedné, může být vzdálenost uzlů dosti velká. Jak však přidáváme více vazeb, vzdálenost mezi uzly se náhle rychle zmenšuje. Uvažme síť, v níž uzly mají v průměru k vazeb. To znamená, že z kteréhokoli uzlu se můžeme v jednom kroku dostat typicky ke k jiným uzlům. Uzlů ve vzdálenosti 2 je však k^2 a zhruba k^d uzlů má vzdálenost d. Je-li tudíž k velké číslo, pak i pro malé hodnoty d může počet uzlů, jichž je možné dosáhnout, nabývat velmi vysokých hodnot. V několika málo krocích se dostanete ke všem uzlům, které je možné najít, což vysvětluje, proč je průměrná vzdálenost ve většině sítí tak krátká.

Tyto argumenty se dají snadno formulovat matematickým vzorcem, který předpovídá, jaká bude vzdálenost v náhodné síti v závislosti na počtu uzlů.* Důvodem malých vzdáleností je logaritmický člen v této formuli. Logaritmus i velmi velkého čísla je skutečně dosti malý. Desítkový logaritmus miliardy je pouze devět. Máme-li například dvě sítě, obě průměrně s deseti vazbami na jeden uzel, ale jedna z nich je stokrát větší než druhá, pak vzdálenost v té větší bude pouze o dva kroky vyšší než vzdálenost v menší síti. Logaritmus smršťuje obrovské sítě a tak tvoří malé světy kolem nás.

* Máme-li v síti N uzlů, pak k^d nesmí přesáhnout N. Tedy s použitím rovnice $k^d = N$ získáváme jednoduchou formuli, která dobře funguje u náhodných sítí, a která nám říká, že průměrná vzdálenost se řídí rovnicí $d = \log N / \log k$ (pozn. aut.).

* * *

Karinthy, jeden z nejroztržitějších lidí své generace, byl proslulý zapomínáním schůzek, které si domluvil daleko dopředu. Dezső Kosztolányi, Karinthyho blízký přítel a literární soupeř, jednou poznamenal: „Musím už běžet domů, protože Karinthy slíbil, že nás navštíví, ale možná že na svůj slib zapomněl, a tak opravdu přijde." Je zajímavé, že idea šesti kroků jako by šla právě takovou karinthyovskou cestou: zapomenutí, nová formulace a znovuobjevení jak v populárním tisku, tak ve vědeckých textech. Nemám představu, kdo původně pojem šesti kroků objevil. Nejstarší písemný záznam, který znám, pochází od Karinthyho. Ale jak se k němu dostal? Vymyslel ho sám? Uvážíme-li jeho nevídaný intelekt a slabost pro nečekané a nekonvenční myšlenky, není to nemožné. Anebo o tom slyšel od někoho jiného v kavárně, jak naznačuje jeho povídka? Nejspíš nikdy nebudeme znát odpověď. Je však zajímavé popřemýšlet o tom, co se dělo pak.

Karinthyho povídka vyšla roku 1929, když Erdősovi, který tehdy žil v Budapešti, bylo sedmnáct. Jelikož i neúspěšné Karinthyho knihy znamenaly literární událost, není nepravděpodobné, že Erdős četl nebo slyšel vyprávět o povídce „Články řetězu", v níž Karinthy stanoví, že všichni lidé na zeměkouli se dají spojit řetězcem pěti známých. Možná že Karinthyho povídku četl i Alfréd Rényi, kterému sice bylo teprve devět let, když vyšly „Články řetězu", ale jehož neobyčejně přitahovala literatura. Bylo o něm dokonce známo, že má mezi spisovateli řadu dobrých přátel, včetně Karinthyho syna Ference, který byl sám známým spisovatelem.

Erdős se s Rényim spojil roku 1959, aby pak napsali svou slavnou sérii osmi článků o náhodných sítích. Tyto články skutečně obsahují výraz udávající poloměr sítě jako funkci počtu uzlů. Kdyby se o to pokusili, mohlo by se snadno ukázat, že Karinthyho intuice byla správná, jelikož množství sociálních vazeb, které máme, smršťuje i gigantické sítě na skutečně malinkaté světy. Nikdy však tuto aplikaci ve svých článcích nezmínili a pravděpodobně nebudeme nikdy vědět, zda si s touto myšlenkou nepohrávali v přestávkách mezi důkazy a teorémy. Vazby se tam však nezastavily. Stanley Milgram publikoval své pokusy odhalující pět a půl kroku v roce 1967, čtyřicet let po Karinthyho hypotéze pěti kroků a téměř deset let poté, co Erdős s Rényim založili teorii náhodných sítí. Nezdá se, že by mu

byla známa podstata práce o sítích v teorii grafů, a s největší pravděpodobností o Erdősovi a Rényim nikdy neslyšel. Ví se, že na něj měly vliv práce, které prováděli Ithiel de Sola Pool na MIT a Manfred Kochen z IBM, kteří skupině kolegů poskytli své rukopisy o problému malého světa, jež nechávali ležet desítky let v šuplíku, protože cítili, že nikdy „netrefili hřebík na hlavičku". Shodou okolností je Milgram synem maďarského otce a rumunské matky, kteří se přistěhovali do Spojených států a usadili se v Bronxu. Mohl jeho otec nebo strýcové, které často navštěvoval, vědět, třeba z vyprávění, o Karinthyho pěti krocích? Mohl jeho skutečný zájem o problém vyrůstat z příběhů, které zaslechl jako dítě? To je opět něco, co nikdy nebudeme vědět, ale určitě to naznačuje některé zajímavé cesty, kterými se myšlenka šesti kroků mohla ubírat.

* * *

Tvrzení o šesti či devatenácti krocích je hluboce zavádějící, protože naznačuje, že v malém světě je snadné něco najít. Nic nemůže být dále od pravdy! Nejen hledaná osoba – či dokument – je od nás vzdálená šest či devatenáct vazeb, ale platí to pro všechny osoby či dokumenty. Jinými slovy šest – nebo deset či devatenáct – může být buď velmi malé, nebo velmi velké číslo, záleží na tom, o co se snažíte. Jelikož průměrný počet odkazů na webovském dokumentu je kolem sedmi, znamená to, že zatímco z první stránky se můžeme vydat sedmi směry, ve vzdálenosti dvou kliknutí je 49 dokumentů, tři kliknutí nás dělí od 343 dokumentů atd. Než dospějeme k uzlům, které jsou právě devatenáct kroků daleko, prošli jsme 10^{16} dokumentů, 10 000 000krát více, než je celkový počet stránek na webu. Tento zdánlivý rozpor má prosté vysvětlení: Některé z odkazů, s nimiž se na cestě setkáme, ukazují zpět na stránky, které jsme viděli už dříve. Nejsou to tedy „nové" odkazy, ale i kdyby trvalo jen jednu vteřinu prohlédnout si jeden dokument, zabralo by nám více než 300 milionů let dostat se ke všem dokumentům vzdáleným devatenáct kliknutí! Nicméně navzdory záplavě možností najdeme někdy dokumenty dosti rychle, a to i bez vyhledávačů.

Finta je samozřejmě v tom, že nejdeme po všech odkazech, ale držíme se nějakého klíče. Pochopitelně když hledáme informace o Picassovi a na dané webové stránce stojíme před třemi možnými odkazy, nejspíš budeme sledovat odkaz na moderní umění než od-

kaz na slavného zápasníka nebo na sexuální život žab. Tím, že odkazy *interpretujeme*, vyhneme se prohlížení všech stránek v dosahu devatenácti kroků a můžeme si to několika málo kliknutími namířit rovnou na žádanou stránku. Zatímco tato metoda vypadá jako nejefektivnější, téměř vždy při hledání nejkratší cesty selhává. Je totiž vždycky možné, že zápasník, jehož webovou stránku jsme obešli, se neprojevuje jen jako tvrdý chlapík, ale jeho zájmy dokresluje i odkaz na nejlepší stránku o Picassovi. Ale většina lidí hledajících Picassa by odkaz na zápasníka ignorovala a nakonec by prošla delší cestou k cíli. Počítač, který nemá žádné chutě či předsudky (zatím), sežvýká se stejným vzrušením stránky zápasníka, moderního umění a sexuálního života žab a bude věcně sledovat všechny tři odkazy. Když vyzkoušíme všechny možné cesty, nezbytně najdeme tu nejkratší, bez ohledu na obsah stránek, jimiž procházíme.

Hledání Picassa na webu zdůrazňuje základní problém šesti kroků: Milgramova metoda určila hodnotu nejkratší vzdálenosti mezi dvěma lidmi ve Spojených státech. Šest kroků je ve skutečnosti horní odhad. Existuje nepředstavitelné množství cest s nesmírně rozdílnými délkami, které vedou od jednoho člověka k druhému. Milgramovy pokusné osoby si nikdy neuvědomovaly nejkratší cestu k cíli. Je to jako ztratit se v ohromném bludišti, v němž můžeme vidět jen blízké chodby a dveře. I kdybychom měli kompas a věděli, že východ z bludiště je severním směrem, může být pro nás jeho hledání žalostně neefektivní a časově náročné. S mapou bludiště v ruce bychom byli venku za pět minut. Podobně by Milgramovy dopisy sledovaly nejkratší cestu mezi Omahou a Bostonem, jen kdyby měli účastníci mapu, která by zakreslovala sociální vazby všech Američanů. Protože takovou mapu neměli, předali zprávu dál těm, o nichž *předpokládali*, že ji asi nejspíš posunou správným směrem. Kdybyste například zatoužili seznámit se s prezidentem republiky, začali byste přemýšlet o někom, kdo prezidenta zná. S největší pravděpodobností byste se soustředili na svého poslance nebo senátora. Protože většina z nás si se svým senátorem netyká, zkusili byste najít některého z jeho osobních přátel, který by byl ochoten zprostředkovat setkání s prezidentem. To by vyžadovalo nejméně trojí podání ruky. A zatím možná nemáte ani tušení, že ten pán, který seděl vedle vás před pár dny na banketu, chodil s prezidentem do školy. A tak jste ve skutečnosti od prezidenta jen dva kroky. Podobně byly cesty zaznamenané v Milgramově experimentu pravidelně delší než ty nejkratší mož-

né. Tím byla reálná vzdálenost ve společnosti jasně nadhodnocená. Musí být kratší než šest kroků - možná kratší než Karinthyho pět. Stroj na prohledávání společnosti nemáme, takže nikdy nemůžeme znát skutečnou hodnotu s naprostou jistotou.

* * *

Šest kroků je produktem moderní společnosti - výsledkem toho, že za každou cenu chceme být v kontaktu. Pomáhá nám poměrně nedávno získaná schopnost komunikovat na velké vzdálenosti - často na tisíce kilometrů. Globální vesnice, v níž jsme si zvykli žít, je pro lidi novou realitou. Předkové většiny Američanů ztratili kontakt se svými blízkými, které zanechali někde ve staré vlasti. Od stád dobytka v prériích či zlatých dolů ve Skalnatých horách nebylo možné dosáhnout k milovaným osobám za oceány a kontinenty. Neměli po ruce žádné pohlednice, žádný telefon. V křehké sociální síti té doby bylo dosti obtížné znovu oživit vztahy, které se přervaly, když se lidé přestěhovali. To se změnilo ve 20. století, jak fungující pošta, telefon a pak letecká doprava strhly překážky a zkrátily fyzické vzdálenosti. Dnešním přistěhovalcům do Ameriky nic nebrání udržovat vztahy se svými blízkými. Můžeme udržovat kontakt a také to děláme. Já si udržuji přehled o svých příbuzných a známých, třebaže jsou až kdesi v Koreji nebo ve východní Evropě. Ve 20. století se svět neodvolatelně scvrkl. A právě teď, kdy do každého kouta světa proniká internet, v něm dochází ještě k dalšímu smršťování. Ačkoli jsme devatenáct kliknutí od kohokoli na webu, jsme jen jedno kliknutí od svých přátel. Možná že od té doby, co jsme se s nimi naposledy viděli, vystřídali tři města a pět zaměstnání. Ať jsou však kdekoli, obvykle je dokážeme najít na internetu - kdykoli a kdekoli si to budeme přát. Svět se zmenšuje, protože sociální vazby, které by ještě před sto lety odumřely, zůstávají živé a lze je snadno aktivovat. Počet sociálních vazeb, které jedinec dokáže aktivně udržovat, dramaticky vzrostl, což snižuje počet kroků, které nás od sebe dělí. Milgram jich napočítal šest, Karinthy pět. Dnes bychom se mohli spíš přibližovat ke třem.

Malé světy jsou typickou vlastností sítí obecně. Krátké vzdálenosti nejsou tajemstvím lidské společnosti nebo nějakou zvláštností webu: naprostá většina sítí kolem nás tvoří malý svět. Mají to zakořeněno ve své struktuře - nepotřebuji prostě mnoho vazeb, abych

se dostal k obrovskému množství webovských stránek svých kamarádů. Vznikající malé světy se dosti liší od starého známého eukleidovského světa, kde se vzdálenosti měří v kilometrech. Naše schopnost dostat se k lidem stále méně závisí na fyzické vzdálenosti mezi námi. Jak při cestování světem nacházíme společné známé s úplně cizími lidmi, opakovaně si připomínáme, že někdo na opačné straně planety je nám v sociální síti blíž než naši sousedé v domě. Jak proplouváme tímto neeukleidovským světem, neustále nás klame naše intuice a uvědomujeme si, že tam platí nová geometrie. Geometrie, již si musíme osvojit, abychom se vyznali v komplexním světě kolem nás.

Vlákno čtvrté

Malé světy

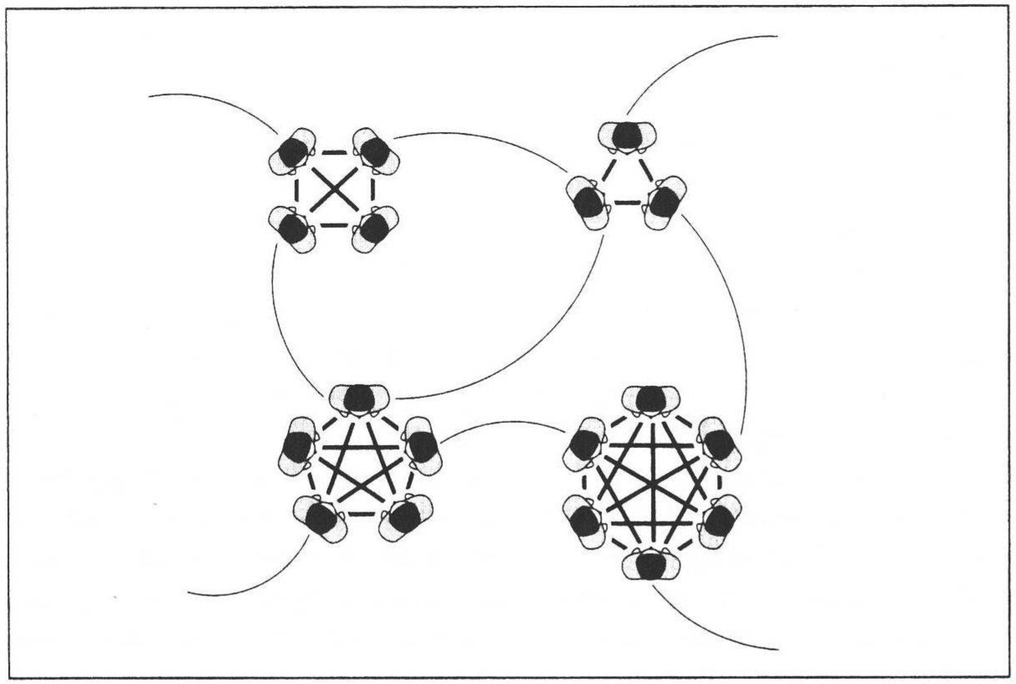
Když Mark Granovetter ještě jako postgraduální student na Harvardu odeslal svůj vůbec první článek k publikaci, vkládal do rukopisu velké naděje. Harvard na sklonku šedesátých let byl tím správným místem ve správnou dobu. Sítě se právě chystaly ovládnout sociologii a Harvard a MIT byly líhní nových myšlenek. Série přednášek Harrisona Whitea, průkopníka síťového pohledu ve společenských vědách, uchvátila Granovettera hned na počátku jeho postgraduálního studia natolik, že se vrhl do studia sítí. Mnohé z nových myšlenek padly u něj na úrodnou půdu, jak se ukázalo v jeho doktorské disertaci, která svůj sociologický mikroskop zaměřila na otázku, jež bude dříve nebo později sužovat všechny doktorandy: jak lidé získávají zaměstnání. Místo aby vypilovával rezumé své disertace a rozhlížel se na trhu práce, zamířil Granovetter přes Charles River do Newtonu v Massachusetts. Zatímco dnes je Newton bohatým předměstím Bostonu, koncem šedesátých let to byla dělnická čtvrť. Granovetter se snažil zjistit, jak se lidé „sesíťovávají" - jak využívají své sociální vazby, aby sehnali dobré zaměstnání -, a tak dělal rozhovory s desítkami manažerů a kvalifikovaných pracovníků a ptal se jich, kdo jim pomohl k jejich současnému místu. Byl to kamarád? A dostával stále stejnou odpověď: Ne, nebyl to kamarád, byl to jenom známý. To Granovetterovi připomnělo klasickou přednášku z chemie vysvětlující, jak slabé vodíkové můstky drží pohromadě veliké molekuly vody, a tento obrázek, který se mu vryl do mysli na začátku studia, inspiroval jeho první vědecký článek, dlouhý a objevný rukopis o tom, jak důležitá jsou v našem životě slabá sociální pouta. Odeslal jej v srpnu 1969 do časopisu *American Sociological Review*. V prosinci obdržel sdělení, že dva anonymní oponenti jeho článek zamítli. Podle vyjádření jednoho z nich se rukopis nemá publikovat „z nekonečné řady důvodů, které se okamžitě vybaví v mysli". Strašlivě zklamaný Granovetter se článku tři roky ani nedotkl. Teprve pak zaslal poněkud zkrácenou verzi rukopisu do jiného časopisu, do *American Journal of Sociology*. Tentokrát měl větší štěstí a článek nakonec vyšel v květnu 1973, čtyři roky poté, co byl poprvé nabídnut k publikaci. Dnes se tento Granovetterův článek, nazvaný „Síla slabých pout",* považuje za jeden z nejvlivnějších sociologických článků všech dob. Je také jedním z nejčastěji citovaných a časopis *Current Contents* jej v roce 1986 zařadil do svého seznamu klasických citací.

V „Síle slabých pout" navrhl Granovetter cosi, co zní na první pohled absurdně. Když si člověk chce najít práci, otevřít novou restauraci nebo když se šíří nejnovější móda, pak jsou naše slabé sociální vazby důležitější než naše milá a pevná přátelství. Jak říká, struktura sociální sítě kolem běžného člověka, nazvaného Ego, má charakteristické rysy. „Ego bude mít soubor blízkých přátel, z nichž většina se zná navzájem - hustě propletený chumáč sociální struktury. Kromě toho bude mít soubor známých, kteří se zřídka budou znát mezi sebou. Každý z těchto známých však pravděpodobně bude mít své vlastní blízké přátele a bude tedy zamotaný do pevného klubka sociální struktury, ale jiného, než v němž se nachází Ego."

V Granovetterově argumentu je skryta představa společnosti, která je velmi odlišná od náhodného světa, jak jej vykreslili Erdős s Rényim. Podle něj je společnost seskupena do vysoce pospojovaných shluků či pevně stmelených okruhů přátel, kde každý zná každého. Několik vnějších vazeb spojujících tyto shluky navzájem brání tomu, aby zůstaly izolované od zbytku světa. Je-li Granovetterův přístup správný, pak má síť popisující naši společnost dosti zvláštní stavbu. Je to soubor *úplných grafů*, malinkých shluků, v nichž každý uzel je spojen se všemi ostatními uzly téhož shluku (viz obr. na str. 48), a tyto úplné grafy jsou zase navzájem propojeny několika slabými vazbami mezi známými, z nichž každý patří do jiného okruhu přátel.

Slabé vazby hrají klíčovou úlohu tehdy, potřebujeme-li komunikovat s vnějším světem. Při hledání zaměstnání se často stává, že naši blízcí přátelé nám těžko mohou pomoci. Pohybují se ve stejných kruzích a vědí tedy zhruba totéž co my. Abychom získali novou informaci, musíme aktivovat své slabé vazby. Řídící pracovníci se s větší pravděpodobností dozvědí o pracovní příležitosti díky slabým vazbám (27,8 % případů) než prostřednictvím silných vazeb (16,7 %). Sla-

* The Strength of Weak Ties.



Silné a slabé vazby. V sociálním světě Marka Granovettera se naši nejbližší přátelé přátelí i navzájem. Síť v pozadí takové shlukující se společnosti sestává z malých plně propojených kroužků přátel, spojených silnými vazbami – tučnými čarami. Slabé vazby, znázorněné tenkými čarami, spojují členy těchto přátelských kroužků s jejich známými, a ti zase mají silné vazby se svými přáteli. Slabé vazby hrají významnou roli ve všech možných sociálních činnostech, od rozšiřování fám po hledání nového zaměstnání.

bé vazby neboli naši známí jsou pro nás mostem k vnějšímu světu, protože tím, že se vyskytují na jiných místech, získávají informace z jiných zdrojů než naši bezprostřední kamarádi.

V náhodné síti by neexistoval žádný okruh známých, protože naše spojení k jiným uzlům jsou zcela náhodná. V Erdősově a Rényiho sociálním vesmíru je pravděpodobnost, že moji nejbližší přátelé se také znají navzájem, stejná jako šance, že nejlepší přítel australského ševce je africký kmenový náčelník. Naše společnost však takhle nevypadá. Ve většině případů dva dobří přátelé znají navzájem své přátele. Často chodí na stejné večírky, navštěvují tytéž hospody a sledují stejné filmy. Čím je vazba mezi dvěma lidmi silnější, tím více se shodují jejich okruhy přátel. Třebaže Granovetterův argument o důležitosti slabých vazeb může na první pohled vypadat podivně, či dokonce paradoxně, vyjadřuje prostou pravdu o organizaci naší společnosti. Granovetterova společnost, roztříštěná pavučina plně

pospojovaných shluků komunikujících prostřednictvím slabých vazeb, odpovídá naší každodenní zkušenosti daleko více než představa naprosté náhodnosti předložená Erdősem a Rényim. Abychom plně pochopili strukturu společnosti, musí se teorie náhodných sítí nějak sladit s reálnou existencí shluků vykreslených Granovetterem. Trvalo téměř třicet let, než se to podařilo. Zajímavé na tom je, že klíč k možnému řešení nevyšel ze sociologie nebo teorie grafů.

* * *

Naproti kavárně Central, pár kroků od Karinthyho oblíbeného okna, sejdete malými dvířky a úzkým podzemním schodištěm do jedné z elitních studiových scén Budapešti. Má trefné jméno *Kamra* neboli „komora“, protože se tam na jeviště vejde jen asi deset herců a hlediště pojme stovku diváků. Ti, kdo dobře znají rušný budapešťský divadelní svět, vášnivě dychtí po jeho představeních. Poslední kus, který jsem v tomto divadle zhlédl, se kvůli úspoře místa obešel bez opony, takže mnoha divákům nebylo jasné, kdy přesně hra skončila. Bylo však těžko se splést, protože najednou všichni kolem mě spustili bouřlivý potlesk, který ještě sílil odrazy od černých stěn malé podzemní prostory. V okamžiku se chaotická bouře proměnila v rytmický aplaus. Naše dlaně na sebe narážely přesně v týž okamžik, sjednocené tajemnou silou, která nás přiměla tleskat ve stejném rytmu, jako bychom sledovali taktovku neviditelného dirigenta. Jak se herci ukláněli, mizeli v zákulisí a zase se přicházeli děkovat, rytmický potlesk ještě zesílil. Jeho synchronizace na chvíli polevila, jak tleskání nabralo rychlost a sílu, ale v několika vteřinách se projevila znovu v plné síle.

Synchronizované tleskání není žádnou zvláštností maličkého budapešťského divadla Kamra. Je to ve východní Evropě obvyklý jev po divadelních představeních, koncertech či sportovních událostech a čas od času je k slyšení kdekoli na světě. Vznikl spontánně například v Madison Square Garden – to diváci nevědomky synchronizovali svůj potlesk na počest Waynea Gretzkyho, legendárního hokejisty, když roku 1999 odcházel na odpočinek z New York Rangers. Synchronní potlesk, vznikající sám od sebe a z nejasných příčin, je nádherným příkladem samoorganizace řízené přísnými zákony, po nichž usilovně pátrají fyzici a matematici. I některé druhy světlušek se řídí těmito zákony. V jihozápadní Asii se jich slétají miliony kolem

vysokých mangrovníků a periodicky blikají. Pak najednou začnou všechny světlušky rozsvěcet a zhasínat své fluoreskující zadečky přesně v týž okamžik a promění strom, vyhlížející jako maják, ve velikou pulzující žárovku viditelnou na mnoho kilometrů. Neznatelné nutkání k synchronizaci proniká celou přírodou. Právě ono pohání pulzace tisíců pacemakerových buněk v srdci a vede k synchronizaci menstruačních cyklů žen, které žijí dlouhou dobu společně.

Duncan Watts, který v polovině devadesátých let pracoval na své doktorské disertaci z aplikované matematiky na Cornellově univerzitě, dostal za úkol prozkoumat zvláštní problém: jak cvrčci synchronizují své cvrkání. Samečci cvrčků lákají samičky svým hlasitým cvrkotem. Na rozdíl od většiny lidí se vyhýbají tomu, aby byli středem pozornosti, a to tak, že pečlivě poslouchají ostatní cvrčky v okolí a přizpůsobí své cvrkání tomu, aby souhlasilo s cvrkotem sousedů. Dejte jich několik dohromady, a z disonance se vynoří symfonie, jakou se často kocháme na zadní verandě za vlahých letních večerů.

Watts neodpovídá stereotypní představě pedantského matematika. Má bystrého ducha a vzácnou schopnost zastavit se, vrátit se o krok zpět, zamyslet se nad svou prací a změnit směr, je-li to potřeba. Ve skutečnosti se díky studiu cvrčků stal průzkumníkem sociálních sítí a nakonec sociologem. Tato proměna byla oficiálně posvěcena, když roku 2000 dostal nabídku profesorského místa na katedře sociologie Columbijské univerzity.

Zatímco se usilovně snažil přijít na to, jak se cvrčci synchronizují, upoutala ho myšlenka šesti kroků, kterou mu nasadil do hlavy jeho otec při náhodném rozhovoru. Lidé rádi donekonečna debatují o takových věcech, jako je vzdálenost šesti kroků, ale taková kavárenská filozofie zřídka vede k opravdovému poznání. Abychom plně porozuměli tomu, jak se cvrčci synchronizují, uvažoval Watts, musíme pochopit, jak si jeden cvrček všímá druhého. Poslouchá každý cvrkání všech ostatních? Anebo se snaží synchronizovat jen s jedním vybraným oblíbencem? Jaká je struktura sítě popisující, jak se cvrčci či lidé navzájem ovlivňují? Když zjistil, že přemýšlí čím dál více o sítích a čím dál tím méně o cvrčcích, zašel se Watts poradit se svým školitelem, Stevenem Strogatzem. Strogatz, profesor aplikované matematiky na Cornellu, uznávaný pro své studie o chaosu a synchronizaci, proslul tím, že žádnou nekonvenční myšlenku nenechá přejít bez povšimnutí. Brzy byli Watts se Strogatzem na výpravě do

nezmapovaných oblastí a posouvali sítě za hranice stanovené Erdősem a Rényim.

Watts zahájil svou síťovou expedici jednoduchou otázkou: Jaká je pravděpodobnost, že dva z mých přátel se znají navzájem? Jak jsme právě viděli, dává na tuto otázku teorie náhodných sítí jasnou odpověď. Protože uzly jsou pospojovány náhodně, mají dva mí nejlepší přátelé stejnou pravděpodobnost se navzájem znát jako benátský gondoliér a eskymácký rybář. Je jasné, jak tvrdil už pětadvacet let předtím Granovetter, že takhle společnost nefunguje. Jsme součástí shluků, v nichž každý zná každého. Dva moji nejlepší přátelé se tedy nutně budou znát. Abychom získali důkazy o tom, jak se společnost shlukuje, ve formě přijatelné pro matematika či fyzika, musíme být schopni *měřit* toto shlukování. K tomu účelu zavedli Watts se Strogatzem veličinu zvanou *koeficient shlukování.** Předpokládejme, že máte čtyři dobré přátele. Pokud jsou i oni všichni navzájem přáteli, můžete každého z nich spojit vazbou, čímž dostanete celkem šest přátelských vazeb. Je však možné, že někteří z vašich přátel nejsou přáteli navzájem. Pak bude reálný počet méně než šest: řekněme čtyři. V tomto případě bude koeficient shlukování vašeho okruhu přátel 0,66 – tento údaj dostaneme vydělením skutečného počtu vazeb mezi vašimi přáteli (čtyři) počtem vazeb, které by měli, kdyby byli všichni navzájem přáteli (šest).

Koeficient shlukování nám říká, jak těsným tkanivem je svázán váš okruh přátel. Číslo blízké jedničce znamená, že všichni vaši přátelé jsou navzájem dobrými přáteli. Je-li naopak koeficient shlukování nula, pak jste jedinou osobou, která drží vaše přátele pohromadě, neboť, jak se zdá, nemají v oblibě jeden druhého. Granovetterova vize společnosti zahrnuje mnoho dobře pospojovaných shluků, svázaných navzájem slabými vazbami. Taková síť s velkým shlukováním by měla mít vysoký koeficient shlukování. Abychom získali kvantitativní důkaz, že naše společnost je skutečně plná takových shluků, potřebovali bychom měřit koeficient shlukování pro každou osobu na Zemi. Jelikož neexistují mapy, které by nám řekly, kdo je svázán s kým a kdo se přátelí s kým, je to úkol nesplnitelný. Naštěstí však jedna zvláštní podmnožina společnosti pravidelně zveřejňuje své sociální vazby, takže můžeme hledat shlukování v rámci této neobvyklé skupiny.

* Clustering coefficient (pozn. překl.).

* * *

Dnes je Paul Erdős známý nejen svými nesčetnými teorémy a matematickými důkazy, ale i díky jednomu pojmu, který inspiroval: Erdősovu číslu. Erdős publikoval více než 1 500 článků s 507 spoluautory. Je to obrovská čest, můžete-li se počítat k stovkám jeho spoluautorů. Můžete si cenit i toho, že jste jen dva kroky od něj. Aby se vědělo, jak daleko od Erdőse jsou, zavedli matematici *Erdősovo číslo*. Erdős má Erdősovo číslo nula. Těm, kdo měli s Erdősem společný článek, přísluší Erdősovo číslo jedna. Ti, kdo napsali článek společně s Erdősovým spoluautorem, získali Erdősovo číslo dvě a tak dále. Nízké Erdősovo číslo je věcí cti - šlo to až tak daleko, že vzniklo podezření, že po Erdősově smrti v roce 1996 snad někteří lidé vykonstruovali neexistující spolupráci, jen aby si Erdősovo číslo snížili. A matematici po celém světě se začali pídit po tom, jak jsou daleko od tohoto výstředního středu matematického vesmíru. Aby jim to hledání usnadnil, spravuje Jerry Grossmann, profesor matematiky na Oaklandské univerzitě v Rochesteru ve státě Michigan, podrobnou webovou stránku s Erdősovým číslem několika tisíců matematiků.

Ukazuje se, že většina matematiků má Erdősovo číslo dosti malé. Většinou jsou dva až pět kroků od Erdőse. Ale Erdősův vliv značně překračuje jeho bezprostřední obor - i ekonomové, fyzici a informatici se s ním dají snadno propojit. Einstein má Erdősovo číslo dva. Paul Samuelson, nositel Nobelovy ceny za ekonomii, má číslo pět. James D. Watson, spoluobjevitel dvojité šroubovice DNA, má číslo osm a slavný lingvista Noam Chomsky číslo čtyři. Dokonce i William H. (Bill) Gates, zakladatel Microsoftu, který ve vědě publikoval jen málo, má Erdősovo číslo čtyři. I já mám Erdősovo číslo čtyři: Erdős napsal článek s Josephem E. Gillisem, k jehož sedmnácti spoluautorům patřil George H. Weisse, a ten zase pracoval s H. Eugenem Stanleym, vedoucím mé doktorské práce, s nímž jsem napsal knihu a přes deset vědeckých článků.

Samotná existence Erdősova čísla ukazuje, že vědecká obec tvoří vysoce propojenou síť, v níž všichni vědci jsou navzájem spojeni prostřednictvím článků, které napsali. Nízká hodnota většiny Erdősových čísel značí, že tato vědecká pavučina je skutečně malý svět. Protože se jen zřídka stane, že se autoři publikace mezi sebou neznají, spoluautorství představuje silné sociální vazby. To znamená,

že pavučina vědy je zmenšeným prototypem naší sociální sítě a že má tu jedinečnou vlastnost, že vazby se pravidelně zveřejňují. Aby mohli vědci najít články pojednávající o určitém problému, jsou všechny vědecké publikace zaznamenány v počítačových databázích; tím se automaticky vytváří podrobný digitální záznam o sociálních a profesionálních vazbách mezi vědci. Můžeme je tedy použít ke studiu struktury sítě spolupráce.

Přesně to také udělala naše skupina na jaře 2000. Tamás Vicsek, renomovaný vědec a vedoucí oddělení biofyziky na Eötvösově univerzitě v Budapešti, zorganizoval v akademickém roce 1999-2000 v Ústavu pro pokročilá studia, který má sídlo na půvabném Budínském hradě, tyčícím se nad Dunajem, roční program zaměřený na biofyziku. Jeden z účastníků, rumunský vědec Zoltán Néda, vzal s sebou Erzsébet Ravaszovou, tehdy studentkou v Nédově skupině. K týmu se přidal také András Schubert, odborník na sociometrii, pracující v Maďarské akademii věd, který měl pro výzkumné účely přístup k velkým databázím spoluautorů. Společně s Vicsekem, Ravaszovou, Nédou, Schubertem a Hawoongem Jeongem jsme propojili všechny matematiky prostřednictvím článků publikovaných v letech 1991 až 1998 - dali jsme tak dohromady složitě propletenou síť 70 975 matematiků spojených více než 200 000 spoluautorskými vazbami. Kdyby si matematici vybírali své spoluautory náhodně, pak výsledná náhodná síť by podle předpovědi Erdősovy a Rényiho teorie měla velmi malý koeficient shlukování, přibližně 0,000 01. Naše měření však naznačovalo, že koeficient shlukování skutečné sítě spolupráce je asi 10 000krát vyšší, což dokazuje, že matematici si nevybírají své spolupracovníky naslepo. Naopak, tvoří síť s výraznými shluky, podobnou té, již objevil Granovetter v celé naší společnosti.

Aniž jsme to věděli, i Mark Newman, fyzik ze Santafeského institutu, se zabýval zkoumáním grafu spoluprací mezi vědci, a to zejména mezi fyziky, lékaři a informatiky, a kladl si podobné otázky jako my v Budapešti. Newman, který rozumí všemu možnému od náhodných systémů až po vymírání druhů v ekosystémech, rozpoznal jedinečnou příležitost, kterou nám náš komputerizovaný svět poskytuje k pochopení sítí. Ještě než se pustil do sítí spolupráce, napsal několik dnes už proslulých článků o malých světech. Zatímco náš počítač chrlil první výsledky, umístil Newman na internetu svůj první článek o vzájemné spolupráci vědců. Ukázal v něm, že každoden-

ní vědecký provoz se odehrává v hustě propojených shlucích vědců, navzájem svázaných příležitostnými slabými vazbami. Newmanova práce, zkombinovaná s naší vlastní, poskytla kvantitativní důkaz čehosi, co jsme celou dobu cítili, že musí být pravda, ale co bylo stále obtížné změřit, dokud nebyly k dispozici počítače: že v sociálních systémech skutečně hraje roli shlukování.

* * *

Shlukování ve společnosti je cosi, co intuitivně chápeme. Lidské bytosti mají vrozenou touhu vytvářet party a skupiny, které jim poskytují zázemí, bezpečí a pocit soukromí. Vědce však zajímají jen ty vlastnosti sociální sítě, které odhalují nějakou obecnou vlastnost většiny sítí v přírodě. A nejdůležitějším Wattsovým a Strogatzovým objevem je to, že shlukování se neomezuje jen na sociální sítě.

Ačkoli se lidská inteligence obecně spojuje s komplexitou a velikostí neuronové sítě našeho mozku, červ s těžko vyslovitelným jménem *Caenorhabditis elegans* je živoucím důkazem toho, jak daleko se dostaneme s pouhými 302 neurony. Přestože žije jen dva až tři týdny, udělal tento milimetrový červík skvělou kariéru, a to od chvíle, kdy si jej Sydney Brenner, prominentní molekulární biolog z Ústavu molekulárních věd v kalifornském Berkeley, vyvolil za „pokusného králíka" molekulární biologie. Od té doby vystupoval v tisících článků, množili ho ve stovkách laboratoří po celém světě a je mu zasvěcena řada webových stránek.

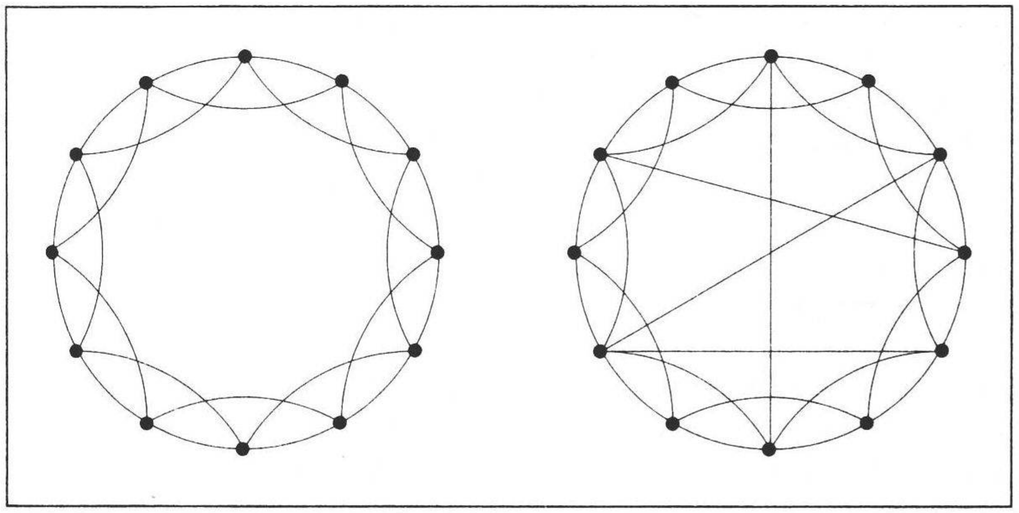
I když se jeho genom zase tak mnoho neliší od lidského, je tento červíček jedním z nejjednodušších mnohobuněčných organismů. Vědcům se podařilo vyzkoumat přesné propojení jeho nervového systému a vytvořili mapu, která podrobně popisuje, který jeho neuron je spojený s kterým. Když se pak na tento diagram nervových spojení podívali Watts se Strogatzem, zjistili, že tato malinká pavučina se příliš neliší od pavučiny celé lidské společnosti: i ona vykazuje vysoký stupeň shlukování - ve skutečnosti tak velký, že sousedé nějakého neuronu jsou spojeni s pětkrát větší pravděpodobností, než by tomu bylo v případě náhodné sítě. Výzkumníci zjistili stejné chování u elektrické rozvodné sítě na západě Spojených států, v níž uzly představují generátory a transformátory a hrany reprezentují vedení vysokého napětí. U této rozvodné sítě se také objevuje neobvykle vysoký stupeň shlukování. A totéž platí pro síť spolupráce hollywoodských herců, jíž se budeme podrobně věnovat v příští kapitole.

Díky zvýšenému zájmu o fenomén shlukování, vyvolanému Wattsovým a Strogatzovým nečekaným objevem, prozkoumali vědci podrobně jednu po druhé velké množství sítí. Dnes víme, že shlukování je charakteristickým rysem webu, zpozorovali jsme je ve fyzickém propojení počítačů na internetu, ekonomové je odhalili v síti, která popisuje spoluvlastnické vztahy firem, ekologové nalézají shlukování v potravních sítích, které znázorňují, jak v ekosystému jeden druh požírá jiný, a buněční biologové zjistili, že shlukování charakterizuje křehkou síť molekul v buňce. Díky objevu všudypřítomnosti shlukování se ze zvláštního rysu lidské společnosti velice rychle stala typická vlastnost komplexních sítí a vážně se tím nabourala představa, že reálné sítě jsou víceméně náhodné.

* * *

Aby vysvětlili všudypřítomnost shlukování ve většině reálných sítí, navrhli Watts a Strogatz ve své studii publikované roku 1998 v časopise *Nature* alternativu k Erdősově a Rényiho modelu náhodné sítě. Přišli s modelem, který poprvé dokázal smířit shlukování s naprosto nahodilým charakterem náhodných grafů. Představili si, že lidé žijí na obvodu kruhu (obr. na str. 56), podél něhož každý zná své bezprostřední sousedy. V tomto jednoduchém modelu má každý uzel přesně čtyři sousedy *navzájem* spojené třemi vazbami. Výsledná síť tedy má velký koeficient shlukování. Ano, kdyby všichni čtyři sousedi byli navzájem spojení, existovalo by mezi nimi šest vazeb. Protože jsou jen tři, je koeficient shlukování 3/6 čili 0,5, což není daleko od hodnoty 0,56, zjištěné u sítě matematiků. Abychom pochopili, že to skutečně znamená značné shlukování, uvažme náhodnou síť, v níž má typický uzel stále čtyři sousedy, ale je spojen náhodně s libovolným uzlem v systému. Počet vazeb mezi mými čtyřmi sousedy teď závisí na velikosti sítě. Mám-li dvanáct uzlů, tak jak je to na obrázku, bude koeficient shlukování 0,33. Pro miliardu uzlů však poklesne na 4 miliardtiny! Je jasné, že koeficient shlukování rovný 0,5, jak to předpovídá model, mnohonásobně tyto hodnoty překračuje.

Za tak vysoký koeficient shlukování však musíme něčím zaplatit. Náš malý svět je pryč. V modelové společnosti na obrázku jsou mi



Malý a nahloučený svět. Aby mohli modelovat sítě s vysokým stupněm shlukování, začali Duncan Watts a Steven Strogatz s uzly uspořádanými do kruhu tak, že každý uzel je spojen se svými nejbližšími a druhými nejbližšími sousedy (vlevo). Malý svět z nich vytvořili tím, že přidali navíc menší počet vazeb spojujících náhodně vybrané uzly (vpravo). Tyto dalekodosahové vazby podstatným způsobem zkracují cestu mezi vzdálenými uzly a tak drasticky zkracují průměrnou vzdálenost mezi kterýmikoli dvěma uzly.

blízko jenom mí nejbližší sousedé a ještě ti za nimi. Abych se dostal k někomu na opačné straně kruhu, musel bych doslova obejít kruh a cestou si podat ruku s nesčetnými lidmi. Jak si lze snadno ověřit, nejkratší dráha spojující nejhořejší uzel s nejspodnějším je dlouhá nejméně tři vazby. To nemusí vypadat jako zvlášť hodně, ale kdybych měl trpělivost (a dost místa), abych nakreslil podél téže kružnice 6 miliard uzlů a každý z nich by byl spojený se svými nejbližšími a druhými nejbližšími sousedy, nejkratší cesta na opačnou stranu kruhu by vyžadovala potřást si rukou více než miliardkrát! Takže společnost na kruhu nejenže vykazuje velké shlukování, ale je to také zároveň velmi velký svět.

Ve skutečnosti máme všichni vazby na lidi daleko na zeměkouli. Každý z nás má přátele, kteří nebydlí hned vedle. Chci-li najít cestu k nějaké osobě v Austrálii, nepůjdu od domu k domu, protože bych dříve či později narazil na Tichý oceán. Spíš si vzpomenu, že můj nejlepší kamarád ze střední školy se před pár lety přestěhoval do Sydney. A tak nepotřebuji nic víc než najít vazbu k mé australské cílové osobě prostřednictvím stále hustších přátelských vazeb, které kolem sebe můj přítel právě teď vytváří. Realistický model dnešní společnosti musí dovolit vazby na velkou vzdálenost. V rámci výše popsaného modelu se toho dá snadno dosáhnout tím, že přidáme pár vazeb mezi náhodně vybranými uzly podél kružnice. To znamená vzít dva uzly na kruhu a spojit je novou vazbou. Sníží se tak vzdálenost mezi zvolenými uzly na jedničku a také jejich bezprostřední sousedé si budou podstatně blíže. Pokud takových náhodných vazeb přidám hodně, dosáhnu toho, že všechny uzly budou navzájem velmi blízko.

Watts a Strogatz dospěli k překvapivému zjištění, že *i malé množství* dodatečných vazeb stačí k tomu, aby se dramaticky snížila průměrná odlehlost uzlů. Těch několik vazeb nijak výrazně nezmění koeficient shlukování, ale díky dlouhým můstkům, které se tím vytvoří a které často spojují uzly na opačné straně kruhu, se vzdálenost mezi všemi uzly úžasně zkrátí. Schopnost modelu podstatně zmenšovat vzdálenosti, zatímco koeficient shlukování zůstává prakticky beze změny, ukazuje, že při výběru přátel můžeme klidně zůstat doma za pecí. Stačí, když sem tam někdo má příbuzné a přátele, kteří nebydlí hned za rohem. Díky těmto vzdáleným vazbám máme k dispozici zkratky k lidem ve velmi odlehlých oblastech světa. Aby obrovské sítě vykazovaly rysy malého světa, nemusí obsahovat spousty náhodných spojů. Pár takových vazeb úplně stačí.

* * *

Když vyšel Wattsův a Strogatzův článek o shlukování, strhl na sebe nebývalý zájem jak fyziků, tak matematiků. Především formalizoval Granovetterovu vizi tím, že předložil model se skutečně značným shlukováním. Zadruhé sehrál jedinečnou úlohu v tom, že si problému malého světa, široce zkoumanému v sociologii, začali všímat i lidé zběhlí ve fyzice a matematice. Nějakou dobu se zdálo, že by obecnější model Wattse a Strogatze, připouštějící shlukování, mohl nahradit náhodný vesmír Erdőse a Rényiho. Všechno bychom mohli přirovnat k jednoduché představě dobře známého místního uspořádání protkaného několika málo vzdálenými vazbami, čímž bychom poskytli naprosto jasné vysvětlení malých světů kolem nás. Model nabídl elegantní kompromis mezi zcela náhodným světem Erdőse a Rényiho, který tvoří malý svět, ale nemá rád přátelské kroužky, a pravidelnou mřížkou, kterou charakterizuje značné shlukování, ale v níž jsou uzly daleko od sebe.

Dnes už víme, že Wattsův a Strogatzův model není neslučitelný s Erdősovým a Rényiho pohledem na svět. Jistě, za předpokladu, že vyjdeme od pravidelné mřížky, opravdu umožníme shlukování, ale v mnoha ohledech jeho nejzákladnější myšlenka stále těsně sleduje představu Erdőse a Rényiho. Ve skutečnosti až na to, že na začátku uspořádáme uzly podél kružnice, spojujeme uzly zcela *náhodně* jeden s druhým. Oba modely tedy zobrazují naprosto rovnostářskou společnost, jejíž vazby se řídí hodem hrací kostky.

Když roku 1998 vyšel Wattsův a Strogatzův stěžejní článek, moje výzkumná skupina se snažila pochopit strukturu komplexních sítí a soustřeďovala se hlavně na world wide web. Chvíli nám trvalo, než jsme plně pochopili důležitost poselství obsaženého v tomto článku a než jsme docenili, jak nový model dokáže sblížit Erdősův a Rényiho pohled na svět s Granovetterovou shlukující se společností. Než jsme to nakonec vstřebali, měli jsme po ruce záchranu. Náš malinký robot se vrátil z webu s plánem sítě diametrálně odlišné od toho, co předpovídal jak Erdősův-Rényiho, tak Wattsův-Strogatzův model. Jak uvidíme v příští kapitole, posbíral celou řadu center – uzlů s neobyčejně vysokým počtem vazeb. Problém byl v tom, že v rovnostářském modelu Erdőse a Rényiho jsou taková centra extrémně vzácná; bylo tedy jasné, že model není schopen vysvětlit to, co robot zjistil. Ani Wattsův-Strogatzův model na tom nebyl o mnoho lépe. I on zakazuje uzly s výrazně větším počtem vazeb, než má průměrný uzel. *Oběma* modelům tedy scházelo něco důležitého, bez čehož jsme nemohli svět sítí plně pochopit. Data nás přiměla podívat se na reálné sítě hlouběji a nakonec nás donutila zcela opustit pohled na svět z hlediska náhody. Když jsme se vydali touto cestou, věci se obrátily velmi nečekaným směrem. A my jsme se museli vzdát téměř všeho, co jsme se dosud o sítích naučili.

Vlákno páté

Centra a prostředníci

Malcolm Gladwell, reportér časopisu *The New Yorker*, popisuje ve své knize *Vítězný bod** jednoduchý test, který vám řekne, jak společenští jste. Dostanete seznam 248 příjmení vypsaných z telefonního seznamu Manhattanu a máte si připsat bod, když znáte někoho, kdo takové příjmení má. Víc známých s týmž příjmením se také počítá: znáte-li tři Jonesy, což je jedno ze jmen na seznamu, dostanete 3 body. Když Cladwell předložil tento seznam studentům manhattanské City College, jimž bylo něco přes dvacet a většinou to byli nedávní přistěhovalci, zaznamenal průměrně 21 bodů. Jinými slovy, znali kolem jedenadvaceti lidí s příjmeními, která se shodovala s někým na seznamu. Náhodně vybraná skupina většinou bílých vysoce vzdělaných vysokoškoláků dosáhla kolem 39 bodů, skoro dvakrát víc než studenti z City College. Na tom není nic překvapivého. Co však Gladwella upoutalo, bylo rozpětí, v jakém se výsledky pohybovaly. Na City College to bylo od 2 do 95. V náhodném vzorku byl nejnižší údaj 9 a nejvyšší 118. I když zkoumal velmi homogenní skupinu lidí podobného věku, vzdělání a úrovně příjmů, bylo rozpětí enormní. Nejnižší počet bodů byl 16 a nejvyšší 108. Nakonec Gladwell otestoval celkem asi sto lidí a v každé sociální skupině, na kterou se zaměřil, našel malý počet vysokých bodových hodnocení. Došel proto nutně k závěru: „V každém místě, kam nás život zanese,...jsou tu a tam nemnozí lidé se skutečně výjimečnou dovedností, jak si získat přátele a známé. To jsou prostředníci."

Prostředníci jsou neobyčejně důležitou složkou naší sociální sítě. Vytvářejí trendy a módy, uzavírají důležité dohody, šíří módní vlny či pomáhají zahájit provoz restaurace. Jsou pojivem společnosti a pomalu dávají dohromady různé rasy, úrovně vzdělání a rodokmeny. Když si povšiml existence prostředníků, myslel si Gladwell, že pozoruje cosi typicky lidského. Ve skutečnosti, aniž si to uvědomoval, narazil na něco mnohem obecnějšího, na jev, který naší výzkum-

* *The Tipping Point.*

né skupině vrtal hlavou mnohem dřív, než vyšla kniha *Vítězný bod*. Prostředníci – uzly s anomálně vysokým počtem vazeb – se vyskytují ve velmi rozličných komplexních systémech, od ekonomiky po buňku. Jsou základní vlastností většiny sítí. Tento fakt upoutal pozornost vědců z oborů tak odlišných, jako je biochemie, informatika a ekologie. Jejich objev převrátil všechno, co jsme věděli o sítích, na hlavu. Shlukování odhalilo první trhlinu v Erdősově a Rényiho náhodném pohledu na svět. Jednoduchý model Wattse a Strogatze, rozebíraný v předchozí kapitole, to zachránil a smířil přátelské kroužky s fenoménem šesti kroků od sebe. Prostředníci dali oběma modelům poslední ránu. Chceme-li vysvětlit, odkud se tyto vysoce propojené uzly berou, musíme jednou provždy opustit náhodný pohled na svět.

* * *

Kyberprostor ztělesňuje dokonalou svobodu slova. Někoho to může urážet, někdo může být nadšen, ale obsah webové stránky lze těžko cenzurovat. Jakmile je zveřejněna, je k dispozici stamilionům lidí. Tato volnost vyjádřit svůj názor, která nemá obdoby, spolu se sníženými publikačními náklady dělá z webu dokonalé fórum demokracie; hlas kohokoli má stejnou šanci být slyšen. Tak to aspoň tvrdí odborníci na americkou ústavu a podnikatelské časopisy na křídovém papíře. Kdyby byl web náhodnou sítí, byla by to pravda. Ale není to tak. To, co nás v našem projektu mapování webu nejvíce fascinovalo, byla *úplná* absence demokracie, spravedlnosti a rovnostářských hodnot na webu. Zjistili jsme, že topologie webu nám umožní vidět pouhou hrstku z miliardy dokumentů, které tam jsou.

U webu už není klíčovou otázkou, zda můžete své názory zveřejnit. Možné to je. Jakmile je publikujete, budu okamžitě k dispozici komukoli na světě, kdo má připojení na internet. Když si uvědomíme tu džungli miliardy dokumentů, je spíše otázkou, zda si vás vůbec někdo všimne.

Aby někdo četl vaše stránky, musíte být vidět, a tato banální pravda platí stejně pro autory románů jako pro vědce. Na webu je měřítkem viditelnosti počet odkazů. Čím více *příchozích* odkazů ukazuje na vaši webovou stránku, tím je viditelnější. Kdyby měl každý dokument na webu odkaz na vaši stránku, ve chvilce by všichni věděli, co máte na srdci. Průměrná webová stránka má však pouze pět až sedm odkazů, každý směřující na jednu z miliardy existujících stránek. Pravděpodobnost, že typický dokument odkazuje na vaši stránku, je tedy prakticky nulová.

Tento závěr dokonale platí pro mou vlastní stránku, tedy pro stránku www.nd.edu/~alb. Podle AltaVisty je na světě kolem čtyřiceti jiných stránek, které na ni odkazují. Upřímně řečeno je to dost, vzhledem k tomu, jak úzce je zaměřená, ale když uvážíte, že na výběr máme kolem miliardy stránek, je pravděpodobnost, že zrovna vy objevíte tu mou, zhruba čtyřicet k jedné miliardě. To znamená, že když náhodně surfujete webem a u každé webové stránky se zdržíte pouhých deset vteřin, budete surfovat osm let, dnem i nocí, než se dostanete k odkazu na mou domovskou stránku.

Každý z nás má velmi odlišné zájmy, vyznává jiné hodnoty, lišíme se v tom, čemu věříme a v čem si libujeme. Odkazy, které přidáváme na své webové stránky, tuto rozmanitost odrážejí. Děláme odkazy na všechna možná místa, od stránek o umění afrických domorodých kmenů po portály elektronického obchodu. Můžeme-li si vybrat z více než miliardy uzlů, dá se očekávat, že výsledná struktura odkazů bude dosti náhodná. Takové náhodné vazby by znamenaly, že tu vládne Erdősův a Rényiho model. Náhodný web by byl dokonalým nositelem rovnostářství, protože Erdősova-Rényiho teorie zaručuje, že všechny uzly jsou si navzájem velmi podobné a každý má zhruba stejný počet příchozích vazeb.

Naše měření se však vymykalo tomuto očekávání. Mapa, kterou nám předal náš robot, potvrdila vysoký stupeň nerovnosti v topologii webu. Z 325 000 stránek v doméně Univerzity Notre Dame, které jsme prozkoumali, mělo 270 000, tedy celých 82 % všech stránek, *tři a méně* příchozích odkazů. Naproti tomu na malou menšinu, kolem dvaačtyřiceti stránek, se odvolávalo více než 1 000 jiných stránek a ty měly více než 1 000 příchozích odkazů. Pozdější měření na vzorku 203 milionů webových stránek odhalilo ještě širší spektrum: na obrovskou většinu, celých 90 % všech dokumentů, míří deset a méně odkazů, zatímco na několik málo, asi tak tři, odkazuje téměř milion jiných stránek!

Tak jako ve společnosti zná několik málo prostředníků neobyčejné množství lidí, je – jak jsme zjistili – architektura world wide webu ovládaná několika málo vysoce propojenými uzly neboli *centry*.* Tato centra, jako třeba Yahoo! nebo Amazon.com, jsou extrémně vi-

* Anglický termín *hub* zde překládáme jako centrum (pozn. překl.).

ditelná - kamkoli se obrátíte, vidíte, že na ně míří nějaký další odkaz. V síti, která je základem webu, drží řada neznámých nebo zřídka navštěvovaných uzlů s malým počtem vazeb pohromadě právě díky těmto vysoce propojeným webovým stránkám.

Centra jsou tím nejsilnějším argumentem proti utopické vizi rovnostářského kyberprostoru. Ano, všichni máme právo umístit na web, cokoli se nám zachce. Ale všimne si toho někdo? Kdyby byl web náhodnou sítí, měli bychom všichni stejnou šanci být vidět a slyšet. Kolektivní činností nějak vytváříme centra, webové stránky, na které všichni odkazují. Dají se velmi snadno najít, bez ohledu na to, kde se na webu nacházíte. Ve srovnání s těmito centry je zbytek webu neviditelný. Ať se na to díváme jakkoli, stránky, na které odkazuje pouze jeden nebo dva jiné dokumenty, prakticky neexistují. Je téměř nemožné je najít. Dokonce i webové vyhledávače jsou proti nim zaujaté a ignorují je, když prolézají webem a hledají mezi stránkami nejžhavější novinky.

* * *

Právě ten večer, kdy v televizi běžel film *Kokosy v pralese** s Kevinem Baconem, přišli Craig Fass, Brian Turtle a Mike Ginelly, studenti z Albright College v Readingu v Pensylvánii, na cosi neuvěřitelného. Najednou jim svitlo, že Bacon hrál v tolika různých filmech, že ho lze spojovat snad s každým hercem v Hollywoodu. Plni vzrušení poslali v lednu 1994 dopis tvůrcům show Jona Stewarta, provokativního pořadu oblíbeného mezi studentským publikem. „Jsme tři a máme poslání. Chceme dokázat divákům Jona Stewarta, ale nejen jim, celému světu, že Bacon je Bůh." Ke svému velkému překvapení si užili svých patnáct minut slávy. Dostali pozvání, aby ve Stewartově show s Kevinem Baconem vystoupili, a okouzlili publikum tím, jak jej dokázali spojit s kterýmkoli hercem, jehož jméno jim bylo předhozeno. Od začátku do konce se však beznadějně mýlili. Bacon není o nic blíže ke středu Hollywoodu než ke středu vesmíru.

Geniální myšlenka, můžeme-li to tak nazvat, těchto studentů spočívala v pozorování, že každý herec v Hollywoodu se dá spojit s Kevinem Baconem typicky dvěma až třemi vazbami. Například Tom Cruise je od Bacona jen jeden krok, protože společně hráli ve filmu

* *The Air Up There.*

*Pár správných chlapů.** Použijeme-li analogie s Erdősovým číslem, má Tom Cruise Baconovo číslo jedna. Mike Myers by pak měl číslo dvě, protože je spojen s Robertem Wagnerem prostřednictvím filmu *Špion, který mě vojel.*** Wagnerovi bychom přisoudili Baconovo číslo jedna díky filmu *Nebezpečné hry.**** Ale i takové historické postavy, jako je Charlie Chaplin, mají spoj na Bacona: Chaplin hrál s Barrym Nortonem ve filmu *Monsieur Verdoux*; ten hrál s Robertem Wagnerem ve filmu *Na poli cti a slávy*,[+] a Wagner, jak už víme, je jeden krok od Bacona. Takže Charlie Chaplin má Baconovo číslo tři. Abychom to ještě víc zamotali, Paul Erdős má Baconovo číslo čtyři, a to díky dokumentárnímu filmu *N je nějaké číslo*,[++] který byl o něm natočen a v němž hraje sebe sama. Účinkoval tam i Gene Patterson, který se později objevil v malé roli ve filmu *Život v sedmém nebi*,[+++] díky němuž získal Baconovo číslo tři. A protože v *N je nějaké číslo* se předváděla největší smetánka teorie grafů, má mnoho matematiků nejen malé Erdősovo číslo, ale i malé číslo Baconovo.

Hra s Kevinem Baconem by zůstala jen filmovou banalitou, kdyby se na Stewartovu show nedívali dva studenti informatiky z Virginské univerzity, Glen Wasson a Brett Tjaden. Ti okamžitě pochopili, že jakmile získáme přístup k databázi všech herců a filmů, které kdy byly natočeny, je určování vzdáleností mezi kterýmikoli dvěma herci schůdný počítačový projekt. Internetová filmová databáze IMDb.com, laboratoř fanoušků filmu, která nabízí více informací o hercích a filmech, než bude někdo někdy potřebovat, už tu byla. Po několika týdnech programování dali Wasson a Tjaden dohromady webovou stránku s názvem „Baconovo orákulum", a ta dovedla hru k dokonalosti. Zadáte-li jména kterýchkoli dvou herců, ukáže vám během několika tisícin vteřiny nejkratší cestu mezi nimi a vypíše seznam herců a filmů, prostřednictvím nichž jsou spojeni.*+ Počet návštěvníků této webové stránky se okamžitě vyšplhal na více než 20 000 denně a nakonec se dostala na se-

* *A Few Good Men.*
** *The Spy Who Shagged Me.*
*** *Wild Things.*
\+ *What Price Glory.*
\++ *N Is a Number.*
\+++ *Box of Moonlight.*
*+ Tak můžeme například zjistit, že Vlastimil Brodský a Jan Tříska mají Baconovo číslo 2, kdežto Zdeněk Svěrák má číslo 3, stejně jako Václav Havel (pozn. překl.).

znam deseti nejúspěšnějších stránek roku 1997 v časopisu *Time*. Naposledy jsem ji zkoušel 26. srpna 2001 a jen toho dne měla více než 13 000 návštěvníků.

* * *

Hru Kevina Bacona můžeme hrát proto, že Hollywood tvoří hustě pospojovanou síť, kde herci představují uzly, spojené skrze filmy, v nichž hráli. Každý herec má vazbu na všechny ostatní obsazené herce. A tak jsou ti, kdo hráli ve více filmech, navázáni více vazbami. Protože každý herec má v průměru dvacet sedm vazeb, což je mnohem více než nezbytná *jedna*, která dělá síť dokonale propojenou, vzniká šest kroků zcela přirozeně: ***každý*** herec se dá spojit s kterýmkoli jiným hercem průměrně třemi vazbami. Jenomže, jak zaznamenala naše skupina, když jsme analyzovali hereckou síť, průměrné hodnoty se tady nedají použít. Celých 41 % herců má méně než deset vazeb. To jsou ti méně známí herci, jejichž jména běží v titulcích poté, co jste už opustili sál. Nepatrná menšina herců však má mnohem více než deset vazeb. John Carradine si během své plodné kariéry vytvořil 4 000 vazeb na jiné herce, zatímco Robert Mitchum za desetiletí na stříbrném plátně účinkoval s 2 905 kolegy. Tito výjimečně silně propojení herci jsou centry Hollywoodu. Když několik z nich odstraníte, cesta téměř každého herce k Baconovi se hned podstatně prodlouží.

Na jednu stranu by poučený člověk mohl tvrdit, že herci, kteří hráli v nejvíce filmech, jsou také nejvíce propojení a mají nejkratší vzdálenost ke komukoli v Hollywoodu. Ukazuje se, že v průměru to platí: čím ve více filmech herec hrál, tím kratší je jeho průměrná vzdálenost k jiným hercům. Na druhé straně ze seznamu herců s největším počtem filmů nezjistíme nejvíce spojené herce a navíc nás čekají různá překvapení, jak ukazuje následující žebříček deseti herců s největším počtem filmů sestavený Hawoongem Jeongem (v závorce je počet filmů, v nichž hráli): Mel Blanc (759), Tom Byron (679), Marc Wallice (535), Ron Jeremy (500), Peter North (491), T. T. Boy (449), Tom London (436), Randy West (425), Mike Horner (418), Joey Silvera (410). Vsadil bych se, že většině z vás říkají tato jména stejně málo jako nám, když jsme je poprvé uviděli. Američtí diváci by mohli znát Mela Blanca, který propůjčil svůj hlas populárním a zbožňovaným kresleným postavičkám, jako byli králíček Bugs,

datel Woody, kačer Daffy, prasátko Porky, kanár Tweety a kocour Sylvester. A ti z vás, kdo jste už překročili padesátku, jste možná viděli Toma Londona, snad nejplodnějšího herce druhořadých westernů, v nichž ztvárnil nesčetné šerify, rančery a kumpány. Zbytek herců ze seznamu ne a ne zařadit. Nakonec, po nějakém bádání, jsme na to přišli. Jsou to všechno pornohvězdy.

Tento seznam je snad nejživější ukázkou toho, že co se týče sítí, nezáleží vždy na velikosti. Přestože hrály pornohvězdy v rekordním počtu filmů, nedostaly se nikam poblíž centra Hollywoodu. Protože sítě se vyznačují tvorbou shluků, uzly, které jsou spojeny jenom s uzly ze stejného shluku, mohou hrát jen centrální roli ve své subkultuře či žánru. Bez vazeb, které by je spojovaly s okolním světem, mohou být dosti daleko od uzlů v jiných shlucích. Je tedy dosti obtížné spojit herce, který hrál jen v pornografických filmech a má vazby jen na hvězdy pornofilmu, s hereckými hvězdami filmů Martina Scorseseho nebo Andreje Tarkovského. Pohybují se prostě v jiných světech. Ta pravá ústřední pozice v sítích je vyhrazena uzlům, které jsou zapojeny současně do mnoha velkých shluků. Jsou to herci, kteří během své kariéry hráli ve velmi odlišných žánrech. Jsou to webové stránky, které nepopisují jen moderní umění, ale obsahují odkazy na všechny oblasti lidského bádání. Jsou to ti, kdo se pravidelně stýkají s lidmi z různých oblastí a sociálních vrstev. Jsou to Erdősové matematiky, kteří se nedají uzavřít do škatulky a kteří se pouštějí se stejnou hravostí do problémů v mnoha podoborech vědy. Jsou to Leonardové sítí, kteří jsou stejně doma v umění jako ve vědě.

Kevin Bacon je samozřejmě prominentní hollywoodský herec. Hrál ve více než 46 filmech a nasbíral přes 1 800 vazeb na jiné herce. Jeho průměrná vzdálenost ke komukoli jinému v Hollywoodu je 2,79: většina herců tedy od něj není dál než tři kroky. Proto se někomu tak daří v Baconově hře a snadno s ním spojí kteréhokoli jiného herce. Je však Bacon nejlépe zapojeným hercem? Když Hawoong Jeong připravoval seznam tisíce nejvíce propojených herců, skutečných center Hollywoodu, chvíli nám trvalo, než jsme tam Bacona našli. Na prvním místě jsme viděli Roda Steigera s průměrnou vzdáleností 2,53 od kohokoli jiného. Následoval Donald Pleasence se vzdáleností 2,54. Martin Sheen, Christopher Lee, Robert Mitchum a Charlton Heston zaujali další čtyři pozice, každý se vzdáleností menší než 2,57. Pročítali jsme stovky jmen, procházeli desítky stran,

ale po Baconovi ani vidu ani slechu. Nakonec jsme ho našli ke konci seznamu, na 876. místě.

Proč tedy hrajeme hru Kevina Bacona? Baconova výjimečnost je dána shodou okolností a plyne z publicity, kterou vytvořila Stewartova show. *Každý* herec je vzdálený tři kroky od většiny herců. Bacon není ničím výjimečný. Nejenže je daleko od středu vesmíru, ale je daleko i od centra Hollywoodu.

* * *

V náhodném světě se prostředníci nevyskytují. Kdyby byla společnost náhodná, pak by v Gladwellově nepříliš velkém sociálním vzorku čtyř stovek lidí s průměrem kolem 39 sociálních vazeb musela mít nejspolečenštější osoba mnohem méně známých než skutečných 118. Kdyby byl web náhodnou sítí, pak pravděpodobnost existence stránky s pěti sty příchozími odkazy by byla 10^{-99}, tedy prakticky nula, a to by znamenalo, že centra jsou v náhodně propojeném webu vyloučená. Avšak poslední zkoumání webu, které pokrylo necelou pětinu celého rozsahu, našlo čtyři sta takových stránek a navíc jeden dokument, na který mířilo více než milion odkazů. Šance, že na takovýto uzel narazíte v náhodné síti, je menší, než že najdete jeden určitý vybraný atom ve vesmíru. Kdyby Hollywood představoval náhodnou síť, pak by Rod Steiger neexistoval, protože pravděpodobnost, že se vyskytne tak dobře propojený herec, by byla kolem 10^{-120}, což je tak malé číslo, že je obtížné je k něčemu přirovnat. Kvůli těmto neuvěřitelně malým číslům snad pochopíte naše překvapení, když jsme si poprvé všimli center na webu a v Hollywoodu při našich prvních pokusech uchopit strukturu reálných sítí. Neměli jsme kde se na ně připravit, protože jak v Erdősově-Rényiho, tak ve Wattsově-Strogatzově modelu nebyla dovolena. Prostě nikdo nepředpokládal, že existují.

Objev, že na webu několik center shrábló většinu odkazů, odstartoval horečné pátrání po existenci center v mnoha oblastech a dostavily se překvapivé výsledky. Dnes víme, že Hollywood, web a lidská společnost nejsou v žádném případě ničím výjimečným. Například v buňce se přišlo na centra v síti molekul spojených chemickými reakcemi. Několik málo molekul, například voda nebo adenosintrifosfát (ATP), jsou něco jako Rod Steiger v buňce, protože se účastní obrovského množství reakcí. Na internetu, čímž myslíme fyzickou

síť linek spojujících počítače po celém světě, je pár center určeno k tomu, aby zabezpečovalo odolnost internetu vůči poruchám. Erdős je velkým centrem sítě matematiků, protože 507 matematiků má Erdősovo číslo jedna. Podle studie vypracované v AT&T* připadá neobyčejně vysoký podíl odchozích a příchozích telefonních hovorů jen na malý počet telefonních čísel. Ačkoli rodiče, kteří mají doma pubertálního potomka, si mohou myslet své o tom, kdo asi budou některá z těch center, pravda je, že skutečnými původci jsou se vší pravděpodobností firmy specializující se na prodej po telefonu a telefonní čísla zákaznických služeb. Centra se objevují u většiny velkých komplexních sítí, které měli vědci dosud příležitost studovat. Jsou všudypřítomná, tvoří charakteristický stavební prvek našeho komplexního, navzájem propojeného světa.

* * *

V poslední době se centrům věnuje výjimečná pozornost. Emanuel Rosen oslavuje sílu center ve své knize *Jak se dělá fáma*,** kde v několika kapitolách klasifikuje sociální centra a zkoumá jejich úlohu při šíření novinek a reklamy. Každé čtyři roky se ve Spojených státech koná inaugurace nového sociálního centra – prezidenta. Faktem je, že Franklin Delano Roosevelt měl ve svém adresáři kolem 22 000 jmen, takže byl vlastně jedním z největších center své doby. Tři významní biologové nedávno v prestižním vědeckém časopise *Nature* naznačili, že postavení jisté molekuly, proteinu p53, jakožto centra metabolické sítě, je klíčem k pochopení procesů tvořících molekulární pozadí mnoha forem rakoviny. Ekologové se domnívají, že centra potravních sítí jsou klíčovými druhy v přírodě a závisí na nich stabilita ekosystému.

Centra si takovou pozornost opravdu zaslouží. Centra jsou výjimečná. Ovládají strukturu všech sítí, v nichž se vyskytnou, a dělají z nich malé světy. Jelikož mají vazby k neobyčejně vysokému počtu uzlů, budují mosty mezi kterýmikoli dvěma místy v systému. Z toho plyne, že ačkoli průměrná odlehlost dvou náhodně vybraných lidí na Zemi je šest, vzdálenost kohokoli od nějakého prostředníka je

* American Telephone and Telegraph, největší americká telekomunikační firma (pozn. překl.).

** *The Anatomy of Buzz*.

často jen jeden či dva kroky. Podobně je tomu na webu: zatímco dvě libovolné stránky jsou devatenáct kliknutí od sebe, k Yahoo.com, gigantickému centru, se dostanete z většiny webových stránek dvěma či třemi kliknutími. Z hlediska center je svět opravdu mrňavý.

Názor, že sítě jsou náhodné, který se udržoval pod vlivem Erdőse a Rényiho, začal být v poslední době v mnoha ohledech zpochybňován. Wattsův a Strogatzův model poskytl jednoduché vysvětlení shlukování a přivedl náhodné sítě a shlukování pod jednu střechu. Stávající teorii však opět nahlodávají centra. Nedají se vysvětlit žádným z dosud uváděných modelů. Centra nás tedy nutí, abychom znovu zvážili své vědomosti o sítích a položili si tři základní otázky: Odkud se centra berou? Kolik se jich dá očekávat v dané síti? Proč se žádnému z předchozích modelů nepodařilo je vysvětlit?

Za poslední dvě léta jsme našli odpověď na většinu z těchto otázek. Zjistili jsme, že centra nejsou v našem provázaném světě vzácnou výjimkou, že se naopak řídí přesným matematickým zákonem, jehož všudypřítomnost a rozsah nás vybízejí, abychom začali o sítích přemýšlet úplně jinak. Objevování a vysvětlování těchto zákonů bylo jako fascinující jízda na kolečkových bruslích, během níž jsme se dozvěděli o našem komplexním, vzájemně propojeném světě více, než bylo známo za posledních sto let.

Vlákno šesté

Pravidlo 80/20

Když významný italský ekonom Vilfredo Pareto v prvních letech 20. století přednášel na ekonomickém kongresu v Ženevě, neustále ho hlučně přerušoval jeho vlivný kolega Gustav von Schmoller. Tento mocný muž, který ze svého trůnu na berlínské univerzitě vládl německému akademickému světu, povýšenecky vykřikoval: „Existují vůbec nějaké ekonomické zákony?“

Navzdory aristokratické výchově nedal Pareto příliš na vnější vzhled a údajně napsal své monumentální dílo *Pojednání o všeobecné sociologii** v době, kdy vlastnil jedny boty a jeden oblek. A tak se nazítří snadno proměnil v žebráka a oslovil von Schmollera na ulici. „Prosím vás, pane,“ řekl, „mohl byste mi říct, kde bych našel hostinec, v němž bych se zadarmo najedl?“ „Milý pane,“ odpověděl mu von Schmoller, „takové hostince nejsou, ale za rohem je jedno místo, kde dostanete dobré jídlo velice levně.“ „Ahá,“ zvolal Pareto a vítězoslavně se zasmál, „tak přece jenom existují ekonomické zákony!“

Svou pozornost k ekonomii obrátil Pareto poté, co dvacet let pracoval jako inženýr na železnici. Hluboce ho ovlivnila matematická krása newtonovské fyziky a tak zbytek života zasvětil svému snu – udělat z ekonomie exaktní vědu, která by se dala popsat zákony srovnatelnými svým dosahem a obecností s těmi, které formuloval Isaac Newton ve svých *Principiích*. Plod jeho houževnatého úsilí, třísvazkové *Pojednání*, zůstává dodnes zdrojem inspirace a pobídkou k interpretaci jak pro ekonomy, tak pro sociology.

Mimo akademické kruhy je Pareto znám nejvíce díky jednomu ze svých empirických pozorování. Jako vášnivý zahrádkář si všiml, že 80 % jeho úrody hrachu pochází z pouhých 20 % lusků. A jako pečlivý pozorovatel ekonomických nerovností viděl, že 80 % půdy v Itálii je v rukou pouhých 20 % populace. V méně vzdálené minulosti se z Paretova zákona či principu, jemuž se také říká pravidlo 80/20, stal

* *Trattato di Sociologia Generale.*

Murphyho zákon managementu: 80 % zisku produkuje pouze 20 % zaměstnanců, 80 % problémů zákaznické služby vytváří jen 20 % zákazníků, 80 % rozhodnutí padne během 20 % doby, kterou trvá schůze atd. Odtud pochází i celá škála otřepaných pravd, například že 80 % zločinů páchá 20 % zločinců.

Pod různými převleky popisuje pravidlo 80/20 týž jev: ve většině případů jsou čtyři pětiny našeho úsilí do značné míry bezpředmětné. Dovolte mi připojit ještě pár dalších položek k těm, které se pravidlu 80/20 blíží: 80 % odkazů na webu míří pouze na 15 % stránek, 80 % citací se vztahuje na pouhých 38 % vědců, 80 % vazeb v Hollywoodu spojuje pouhých 30 % herců. Ačkoli to svádí k závěru, že pravidlo 80/20 se uplatňuje skoro všude, bylo by to hrubé přehánění. Ve skutečnosti každý systém, který se řídí Paretovým zákonem, má vlastní svéráz. To, co je odlišuje, je vlastnost, která hraje klíčovou roli i pro pochopení komplexních sítí.

* * *

Když Hawoong Jeong začal tvořit našeho malého robota na mapování webu, měli jsme o tom, jak asi bude síť skrývající se za webem vypadat, naivní představy. Pod vlivem Erdősových a Rényiho objevů jsme očekávali, že webové stránky jsou navzájem spojeny náhodně. Jak jsme vysvětlovali ve 2. kapitole, počet odkazů na jedné webové stránce se měl řídit rozdělením s výrazným maximem, což by nám říkalo, že většina dokumentů je zhruba stejně populární. Síť, kterou si náš robot přivezl ze své cesty, měla však mnoho uzlů s pouhými několika málo hranami a několik center s neobyčejně vysokým počtem hran. Největší překvapení přišlo, když jsme zkusili proložit křivkou histogram konektivity uzlů (tedy počtu vazeb, které z uzlu vycházejí či do něj vcházejí) v logaritmickém měřítku. Proložená křivka nám ukázala, že rozdělení počtu odkazů na webových stránkách se přesně řídí matematickým výrazem, kterému se říká *mocninný zákon*.

Pokud nejste fyzici nebo matematici, nejspíš jste o mocninných zákonech nikdy neslyšeli. Je to tím, že většina veličin v přírodě se řídí zvonovitou křivkou,* což je rozdělení s výrazným maximem, dosti podobné tomu, které charakterizuje náhodné sítě. Když například změříte výšku svých dospělých známých mužského pohlaví a sestavíte histogram vypočítávající, kolik z nich je vysokých 150, kolik 160, 170 nebo 180 centimetrů, zjistíte, že většina mužů ve vašem vzorku měří kolem 170 a 180 centimetrů. Váš histogram bude mít v okolí těchto hodnot maximum. Dlouhánů vysokých 190 centimetrů nebo 2 metry najdete ve svém vzorku skutečně velmi málo, ledaže byste trávili čas ve společnosti hráčů basketbalu. Totéž bude platit pro lidi menšího vzrůstu: 150centimetroví mužíčci budou dosti vzácní. Jelikož většina veličin v přírodě, od inteligenčního kvocientu po rychlost molekul v plynu, se řídí takovýmto rozdělením s výrazným maximem, jsou lidé na všudypřítomné zvonovité křivky zvyklí.

V posledních několika desetiletích vědci zjistili, že příroda občas produkuje veličiny, které se místo zvonovité křivky řídí rozdělením podle mocninného zákona. Mocninné rozdělení se velmi liší od zvonovitých křivek popisujících naši tělesnou výšku. Rozdělení podle mocninného zákona především nemá výrazné maximum. Místo toho je histogram řídící se mocninným zákonem spojitě klesající křivka, což znamená, že máme velké množství malých událostí a zároveň menší množství událostí velkých. Kdyby se výška obyvatel nějaké imaginární planety řídila mocninným rozdělením, byli by tamní tvorové většinou opravdoví pidimužíci. Nikoho by však nepřekvapilo, kdyby občas potkal padesátimetrové monstrum, jak si to šine ulicí, neboť mezi 6 miliardami obyvatel by byl dokonce aspoň jeden vysoký přes 3 kilometry. Takže význačnou vlastností mocninného zákona je nejen to, že existuje spousta malých událostí, ale i to, že tyto četné nepatrné události koexistují s několika málo velmi velkými. Takovéto výjimečně velké události jsou při zvonovité křivce jednoduše zakázány.*

Každý mocninný zákon je charakterizován specifickým *exponentem*, který nám například říká, kolikrát méně je velmi oblíbených webových stránek ve srovnání s méně oblíbenými. Protože u sítí popisuje mocninný zákon rozdělení konektivity uzlů, říkáme tomuto exponentu exponent konektivity. Naše měření naznačovala, že

* Autor má na mysli tzv. Gaussovu křivku neboli normální rozdělení (pozn. překl.).

* Všimněte si, že mezi mocninným zákonem a zvonovitou křivkou je jeden důležitý kvalitativní rozdíl, pokud jde o křídla rozdělovacího zákona. Zvonovité křivky mají křídla klesající exponenciálně, což je mnohem rychlejší pokles než u mocninného zákona. Tato exponenciální křídla jsou zodpovědná za absenci center. Naproti tomu mocninné zákony klesají mnohem pomaleji a tak umožňují vznik „řídkých jevů", jako jsou například centra (pozn. aut.).

rozdělení odkazů přicházejících na webové stránky se řídí mocninným zákonem se specifickým exponentem blízkým dvěma. Podobný mocninný zákon se ukázal, když jsme sledovali odcházející odkazy, přičemž exponent byl v tomto případě o něco málo větší.*

Náš malý robot poskytl přesvědčivý důkaz, že miliony tvůrců webových stránek jakýmsi tajemným způsobem spolupracují na tvorbě komplexní pavučiny webu, která se vymyká náhodnému vesmíru. Jejich kolektivní činnost zabrání tomu, aby se rozdělení konektivity řídilo zvonovitou křivkou, typickou pro náhodné sítě, a dělá z webu velmi podivnou síť popsanou mocninným zákonem. Robot však nedokázal odpovědět na tu nejdůležitější otázku: Co přiměje web, aby se vzepřel nekompromisní předpovědi náhodné sítě?

A pak jsme si uvědomili, že k tomuto problému můžeme přistoupit jiným způsobem. Bylo by možné, že většina komplexních sítí se řídí stejně jednoduchými zákony, ale my jsme je neviděli, protože jsme je předtím nehledali? Ukázalo se, že tato druhá linie našeho pátrání je mnohem plodnější. A také když jsme o několik měsíců později analyzovali síť hollywoodských herců, zjistili jsme, že i ona se řídí stejnou matematickou závislostí: počet herců, kteří mají vazby přesně na k jiných herců, klesá podle mocninného zákona. Později jsme se dozvěděli, že i Erdős a jeho matematičtí kolegové splňují tento zákon. Síť uvnitř buňky se k tomuto seznamu připojila, když jsme zjistili, že i počet molekul reagujících s právě k jinými molekulami klesá podle mocninného zákona. Navíc jsme objevili článek od Sida Rednera, profesora fyziky na Bostonské univerzitě, který zjistil, že rozdělení citací ve fyzikálních časopisech splňuje mocninný zákon. Představíme-li si citace jako spojnice sítě, jejímiž uzly jsou publikace, znamenalo Rednerovo zjištění, že i citační síť je popsána mocninným rozdělením konektivity.** Později se v řadě velkých sítí, které jsme my a řada dalších vědců měli možnost studovat, vynořil

* To znamená, že počet webových stránek, na něž míří právě k odkazů, označený symbolem $N(k)$, se řídí vzorcem $N(k) \sim k^{-\gamma}$, kde parametr γ je exponent konektivity. Sklon přímky na grafu v logaritmickém měřítku ukazuje, že exponent konektivity má hodnotu kolem 2,1. Když jsme počítali, kolik odkazů vychází z daného webovského dokumentu, objevil se tentýž obrázek: graf v logaritmickém měřítku odhalil, že počet stránek s právě k odcházejícími odkazy se řídí vzorcem $N(k) \sim k^{-\gamma}$, kde $\gamma = 2{,}5$ (pozn. aut.).

** Mocninné rozdělení počtu citací na jednu publikaci bylo známo už mnohem dříve. U nás se tímto problémem zabýval ing. Jan Vlachý a jeho výsledky prokazující mocninné rozdělení lze najít například v článku: J. Vlachý, *Scientia Yugoslavica* 6 (1980), str. 155–189, obsahujícím i velmi obšírnou bibliografii k tomuto tématu (pozn. překl.).

soustavný a úžasně jednoduchý rys: počet uzlů s přesně k vazbami se řídí mocninným zákonem, pokaždé s charakteristickým exponentem konektivity, pro většinu systémů s hodnotu mezi 2 a 3.

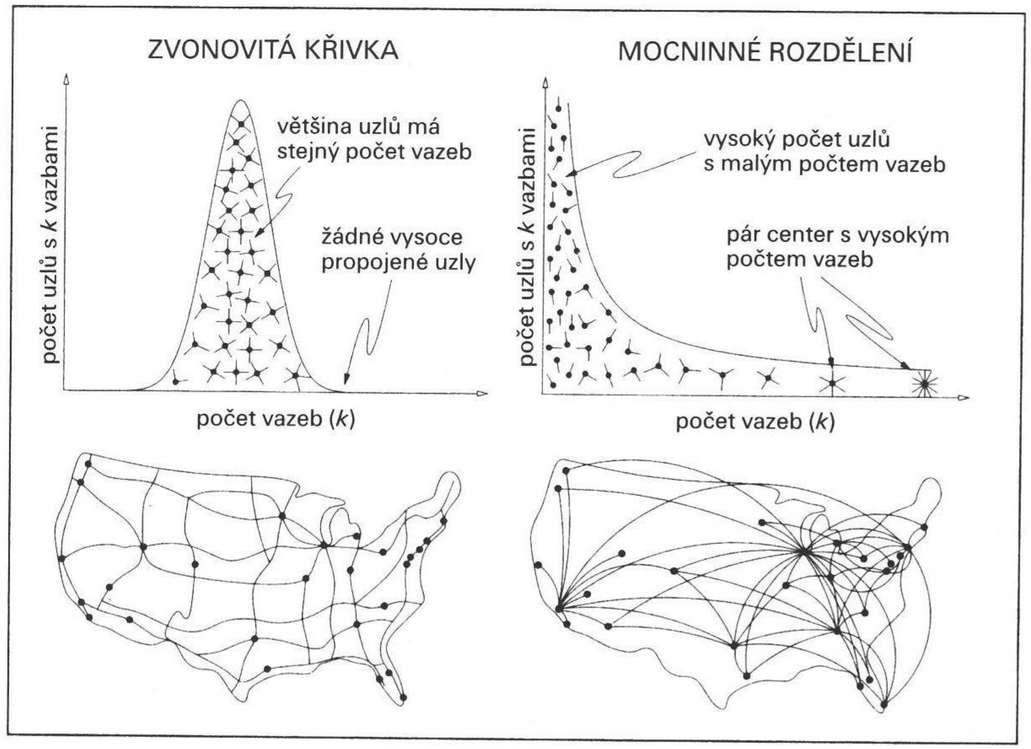
* * *

Nápadné vizuální a strukturální rozdíly mezi náhodnou sítí a sítí popsanou mocninným zákonem rozdělení konektivity vystoupí nejlépe při srovnání automapy se schématem leteckých linek. Na automapě hrají města roli uzlů a dálnice, které je spojují, zase hran. Jde o dosti stejnorodou síť, protože každé větší město má alespoň jednu spojnici k dálniční síti a neexistují města, v nichž by se křížily stovky dálnic. Takže většina uzlů se sobě navzájem dosti podobá a má zhruba stejný počet hran. Jak jsme viděli ve 2. kapitole, je taková stejnorodost podstatnou vlastností náhodných sítí s výrazným maximem v rozdělení konektivit.

Schéma leteckých linek se od automapy zásadně liší. Uzly této sítě jsou letiště spojená přímými lety mezi nimi. Když si při cestování letadlem prohlížíme mapy vyobrazené v líbivých magazínech v kapsách na zadní straně každého sedadla, nemůžeme si nevšimnout center, jako je Chicago, Dallas, Denver, Atlanta a New York, odkud se létá na téměř všechna ostatní americká letiště. V naprosté většině jsou ale letiště malinká a vidíme je jako uzly s nanejvýš několika málo hranami spojujícími je s jedním nebo s několika centry. Na rozdíl od silniční mapy, kde je většina uzlů ekvivalentní, spojuje tedy na letecké mapě několik málo center stovky malých letišť (obr. na str. 74).

Podobná nerovnost charakterizuje i sítě s mocninným rozdělením konektivity. Mocninné zákony matematicky formulují ten fakt, že ve většině reálných sítí má většina uzlů jen *několik málo* hran a že tyto četné malé uzly koexistují s několika málo velikými centry, uzly s anomálně vysokým počtem hran. Těch pár hran spojujících menší uzly navzájem nestačí na to, aby byla síť plně pospojovaná. Tuto funkci zabezpečují poměrně nepočetná centra, která se starají o to, aby se reálné sítě nerozpadly.

V náhodné síti znamená maximum rozdělení to, že naprostá většina uzlů má stejný počet hran a že uzly odchylující se od průměru jsou mimořádně vzácné. Náhodnou síť lze tedy charakterizovat typickou hodnotou konektivity uzlů neboli charakteristickou *škálou*,



Náhodné a bezškálové sítě. Rozdělení konektivit v náhodné síti se řídí zvonovitou křivkou, která nám říká, že většina uzlů má tentýž počet vazeb a uzly s velmi vysokým počtem vazeb se nevyskytují (vlevo nahoře). Náhodná síť se tedy podobá síti dálnic, v níž uzly jsou města a vazbami jsou hlavní dálniční spojení mezi nimi. Většina měst je skutečně napojena na zhruba stejný počet dálnic (vlevo dole). Naproti tomu mocninné rozdělení konektivit v bezškálové síti předpovídá, že většina uzlů bude mít jen málo vazeb a pohromadě je drží pár vysoce propojených center (vpravo nahoře). Napohled se to velmi podobá systému letecké dopravy, kde je velký počet malých letišť navzájem propojen prostřednictvím několika málo velkých center (vpravo dole).

ztělesněnou průměrným uzlem a zafixovanou maximem rozdělení konektivity. Naproti tomu to, že v mocninném rozdělení konektivity maximum schází, znamená, že v reálných sítích nic takového jako typický uzel neexistuje. Vidíme jen plynulou hierarchii uzlů, sahající od nepočetných center až k množství malinkých uzlů. Největší centrum je těsně následováno dvěma či třemi poněkud menšími centry a za nimi následují desítky ještě menších atd., až nakonec dospějeme k záplavě malých uzlů.

Mocninné rozdělení nás tedy nutí opustit myšlenku nějaké škály nebo nějakého typického uzlu. Ve stupních hierarchie neexistuje žádný určitý uzel, který bychom mohli vybrat a prohlásit za typického reprezentanta všech uzlů. V těchto sítích není žádná charak-

teristická škála. Proto jsme v mé výzkumné skupině začali říkat sítím s mocninným rozdělením konektivity *bezškálové* sítě. Když si lidé uvědomili, že většina komplexních sítí v přírodě má mocninné rozdělení konektivity, rozšířil se termín *bezškálové sítě* rychle do většiny oborů, které se musí komplexními pavučinami zabývat.

V roce 1999, kdy jsme učinili náš objev, neexistovala žádná teorie sítí, která by dokázala vysvětlit hierarchii všudypřítomných center a mocninné zákony, které ji provázejí. Nanejvýš byly považovány za pouhou náhodu. Jak teorie náhodných sítí Erdőse a Rényiho, tak její rozšíření zavedené Wattsem a Strogatzem lpěly na tom, že počet uzlů s *k* hranami má klesat exponenciálně, tedy mnohem rychleji, než předpovídá mocninný zákon. Obě tyto teorie nám matematicky rigorózním jazykem říkají, že *centra neexistují*.

Překvapující objev mocninných zákonů na webu nás donutil vzít centra na vědomí. Pomalu klesající mocninné rozdělení přirozeným způsobem vyjadřuje, že tyto vysoce propojené anomálie jsou poměrně častým jevem. Předpovídá, že každá bezškálová síť bude mít několik velkých center, které budou zásadním způsobem předurčovat topologii sítě. Zjištění, že významné sítě jsou většinou bezškálové, dalo existenci center smysl. Ještě uvidíme, jak centra ovlivňují strukturální stabilitu reálných sítí, jejich dynamické chování, robustnost a odolnost vůči chybám a útokům zvnějšku. Jsou důkazem vysoce důležitých organizačních principů, které řídí evoluci sítí.

* * *

Výraz 80/20 Pareto nikdy nepoužíval. Došli k němu pozdější ekonomové, kteří jeho pozorování rozvíjeli. Pareto si jen koncem 19. století všiml, že některé veličiny v přírodě a ve společnosti se vymykají všudypřítomné zvonovité křivce a místo toho se chovají podle mocninného zákona. Jeho nejslavnějším objevem bylo, že rozdělení příjmů se řídí mocninným zákonem, což znamená, že většinu peněz vydělává několik málo velmi bohatých jedinců, zatímco většina obyvatel se musí spokojit s nepatrnou částkou. Paretovo zjištění znamená, že zhruba 80 % peněz se dostane do rukou pouhých 20 % populace, a tato nerovnost přetrvává i sto let po Paretově objevu.

Není jasné, kdy se termín 80/20 přesně objevil. Zatímco fyzici a matematici nenuceně hovoří o mocninných zákonech, princip 80/20 proniká populárním tiskem a podnikatelskou literaturou. Ale

pokaždé když pravidlo 80/20 skutečně platí, se můžete vsadit, že v pozadí je nějaký mocninný zákon. Mocninné zákony matematickým způsobem formulují to, že několik málo velkých událostí pokrývá většinu toho, co se děje.

Mocninné zákony se zřídkakdy objevují v systémech, které jsou naprosto ovládány hodem kostkou. Fyzici zjistili, že nejčastěji jsou signálem přechodu z neuspořádanosti k řádu. A tak mocninné zákony, které jsme uviděli na webu, znamenaly, poprvé v matematicky přesné podobě, že reálné sítě zdaleka nejsou náhodné. Komplexní sítě k nám nakonec začaly hovořit jazykem, kterému konečně vědci zběhlí v samoorganizaci a teorii komplexních systémů rozuměli. Mluvily o řádu a chování, které povstává z interakce jednoduchých součástí. Bylo jen potřeba jim pozorně naslouchat.

Mohlo by se zdát, že objev, že sítě se řídí jednoduchým mocninným zákonem, může vzrušit jenom pár matematiků nebo fyziků. Avšak mocninné zákony hrají ústřední roli u některých z nejúžasnějších objevů druhé poloviny 20. století, u objevů spojených s chaosem, fraktály a fázovými přechody. To, že jsme si jich všimli u sítí, znamenalo objev nečekaných souvislostí s jinými přírodními jevy a posunulo sítě do přední linie našeho chápání komplexních systémů obecně. To, že sítě skrývající se za webem, Hollywoodem, vědeckou obcí, buňkou a mnoha jinými komplexními systémy splňují mocninný zákon, nám umožnilo parafrázovat Pareta. Poprvé jsme tak mohli prohlásit, že snad *existují zákony skrývající se za komplexními sítěmi*.

* * *

Molekulu vody, připomínající myšáka Mickeyho s velkou hlavou písmene *O* a dvěma velkýma ušima *H*, a její chemickou značku H_2O všichni velmi dobře známe. Její velikost a vnitřní struktura jsou probádány do nejmenších detailů. Na tom není nic překvapivého, vždyť voda je nejběžnější a nejstudovanější látkou na Zemi. Přesto však je pro nás voda jako tekutina, soubor miliard přitahujících se molekul namačkaných ve sklenici, stále hádankou.

Plyny jsou jednoduché: jejich molekuly poletují v prázdném prostoru a všímají si jedna druhé, jen když do sebe občas narazí. Krystaly představují opačný extrém, ale i ony jsou poměrně jednoduché: molekuly se pevně drží navzájem a vytvářejí tak dokonale tuhou mřížku.

Kapaliny se pohybují po vratké střední cestě mezi těmito krajnostmi. Přitažlivé síly, které drží molekuly vody pohromadě, nejsou dostatečně silné, aby je přiměly k pevnému řádu. A tak, zachyceny mezi chaosem a řádem, se molekuly vody účastní majestátního tance, v němž se některé molekuly sblíží, vytvoří malé a mírně uspořádané skupiny, pohybují se společně a pak se najednou oddělí, jen aby se připojily k jiným molekulám tvořícím zase jiné skupiny.

Když sklenici vody ochladíme, tento velkolepý vodní rej se nijak podstatně nezmění. Molekuly se jenom začnou pohybovat důstojněji – jsou těžkopádnější a pomalejší. Při 0° C se však stane něco zvláštního. Molekuly vody náhle vytvoří dokonale uspořádaný krystal ledu – jako bloumající vojáci, kteří se seřadí na povel důstojníka. Ale zatímco vojáci tento dril tisíckrát nacvičují a namáhavě se učí svou přesnou polohu ve formaci, molekuly vody nemusely nikdy předtím zakusit, co to je být ledem. Žene je tajemný pud zaměnit svůj tulácký život za něco pevného a uspořádaného. Led, známý symbol chladného a dokonalého řádu, povstává sám od sebe.

Proměna vodního tance v chladný krystalický řád tuhého tělesa je jedním z nejznámějších příkladů *fázového přechodu*, jevu, jehož podstatu se fyzici marně snažili pochopit po celá desetiletí – až do šedesátých let 20. století. Fázové přechody jsou běžné v nejrůznějších materiálech, formou a vzhledem velmi odlišných od zmrzlé vody. Například každý atom ve feromagnetickém kovu má magnetický *moment* neboli spin; často se znázorňuje malými šipkami procházejícími skrze atom. Při vysokých teplotách ukazují spiny atomů náhodně do všech možných směrů. Když se však zchladí na určitou kritickou teplotu, pak všechny atomy zorientují své spiny do přesně stejného směru a vytvoří magnet.

Jak zmrznutí vody, tak vznik magnetu jsou příklady přechodu od *nepořádku* k *pořádku*. Ve srovnání s dokonalým řádem krystalického ledu je kapalná voda skutečně dosti neuspořádaná. V bodě mrazu jako zázrakem opustí tento stav nepořádku a zvolí si místo toho stav s vysokou symetrií a pořádkem. Podobně jsou u magnetického kovu náhodně orientované spiny ve stavu chaotického nepořádku. Jakmile je zchladíme pod kritickou teplotu, jako mávnutím kouzelného proutku zaujmou vysoce uspořádanou společnou orientaci. Takové náhlé transformace obsahují klíč k odpovědi na základní otázku, která zajímá jak vědce, tak filozofy: Jak v přírodě povstává řád z neuspořádanosti?

* * *

Uspořádaný a neuspořádaný stav magnetu odpovídají termodynamicky odlišným skupenstvím hmoty. Právě v bodě přechodu systém váhá, které skupenství si vybrat, stejně jako horolezec na hřebeni se rozhoduje, kterou cestou má sestoupit dolů do údolí. Jak systém váhá, kudy se dát, přechází často tam a zpět, a jeho kolísání narůstá blízko kritického bodu.

Takovéto kolísání má experimentálně měřitelné důsledky. Poblíž kritického bodu se míchají prvky pořádku a nepořádku, což znamená, že systém prozkoumává obě strany hřebene. V kovech blízko teploty přechodu se objevují shluky atomů, jejichž spiny míří stejným směrem. Čím je kov blíže kritickému bodu, tím větší jsou tyto uspořádané magnetické shluky. Rostoucí objem experimentálních dat nasbíraných fyziky v průběhu šedesátých let naznačoval, že v blízkosti kritického bodu se několik klíčových veličin řídí mocninným zákonem. Například vzdálenost, na kterou atomy navzájem komunikují, neboli *korelační délka*, slouží často jako hrubý odhad velikosti shluků. Měření ukázala, že když se přibližujeme ke kritickému bodu, vzrůstá tato korelační délka podle mocninného zákona, charakterizovaného specifickým *kritickým exponentem*. Čím se kov dostává blíže k teplotě přechodu, tím je větší vzdálenost, na jakou o sobě spiny vědí. I síla magnetu, definovaná jako podíl spinů, které míří stejným směrem, se v blízkosti kritické teploty řídí mocninným zákonem, ale s jiným kritickým exponentem.

Pečlivým zkoumáním toho, jak v nejrůznějších systémech povstává řád z neuspořádanosti, objevili fyzici ještě řadu dalších mocninných zákonů, které platí při fázovém přechodu. Zjistili, že tytéž zákony řídí změnu zahřívané kapaliny v plyn nebo změnu olověného drátu v supravodič při dostatečně nízké teplotě. Přechod pořádek – nepořádek začínal odhalovat matematické pravidelnosti, které do sebe úžasně zapadaly. Problémem bylo, že nikdo nevěděl proč. Proč kapaliny, magnety a supravodiče v kritickém bodě zapomenou na vzájemné rozdíly a rozhodnou se, že se budou řídit týmž mocninným zákonem? Odkud se bere tak silná podobnost mezi tak rozdílnými systémy? A co s tím mají společného mocninné zákony?

* * *

Jeden z největších průlomových objevů směřujících k pochopení přechodu od nepořádku k řádu se odehrál o vánočních prázdninách roku 1965. Tehdy měl Leo Kadanoff, fyzik z Illinoiské univerzity v Urbaně, náhlé vnuknutí: v blízkosti kritického bodu už nesmíme chápat atomy odděleně. Místo toho musíme uvažovat celé jejich soubory, které jednají v unisonu. Jednotlivé atomy se musí nahradit krychličkami atomů, takže celá krychlička se pak chová jako jeden atom.

V té době byla situace taková, že spousty hodin strávených nad fázovými přechody, jimž se věnovali ti nejlepší a nejdůmyslnější teoretičtí fyzici, vedly k objevu devíti různých kritických exponentů, z nichž každý byl spojen s určitým mocninným zákonem, který se objevoval v okolí kritického bodu. Kadanoffova idea nabídla přitažlivý vizuální model, který se dal použít k odvození přesných matematických vztahů v přeplněném zvěřinci exponentů. Ukázal, že přechod od nepořádku k pořádku nevyžaduje všech devět neznámých exponentů, ale dá se popsat pomocí kterýchkoli dvou z nich. Několik dalších badatelů dospělo v téže době nezávisle k témuž závěru. Ben Widom, fyzikální chemik z Cornellovy univerzity, a fyzici ze Sovětského svazu Alexandr Z. Patašinskij a Valerij L. Pokrovskij, odvodili podobné škálovací relace jinou cestou. Soubor nerovností mezi exponenty, odvozený fyzikem Michaelem Fisherem z Cornellovy univerzity, poskytl další náznaky řádu ve zvěřinci exponentů.

Něco tu však stále scházelo. Nebyla tu teorie, která by poskytla zbývající dva exponenty a objasnila, proč se mocninné zákony objevují pokaždé, když ve složitém systému spontánně vzniká uspořádanost. Nebylo vůbec jasné, zda taková všeobsáhlá teorie vůbec může existovat. Doufali v to všichni, kdo viděli, jak do sebe dosud získané výsledky nádherně zapadají. Na konečnou odpověď museli fyzici čekat až do listopadu 1971. Přišla dosti neočekávaně od jejich kolegy, který se předtím fázovými přechody a kritickými jevy téměř nezabýval.

Na sklonku šedesátých let byl Kenneth Wilson asistentem s nevalnou reputací na katedře fyziky Cornellovy univerzity. Každý věděl, že mu to skvěle myslí, ale jeho skvělost se neprojevila v publikacích – měřitelném kritériu akademického úspěchu. Taková situace ho na Cornellu málem stála místo. Když ho atestační komise přinutila publikovat, vytáhl z šuplíku pár svých článků. Dva z nich, které odeslal ve stejný den, 2. června 1971, a které vyšly v listopadu

téhož roku ve *Physical Review B*, převrátily statistickou fyziku naruby. Předložily elegantní a všeobsáhlou teorii fázových přechodů.

Wilson převzal škálovací ideu vyvinutou Kadanoffem a přetvořil ji v účinnou teorii zvanou *renormalizace*. Startovním bodem tohoto přístupu byla *škálová invariance*: Wilson předpokládal, že v okolí kritického bodu působí fyzikální zákony stejným způsobem na všech škálách, od jednotlivých atomů až po kvádry obsahující miliony identických atomů, které jednají v unisonu.

Jeho teorie poskytla přesný matematický základ pro škálovou invarianci a ukázala, proč se pokaždé když se přiblížíme ke kritickému bodu, tam, kde nepořádek vyklízí prostor pořádku, vynoří mocninný zákon. Wilsonova renormalizační grupa si nejen vynucuje mocninné zákony, ale poprvé dokázala předpovědět i hodnotu dvou dosud neznámých kritických exponentů. Tak Wilson vsadil poslední kámen na špičku pyramidy fázových přechodů. Tento objev mu v roce 1982 vynesl Nobelovu cenu za fyziku.

Za normálních okolností nemá příroda mocninné zákony příliš v lásce. V běžných systémech všechny veličiny sledují zvonovitou křivku a korelace rychle klesají podle exponenciálního zákona. To se však všechno změní, když je systém nucen prodělat fázový přechod. Pak nastoupí mocninné zákony: to nám příroda dává neklamně najevo, že mizí chaos a nastává pořádek. Teorie fázových přechodů nám jasně říká, že cesta od nepořádku k pořádku je udržována mocnými silami samoorganizace a je dlážděna mocninnými zákony. Říká nám, že mocninné zákony nejsou prostě jen jedním z řady způsobů, jak se systém projevuje, ale jsou jasným znamením samoorganizace v komplexních systémech.

Tento jedinečný a hluboký význam mocninných zákonů možná vysvětluje naše vzrušení, když jsme je poprvé zahlédli na webu. Nebyly jen něčím nevídaným a nečekaným v kontextu sítí, díky nim se komplexní sítě vymanily z džungle náhodnosti, kam je čtyřicet let předtím zasadili Erdős a Rényi, a vrhly je do centra barvité a myšlenkově bohaté arény samoorganizace. Když jsme zírali na mocninné zákony, které náš malý internetový vyhledávač přivezl ze svých cest, zahlédli jsme v sítích nový a nečekaný řád, který se vyznačoval neobyčejnou krásou a celistvostí.

* * *

Když se koncem šedesátých a na počátku sedmdesátých let 20. století objevilo škálování a teorie renormalizační grupy, bylo to pro fyziky, kteří se snažili pochopit, proč voda zamrzá, cosi jako zjevení. Zjistili, že se poblíž kritického bodu, právě když z chaosu povstává řád, všechny zajímavé veličiny řídí mocninnými zákony s charakteristickými kritickými exponenty. Ale ať pozorujeme vodu přecházející z kapaliny v plyn, lávu tuhnoucí v kámen, kov, z něhož se stává magnet, nebo keramický materiál měnící se v supravodič, platí vždy tytéž zákony, které jsou příčinou záhadných mocninných závislostí. Nakonec jsme zjistili, že ve chvíli, kdy se rodí pořádek, odvrhují komplexní systémy své jedinečné vlastnosti a začnou projevovat univerzální chování, chování společné širokému spektru systémů.

Všudypřítomnost mocninných zákonů v systémech, v nichž nastává přechod od nepořádku k pořádku, inspirovala vedoucího mé doktorské práce, H. Eugena Stanleyho, který na Bostonské univerzitě vede nejaktivnější skupinu zabývající se fázovými přechody, k vtipné průpovídce, že v Bostonu mají jen papír s logaritmickým měřítkem. Stanley, který se účastnil všech významných objevů, které zformovaly naše vědomosti o fázových přechodech a univerzalitě, tím narážel na grafy, které vědci kreslí, když chtějí zjistit přítomnost mocninných zákonů v experimentálních datech. Skutečně, kam se fyzici, biologové, technologové, matematici či ekonomové v osmdesátých a devadesátých letech 20. století podívali, pak pokud tam vládla samoorganizace, setkali se s mocninnými zákony a univerzalitou. Zdá se, že ani sítě nejsou výjimkou: v pozadí center je dosti přesný matematický výraz, totiž mocninný zákon.

To nás přivádí k další hádance. Jsou-li mocninné zákony znamením systémů na přechodu mezi chaosem a řádem, o jaký typ přechodu jde v případě komplexních sítí? Jestliže se mocninné zákony objevují v blízkosti kritického bodu, co nastaví reálné sítě do jejich vlastního kritického bodu a umožní jim tak projevit bezškálové chování? K pochopení kritických jevů jsme došli poté, co fyzici odhalili mechanismy fázových přechodů. Dnes nám matematicky přesné teorie dovolují počítat s vysokou přesností všechny veličiny charakterizující systém, v němž se rodí pořádek. V sítích jsme však zatím jen *pozorovali* centra. Teď nám bylo jasné, že se objevila díky mocninným zákonům, které dávaly tušit samoorganizaci a pořádek. Jistě, byl to velmi významný pokrok a umožnil nám vyjmout sítě z říše náhody, ale ty nejdůležitější otázky, otázky po *mechanismech,* které

jsou zodpovědné za centra a mocninné zákony, zůstávaly stále nezodpovězené. Jsou reálné sítě ve stavu neustálého přecházení od nepořádku k řádu? Proč se centra objevují ve všech sítích, od herců po web? Proč jsou popsána mocninnými zákony? Existují nějaké základní zákonitosti, které nutí rozdílné sítě, aby na sebe vzaly stejnou univerzální podobu? Jak příroda souká své sítě?

Vlákno sedmé

Bohatí bohatnou, chudí chudnou

Pôrto bylo kdysi významným přístavem portugalského impéria, ale dnes jako by se v něm zastavil čas. Řeka Douro se tam pomalu klikatí na své cestě k Atlantskému oceánu a příkré okolní kopce shlížejí na mořské pobřeží. V Pôrtu ještě dnes rozpoznáte živé středověké město se strategickou polohou na snadno hájitelném úzkém mořském útesu. Člověk by čekal, že se svými majestátními hrady střežícími řeku a s bohatou historií vinařství bude jedním z nejnavštěvovanějších měst světa. Ale protože se skrývá kdesi v severozápadním cípu Iberského poloostrova, málokterý turista si tam odskočí. Očividně je příliš málo vyznavačů nezaměnitelné plné chuti portského vína, aby probudili toto nádherné středověké město z jeho dřímoty.

Navštívil jsem Pôrto v létě roku 1999, krátce poté co jsme se studenty dokončili rukopis o úloze mocninných zákonů na webu. Účastnil jsem se tam workshopu o nerovnovážných a dynamických systémech, který organizovali dva profesoři z tamější univerzity, José Mendes a Maria Santosová. V létě 1999 o sítích přemýšlelo velmi málo lidí a na workshopu se o nich nepřednášelo, ale mně sítě nedaly spát. Prostě jsem musel vzít s sebou na cestu naše nevyřešené otázky: Proč existují centra? Proč pozorujeme mocninné zákony?

Tehdy byl web jediným příkladem sítě, kde byla přítomnost center prokázána s matematickou přesností. Když jsme se to usilovně snažili pochopit, hledali jsme, co je pro web nejvíc charakteristické, a zároveň jsme toužili dozvědět se více o struktuře dalších reálných sítí. A tak jsem před odletem do Pôrta kontaktoval Duncana Wattse, a ten nám laskavě poskytl data popisující elektrorozvodnou síť na západě Spojených států a topologii neuronů hlístice *Caenorhabditis elegans*. Brett Tjaden, bývalý doktorand spravující webovou stránkou „Baconovo orákulum“, nyní docent informatiky na Ohijské univerzitě v Athens ve státě Ohio, nám poslal databázi hollywoodských herců. Jay Brockman, profesor informatiky na Notre Dame, nám zase poskytl údaje o jedné síti vyrobené člověkem, totiž schéma zapojení čipu vyráběného firmou IBM. Než jsem odletěl do Evropy,

dohodl jsem se s doktorandkou Rékou Albertovou, že provede analýzu těchto sítí. 14. června, týden po mém odjezdu, jsem od ní dostal dlouhý e-mail, v němž mi podrobně popisovala, co právě dělá. Na závěr zprávy připojila dovětek: „Dívala jsem se taky na rozdělení konektivity a téměř u všech systémů (IBM, herci, elektrická síť) pro velké hodnoty splňuje rozdělení mocninný zákon."

Z jejího e-mailu jsem okamžitě pochopil, že web není v žádném případě výjimkou. Přistihl jsem se, že sedím v sále a vůbec nesleduji přednášky, protože mám plnou hlavu úvah o důsledcích tohoto objevu. Jestliže dvě sítě tolik odlišné, jako je web a osazenstvo Hollywoodu, vykazují jedna jako druhá mocninné rozdělení konektivity, pak zde musí být nějaký univerzální zákon či mechanismus, který je za to zodpovědný. A pokud takový zákon existuje, mohl by potenciálně fungovat u všech sítí.

A hned o první přestávce mezi přednáškami jsem se uchýlil do klidu bývalého semináře, kde jsme byli ubytováni. Daleko jsem však nedošel. Během patnáctiminutové chůze do mého pokoje mi napadlo jedno možné vysvětlení, tak jednoduché a přímočaré, že se mi ani nechtělo věřit, že by bylo správné. Ihned jsem se vrátil na univerzitu a zafaxoval Réce, jestli by nezkusila mou myšlenku otestovat na počítači. O několik hodin později mi e-mailovala odpověď. K mému velikému úžasu to fungovalo. Jednoduchý mechanismus typu „bohatí bohatnou, chudí chudnou" dokázal vysvětlit mocninné zákony, které jsme viděli na webu a v Hollywoodu.

Z Pôrta jsem se krátce vrátil na Notre Dame a pak jsem měl odjet na další měsíční cestu. Bylo však jasné, že s publikací výsledků nemůžeme čekat další měsíc. Měli jsme sedm dní na to, abychom napsali článek. Osmihodinový let z Lisabonu do New Yorku mi připadal ideální příležitostí k tomu, abych dal dohromady první předběžnou verzi. Jakmile letadlo vzlétlo, vytáhl jsem zbrusu nový notebook, koupený před cestou do Pôrta, a začal jsem zběsile psát. Právě jsem dokončoval úvod, když mi letuška, která podávala limonádu pasažérovi sedícímu vedle mě, zničehonic vylila celou sklenici na klávesnici. Můj notebook už nebyl k ničemu a na displeji se míhaly jakési nesmysly. I tak jsem ale článek v letadle dopsal, vlastní rukou od začátku až do konce. Týden nato už byl odeslán do prestižního časopisu *Science*, kde jej po deseti dnech odmítli, aniž by jej, jak bývá zvykem, poslali k recenzi oponentům, protože redaktor se domníval, že náš článek nesplňuje standardy tohoto časopisu, co se týče

novosti a zajímavosti pro široké vědecké publikum. V té době jsem byl na návštěvě u příbuzných a známých v srdci Karpat, v Transylvánii. Zklamaný, ale přesvědčený, že náš článek za to stojí, jsem udělal něco co ještě nikdy předtím: zatelefonoval jsem redaktorovi, který článek odmítl, v zoufalé snaze přimět ho, aby změnil svůj názor. K mému velkému překvapení se mi to podařilo.

* * *

Náhodný model Erdőse a Rényiho spočívá na dvou jednoduchých předpokladech, na něž se často zapomíná. Především začínáme s už danou zásobárnou uzlů. Všechny uzly máme k dispozici od začátku a předpokládáme, že jejich počet je pevný a za života sítě se nemění. Zadruhé, všechny uzly jsou ekvivalentní. Protože nedokážeme mezi uzly rozlišovat, spojujeme je náhodně mezi sebou. Tyto předpoklady během čtyřiceti let výzkumu sítí nikdo nezpochybňoval. Teprve objev center a mocninných zákonů, které je popisují, nás přinutil oba předpoklady opustit. Rukopis odeslaný do *Science* byl prvním krokem na této cestě.

* * *

Co se týče webu, na jedné věci se všichni shodnou: roste. Každý den přibývá dokumentů, které do něj vkládají jednotlivci, když chtějí vylíčit svůj nový koníček nebo zálibu, korporace rozšiřující své internetové produkty a služby, vlády, které se stále více spoléhají na web, když chtějí rozšiřovat informace mezi občany, univerzitní profesoři publikující studijní materiály ke svým přednáškám, neziskové organizace snažící se dostat k těm, kdo by mohli využít jejich služeb, tisíce internetových „dot.com" firem, které se se svými líbivými stránkami ucházejí o vaši peněženku. Odhaduje se, že za deset let bude na webu uložen asi exabajt (10^{18} bajtů) informace, rozptýlené po celé planetě v nejrůznějších formátech, z nichž většina dosud není známa. I když se postup této exploze bude nejspíš zpomalovat, jak se většina informací nasbíraných lidstvem bude ukládat na internet, zatím žádné známky zpomalení nepozorujeme.

Těžko uvěřit, že se svou více než miliardou přístupných dokumentů vznikal web dokument po dokumentu. Ale bylo to tak. Před pouhými deseti lety měl jen *jeden* uzel, slavnou první webovou stránku

Tima Bernerse-Leeho. Jak si fyzici a informatici začali vytvářet své vlastní stránky, na první stránku postupně mířily další odkazy. Tento pomenší web s tuctem velmi jednoduchých dokumentů byl předchůdcem planetárního slepence, jímž je web dnes. Navzdory své ohromující velikosti a složitosti roste i nadále postupně, uzel po uzlu. Tato expanze je v ostrém rozporu s předpokladem těch modelů sítí, které jsme dosud v této knize popisovali a které předpokládají, že počet uzlů v síti se s časem nemění.

I hollywoodská síť začínala z nepatrného jádra herců prvních němých filmů devadesátých let 19. století. Podle databáze IMDb.com zaměstnával Hollywood v roce 1900 jen 53 herců. Tím, jak rostla poptávka po pohyblivých obrázcích, nabývalo toto jádro postupně na objemu a s každým dalším filmem mu přibylo pár nových tváří. První konjunkturu zažil Hollywood v letech 1908–1914; tehdy počet herců, kteří každoročně přibývali, stoupl z necelých 50 na téměř 2 000. Druhá skvělá hollywoodská konjunktura, jež začala v osmdesátých letech, udělala z filmařiny gigantický zábavní průmysl, jak ho známe dnes. Z nepatrného jádra němých herců vyrostla obrovitá síť o více než půl milionu uzlů a roste neuvěřitelnou rychlostí stále dál. Za pouhý jediný rok 1998 přibylo do databáze IMDb.com 13 209 jmen herců, kteří se objevili poprvé na stříbrném plátně.

Navzdory své různorodosti sdílí většina reálných sítí jeden podstatný rys: růst. Ať už si vezmete kteroukoli z nich, s největší pravděpodobností o ní bude platit, že začínala s několika málo uzly a postupně rostla přidáváním uzlů nových, až dosáhla své dnešní velikosti. Růst nás samozřejmě nutí znovu promyslet předpoklady našich modelů. Jak Erdősův-Rényiho, tak Wattsův-Strogatzův model předpokládal, že máme pevný počet uzlů pospojovaných nějakým chytrým způsobem. Sítě vznikající v těchto modelech jsou tudíž *statické*, což znamená, že počet uzlů se během života sítě nemění. Naproti tomu naše příklady naznačují, že pro reálné sítě se statická hypotéza nehodí a že musíme do svých modelů sítí zahrnout růst. To bylo první, co jsme pochopili, když jsme se snažili vysvětlit existenci center. A při té příležitosti jsme svrhli z trůnu první fundamentální předpoklad náhodného světa: jeho statický charakter.

* * *

Modelovat rostoucí síť je poměrně jednoduché. Začneme z malého zárodku a neustále přidáváme uzly, jeden po druhém. Předpokládejme, že každý nový uzel má dvě vazby. Takže když začneme se dvěma uzly, bude mít náš třetí uzel spojení k oběma z nich. Čtvrtý uzel si bude moci vybrat ze tří uzlů. Jak zvolíme ty dva, k nimž mají vést vazby? Pro jednoduchost sledujme Erdősův a Rényiho postup a náhodně vyberme dva z těchto tří uzlů a připojme nový uzel k nim. Tento proces můžeme opakovat neomezeně dlouho, a pokaždé když přidáme uzel nový, spojíme ho s dvěma náhodně zvolenými uzly. Síť vytvořená tímto jednoduchým algoritmem, zvaným *model A*, se od modelu náhodné sítě Erdőse a Rényiho liší jen tím, že roste. Tento rozdíl je však podstatný. Přestože vazby vybíráme náhodně a demokraticky, nejsou uzly v modelu A navzájem rovnocenné. Snadno identifikujeme vítěze a poražené. V každém okamžiku mají všechny uzly stejnou šanci, že se k nim někdo připojí, což jasně zvýhodňuje starší uzly. Pomineme-li různé nečetné statistické fluktuace, budou první uzly v modelu A nejbohatší, protože měly nejvíce času sbírat vazby. Nejchudší uzel bude ten, co se připojil naposledy, protože zatím se k němu nestihl nikdo připojit. Model A patřil k našim prvním pokusům, jak vysvětlit mocninné zákony, které jsme pozorovali na webu a v Hollywoodu. Počítačové simulace nás brzy přesvědčily, že odpověď jsme ještě nenalezli. Rozdělení konektivit, funkce, která odlišuje bezškálové sítě od náhodných modelů, klesalo příliš rychle, podle exponenciály. První uzly byly sice jasnými vítězi, ale zjištěná exponenciální závislost předpovídala, že jsou příliš malé a není jich dost. Model A tedy nedokázal vysvětlit centra a prostředníky. Ukázal však, že *samotným* růstem vznik mocninných zákonů nevysvětlíme.

* * *

Když se roku 1999 hrálo finále amerického fotbalu, utratily zástupy naprosto neznámých internetových firem, jako byly OurBeginning.com, WebEx.com a Epidemic Marketing, 2 miliony dolarů za reklamní spoty, které jejich jméno přenášely k milionům Američanů sledujících zápas Denveru se Saint Louis. Během jednoho roku jen samotná firma E*Trade vydala 300 milionů dolarů na reklamu. AltaVista, jeden z nejpopulárnějších internetových vyhledávačů, měl v rozpočtu na reklamu vyhrazeno téměř 100 milionů. America

Online, Goliáš internetového světa, se mu se svými 75 miliony přibližoval. Roku 1999 se na internetový marketing vydalo více než 3,2 miliardy dolarů, tedy asi polovinu toho, co se v téže době utratilo za reklamy na kabelové televizi, médiu, jehož historie se už píše více než dvě desítky let.

Čeho chtěly všechny tyto firmy dosáhnout? Odpověď je prostá, i když poněkud neobvyklá: začínající firmy stejně jako zavedené společnosti stravovaly investiční kapitál a těžce našetřené peníze po milionech denně, aby porazily náhodný svět Erdőse a Rényiho. Věděly, že na webu se nepřipojujeme náhodně. Chtěly z této nenáhodnosti získat výhodu tím, že nás lákaly, abychom se k nim připojili.

Jak se ve skutečnosti rozhodujeme, ke kterým webovým stránkám se na WWW připojíme? Podle modelu náhodných sítí bychom se napojili náhodně na kterýkoli uzel. Když se však nad svým výběrem trochu zamyslíme, vidíme, že je to jinak. Spousta lidí například sleduje webové stránky se zpravodajstvím. Rychlé hledání slova „noviny" na Googlu poskytne kolem 1 220 000 stránek. Ručně uspořádaný seznam na Yahoo! poskytuje výběr z více než 8 000 internetových novin. Jak si z nich vybrat? Podle modelu náhodné sítě si v seznamu volíme *náhodně*. Upřímně řečeno nevěřím, že by to někdo takhle dělal. Většina z nás spíš dobře zná pár zdrojů zpráv. Aniž bychom nad tím příliš přemýšleli, připojíme se k jednomu z nich. Jako dlouholetému čtenáři *The New York Times* mi nedá žádnou námahu zvolit nytimes.com. Někdo jiný třeba dává přednost CNN.com nebo MSNBC.com. Důležité však je, že webové stránky, k nimž se většinou připojujeme, nejsou obyčejné uzly. Jsou to centra. Čím jsou známější, tím více odkazů k nim směřuje. Čím více odkazů přitáhnou, tím snadněji se na webu vyhledávají a tím lépe je tedy známe. Nakonec všichni nevědomky sledujeme určitý trend a připojujeme se s větší pravděpodobností k uzlům, které známe, což jsou zákonitě silněji propojené uzly na webu. Dáváme přednost centrům.

Zásadním faktorem je to, že se při rozhodování, kam na webu nasměrovat odkazy, řídíme principem *preferenčního připojování*: vybíráme-li si mezi dvěma stránkami, z nichž na jednu míří dvakrát více odkazů než na druhou, na stránku s větším počtem spojů se připojí zhruba dvakrát více lidí. Zatímco naše individuální volba je téměř nepředvídatelná, jako skupina se řídíme přísnými vzorci chování.

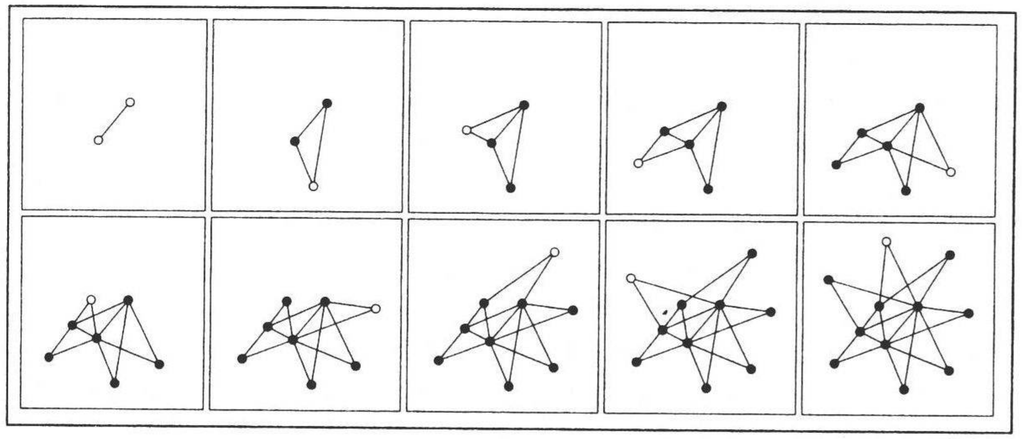
Preferenční připojování ovládá i Hollywood. Producent, jehož úkolem je vydělat na filmu peníze, ví, že filmy se prodávají díky hvězdám. Obsazení je tedy dáno dvěma protichůdnými faktory: jak dobře role herci sedne a jak je herec populární. Oba faktory vnášejí do výběru tentýž trend. Herci, kteří už byli obsazeni vícekrát, mají větší šanci získat nové role. Čím více filmů herec natočil, tím větší je pravděpodobnost, že se znovu objeví v hledáčku režiséra pátrajícího po vhodném obsazení. Právě tady jsou herečtí nováčci v obrovské nevýhodě ve stylu *Hlavy 22*, jak ví každý v Hollywoodu i mimo něj. Abys dostal dobrou roli, musíš být známý, ale abys byl známý, musíš se ukázat v dobré roli.

Web a Hollywood nás nutí opustit druhý významný předpoklad vtělený do náhodných sítí: jejich demokratický charakter. V modelech Erdőse-Rényiho a Wattse-Strogatze není mezi uzly sítě žádný rozdíl; všechny mají stejnou pravděpodobnost, že se k nim někdo připojí. Příklady, které jsme před chvílí uvedli, však naznačují něco jiného. V reálných sítích není spojování nikdy náhodné. Naopak, popularita přitahuje. Webové stránky, na něž míří mnoho odkazů, budu častěji získávat další odkazy, herci s vysokou konektivitou se častěji stanou kandidáty na nové role, vysoce citované články budou mít větší šanci, že se budou citovat znovu, prostředníci budou získávat více nových přátel. Evoluci sítě řídí neviditelný, ale nemilosrdný zákon preferenčního připojování. Pod jeho vládou nevědomky přidáváme častěji vazby těm uzlům, které už předtím mají vazeb habaděj.

* * *

Když si dáme dohromady, co jsme se dosud dozvěděli, zjistíme, že reálné sítě jsou řízeny dvěma zákony: *růstem* a *preferenčním připojováním*. Každá síť začíná z malého zárodku a rozrůstá se přidáváním nových uzlů. A tyto nové uzly pak, když se rozhodují, kam se připojit, preferují uzly s více vazbami. Oba tyto zákony se značně odchylují od dřívějších modelů, které předpokládaly pevný počet náhodně spojených uzlů. Bude to ale stačit k vysvětlení výskytu center a mocninných zákonů, jak je vidíme v reálných sítích?

Abychom na tuto otázku odpověděli, zavedli jsme v našem článku v *Science* z roku 1999 model sítě, který v sobě obsahoval oba tyto zákony. Byl to velice jednoduchý model, protože růst a preferenční



Zrod bezškálové sítě. Bezškálová topologie je přirozeným důsledkem toho, že síť svou podstatou neustále expanduje. Začínáme dvěma spojenými uzly (vlevo nahoře) a v každém panelu se k síti připojí nový uzel (znázorněný prázdným kroužkem). Když se nové uzly rozhodují, kam se připojit, dávají přednost uzlům s vyšší konektivitou. Díky růstu a preferenčnímu připojování tak vzniká malý počet vysoce propojených center.

připojování přirozeně vedou k algoritmu, který je definován dvěma přímočarými pravidly (obr. nahoře):

A. *Růst*: Pro každé dané časové období přidáme k síti jeden uzel. Tento krok podtrhuje ten fakt, že sítě jsou sestaveny uzel po uzlu.

B. *Preferenční připojování*: Předpokládáme, že každý nový uzel se ke stávajícím uzlům naváže dvěma vazbami. Pravděpodobnost, že si zvolí určitý uzel, je úměrná počtu vazeb, které zvolený uzel má. To znamená, že když máme na vybranou mezi dvěma uzly, z nichž jeden má dvakrát více uzlů než druhý, je dvakrát pravděpodobnější, že nový uzel se připojí k uzlu s větším počtem vazeb.

Při každém opakování kroků (A) a (B) přidáváme do sítě jeden uzel. Tím tvoříme, uzel po uzlu, neustále se rozšiřující pavučinu (obr. nahoře). Tento model, který kombinuje růst a preferenční připojování, byl naším prvním úspěšným pokusem vysvětlit centra. Réčiny počítačové simulace brzy ukázaly, že produkují ony těžko postižitelné mocninné zákony. Jako prvnímu modelu, který vysvětloval bezškálové mocninné zákony pozorované v reálných sítích, se mu rychle začalo říkat *bezškálový model*.

* * *

Proč se centra a mocninné zákony v bezškálovém modelu objevují? Zaprvé v něm hraje důležitou roli růst. Rozšiřování sítě znamená, že starší uzly mají více času nasbírat vazby než pozdější příchozí: k uzlu, který dorazil jako poslední, neměl nikdo šanci se připojit, zatímco na uzel, který byl v síti první, se mohly navázat všechny pozdější uzly. Růst tedy poskytuje jasnou výhodu starším uzlům a ty jsou tudíž nejbohatší na vazby. Pouhé stáří však na vysvětlení mocninných zákonů nestačí. Centra vyžadují pomoc druhého zákona, zákona preferenčního připojování. Protože nové vazby se spíš připojují k propojenějším uzlům, budou dřívější uzly s větším počtem vazeb vybírány častěji a porostou rychleji než jejich mladší a méně zapojení kolegové. Jak přibývají další a další uzly a stále si vybírají k připojení uzly, které jsou už teď více propojené, utrhnou se starší uzly nevyhnutelně od ostatních a získají velmi mnoho vazeb. Stanou se z nich centra. Díky preferenčnímu připojování tak *bohatí bohatnou a chudí chudnou*, což pomáhá více propojeným uzlům shrábnout nepoměrně více vazeb na úkor těch, které přišly později.

Tento fenomén ještě většího bohatnutí bohatých vede přirozeně k mocninným zákonům pozorovaným v reálných sítích. A v našich numerických simulacích se skutečně ukázalo, že počet uzlů, které mají právě k vazeb, se pro libovolné číslo k řídí mocninným zákonem. Přesná hodnota exponentu tohoto zákona, parametru, který charakterizuje mocninné rozdělení, už také nebyla tajemstvím. Byli jsme schopni ji vypočítat analyticky, pomocí matematického nástroje zvaného *spojité přiblížení*, které jsme pro tento účel vyvinuli. Díky preferenčnímu připojování přitahuje každý uzel vazby rychlostí úměrnou počtu vazeb, které právě má. Na základě tohoto prostého pozorování jsme sestavili jednoduchou rovnici, předpovídající, jak uzlům přibývá vazeb během expanze sítě. Řešení nám dovolilo analyticky vypočítat rozdělení konektivity a potvrdilo, že skutečně splňuje mocninný zákon.*

Dokázal by buď samotný růst, nebo samotné preferenční připojování vysvětlit mocninné zákony? Počítačové simulace a výpočty nás přesvědčily, že k tomu, aby vznikla bezškálová síť, je potřeba obojí.

* Příslušný exponent pro bezškálový model je $\gamma = 3$, rozdělení konektivity tedy splňuje $P(k) \sim k^{-3}$ (pozn. aut.).

Rostoucí síť bez preferenčního připojování vede k exponenciálnímu rozdělení konektivity, které se podobá zvonovité křivce v tom, že zakazuje centra. Jestliže síť neroste, jsme zpátky u statických modelů, v nichž mocninné zákony nevznikají.

* * *

Náš cíl, pokud šlo o bezškálový model, byl dosti skromný: měl ukázat, že dva jednoduché zákony, zákony *růstu* a *preferenčního připojování*, jsou s to vyřešit záhadu center a mocninných zákonů. A tak nás příjemně překvapilo, jak velký vliv měl tento model na další výzkum, zejména proto, že bylo od začátku jasné, že topologie reálných sítí byla formována mnoha efekty, které jsme kvůli jednoduchosti a srozumitelnosti ignorovali. Jedním z nejevidentnějších faktů je, že zatímco v bezškálovém modelu se všechny vazby napojují v okamžiku, kdy přibývá nový uzel, ve většině sítí mohou vazby spontánně přibývat i jindy. Když například na svou webovou stránku přidám odkaz na nytimes.com, vytvořil jsem *vnitřní vazbu* spojující dva staré uzly. 94 % hollywoodských vazeb je vnitřních a vzniká, když dva zavedení herci poprvé natáčejí společně. Dalším rysem, který bezškálovým sítím chybí, je to, že v mnoha sítích mohou některé uzly a vazby zmizet. Ve skutečnosti se mnoho webových stránek likviduje, a s nimi mizí i tisíce vazeb. Vazby lze také přesměrovat, to když se například rozhodneme, že svůj odkaz na CNN.com nahradíme odkazem na nytimes.com. Tyto a jiné jevy, které se na rozdíl od bezškálového modelu v některých sítích často vyskytují, ukazují, že vývoj reálných sítí je mnohem složitější, než předpovídá bezškálový model. Abychom pochopili sítě v komplexním světě kolem nás, museli bychom tyto mechanismy vtělit do mnohem obšírnější teorie sítí a objasnit jejich vliv na síťovou strukturu.

Hned jak jsme odeslali náš článek o bezškálovém modelu, začali jsme, Réka Albert a já, zkoumat vliv takových procesů, jako jsou vnitřní vazby a přesměrování, na strukturu bezškálových sítí. Už jsme však nebyli osamoceni. Měsíc poté, co vyšel náš článek v *Science*, jsem se dozvěděl o podobných výzkumech, které se prováděly v několika laboratořích po celém světě. Luis Amaral, můj dlouholetý spolupracovník, dnes profesor na Bostonské univerzitě, rozpracoval zobecnění bezškálového modelu tak, že zahrnovalo stárnutí, a tak bral v úvahu možnost, že hercům v důchodu už

další vazby nepřibývají. Amaral, ve spolupráci s Genem Stanleym a dvěma studenty, Antoniem Scalou a Markem Barthélémym, ukázal, že když se uzlům po dovršení určitého věku nepodaří získat vazby, zůstane velikost center omezená a velká centra budou méně četná, než by odpovídalo mocninnému zákonu. Ve stejné době pracovali José Mendes a Sergej Dorogovcev v Pôrtu nezávisle na podobném problému a brzy nato publikovali první ze série vynikajících článků o bezškálových sítích. Za předpokladu, že uzly s věkem pomalu ztrácejí svou schopnost získávat vazby, ukázali, že postupné stárnutí mocninný zákon nezruší, ale pouze změní počet center tím, že změní exponent rozdělení konektivity. Paul Krapivsky a Sid Redner, také z Bostonské univerzity, společně s Françoisem Leyvrazem z Mexika zobecnili princip preferenčního připojování – vzali v úvahu i možnost, že připojování k nějakému uzlu není prostě úměrné počtu vazeb, které tento uzel má, ale řídí se nějakou složitější funkcí. Zjistili, že tento efekt může zrušit mocninný zákon charakterizující síť.

To byly první z mnoha výsledků, které následovaly a které získali fyzici, matematici, informatici, sociologové a biologové, kteří pečlivě zkoumali bezškálový model a jeho nejrůznější variace. Díky jejich úsilí dnes máme bohatou a konzistentní teorii růstu sítí, jaká by ještě před pár lety byla nemyslitelná. Chápeme, že vnitřní vazby, přesměrování, odstraňování uzlů a vazeb, stárnutí, nelineární efekty a mnoho dalších procesů ovlivňujících topologii sítě lze hladce vtělit do úžasné teoretické konstrukce vyvíjejících se sítí, která obsahuje bezškálový model jako zvláštní případ. Tyto procesy pozměňují růst a vývoj sítí a zákonitě mění počet a velikost center. Ve většině případů, kdy pozorujeme jak růst, tak preferenční připojování, se však objevují i centra a mocninné zákony. Ve složitých sítích není bezškálová struktura výjimkou, nýbrž pravidlem, což vysvětluje její všudypřítomnost ve většině reálných systémů.

* * *

Teorie vyvíjejících se sítí, která se zformovala v minulých třech letech, vytyčuje v modelování sítí jasný směr. Pohlížíme-li na sítě jako na dynamický systém, který se s časem neustále mění, otvírá bezškálový model novou kapitolu v jejich modelování. Klasické statické modely, začínající u Erdőse a Rényiho, se jednoduše snažily uspořá-

dat pevný počet uzlů a hran tak, aby výsledná síť měla stejné vlastnosti jako ta, kterou chceme modelovat. Podobá se to kreslení. Když si sedneme před ferrari a chceme nakreslit obrázek, z něhož by každý poznal, o jaké auto jde, máme sice nakonec věrnou kresbu, neřekne nám však nic o tom, jak auto vzniklo. K tomu bychom museli umět postavit vůz k nerozeznání od originálu. A právě to se snaží dokázat různé modely vyvíjejících se sítí. Vystihují postupné skládání sítí, a to tak, že opakují kroky, které dělala příroda, když tvořila své nejrůznější komplexní systémy. Pokud budeme správně modelovat sestavování sítě, měla by naše výsledná síť být věrným obrazem skutečnosti. A tak se náš cíl přesunul od popisu topologie k pochopení mechanismu, který utváří sítě během jejich vývoje.

Tento posun zájmu měl za následek dramatickou změnu jazyka, jímž o sítích mluvíme. Statická povaha klasických modelů unikala pozornosti do té doby, dokud jsme nebyli nuceni započítat i růst. Podobně náhodnost nepředstavovala problém, dokud po nás mocninné zákony nezačaly vyžadovat, abychom zavedli preferenční připojování. Díky pochopení, že struktura a vývoj sítí se od sebe nedají oddělit, se jen těžko vrátíme k statickým modelům, které po desítky let ovládaly naše myšlení. Tyto myšlenkové posuvy vytvořily u sítí sérii protikladů: *statická* proti *rostoucí*, *náhodná* proti *bezškálové*, *struktura* proti *vývoji*.

Minulou kapitolu jsme zakončili závažnou otázkou, zda je přítomnost mocninných zákonů známkou toho, že reálné sítě jsou výsledkem fázového přechodu od nepořádku k pořádku. Odpověď, k níž jsme dospěli, je prostá: není to tak. Sítě nejsou na přechodu mezi pořádkem a nepořádkem a ani nebalancují na hraně náhodnosti nebo chaosu. Naopak, bezškálová topologie je projevem organizačních principů, které se uplatňují neustále v průběhu formování sítě. Není v tom nic tajemného, jelikož růst a preferenční připojování dokážou vysvětlit základní rysy sítí pozorovaných v přírodě. Bez ohledu na to, jak je nakonec síť velká a komplikovaná, pokud zahrnuje růst a preferenční připojování, udrží si svoji bezškálovou topologii s dominantními centry.

Bezškálový model by byl zůstal zajímavou akademickou rozcvičkou, nebýt objevů, které po něm následovaly. Nejdůležitějším bylo poznání, že složité sítě, které mají teoretický i praktický význam, jsou většinou bezškálové. Údaje o webu byly dostatečně obsáhlé a podrobné, aby nás přesvědčily, že mocninné zákony mohou popisovat reálné sítě. Toto poznání odstartovalo lavinu objevů, která se dosud nezastavila. Jak se Hollywood, metabolická síť buňky, citační sítě, ekonomické sítě a sítě skryté v jazyce* připojovaly k našemu seznamu, začal být najednou původ bezškálové topologie důležitý pro mnoho vědeckých oborů. Dva zákony řídící vývoj sítě, které byly zabudovány do bezškálového modelu, byly dobrým výchozím bodem pro studium těchto rozličných systémů.

Nejdříve daly mocninné zákony ospravedlnění centrům. Pak bezškálový model pozvedl mocninné zákony na matematicky podložený koncepční výdobytek. S podporou propracované teorie vyvíjejících se sítí, která nám dovoluje přesně předvídat škálovací exponenty a dynamiku sítě, jsme dosáhli nové úrovně pochopení našeho složitého a navzájem propojeného světa, což nás více než kdykoli předtím přiblížilo chápání architektury komplexity.

Avšak bezškálový model položil nové otázky. Jedna z nich byla obzvlášť naléhavá: Jak dokážou ve světě, kde bohatnou jen bohatí, prosperovat ti, kdo přišli později? Pátrání po odpovědi nás přivedlo na jedno velmi neočekávané místo: ke zrodu kvantové mechaniky na začátku 20. století.

* Bezškálovou povahu jazyka prokázaly různé skupiny badatelů. Uzly této sítě jsou slova a vazbami statisticky významné společné výskyty v textu nebo sémantické vztahy (synonyma, antonyma) (pozn. aut.).

Vlákno osmé

Einsteinův odkaz

Pokud nejste počítačovými odborníky se specializací na internetové vyhledávače a ani se do hloubky nezajímáte o prosperitu internetových „dot.com“ firem, nejspíše jste nikdy neslyšeli o Inktomi, firmě, která kdysi provozovala vyhledávač skrytý za nejpopulárnější webovou stránkou, Yahoo! Navzdory všeobecnému přesvědčení Yahoo!, America Online, Microsoft a řada dalších velkých firem neprohledávají internet vlastními silami. Místo toho si platí služby obrovských databází, jako má třeba Inktomi, jeden z nejrozsáhlejších skladů informací na webu. Protože se firma Inktomi rozhodla nevytvořit svůj vlastní portál, nikdy nevešla ve známost tak jako její zákazníci a zřídkakdy se o ní psalo. To se rázem změnilo v červnu 2000. Tehdy se v tisku objevila zpráva, že tržní cena této firmy klesla ze dne na den o 2,8 miliardy dolarů. Příčina? Firma Yahoo! s ní zrušila smlouvu jakožto internetovým vyhledávačem a nahradila ji teprve dva roky starou firmou zvanou Google.

S Larrym Pagem, absolventem Stanfordovy univerzity a spoluzakladatelem Googlu, jsem se seznámil v březnu 2000, kdy o jeho vyhledávači vědělo jen pár lidí. Účastnili jsme se jako řečníci na workshopu sponzorovaném společností Internet Archives v San Francisku. Tato událost přitáhla různorodou směsici informatiků, fyziků, matematiků, knihovníků, právníků a hrstku lidí, kteří vydělali miliony v „dot.com“ firmách. Všechny spojovala fascinace nově vznikajícím internetovým vesmírem. Larry Page pronesl krátkou přednášku o svém vyhledávači a uprostřed místnosti nechal krabici plnou triček s proslulým googlovským nápisem „I'm Feeling Lucky“, což v české verzi zní „Zkusím štěstí“. Po návratu domů jsem si tričko natáhl na sebe. A pak jsem se připojil ke Googlu a okamžitě jsem mu propadl. Vůbec mě nepřekvapilo, že u Yahoo! na tom chtěli také něco vydělat.

* * *

Google mi vrtal hlavou, protože narušoval nejdůležitější předpověď bezškálového modelu, totiž že ve výhodě je ten, kdo přišel dřív, a že v bezškálovém modelu jsou ty uzly, které se objevily nejdříve, také nejvíce propojené. Měly nejvíce času na to, aby nasbíraly spoje a vyvinuly se v centra. Google, uvedený do provozu až roku 1997, přišel na web pozdě. Populární vyhledávače, jako je AltaVista nebo Inktomi, ovládaly trh dávno předtím, než se objevil Google, který byl jasně na tahu až jako druhý. Za necelý rok se však z Googlu stal největší uzel a nejpopulárnější vyhledávač.

Dějiny podnikání jsou samozřejmě plné příběhů firem, které sice přišly s něčím novým, ale jimž přebral zákazníky úspěšnější následovník. Známým případem z počítačového průmyslu je firma Apple, jejíž důmyslný kapesní počítač Newton úplně vytlačila novinka zvaná Palm. Když se díváme na produkty jako na uzly složité obchodní sítě, můžeme říct, že vazby na Apple byly během krátké doby přesměrovány na Palm.

Jeden méně známý příklad pochází z leteckého průmyslu. Proudové dopravní letadlo nevynalezla firma Boeing. O tento výdobytek se zasloužila britská společnost De Havilland, která začala první proudový letoun zvaný Comet prodávat už roku 1949. Se svou rekordní rychlostí 700 kilometrů za hodinu ovládl jak evropský, tak americký trh. Netěšil se však z vítězství dlouho. Rok po prvních komerčních letech začala letadla firmy De Havilland padat i s pasažéry na palubě. Únava kovových materiálů se kvůli větším rychlostem a výškám projevuje u proudových letadel jinak. Když Boeing navrhoval svůj první proudový letoun, vzal De Havillandovo tragické opominutí v úvahu a pět let po prvním letu cometu přišel s modelem Boeing 707, který brzy ovládl De Havillandův trh. Čtyřicet let poté Boeing se zděšením sledoval, jak třetí příchozí, evropský Airbus, ohrožuje jeho světovládu a nevídanou rychlostí ukusuje z jeho podílu na trhu.

Zdá se, že se efekt „nového koštěte, které dobře mete“ projevuje ve většině sítí. V bezškálovém modelu však není pro takové dominantní nováčky místo, protože tam, stejně jako v dalších modelech, o nichž jsme hovořili, jsou všechny uzly identické. Jistě, bezškálový model rozlišuje mezi uzly na základě počtu vazeb, které nasbíraly, což závisí na tom, kdy se připojily k síti. Ve většině komplexních systémů má však každý uzel nějakou typickou charakteristiku, která je zjevná, i když neznáme jeho konektivitu. Webové stránky, firmy či

herci mají své vnitřní kvality, které ovlivňují rychlost, s níž získávají vazby v konkurenčním prostředí. Některé se objevují velice pozdě, a přesto zakrátko shrábnou všechny vazby. Jiné přicházejí brzy, a přesto nejsou nikdy příliš úspěšné a nepodaří se jim využít časného příchodu k tomu, aby se staly centrem. Chceme-li vysvětlit nelítostnou konkurenci, která vládne ve většině sítí, musíme přijmout fakt, že každý uzel je jiný.

* * *

Někteří lidé mají nadání přetvořit každé náhodné setkání v trvalou sociální vazbu. Některé společnosti si z každého zákazníka udělají loajálního partnera. Některé webové stránky udělají ze surfera maniaka. Co mají všechny tyto uzly ve společnosti, v obchodě a na webu společného? Je jasné, že každý má nějakou vnitřní vlastnost, která jej táhne do čela pelotonu. Nalézt tajemství univerzálního úspěchu je sice nad naše síly, můžeme se ale zaměřit na *proces*, který oddělí vítěze od poražených: na soutěžení v komplexních systémech.

V konkurenčním prostředí se každý uzel vyznačuje určitou *zdatností*. Ta nám říká, jak snadno si dokážeme najít přátele ve srovnání s ostatními lidmi kolem nás, jak je firma ve srovnání se svými konkurenty schopná nalákat zákazníky a udržet si je, u herce je to schopnost zalíbit se a vrýt se do paměti víc než ostatní herci, u webové stránky schopnost každý den nás přitáhnout spíš než miliardy jiných stránek, které soutěží o naši pozornost. Je to kvantitativní míra schopnosti uzlu obstát v konkurenci. Zdatnost lidí může pocházet z dědičnosti, u firem souvisí s kvalitou produkce a managementu, u herců je dána jejich talentem a u webových stránek kvalitou obsahu.

Každému uzlu sítě můžeme přiřadit zdatnost a tím simulovat jeho schopnost soutěžit o vazby. Například na webu by moje webová stránka měla zdatnost 0,000 01, zatímco Google by měl 0,2. Skutečná velikost těchto čísel není důležitá. Podstatný je jejich poměr a ten vyjadřuje, kolikrát je kdo schopnější přilákat návštěvníky. Průměrný člověk by opravdu snadno zjistil, že Google je 20 000krát užitečnější než moje osobní webová stránka.

Vezmeme-li v úvahu zdatnost, neodsouváme tím do pozadí růst a preferenční připojování, tyto dva základní mechanismy řídící vývoj sítí. Započítáváme však vliv atraktivnosti v konkurenčním prostředí. V bezškálovém modelu jsme předpokládali, že přitažlivost uzlu byla dána pouze počtem jeho vazeb. V konkurenčním prostředí začíná hrát roli i zdatnost: uzly s větší zdatností se připojují častěji. Jednoduchý způsob, jak do bezškálového modelu zahrnout zdatnost, je předpokládat, že preferenční připojování je řízeno *součinem* zdatnosti uzlu a počtem vazeb, které má. Každý nový uzel při rozhodování, kam se má připojit, srovnává *součin zdatnosti a konektivity** všech uzlů, které jsou k dispozici, a připojuje se s větší pravděpodobností tam, kde najde vyšší hodnotu tohoto součinu a kde jsou tudíž atraktivnější uzly. Ze dvou uzlů s touž konektivitou získává vazby rychleji ten zdatnější. Jsou-li však dva uzly stejně zdatné, je ten starší stále ve výhodě.

Tento jednoduchý *model se zdatností*, zahrnující soutěžení a růst, byl naším prvním pokusem vysvětlit Google. Byl vymyšlen jako rychlé řešení, které nám umožnilo rozlišovat mezi uzly a dát šanci opozdilcům. Brzy jsme zjistili, že zdatnost s sebou nese mnohem závažnější důsledky než jen tohle. Naše rychlé řešení otevřelo nečekaný pohled na širokou škálu jevů, které jsou naprosto nepostřehnutelné v rovnostářském světě bez zdatnosti.

* * *

Ginestra Bianconiová měla za sebou pár měsíců doktorského studia, když jsem ji požádal, aby studovala vlastnosti našeho modelu. Doufal jsem, že pochopíme, jak se z Googlu téměř přes noc stalo centrum. Bianconiová se narodila a studovala v Římě a do naší výzkumné skupiny vnesla neobyčejnou vášeň pro fyziku a důkladnou průpravu ve statistické mechanice. Model se zdatností mi připadal jako poměrně zajímavá úloha, ale matematicky nepříliš náročná, právě tak akorát pro nového studenta. Bianconiová mě však rychle vyvedla z omylu. Především matematika, která se za jejím problémem skrývala, daleko vybočovala z běžné rutiny. Navíc se ukázalo, že je mnohem zajímavější, než se čekalo. Objevila nespočetné vrst-

* V bezškálovém modelu je pravděpodobnost připojení nového uzlu k uzlu s k vazbami dána vzorcem $k/\Sigma_i k_i$. V modelu se zdatností má každý uzel jednu zvláštní charakteristiku, zdatnost η. Pravděpodobnost připojení k uzlu s k vazbami a zdatností η je $k\eta/\Sigma_i k_i \eta_i$. V obou výrazech součet přes všechny uzly, který se ve výrazu vyskytuje, normalizuje pravděpodobnost na hodnotu 1 (pozn. aut.).

vy hlubokých a překvapivých vlastností složitých sítí, které podstatně obohatily naše znalosti o tom, jak se sítě sestavují a jak se vyvíjejí.

Výpočty Bianconiové nejdříve potvrdily naše podezření, že když se uplatňuje zdatnost, nemusí ranní ptáče vždycky doskákat nejdál. Místo toho je u kormidla zdatnost a ta vytváří a ničí centra. V bezškálovém modelu narůstá konektivita uzlů s časem jako druhá odmocnina z času. Model se zdatností předpovídá velmi odlišné chování. Říká nám, že uzly stále získávají vazby podle mocninného zákona, t^{β}. Dynamický exponent β, který ukazuje, jak rychle uzel přibírá nové vazby, je však pro každý uzel jiný. Je úměrný zdatnosti uzlu, takže uzel dvakrát zdatnější než některý jiný uzel bude získávat vazby rychleji, neboť jeho dynamický exponent je dvakrát větší. Rychlost, s jakou uzly nabírají vazby, tedy už není jen otázkou stáří. Ať už se zdatný uzel k síti připojí kdykoli, bude nechávat uzly s nižší zdatností za sebou. Google je toho nejlepším důkazem. Tento nováček s báječnou technologií vyhledávání získával vazby mnohem rychleji než jeho soupeři a nakonec je všechny zastínil. Krása vítězí nad věkem.

Dynamika bezškálového modelu se dá přirovnat k přecpané jednoproudé silnici, kde musí každé auto sledovat provoz před sebou. Automobil, který na silnici najede první, je zákonitě vítězem a stáří vítězí nad rychlostí. Soutěžení v modelu se zdatností, kde mají uzly různé zdatnosti a tak získávají vazby s různou rychlostí, je mnohem dramatičtější. Podobá se automobilovým závodům na široké mnohaproudé dálnici, kde soutěží auta všech možných konstrukcí a modelů. Auta se k závodu připojují jedno po druhém, každé s jiným motorem pod kapotou a s řidiči, z nichž každý projevuje za volantem jiný talent. Pickupy a sportovní dodávky budou nutně polykat prach zvířený za závodními vozy.

Model se zdatností, zahrnující soutěžení v komplexních sítích, přinesl i nové otázky. Mocninný zákon pozorovaný v bezškálovém modelu spočívá na tom, že při nabírání vazeb se všechny uzly řídí týmž dynamickým pravidlem; v síti, kde některé uzly rostou pomalu, zatímco jiné sbírají vazby velmi rychle, je tato jemná rovnováha narušena. Ujmou se i v takovém konkurenčním prostředí vlády mocninné zákony? Budou platit v modelu se zdatností? Budou sítě ovládané konkurencí pořád bezškálové? Anebo dravé soutěžení o vazby zničí znamení řádu, které jsme objevili? Touha pochopit, jak soutěžení formuje topologii sítě, nás zavedla velmi nepravděpodobnou

oklikou zpátky do minulosti, ke třem velikánům kvantové teorie. Jejich jména jsou Bose, Einstein a Planck.

* * *

V červnu 1924 obdržel Albert Einstein dopis a krátký rukopis v angličtině od neznámého indického fyzika z Dháky Satyendranatha Boseho. Einstein nevěděl, že rukopis nedávno odmítli v časopise *Philosophical Magazine of the Royal Society*, vycházejícím v Londýně. Zalíbil se mu tak, že zanechal vlastní práce, přeložil jej do němčiny a zařídil jeho publikaci v časopise *Zeitschrift für Physik*. Připojil dokonce pochvalnou poznámku: „Dle mého názoru představuje Boseho odvození Planckovy formule významný pokrok. Použitá metoda dává také kvantovou teorii ideálního plynu, jak podrobně rozvedu jinde."

Co mohlo Einsteina, už tehdy nositele Nobelovy ceny, vzrušit do té míry, že začal pracovat na novém problému založeném na nepublikovaném rukopise neznámého fyzika? Abychom to plně pochopili, musíme se vrátit ještě o dalších dvacet let do minulosti. Na přelomu 19. a 20. století chtěl německý fyzik Max Planck vyřešit problém, který všechny fyziky neobyčejně zajímal: jak předměty vysílají světlo a teplo. Tehdy spolu soupeřily dvě teorie, z nichž každá vysvětlovala část experimentálních dat, ale žádná ne všechno. Všechny pokusy smířit tyto dva přístupy byly bezvýsledné. Planck byl první, kdo roku 1900 odvodil výraz, který dokonale seděl na všechny experimenty a který je dnes známý jako Planckova formule. Zaplatil však za to velmi vysokou cenu, protože musel zavést speciálně k tomuto účelu vymyšlený předpoklad, že světlo a teplo je vysíláno v malých balíčcích – nespojitých kvantech. Tato myšlenka šla proti názoru té doby, že světlo a elektromagnetické záření jsou vlny, a nikoli oddělené částice. Mezi prvními, kdo vzali Planckovu hypotézu vážně, byl Einstein. Za předpokladu, že světlo se skutečně skládá z nepatrných částeček zvaných fotony, předpověděl* *fotoelektrický jev* – a za tento objev obdržel roku 1922 Nobelovu cenu. Planck získal Nobelovu cenu o tři roky dříve za kvantovou hypotézu, a to na Einsteinův návrh.

* Einstein ve skutečnosti fotoelektrický jev nepředpověděl, ale vysvětlil. Na přelomu století byl fotoelektrický jev jednou z největších záhad tehdejší fyziky a teprve Einstein pochopil jeho kvantovou podstatu. Svoji teorii publikoval roku 1905 (pozn. překl.).

V roce 1924 dělala kvantová hypotéza světla stále potíže: nebylo známo kvantověmechanické odvození Planckovy formule. Dnes tuto úlohu běžně řeší studenti fyziky na vysoké škole, ale tehdy byly všechny pokusy o její odvození bezvýsledné – dokud nepřišel Bose se svým odvážným řešením.

Čím mohl přispět Bose odněkud z Dháky, aby to už nevěděli takoví titánové fyziky, jako byl Einstein a Planck? V 19. století si fyzici mysleli, že atomy se dají rozlišit a individuálně očíslovat, tak jako jsou očíslované míčky skákající v osudí při tahu v loterii. Když z bubnu některý míček vytáhnete, miliony sázejících budou přesně vědět, který to byl, protože má na sobě namalované číslo. Ale Bose tvrdil, že naše schopnost rozlišit určité subatomární částice je iluze, kterou si přinášíme z běžného života. Lehké částice jsou opravdu jedna jako druhá, neočíslované, dokonale nerozlišitelné. Bose ukázal, že jakmile statistickou mechaniku a termodynamiku modifikujeme tak, aby zahrnovaly fakt, že určité subatomární částice jsou skutečně identické, je možné Planckův zákon jednoduše odvodit.

Boseho článek byl ještě v redakci, když Einstein vystoupil v Pruské akademii věd a předvedl své vlastní výsledky pod názvem „Kvantová teorie jednoatomových plynů", kde rozšířil Boseho výsledky na případ molekul plynu. O šest měsíců později měl hotovou ještě další práci, „Druhé pojednání". V těchto článcích Einstein předpověděl velice zvláštní jev, jev, jemuž se dnes říká *Boseho-Einsteinova kondenzace*.

Při běžných teplotách do sebe atomy narážejí různými rychlostmi, některé rychleji, jiné pomaleji. Jazykem fyziky to znamená, že některé mají vysokou a jiné nízkou energii. Když plyn zchladíte, rej atomů se zpomalí. Abyste je zcela zastavili, museli byste zchladit plyn k nedosažitelné teplotě absolutní nuly. Einstein předpověděl, že když se plyn složený z nerozlišitelných atomů dostatečně zchladí, značný podíl částic se usadí na nejnižší energii. To znamená, že atomy lze zahnat do jejich nejnižšího energetického stavu při nějaké kritické teplotě nad absolutní nulou. Když částice tohoto stavu dosáhnou, vytvoří novou formu hmoty zvanou Boseho-Einsteinův kondenzát.

Einsteinova předpověď z roku 1925 byla přijata se značnou skepsí. I ty nejchladnější oblasti mezigalaktického prostoru byly pro Boseho-Einsteinovu kondenzaci příliš horké. Protože nebylo možné

dosáhnout žádané teploty, což je pro většinu atomů miliontina kelvinu, měla tato předpověď pro fyziku malý význam a její platnost byla diskutabilní. I když byly důsledky Einsteinovy předpovědi letmo zahlédnuty v různých systémech, od supratekutého helia po supravodiče, zůstávaly po sedmdesát let nepotvrzeny. A pak v roce 1995 skupina z Národního ústavu pro standardy v Boulderu v Coloradu, vedená Ericem A. Cornellem a Carlem E. Weimanem, zchladila atomy rubidia na tak nízkou teplotu, že vytvořily Boseho-Einsteinův kondenzát.

Obrovský význam Cornellova a Weimanova objevu byl už šest let poté, roku 2001, oceněn udělením Nobelovy ceny za fyziku. Jejich objev nejenže do nejmenšího detailu potvrdil Einsteinovu předpověď, ale zahájil i revoluci v atomové fyzice. Dnes chápeme, že Einsteinův objev má širší uplatnění než jen u plynů. Situace podobající se kondenzaci částic na nejnižší energetickou hladinu nastává v mnoha kvantových systémech, které se jen málo podobají skutečnému plynu. Boseho-Einsteinova kondenzace se stala standardní součástí výbavy každého teoretického fyzika a pomáhá nám rozumět tak odlišným jevům, jako je formování hvězd a supravodivost. A k této výbavě sáhla Bianconiová, když se snažila pochopit chování modelu se zdatností.

* * *

Na webu nejsou žádné subatomární částice a sítě nemají „energetické hladiny", přinejmenším ve fyzikálním smyslu slova. Co s tím má společného Boseho-Einsteinova kondenzace? Takovou otázku jsem položil Ginestře Bianconiové jednoho nedělního odpoledne roku 2000, když jsem si na chvíli zaskočil na univerzitu pro nějaká lejstra. Když jsem odcházel z pracovny, dost rozrušeně mi sdělila, že narazila na cosi zajímavého. „Teď nemám čas," musel jsem ji odbýt, protože na mě v autě čekal můj čtyřletý syn. „Na shledanou v pondělí." Boseho-Einsteinova kondenzace? Kdo kdy slyšel o kondenzátech mimo kvantovou mechaniku? Myslel jsem, že pracuje na modelu se zdatností, který řídí dobře známé zákony klasické fyziky. Co by mohla mít kvantová mechanika společného s webem nebo sociálními sítěmi? To všechno se mi honilo hlavou během dvouhodinové jízdy autem z Notre Dame do Chicaga. Ale v pondělí mě čekalo překvapení.

S použitím jednoduché matematické transformace* nahradila Bianconiová zdatnost energií a přiřadila jednotlivé energetické hladiny každému uzlu v modelu se zdatností. Najednou dostaly výpočty nečekaný význam: začaly připomínat to, na co narazil Einstein o osmdesát let dříve, když objevil kondenzát. Mohla to být náhoda bez dalších důsledků. Byla tu však skutečně přesná matematická korespondence mezi modelem se zdatností a Boseho plynem. Podle této korespondence odpovídá každý *uzel* sítě *energetické hladině* Boseho plynu. Čím větší je zdatnost uzlu, tím nižší je odpovídající energetická hladina. Vazby v síti se mění na *částice* plynu, z nichž každá se nachází na určité energetické hladině. Přidání nového uzlu k síti se podobá přidání nové energetické hladiny k Boseho plynu a přidání nové vazby k síti je totéž jako vypuštění nové Boseho částice do plynu. V tomto zobrazení se komplexní sítě podobají kvantovému plynu a jejich vazby se chovají jako subatomární částice.

Taková korespondence mezi sítěmi a Boseho plynem byla úplně nečekaná. Boseho plyn je koneckonců jedinečným projevem kvantové mechaniky. Chová se podle specifických zákonů subatomární fyziky, které povolují celou sérii jevů odporujících naší intuici a které nemají obdoby v makroskopickém světě. Tyto zákony jsou velmi odlišné od těch, které ovládají sítě, s nimiž se setkáváme v celé této knize. Například uzly a vazby na internetu jsou makroskopické objekty, jsou to směrovače, jsou to kabely, na které si můžeme sáhnout a třeba je přeřezat, budeme-li chtít. Nikoho by vážně nenapadlo, že se řídí kvantovou mechanikou. Ale desítky let jsme se zabývali sítěmi jako geometrickými objekty, které patří jednoznačně do sféry matematiky. Zjištění, že reálné sítě jsou rychle se vyvíjející dynamické systémy, přeneslo studium komplexních sítí i na fyzikální hřiště. Možná že se chystá ještě jeden takový kulturní posun. Zobrazení, které zavedla Bianconiová, naznačilo, že pokud jde o zákony, které řídí chování sítí a Boseho plynu, není tu žádný rozdíl. Některé rysy komplexních sítí budují most mezi mikrosvětem a makrosvětem a jeho důsledky jsou stejně udivující jako samotná existence tohoto mostu.

* Tato transformace po nás žádá, abychom každému uzlu se zdatností η přiřadili energetickou hladinu ε s použitím výrazu $\varepsilon = (-1/\beta)\log \eta$, kde β je parametr, který v Boseho-Einsteinově kondenzaci hraje roli převrácené hodnoty teploty (pozn. aut.).

Tou nejdůležitější předpovědí, která z tohoto zobrazení vyplývá, je, že některé sítě mohou podstoupit Boseho-Einsteinovu kondenzaci. Důsledky této předpovědi může pochopit i ten, kdo neví o kvantové mechanice vůbec nic: prostě je to tak, že v některých sítích *vítěz může sebrat všechno*. Tak jako v Boseho-Einsteinově kondenzátu se všechny částice nahrnou na nejnižší energetickou hladinu a ostatní energetické hladiny zůstanou neobsazené, by mohl v některých sítích nejzdatnější uzel teoreticky shrábnout *všechny* vazby a ostatním uzlům nenechat nic. Vítěz bere vše.

* * *

Každá síť může mít jiné rozdělení zdatnosti, podle něhož poznáme, nakolik jsou uzly sítě podobné či odlišné. V sítích, kde má většina uzlů srovnatelnou zdatnost, se rozdělení řídí úzkou zvonovitou křivkou. V jiných sítích je rozsah zdatnosti velmi široký, takže několik uzlů je mnohem zdatnějších než většina ostatních. Například Google je bezpochyby tisíckrát zajímavější pro všechny webové surfaře než kterákoli osobní webová stránka. Matematické nástroje vyvinuté před několika desetiletími k popisu kvantových plynů nám umožnily vidět, že bez ohledu na podstatu vazeb a uzlů závisí chování a topologie sítě na tvaru jejího rozdělení zdatnosti. Přestože každý systém, od webu po Hollywood, má své vlastní rozdělení zdatnosti, výpočty Bianconiové ukázaly, že pokud jde o topologii, spadají všechny sítě do jedné z pouhých *dvou* možných kategorií. Ve většině sítí nemá soutěžení nějaký na první pohled znatelný dopad na topologii sítě. V některých sítích však vítěz sbírá všechny vazby, což je jasné znamení Boseho-Einsteinovy kondenzace.

První kategorie zahrnuje všechny sítě, v nichž navzdory dravé konkurenci přežívá bezškálová topologie. Tyto sítě se chovají podle hesla *zdatní bohatnou*, což znamená, že nejzdatnější uzel se nutně stane i největším centrem. Vítězovo vedení však nikdy není příliš výrazné. V závěsu za největším centrem následuje centrum o něco menší, které získalo téměř tolik vazeb jako nejzdatnější uzel. V každém okamžiku existuje hierarchie uzlů, jejichž rozdělení konektivit se řídí mocninným zákonem. Ve většině složitých sítí tak mocninné zákony a boj o odkazy nejsou v rozporu, ale mohou rozumně koexistovat.

V sítích, které spadají do druhé kategorie, *vítěz bere vše*, což zna-

mená, že nezdatnější uzel shrábne *všechny* vazby a ostatním uzlům nechá jen nepatrný zbytek. Takové sítě vytvoří *hvězdicovitou* topologii, v níž jsou všechny uzly připojeny k centrálnímu uzlu. V takové síti, připomínající kolo s loukotěmi, je mezi osamělým centrem a všemi ostatními hluboká průrva. A tak je síť, kde vítěz bere vše, velmi odlišná od bezškálových sítí, jimiž jsme se zabývali dříve a v nichž existuje hierarchie center, jejichž distribuce se řídí mocninným zákonem. Síť, kde vítěz bere vše, není bezškálová, ale tvoří ji *jediné centrum* a spousta *malinkých* uzlů. To je zásadní rozdíl. Ve skutečnosti není rychlý růst Googlu znakem chování typu vítěz bere vše, znamená jenom, že zdatný bohatne. Jistě, Google je jedním z nejzdatnějších uzlů, nikdy se mu však nepodařilo shrábnout *všechny* uzly a stát se *hvězdou*. Hřeje se na výsluní spolu s několika uzly, jejichž počet vazeb je s ním srovnatelný. Když vítěz bere vše, není tu pro možného vyzyvatele místo.

Chovají se podle vzoru vítěz bere vše i nějaké reálné sítě? Dnes dokážeme předpovědět, zda se bude daná síť řídit schématem zdatný bohatne nebo vítěz bere vše, když se podíváme na její rozdělení zdatností. Zdatnost však zůstává poněkud obtížně postižitelnou veličinou, jelikož nástroje k měření zdatnosti jednotlivého uzlu se teprve vyvíjejí. Avšak chování typu vítěz bere vše má natolik nezaměnitelný a viditelný dopad na strukturu sítě, že jej v síti nelze přehlédnout. Zlikviduje hierarchii center charakterizujících bezškálovou topologii a učiní z ní hvězdicovitou síť s jedním uzlem kumulujícím všechny vazby. A síť, v níž nemůžeme přehlédnout jeden uzel, který nese známky Boseho-Einsteinova kondenzátu, tady je. Ten uzel se jmenuje Microsoft.

* * *

Nejviditelnějším produktem partnerství Billa Gatese a Paula Allena jsou bezesporu Microsoft Windows. Jejich dopad na náš počítači ovládaný svět je téměř nemožné vyčíslit. Windows znamenají počátek kulturního rozštěpení: buď je milujete, nebo je nenávidíte. Nemůžete stát mezi. Ale ať už se nacházíte v táboře jejich obdivovatelů nebo jejich odpůrců, s největší pravděpodobností s nimi pracujete. Navzdory jejich všudypřítomnosti nejsou však Windows nejvýznamnějším vynálezem Billa Gatese. Daleko trvalejším odkazem Gatesovy a Allenovy spolupráce byla myšlenka prodávat software.

Před nimi to bylo prostě nemyslitelné. Zatímco počítač je hmatatelná věc, software je pouhá informace, nekonečný řetězec nul a jedniček na disku nebo „cédéčku". Nejdivnější z toho všeho je operační systém, který nedělá nic jiného, než že manipuluje s jinými řetězci nul a jedniček a tvoří pomocný můstek mezi různými aplikacemi a hardwarem. A tak byli ze začátku všichni proti podnikatelským plánům Microsoftu. Hackeři, kteří zastávali názor, že informace a programy mají být volně přístupné pro všechny, Windows přímo nenáviděli. Podnikatelé byli zděšeni představou obchodování s něčím, co se dá tak snadno kopírovat.

Jak každý ví, zvítězily Windows navzdory tomu, že Microsoft nebyl na trhu první. Když se objevila jejich první verze, vypadala jako trapná karikatura revolučního operačního systému firmy Apple. Avšak Apple si držel tuhý monopol na svůj hardware, zatímco „péčéčka" nabízela volné pole působnosti pro všechny výrobce počítačů a stala se tak dominantní platformou v našem počítačem poháněném světě. Bill Gates a jeho Windows se svezli s nimi.

Představte si operační systémy jako uzly, které soupeří o vazby čili uživatele. Pokaždé když si nějaký uživatel na svém počítači nainstaluje Windows, přibude Microsoftu vazba. Bezškálový model by napovídal, že nejstarší operační systém bude také systémem nejpopulárnějším. V tom případě bychom všichni používali primitivní DOS. V realističtějším modelu se zdatností přeberou zdatnější operační systémy zákazníky méně zdatným operačním systémům, bez ohledu na stáří.

Kdyby u bezškálové sítě na trhu převažoval režim, kdy zdatní bohatnou, pak by měla existovat hierarchie operačních systémů, kde nejpopulárnější by byl těsně následován několika méně populárními konkurenty. Taková hierarchie v řadě průmyslových odvětví skutečně existuje. Vezměme si například výrobce počítačů. Podle údajů o celosvětových dodávkách měl v roce 2000 Compaq 13% podíl na trhu, za ním těsně následovala firma Dell s 11% podílem. Hewlett-Packard a IBM se na trhu shodně podílely 7 % a Fujitsu-Siemens získal 4 % veškerých prodejů. Ostatní výrobci představovali celých 55 % obratu a tříštili trh na ještě menší segmenty.* Protože většina pře-

* Tato situace se podobá soutěži politických stran. Když si vyneseme rozdělení počtu získaných hlasů pro jednotlivé kandidáty či strany, dostaneme skutečně mocninný zákon. Pro popis takových systémů byl vyvinut tzv. Sznajdův model (pozn. překl.).

hledů uvádí pouze prvních pět největších výrobců počítačů, těžko ověříme, zda rozdělení jejich podílů na trhu skutečně splňuje mocninný zákon. Těsná hierarchie naznačuje, že výrobci počítačů spadají do fáze bohatnutí zdatných, kde trhu nevládne žádný jednotlivý uzel.

Avšak na trhu operačních systémů takové zdravé soutěžení a hierarchie chybějí. Jistě, na světě jsou i jiné operační systémy než Windows. Všechny produkty firmy Apple stále běží pod systémem Mac OS. DOS, předchůdce Windows, je pořád ještě instalován na velkém množství „pécéček". Linux, operační systém přístupný komukoli a zdarma, který jako jediný vážněji ohrožuje dominanci Windows, ukrajuje stále větší podíl trhu. UNIX slouží stále vědcům a síťovým inženýrům na většině počítačů určených k náročným výpočtům. Všechny tyto systémy jsou však trpaslíky ve stínu Windows, jejichž různé verze běží na udivujících 86 % všech osobních počítačů. Druhý nejpopulárnější operační systém, Mac OS od firmy Apple, se na trhu podílí pouze 5 %. Za ním pokulhává stařičký DOS s 3,8 %, následovaný Linuxem s 2,1 %. Všechny ostatní operační systémy včetně systému UNIX zahrnují méně než 1 % trhu.

Microsoft pobral v podstatě všechno. Jako uzel není jen o něco větší než ten, co následuje za ním. Co do počtu zákazníků se nedá prostě s nikým srovnávat. Všichni se chováme jako krajně sociální Boseho částice a kvůli výhodám kondenzujeme do beztvaré masy uživatelů Windows. Jak nakupujeme stále nové počítače a instalujeme Windows, pečlivě přikrmujeme a udržujeme kondenzát, který se vyvinul kolem Microsoftu. Trh operačních systémů nese klasické známky sítě, v níž proběhla Boseho-Einsteinova kondenzace a která se chová podle zásady vítěz bere vše. Zatímco mnoho operačních systémů soupeří o to, kdo se více zviditelní a kdo bude mít větší podíl na trhu, Microsoft se uhnízdil v pozici kondenzátu, hvězdy ovládající valnou většinu vazeb k zákazníkům.

* * *

Uzly vždy soupeří o vzájemná spojení, protože v propojeném světě jim vazby dávají šanci přežít. Ve většině případů je tato konkurence zjevná: když například firmy soupeří o zákazníky, herci se ženou za příležitostí vystupovat a lidé se přetahují o sociální vazby. V jiných systémech už tato dynamika není tak zřejmá. Molekuly v buňce získávají vazby pro dobro organismu jako celku. Ale ať se nám to líbí nebo ne, všichni jsme součástí velké komplexní soutěžní hry. Jak některé uzly vynášíme nahoru a jiné vylučujeme, jsou tu vždycky vítězové a poražení. Sítě kolem nás nesou známky tohoto soutěžení na úrovni vazeb a uzlů.

Dokud jsme považovali sítě za náhodné, modelovali jsme je jako statické grafy. Bezškálový model odráží naše probuzení do skutečnosti, v níž jsou sítě dynamické systémy, které se neustále mění přidáváním nových uzlů a vazeb. Model se zdatností nám dovoluje popisovat sítě jako *konkurenční* systémy, kde uzly nelítostně bojují o vazby. A Boseho-Einsteinova kondenzace ukazuje, jak někteří vítězové dostávají šanci získat všechno.

Zatlačují úspěchy získané při započtení zdatnosti bezškálový model do pozadí? Vůbec ne. V sítích, které se chovají podle zásady zdatní bohatnou, vede soutěžení k bezškálové topologii. Většina sítí, které jsme dosud studovali - web, internet, buňka, Hollywood a spousta dalších reálných sítí -, patří do této kategorie. Vítěz se dělí o pozornost se spojitou hierarchií center.

Boseho-Einsteinova kondenzace nabízí však teoretickou možnost, že v některých systémech může vítěz shrábnout *všechny* vazby. Pokud se tak stane, bezškálová topologie se vytrácí. Zatím se zdá, že mezi reálnými systémy pouze trh operačních systémů, s Microsoftem jako dominantním centrem, takové situaci odpovídá. Jsou někde jiné systémy, které vykazují podobné chování? Je to velmi pravděpodobné. Bude však nějakou dobu trvat, než je všechny rozpoznáme.

V několika málo posledních letech nás naše putování dovedlo k objevu nových a fascinujících rysů našeho světa podobajícího se velké pavučině. Tím, že jsme odhalili mechanismy řídící vývoj sítí, jsme pochopili univerzálnost nástrojů, jimiž příroda utváří komplexní svět kolem nás. Dnes začínají vědci z nejrůznějších oborů, od buněčné biologie po ekonomii, prozkoumávat důsledky komplexních topologií, které byly objeveny. Jaký vliv má topologie sítě na stabilitu komplexních systémů? Jak se na reálných sítích šíří viry? Jak se v krizových situacích hromadí selhání? I když nám struktura a chování sítí skýtají spousty prostoru k dalšímu bádání, začínáme už fascinujícím a kreativním způsobem uplatňovat čerstvé intelektuální výdobytky v praktickém životě.

Vlákno deváté

Achillova pata

Odpolední teplota v Denveru se vyšplhala ke čtyřicítce a stovky úředníků chvátaly z kancelářských věžáků do chladivého vánku svých klimatizovaných automobilů. U čerpacích stanic se tvořily dlouhé fronty na benzin a led, semafory byly vypnuté, nemocnice a silniční dispečinky fungovaly jen v nouzovém režimu a lidé uvěznění ve výtazích marně mačkali zvonek. „V parném dni se z kancelářské budovy během okamžiku stane inkubátor," konstatoval jeden úředník. „Není tam žádná ventilace a žádné okno se nedá otevřít."

Snadno zapomínáme na to, jak silně závisíme na moderní technice. Abychom si to plně uvědomili, musíme zažít její občasné selhání, jako bylo to v létě 1996, kdy se zastavilo všechno, co bylo napájeno elektřinou od hřebenu Skalnatých hor až k Tichému oceánu. Odborníci se už dlouho obávali toho, že se zopakuje velký výpadek z roku 1965, který ponechal 30 milionů lidí po třináct hodin bez elektřiny. Selhání západního elektrorozvodného systému roku 1996 bylo co do finančních ztrát mnohem tragičtější. Někteří lidé se obávají, že směr vývoje energetického průmyslu může vést k ještě častějším výpadkům, než bychom možná čekali. Kalifornské energetické krize v roce 2001 tyto obavy rozhodně nerozptýlily.

Ve srovnání s dnešním systémem byla rozvodná síť roku 1965 mnohem méně propojená. Stát Maine přežil výpadek proto, že fungoval jako ostrov s jenom slabými vazbami na zbytek vypnuté Nové Anglie. Jak se však s lety prohlubovala závislost země na elektrické energii, podléhali lidé panice při každém vypnutí proudu. Podle Alana Weismana, který o tom napsal do *Harper's*, se energetické podniky naučily zvyšovat stabilitu a snižovat náklady tím, že sdílejí společná zařízení a navzájem si podávají pomocnou ruku v krizových situacích. V důsledku toho se původně izolované systémy začínaly propojovat a vznikla tak největší struktura vytvořená člověkem na Zemi, která obsahuje tolik drátů, že by to stačilo až na Měsíc a zpět.

S tisíci generátorů, miliony kilometrů vedení a více než miliardou spotřebičů je toto obrovské elektrické zvíře tak vzájemně propojené a citlivé, že každou poruchu pocítí i lidé vzdálení tisíce kilometrů. Výpadek z roku 1996 ukázal, jak hluboce je tento úžasný systém zranitelný. „Propojený systém nám skutečně pomáhá efektivněji využívat přírodní zdroje a udržuje náklady na nízké úrovni," prohlásila Lynn Bakerová, mluvčí bonnevillské energetické správy, která dohlíží na elektrorozvodnou síť na severozápadě USA. „Znamená to však, že když se něco pokazí, může se porucha šířit systémem jako lavina." Západní výpadek, který způsobil škody a výpadek výroby za 1,5 miliardy dolarů, zdůraznil často opomíjenou vlastnost složitých sítí: že propojenost vede ke zranitelnosti.

* * *

Chyby a selhání postihují každé lidské dílo. Stačí závada na jediné součástce v motoru vašeho auta, a nezbude vám než zavolat odtahovou službu. Stejně tak nepatrná chyba v zapojení obvodů může počítač odsoudit k sešrotování. S přírodními systémy je tomu ale jinak. V geologické minulosti Země vymíral každý rok jeden biologický druh z milionu. Odhadujeme-li počet druhů žijících na Zemi na 3 až 100 milionů, znamená to, že letos vymizí něco mezi 3 a 100 druhy. Avšak tato přirozená vymírání zjevně nenadělají mnoho škody. Za miliony let si ekosystém vyvinul úžasnou rezistenci vůči chybám a selháním a přežívá i tak drastické události, jakou byl dopad meteoritu na Yucatan, což zabilo statisíce druhů, včetně dinosaurů. Pro ekosystém je tedy charakteristická odolnost k chybám, jakou zřídkakdy vidíme u systémů vytvořených člověkem.

Obecně řečeno mají přírodní systémy jedinečnou schopnost přežít za nejrůznějších okolností. I když vnitřní selhání může mít vliv na jejich chování, často udržují své základní funkce i při vysokém výskytu chyb. To je v ostrém kontrastu s většinou výtvorů lidské ruky, v nichž se závada na jedné komponentě často stane osudnou pro celé zařízení. V poslední době rozpoznali vědci ze všech oborů odolnost přírodních konstrukcí a vzbudili v nás naději, že něco takového dokážeme realizovat ve strukturách vytvořených člověkem. Z toho důvodu je *robustnost* – což pochází z latinského slova *robus* neboli „dub", v antickém světě symbolu síly a dlouhověkosti – stále frekventovanějším problémem mnoha oborů.

O robustnost se velmi zajímají biologové, kteří chtějí vědět, jak buňka přežívá a funguje za extrémních podmínek a při častých vnitřních chybách. Robustnost zajímá i badatele ve společenských vědách a ekonomy, kteří se zaměřují na stabilitu lidských organizací tváří v tvář hladomorům, válkám a změnám sociální a ekonomické politiky. Je to vážný problém pro ekology a odborníky na životní prostředí a motivuje ambiciózní celosvětové projekty, jak zachovat udržitelnost ekosystému ohrožovaného ničivými účinky průmyslového rozvoje. Dosažení robustnosti je konečným cílem specialistů na stále propojenější komunikační systémy, které musí udržovat vysokou úroveň pohotovosti navzdory nevyhnutelným poruchám svých komponent.

Většina systémů s velkou tolerancí vůči selháním má jeden společný rys: jejich funkce je zaručována vysoce propojenou komplexní sítí. Robustnost buňky se skrývá v její komplikované regulační a metabolické síti. Stabilita společnosti vyrůstá z propletené pavučiny sociálních vztahů. Stabilitu ekonomiky udržuje jemná síť finančních a regulačních orgánů. Schopnost ekosystému přežít je zakódována v pečlivě vyvážené pavučině vzájemného působní druhů. Zdá se, že příroda se usilovně snaží dosáhnout robustnosti prostřednictvím *vzájemné propojenosti*. Taková univerzální volba síťové architektury je nejspíš víc než pouhá shoda náhod.

* * *

Na podzim roku 1999 vyhlásila Armádní agentura pro pokročilé výzkumné projekty neboli DARPA soutěž na podporu projektů zaměřených na odolnost sítí vůči selhání. Jak se v této výzvě uvádělo, program se měl „v prvé řadě zaměřovat na vývoj nových síťových technologií, které budoucím sítím umožní, aby odolávaly útokům a nepřetržitě poskytovaly síťové služby". Několik měsíců po zveřejnění naší práce o webu a bezškálových sítích jsem hledal finanční prostředky pro náš výzkum v této oblasti. Výzva z DARPA vypadala jako výtečná příležitost pro nás, protože cíle programu mířily stejným směrem jako náš zamýšlený výzkum. Doufali jsme, že bezškálové sítě by mohly být důležité i pro pochopení robustnosti sítí. Poté co jsem do termínu stanoveného na 1. listopad sepsal vyžadovanou grantovou přihlášku, sedli jsme si s Rékou Albertovou a Hawoongem Jeongem a já navrhl, že nebudeme čekat na odpověď z DARPA

a rovnou se pustíme do některých otázek, které jsem formuloval v přihlášce.

Selhání jednotlivých uzlů může snadno způsobit rozpad sítě na izolované, navzájem nekomunikující fragmenty. Kdyby se například současně uzavřely všechny dálnice vedoucí přes Jacksonville a Lake City na Floridě, neizolovalo by to jen tato města; celý poloostrov Florida by zůstal po dálnici nedosažitelný z celého zbytku Spojených států. Takováto fragmentace je dobře známou vlastností sítí postižených závadami, což je téma podrobně studované jak matematiky, tak fyziky. Obecně řečeno otázka zní, jak dlouho bude trvat, než se síť rozpadne na kusy, když budeme náhodně odstraňovat uzly. Kolik směrovačů musíme z internetu odstranit, abychom jej rozdrobili na jednotlivé počítače, které spolu nedokážou komunikovat.

Je jasné, že čím více uzlů odstraníme, tím pravděpodobněji osamostatníme velké skupiny uzlů. Desítky let výzkumu náhodných sítí však ukázaly, že rozpad sítě není postupný proces. Odstraníme-li pár uzlů, bude to mít jen malý dopad na celistvost sítě. Avšak když dosáhne počet odstraněných uzlů kritického bodu, systém se náhle rozpadne na malé nesouvisející ostrůvky. Poruchy v náhodných sítích jsou příkladem obráceného fázového přechodu. Existuje kritický práh chyb, pod nímž je systém poměrně neporušený. Nad tímto prahem se však síť naráz zhroutí.

Motivováni projektem pro DARPA jsme v lednu 2000 provedli sérii počítačových experimentů, abychom prověřili odolnost internetu vůči selhání směrovačů. Vyšli jsme z nejlepší dostupné mapy internetu a odstraňovali jsme náhodně vybrané uzly sítě. Očekávali jsme kritický bod, postupně jsme zvyšovali počet odstraněných uzlů a čekali jsme na okamžik, kdy se internet rozloží. K našemu velkému úžasu se síť ne a ne rozpadnout. Mohli jsme odstranit až 80 % všech uzlů, a zbývajících 20 % stále drželo pohromadě a tvořilo pevně pospojovaný shluk. Toto zjištění se shodovalo se stále sílícím vědomím, že internetu, na rozdíl od mnoha jiných člověkem vytvořených systémů, je vlastní vysoký stupeň robustnosti vůči selhání směrovačů. Výzkum prováděný na Michiganské univerzitě v Ann Arboru opravdu prokázal, že v každém okamžiku jsou stovky internetových směrovačů porouchané. Navzdory těmto častým a nevyhnutelným poruchám uživatelé zřídkakdy postřehnou významné narušení internetových služeb.

Brzy bylo jasné, že nejsme svědky chování charakteristického jen

pro internet. Počítačové simulace, které jsme prováděli na sítích vznikajících v bezškálovém modelu, ukázaly, že podstatná část uzlů se dá náhodně odstranit z *jakékoli bezškálové sítě*, aniž by se rozpadla. Tato neočekávaná robustnost vůči selhání znamená, že bezškálové sítě jsou obdařeny vlastnostmi, které je odlišují od náhodných sítí. A protože internet, web, buňka a lidská společnost jsou, jak známo, bezškálové sítě, znamená to, že jejich dobře známá odolnost vůči chybám je přímým důsledkem jejich topologie - což je dobrá zpráva pro ty, kdo na těchto sítích závisejí.

* * *

Kde se tato úžasná *topologická stabilita* bere? To, co je pro bezškálové sítě typické, je přítomnost center, několika málo vysoce propojených uzlů, které drží tyto sítě pohromadě. Poruchy však nečiní rozdíl mezi uzly, ale postihují se stejnou pravděpodobností malé uzly i velká centra. Jestliže naslepo vytáhnu deset kuliček z pytlíku s 10 červenými a 9 990 bílými kuličkami, v 99 případech ze 100 budu mít v ruce pouze bílé kuličky. Tedy postihují-li poruchy v sítích stejně často všechny uzly, je mnohem pravděpodobnější, že budou zlikvidovány malé uzly, protože je jich mnohem víc.

Malé uzly přispívají k soudržnosti sítě jen nepatrně. Rozhodnu-li se uzavřít nějaké náhodně vybrané letiště, bude to s největší pravděpodobností některé z té spousty malých, jako například to v South Bendu v Indianě. Jinde v Americe si stěží všimnou, že schází: i bez něho budete stále moci cestovat z New Yorku do Los Angeles nebo ze Santa Fe do Detroitu. Chybět bude jen cestujícím letícím do South Bendu nebo zpět. I když bude současně zavřených až deset nebo dvacet menších letišť, ovlivní to jen malý zlomek leteckého provozu.

Podobně v bezškálových sítích postihuje selhání převážně početné malé uzly. Tyto sítě se tedy při poruchách nerozpadnou. Ani náhodné odstranění jediného centra nebude žádná tragédie, protože kaskáda několika velkých center bude udržovat síť pohromadě. Topologická stabilita vyrůstá ze strukturální nerovnoměrnosti bezškálových sítí: selhání postihuje mnohem více malé uzly.

Naše počítačové simulace ponechávaly nezodpovězenou jednu klíčovou otázku, a to zda je všem bezškálovým sítím vlastní stejný stupeň odolnosti k chybám. Na odpověď jsme však nemuseli dlouho čekat. Týden předtím, než vyšel náš článek, jsem dostal e-mail od

Shloma Havlina, profesora fyziky na Bar-Ilanově univerzitě v Ramat Ganu v Izraeli, a v něm jsem našel řešení problému. Havlin, bývalý prezident Izraelské fyzikální společnosti, je jedním ze světově proslulých expertů v teorii perkolace,* fyzikálním oboru, který rozvinul soubor nástrojů, které se nyní uplatňují při studiu náhodných sítí. Ve skutečnosti bylo mnoho výsledků získaných Erdősem a Rényim od té doby nezávisle znovuobjeveno fyziky studujícími perkolaci.

Havlin si rychle uvědomil, že bezškálové sítě musí na selhání odpovídat speciálním způsobem. Společně se svými studenty Reuvenem Cohenem a Kerenem Erezem a se svým bývalým studentem Danielem ben-Avrahamem, dnes profesorem fyziky na Clarksonově univerzitě, se pustili do výpočtů, jakou část uzlů je třeba odstranit z libovolně zvolené sítě, ať už náhodné nebo bezškálové, aby se tato síť rozpadla na kusy. Jejich výpočet především objasnil známý výsledek, že náhodné sítě se rozpadají, jakmile se odstraní kritické množství uzlů. Na druhé straně zjistili, že pro bezškálové sítě zmizí kritický práh tehdy, je-li exponent rozdělení konektivity menší nebo rovný 3. Fantastické na tom je, že zajímavé sítě, od internetu po buňku, jsou většinou bezškálové a mají exponent menší než 3. Takže tyto sítě se rozpadnou, teprve až odstraníme *všechny* uzly - z praktického hlediska nikdy.

* * *

MafiaBoy, montrealský mladík zodpovědný za útoky na Yahoo!, eBay a Amazon.com, byl odsouzen následující den po teroristickém útoku z 11. září 2001 na Světové obchodní středisko a Pentagon. Za trest musel strávit osm měsíců ve vězení pro mladistvé a věnovat 250 dolarů na dobročinné účely. Před vynesením rozsudku prohlásil soudce Gilled Oullet, že jeho „útok oslabil veškerý elektronický komunikační systém". Navzdory tomuto a mnoha podobným tvrzením

* Co je to perkolace, si můžeme představit na jednoduchém příkladu: Desperát z westernu šplhá po závěsu, aby unikl pronásledovatelům. Šerif jej chce dostat živého, jeho muži tedy nestřílejí na padoucha, ale na závěs. Kolik děr musí svými kolty do závěsu udělat, aby zločince dostali? Okamžik, kdy je závěs natolik děravý, že se přetrhne, se nazývá perkolační práh. Matematická analýza tohoto problému ukazuje, že jde o zvláštní druh fázového přechodu z celistvého do „potrhaného" stavu (pozn. překl.).

však MafiaBoy v žádném okamžiku nepředstavoval hrozbu pro internet. Třebaže způsobil dočasnou nedostupnost několika prominentních webových serverů, jeho činnost nikdy nepoškodila infrastrukturu. Důsledky jeho útoků se ani zdaleka nemohly srovnávat s tím, co se všechno mohlo stát při operaci „Kvalifikovaný likvidátor" o dva roky dříve.

V létě roku 1997 začaly prosakovat zvěsti o bojové hře vypracované Národním bezpečnostním úřadem (NSA), která měla za úkol testovat bezpečnost elektronické infrastruktury Spojených států. Vzájemně si odporující inzeráty naznačovaly, že NSA si najala něco mezi pětadvaceti a padesáti počítačovými odborníky, aby provedli koordinovaný útok na neutajené systémy země, například sabotáž proti elektrorozvodné soustavě, proti jednotnému systému tísňového volání (911) a podobně. Cvičení zvané „Kvalifikovaný likvidátor" údajně předvedlo, že nepříliš důmyslní protivníci mohli docela dobře s použitím běžně dostupných prostředků provést takovýto koordinovaný a potenciálně zničující útok, který by mohl vyústit v naprostý rozvrat vojenských komunikačních systémů a jiné kritické infrastruktury Spojených států.

MafiaBoy nanejvýš znepříjemňoval uživatelům život, když se nemohli dostat ke svým oblíbeným stránkám. Útok „Kvalifikovaného likvidátora" naproti tomu ukázal děsivou zranitelnost životně důležitých tepen amerických ekonomických a bezpečnostních systémů. Žádný z těchto útoků nemířil na náhodně vybrané uzly. Intuitivně bylo jejich cílem decimovat centra.

* * *

Napodobením činnosti crackera,* který odepisuje postupně jedno za druhým největší centra internetu, jsme se pustili do nové série experimentů. Tak jako MafiaBoy a ti, kdo se účastnili akce „Kvalifikovaného likvidátora", jsme už nevybírali uzly náhodně, ale mířili jsme rovnou na centra. Nejdříve jsme odstranili největší centrum, po

* Slovo *cracker* se v poslední době používá k označení jedinců, kteří využívají své znalosti k tomu, aby pronikli do počítačových systémů se zločinnými úmysly, například aby je vyřadili z provozu nebo způsobili jinou škodu. Naproti tomu slovo *hacker* má pozitivní význam a označuje jednotlivce s vynikajícími počítačovými schopnostmi, kteří testují meze našeho internetového vesmíru, aniž by škodili jiným počítačům nebo překáželi jiným uživatelům (pozn. aut.).

něm druhé největší atd. Důsledky našeho útoku byly nabíledni. Odstranění prvního centra sice ještě nevedlo k rozpadu systému, protože ostatní centra stále ještě držela síť pohromadě, ale když odpadlo několik dalších center, byl účinek narušení jasný. Od sítě se odlamovaly velké fragmenty, které už nebyly spojené s hlavním a největším shlukem. Když jsme zašli ještě dál a odstranili ještě více center, byli jsme svědky prudkého kolapsu sítě. Kritický bod, který zřetelně chyběl v případě náhodných poruch, se najednou znovu objevil při soustředěném útoku na síť. Odstranění několika center rozmetalo síť na nepatrné izolované kousíčky.

Zatímco současné vyřazení letišť v Santa Fe a South Bendu by sotva vzbudilo pozornost, kdyby bylo jen na pár hodin uzavřeno O'Hareovo letiště v Chicagu, byla by to zpráva pro titulní stránku novin a ovlivnilo by to letecký provoz v celé zemi. Kdyby se z nějakého důvodu současně zastavila letiště v Atlantě, Chicagu, Los Angeles a New Yorku, i kdyby všechna ostatní letiště zůstala v činnosti, pak by letecký provoz ve Spojených státech během pár hodin zkolaboval. Naše počítačové simulace naznačovaly, že před stejným problémem stojíme i na internetu. Kdyby crackeři úspěšně zaútočili na největší internetová centra, způsobili by patrně nesmírnou zkázu. A nebyl by to důsledek špatné konstrukce nebo slabých míst v internetových protokolech; tato zranitelnost tváří v tvář útoku je neoddělitelnou vlastností všech bezškálových sítí.

Stejně prudký rozpad jsme pozorovali, když jsme odstranili vysoce zapojené proteiny ze sítě interakcí proteinů kvasinkové buňky. Totéž zhroucení viděli ekologové, když odstranili vysoce propojené uzly potravních sítí. Dva následující články, jeden z Havlinovy výzkumné skupiny a druhý od Duncana Callawaye z Cornellovy univerzity, který spolupracoval s Markem Newmanem, Stevenem Strogatzem a Duncanem Wattsem, poskytly tomuto pozorování analytický podklad. Ukázaly, že když se jeden po druhém odstraňují největší uzly, v jistém kritickém bodě se síť rozpadá. Odezva bezškálových sítí na útoky se tedy podobá chování náhodných sítí při poruchách. Je tady ale jeden zásadní rozdíl. Abychom dospěli do kritického bodu, nemusíme odstranit velký počet uzlů. Stačí zneškodnit pár center, a bezškálová síť se okamžitě rozpadne.

* * *

Několik dní poté, co jsme odeslali článek popisující toleranci komplexních sítí k chybám a útokům, zamítli v DARPA náš projekt. Článek nám však rychle otiskli v *Nature* a skvěl se na titulní straně. Rozhodnutí představitelů DARPA mě sice mrzelo, ale nemohl jsem se na ně zlobit, protože počátkem roku 2000 nemohl ještě nikdo tušit, jakou významnou roli budou hrát bezškálové sítě při hledání způsobů, jak přežít útok a jak nebýt ohrožen poruchami. A to, že internet je bezškálová síť, v té době nevědělo víc než jen pár vědců a důsledky tohoto faktu ještě vůbec nebyly prozkoumané. Teprve dnes, o desítky výzkumných projektů později, začínáme rozumět tomu, co tento objev znamená.

Ve svém souhrnu tyto výsledky naznačují, že bezškálové sítě nejsou citlivé k poruchám. Za tuto úžasnou odolnost platíme zranitelností při cíleném útoku. Odstranění nejvíce propojených uzlů vede k rychlému rozpojení těchto sítí a k jejich rozpadu na malé nekomunikující ostrůvky. Struktura bezškálové sítě tudíž skrývá neočekávanou Achillovu patu, spojující robustnost vůči selháním s citlivostí k útokům.

Koexistence robustnosti a zranitelnosti hraje klíčovou roli, chceme-li pochopit chování většiny komplexních systémů. Simulace ukázaly, že proteinová síť se nerozpadne při náhodných mutacích genů. Z této klíčové buněčné sítě můžeme ve skutečnosti odstranit řadu uzlů, aniž bychom organismus zabili. Jestliže však nějaká droga či nemoc vypne geny kódující proteiny s největším počtem vazeb, buňka nepřežije. Podobné simulace, které prováděli na potravních sítích Ricard V. Solé a José M. Montoya z Katalánské polytechnické univerzity v Barceloně, ukázaly, že ekosystémy bez problémů přežijí náhodné odstranění jednotlivých druhů. Jsou-li však odstraněny rozhodující vysoce zapojené druhy, ekosystém se rázem zhroutí.

Podrobně se studoval případ mořské vydry v Kalifornii. Vydry během 19. století téměř vymizely kvůli nadměrnému lovu pro jejich kožešiny. Poté co federální úřady roku 1911 zakázaly další vybíjení tohoto nádherného stvoření, vydry se rychle vrátily. Protože se živí mořskými ježovkami, vedlo rozmnožení vyder ke snížení populace ježovek. A když bylo méně ježovek, narostlo mnohem více chaluh, jimiž se ježovky s oblibou živí. Tím přibylo potravy pro ryby a pobřeží bylo chráněno proti erozi. Takže ochrana jednoho jediného druhu, centra sítě, citelně proměnila jak ekonomii, tak ekologii pobřeží.

V pobřežním rybolovu, který se kdysi věnoval škeblím, dnes dominují ryby.

Bezškálové sítě jsou sice citlivé k útokům, musí být však *současně* odstraněno několik největších center, aby došlo k jejich zničení. Často to vyžaduje současné vyřazení až 5 % nebo i 15 % všech center. Crackeři by tedy možná potřebovali atakovat a zneškodnit několik set internetových směrovačů, a to by jim mohlo trvat dosti dlouho. Mohlo by se zdát, že navzdory své Achillově patě skrývá topologie internetu silnou obranu jak proti náhodným poruchám, tak proti zákeřným útokům. Bohužel při důkladném zkoumání se ukazuje, že tomu tak ve skutečnosti není. Jak uvidíme dále, spoléhat na topologickou stabilitu vůči útokům je sázka na špatnou kartu.

* * *

Ačkoli se zpočátku spekulovalo o všem možném, od mimozemšťanů po teroristy, ukázalo se, že výpadek proudu v roce 1996 nebyl výsledkem organizovaného útoku. Jak známo, dráty se teplem natahují. A zahřívat se a protahovat se mohou, nejen když je hodně horko, ale i když jimi protéká velký proud. Jednoho rekordně horkého dne, 10. srpna 1996 v 15 hodin 42 minut a 37 vteřin, se vedení energetické společnosti Allston-Keeler v Oregonu natáhlo a prověsilo natolik, že se téměř dotýkalo stromu. Vyšlehl pořádný blesk a 1 300megawattové vedení zmrtvělo. Protože elektřina se nedá skladovat, musely tento enormní výkon okamžitě převzít jiné linky. Automatický dispečink přesměroval proud na vedení o nižším napětí, 115 a 230 kilovoltů, na východ od Kaskádových hor.

Tato elektrická vedení ale nebyla stavěná na takovýto nadměrný výkon po delší dobu. Když tepelné ztráty dosáhly 115 % povolené hodnoty, vedení se zhroutilo. Porouchalo se relé na 115kilovoltovém vedení a kvůli nadměrnému výkonu se přehřála už tak přetížená linie Ross-Lexington a také spadla na strom. A pak už se pohromy valily jedna za druhou. Porouchalo se třináct generátorů na přehradě McNary, takže výkon a napětí začaly kolísat a fakticky se rozpojilo elektrické vedení mezi severem a jihem pacifického pobřeží poblíž hranice Kalifornie a Oregonu. Západní síť se tím rozpadla na izolované kusy a výpadek proudu zasáhl jedenáct států USA a dvě kanadské provincie.

Výpadek z roku 1996 je typickým případem toho, čemu vědci čas-

to říkají *kaskádové selhání*. Když síť funguje jako dopravní systém, přesouvá lokální selhání zátěž a zodpovědnost na jiné uzly. Je-li nadbytečná zátěž zanedbatelná, zbytek systému ji hladce absorbuje a selhání si prakticky nikdo nevšimne. Je-li nadbytečné zátěže víc, než dokážou sousední uzly unést, pak buď přestanou odpovídat, nebo zátěž opět rozloží na své sousedy. Ať tak či onak, máme co dělat s kaskádovou událostí, jejíž velikost a dosah závisí na tom, do jaké míry jsou první odstraněné uzly centry sítě a jaká je jejich kapacita.

Kaskádová selhání nepostihují jen elektrorozvodné sítě. Porouchaný směrovač automaticky přiměje internetový protokol k tomu, aby chybějící uzel obešel a posílal pakety jiným směrovačům. A byl-li pokažený směrovač hodně vytížený, pak jeho výpadek silně zasáhne jeho sousedy. Směrovače se pod příliš velkým zatížením nehroutí, ale vytvoří prostě frontu a zpracovávají jen tolik paketů, kolik zvládnou, a zbytek nechávají být. Když se tedy na směrovač pošle příliš mnoho síťového provozu, funguje to jako útok typu odepření služby. Jen malé části paketů se podaří projít. Protože odesilatel ztracených paketů nedostane potvrzení, že jeho zpráva dorazila, posílá ji znova a tím zácpu jen zhoršuje. Odstranění několika velkých uzlů tudíž snadno způsobí stejně katastrofické narušení internetu jako to, které napáchal pád vysokonapěťového vedení v Oregonu elektrorozvodnému systému.

Kaskádová selhání bývají častá v ekonomice. Řada lidí přisuzuje východoasijskou ekonomickou krizi v roce 1997 (o níž budeme mluvit podrobněji ve 14. kapitole) tlaku Mezinárodního měnového fondu (MMF) na centrální banky několika východoasijských zemí, což omezilo jejich možnosti zasáhnout ve prospěch ohrožených bank. Tyto banky pak stáhly půjčky firmám, a tím se rozhodnutím MMF, pravděpodobně největšího finančního centra, spustila lavina bankrotů bank a společností.

Kaskádová selhání jsou dobře známým jevem i v živých systémech a ovlivňují stejnou měrou ekologická společenstva i buňku. Jak jsme už viděli v případě mořské vydry, odstranění některých druhů může spustit řetězec událostí, které nakonec vyvolají zásadní reorganizaci ekosystému. Podobně když se náhle změní koncentrace nějaké látky, může to vyústit v kaskádu událostí, které mohou způsobit smrt buňky.

Samozřejmě, pravděpodobnost, že lokální selhání ochromí celý systém, je mnohem větší, jsou-li narušeny nejvíce propojené uzly. To

potvrdily výsledky Duncana Wattse z Columbijské univerzity, který zkoumal model vytvořený k popisu typických rysů kaskádových selhání, jako jsou výpadky proudu, nebo opačných jevů, lavinové popularity knih, filmů a desek, což lze také popsat v rámci téhož schématu. Jeho simulace ukázaly, že většina lavin nevzniká v jediném okamžiku: pod nohama vám to může dlouhou dobu nepozorovaně praskat, než se utrhne lavina. Snaha snížit frekvenci takových lavin však nevyhnutelně vede k tomu, že laviny, které se přece jen utrhnou, jsou o to ničivější.

Některým rysům kaskádových selhání už sice rozumíme, ale naše znalosti jsou přesto dost omezené. Topologická robustnost je strukturální vlastností sítí. Kaskádová selhání jsou však vlastností dynamiky komplexních systémů, což je poměrně neprozkoumaný terén. Nepřekvapilo by mě, kdybych se dozvěděl o dosud neznámých zákonech, které řídí kaskádová selhání. Objev takových zákonů by měl hluboké důsledky v mnoha oborech, od internetu po obchod.*

* * *

Z tolerance k chybám, jak jsme ji poznali v této kapitole, můžeme mít upřímnou radost. Robustnost sítí znamená, že když v našem těle přestanou fungovat nějaké chemikálie a naskočí nám vyrážka nebo se objeví nějaké jiné menší podráždění, budeme pořád schopni vykonávat svou běžnou denní práci. Robustnost sítí vysvětluje, proč si zřídka všimneme chyb směrovačů a proč vymizení několika druhů nevede k ekologické katastrofě.

Cenou za tuto topologickou stabilitu je extrémní bezbrannost vůči útokům. Když vyjmeme sérii vysoce zapojených center, rozrušíme každý systém. To je špatná zpráva pro internet, protože to crackerům umožňuje vyvinout strategie schopné poškodit celou infrastrukturu. Je to špatná zpráva i pro podnikatelské kruhy, neboť to znamená, že někdo, komu jsou trnem v oku základní ekonomické sítě, může vymyslet strategii, jak je vyřadit z provozu. Výsledky výzkumu popsané v této kapitole nás tak přivedly k pochopení, že topologie, robustnost a zranitelnost od sebe nelze plně oddělit. Všechny

* Řadu poznatků v tomto směru nám poskytuje teorie tzv. *samoorganizovaného kritična*, viz např. knihu Peter Coveney a Roger Highfield, *Mezi chaosem a řádem*, Praha 2003 (pozn. překl.).

komplexní systémy mají svou Achillovu patu. Poznali jsme důležitost topologie a přimělo nás to, abychom věnovali větší pozornost centrům. To je první krok k tomu, abychom je chránili.

Teroristické útoky z 11. září 2001 zároveň ukázaly jak sílu center, tak odolnost sítí. Cíle útoků nebyly rozhodně zvoleny náhodně: byly to ty nejviditelnější symboly ekonomické moci a bezpečnosti Spojených států. Tím, že se na ně teroristé zaměřili, se snažili narušit centra globálního kapitalismu. Způsobili sice lidskou tragédii mnohem větší než cokoliv, co zažily Spojené státy za posledních dvacet let, to hlavní se jim ale nepodařilo: nerozvrátili síť. Odstartovali však kaskádu selhání, která se od té doby stále šíří světem. Ale navzdory zničení dvojice věží Světového obchodního centra všechny sítě, od internetu po propletenou pavučinu ekonomiky, přežily a jasně tak demonstrovaly zásadní rozdíl mezi zranitelností centralizovaného lidského plánování a odolností samoorganizované stavby sítí.

Pokud se věda může něco naučit z událostí 11. září, pak to, že jsme stále ještě daleko od opravdového pochopení rovnováhy mezi robustností a zranitelností. Jistě, vědci nedávno odhalili základní principy robustnosti. Rozumíme základní roli, kterou hrají sítě při zabezpečení odolnosti, což je pokrok, který má stálou platnost. Dosud nám však unikal nejdůležitější krok, totiž jak tyto znalosti uplatnit v praxi. Nikdo by nebyl s to předvídat, kam až by zašly kaskády pohrom, které by mohly způsobit teroristické útoky. Jak se události postupně vyvíjely, všichni je v hrůze sledovali a kladli si tutéž otázku: Co přijde pak? Jak jsme zranitelní? Naštěstí naše znalosti o poruchách a útocích ukazují, že kaskádová selhání a lokální poruchy lze uchopit jazykem vědy. Pochopení těchto problémů tedy závisí jen na nasměrování prostředků na správné otázky. A jak nás události z 11. září vedou k otázkám, kolik toho naše sítě vydrží, nepochybně toho budeme vědět čím dál tím víc.

Vlákno desáté

Viry a módní vlny

Gaetan Dugas měl všechno, co si jen mohl přát, a také si toho byl vědom. V oblecích vybíraných v těch nejelegantnějších obchodech Londýna a Paříže a s dobře stavěným, ale nikoli nadmíru svalnatým tělem byl ozdobou každého klubu. Stačilo, aby řekl pár slov svým půvabným francouzsko-kanadským přízvukem, a mohl svést kohokoli. „Jsem nejkrásnější," vychloubal se a jeho přátelé mu dávali za pravdu. Pak se však začal vyhýbat populárním diskotékám a nejvyhlášenějším nočním klubům. Jeho oblíbenými místy se teď stala orosená zrcadla a těžký vzduch lázeňských domů v Bay Area. Navzdory své narcisistické dokonalosti si začínal libovat v temnějších prostorách, které odhalovaly jen málo z jeho okouzlujících fyzických stránek. Nejvíce mu nyní vyhovovaly dlouhé chodby potemnělých kabinek. Jedné noci roku 1982, když se chystal k odchodu z jedné z těchto kabin, rozsvítil světla, zvolna se obrátil k muži, jehož pár minut předtím viděl poprvé v životě a s nímž se hned vyspal, a ukázal na zarudlá místa a boláky na tváři. „Mám rakovinu homosexuálů," řekl. „Zemřu a ty zemřeš taky."

Dugas, francouzský Kanaďan, který kdysi létal jako steward, bývá často označován za nultou oběť epidemie AIDS. Nebylo to ani tak proto, že byl prvním člověkem s touto diagnózou, ale spíš proto, že nejméně 40 z 248 osob s diagnózou AIDS do dubna 1982 mělo pohlavní styk buď s ním, nebo s někým, s kým ho měl on. Byl středem vznikající komplexní sexuální sítě homosexuálních mužů, pavučiny zavěšené mezi východním a západním pobřežím Severní Ameriky, zahrnující San Francisco, New York, Floridu a Los Angeles.

Jeho ústřední role není vůbec náhodná. Dugas byl jedním z prvních severoamerických homosexuálů, u nichž byl diagnostikován Kaposiho sarkom. V roce 1983 už bylo čím dále jasnější, že nemoc, která sklátila Dugase a několik set dalších homosexuálů, má nějaký infekční původ, a Dugas byl jedním z prvních pacientů, kterým to řekli. On však stále trval na tom, že má jen rakovinu kůže. Protože rakovina není nakažlivá, po řadu let si vůbec nepřipouštěl, že by

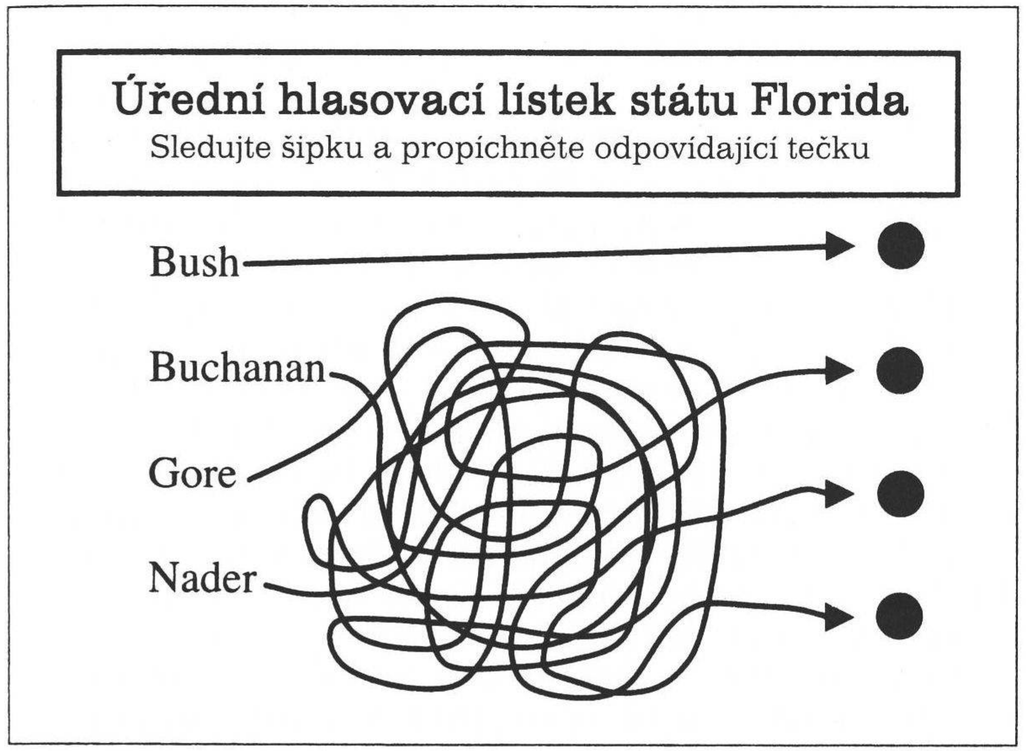
představoval nějaké riziko pro své sexuální partnery. Hrdý na svou přitažlivost a své sexuální výboje, svěřil později ošetřujícímu personálu intimní detaily svých sexuálních zvyků. Vypočítal, že míval kolem 250 sexuálních partnerů ročně. Zatímco podle některých odhadů dosáhl počet jeho partnerů až 20 000, deset let jeho promiskuitního života v klubech homosexuálů a lázních jej přivedlo k sexuálním kontaktům nejméně s 2 500 lidmi.

Není jasné, zda Dugas přinesl AIDS do Severní Ameriky. Často cestoval do Francie, kde se objevily některé z prvních případů, ale nikdy nebudeme vědět jistě, zda se nakazil tam, nebo ve Spojených státech. Co ale víme, je to, že mnoho z prvních případů v Severní Americe s ním souvisí, což znamená, že stál u kořenů epidemie, která do dnešního dne zahubila téměř 20 milionů lidí.

Dugas sehrál významnou roli v tom, že epidemie AIDS se z nejasné a vzácné „rakoviny homosexuálů" stala pohromou severoamerického zdravotnictví. Je děsivým příkladem selhání klasických modelů epidemií a živým důkazem významu center v naší vysoce pohyblivé a propojené společnosti. Skutečně, co se týče virů a epidemií, existence center zásadně mění situaci.

* * *

Stejně jako miliony jiných Američanů, viděl i Mike Collins v televizi 8. listopadu 2000 večer obrázek kontroverzního floridského volebního lístku. Jeho reakce byla: „To mě podrž, jak to, že nedokázali sledovat šipky k puntíkům? Možná že nakreslím něco, co bude ještě zmatenější." Collins, šestadvacetiletý inženýr z městské vodárny a amatérský karikaturista z Elmiry ve státě New York, nakreslil čtyřřádkovou karikaturu a rozeslal ji e-mailem třiceti přátelům. Následujícího dne měl narozeniny a jeho sestře se narodila dcera, takže nebyl celý den doma. Když se večer vrátil domů, čekal na něj obrovský dárek: 17 000 nových návštěv na jeho webové stránce a několik set e-mailů. Zatímco byl pryč, jeho karikatura, která dokonale vystihovala všeobecnou frustraci z prezidentských voleb roku 2000, oběhla celou planetu. Každý, kdo ji zahlédl, ji chtěl mít. Noviny a webové servery od Spojených států po Japonsko jej bombardovaly žádostmi o povolení k otištění. Během několika hodin se z „Mikea" stala okamžitá hvězda, děvčata se mu věšela na krk a rodiče se ho snažili dát dohromady se svými dcerami. Zatímco volební debata nakonec utichla, Collinsova trefná kresba se stala možná nejznámější americkou karikaturou desetiletí a objevovala se všude, od triček, která prodává přes svou webovou stránku, až po pohlednice. Až budeme vzpomínat na nešťastný floridský volební lístek z roku 2000, vybaví se nám nejspíš právě Collinsova karikatura.



Floridský hlasovací lístek. Karikatura Mikea Collinse zesměšňuje zmatené hlasovací lístky používané v prezidentských volbách roku 2000 (přetištěno se svolením Mikea Collinse).

Okamžitá cesta Mikea Collinse ke slávě je dalším příkladem klasického amerického snu. Co je ale neobvyklé, je rychlost, s jakou se uskutečnil. Před několika desítkami let si těžko mohl někdo získat celosvětovou slávu doslova přes noc, a to i v Americe. Něco se tedy změnilo. Normálně tyto změny přisuzujeme internetu a je určitě pravda, že toto médium živí a šíří věhlas. Ale vysvětlení založené jen na technice nestačí. Jsme svědky čehosi kvalitativně nového, čehosi, co dovoluje myšlenkám a módním vlnám dostat se ke komukoli rychlostí světla.

* * *

Gaetan Dugas a Mike Collins nemají na první pohled nic společného. Jeden rozšiřoval zákeřnou nemoc, ten druhý, maloměstský amatér, udělal díru do světa s chytrým nápadem. Nemoci AIDS trvalo desetiletí, než se vynořila ze svého afrického zdroje a pronikla do celého světa, jak od jednoho partnera postupovala k druhému převážně prostřednictvím pohlavního styku. Collinsova karikatura zazářila přes noc a obletěla svět elektronickou poštou a klikáním myši. Přece je však něco spojuje. Oba jsou příklady difuze na složité síti. AIDS se šířil podél vazeb komplikované sexuální sítě osmdesátých let a napomohl mu vznik vysoce sexuálně aktivní homosexuální kultury. Volební karikatura se šířila okamžitě propletenou sítí počítačů a pomáhala jí naše schopnost kontaktovat své přátele e-mailem. Oba případy se však řídily stejnými základními zákony, které ovládají šíření módních vln, myšlenek a epidemií v komplexních sítích. Tyto zákony intenzivně zkoumali pracovníci marketingu, kteří se snažili přijít na to, jak dostat svůj produkt do vašeho nákupního košíku, sociologové snažící se pochopit módní vlny, změny vkusu a pouliční nepokoje, politologové pátrající po schématech chování při volbách a příčinách politického úspěchu, lékaři a epidemiologové, kteří doufají, že se jim podaří zkrotit nemoci, od eboly po každoroční zimní chřipku, mládež vymýšlející počítačové viry, které by přes noc zlikvidovaly všechny produkty Microsoftu, i správci systémů rozhodnutí právě tohle virům znemožnit. Myslelo se, že tyto zákony jsou univerzální, a to skutečně jsou, ale naše rozrůstající se vědomosti o komplexních sítích nás přiměly vidět je z jiného úhlu.

* * *

Zatímco v roce 1933 se v celé Severní Americe hybridní kukuřice pěstovala jen na 16 000 hektarech, do roku 1939 dosáhla výměra této sorty 10 milionů hektarů, celé čtvrtiny veškeré plochy oseté kukuřicí. Znamenalo to revoluci a úplnou proměnu amerického farmářství, která nakonec v necelých deseti letech zasáhla veškeré zemědělství Středozápadu. Zvlášť rychlá v tom byla Iowa. Ačkoli nové osivo bylo k dispozici až po roce 1929, do roku 1939 bylo 75 % výměry kukuřice oseto hybridem. Toto rychlé rozšíření, doprovázené dobrou evidencí, kterou si farmáři vedli, umožnilo poprvé zkoumat šíření inovací. Roku 1943 se do tohoto studia pustili Bryce Ryan a Neal C. Cross z Iowa State College.

Než akceptujeme nějakou inovaci, položíme si obvykle několik jednoduchých otázek: Mám věnovat čas zkoušení nového produktu? Mám za něj utrácet peníze? Jak vím, že mi bude sloužit tak, jak mi slibují? Hybrid vzbuzoval úplně stejné otázky. Když na něj chtěli přejít, museli farmáři investovat do nového osiva namísto toho, co už měli. Ačkoli záměna slibovala větší a vydatnější úrodu, byla malá záruka, že zvýšené zisky převýší počáteční investici. Riziko bylo zvlášť citelné pro ty, kdo přešli na hybrid jako první. Nicméně hybrid zapustil v Iowě kořeny díky malé skupině lidí ochotných podstoupit riziko. Dnes takovým lidem říkáme novátoři.

Každý z nás zná nějaké novátory. Jsou to ti z našich známých, kdo skočili po kapesním počítači Apple Newton, aby vzápětí shledali, že technika nesplnila, co slibovala. O pár let později jako první čmárali písmena na šedivý displej prvních Palm Pilotů, což tentokrát rázem odstartovalo revoluci kapesních počítačů neboli handheldů. Novátory jsou mladí lidé, kteří přebírají nové trendy, ještě než se z nich stane střední proud, umělci a intelektuálové, kteří tříbí myšlenky mnohem dříve, než se dostanou k nám ostatním díky knihám, filmům a časopisům. V Iowě to byli farmáři, jimž stačilo promluvit si s obchodníky a přečíst si dokumentaci, aby byli rozhodnuti nové osivo vyzkoušet.

Ryan a Cross zjistili, že když vynesou do grafu počet farmářů používajících nové osivo v jednotlivých letech, dostanou křivku, která rychle vzrůstá, až dosáhne maxima, a pak stejně rychle klesá. Je to zvonovitá křivka. Jestliže produkt projde základní zkouškou u novátorů, pak jej na základě jejich doporučení přijmou první uživatelé. Po nich následuje početná většina, až je zapojena polovina lidí ze všech, kteří se mají celkem přidat. Po tomto okamžiku začíná počet lidí, kteří se přidávají, klesat. Inovace přitahuje ty, kdo se rozhodují pomalu, ale množství důkazů svědčících v její prospěch je přiměje k činu. Tuto druhou polovinu tvoří farmáři, kteří vidí, že polovina polí kolem nich přešla na hybrid, a to je přesvědčí. Křivka nevyhnutelně končí několika opozdilci, kteří se přidají, teprve když se dostanou do jasné menšiny.

Zvonovitá křivka pozorovaná Ryanem a Crossem není typická jen pro farmáře v Iowě. Charakterizuje šíření většiny inovací a představuje výborný nástroj, díky němuž odborníci na plánování a marketing předpovídají poptávku po novém produktu. Nedokáže však odpovědět na to, co dnes touží vědět každý, od epidemiologů po

výkonné ředitele: Jakou roli hrají při šíření virů či inovací sociální sítě?

* * *

V roce 1954 dal Elihu Katz, badatel Ústavu pro aplikovaný sociální výzkum na Columbijské univerzitě, do oběhu návrh studovat vliv sociálních vazeb na lidské chování. A protože ředitel průzkumu trhu u farmaceutického giganta jménem Pfizer byl náhodou absolventem této univerzity a byl velice dychtivý pochopit, jak lékaři uvádějí do praxe nová léčiva, nabídl Katzovi a jeho dvěma kolegům, Jamesi Colemanovi a Herbertu Menzelovi, 40 000 dolarů, když vystopují šíření tetracyklinu, účinného antibiotika zavedeného v polovině padesátých let.

Coleman, Katz a Menzel dělali rozhovory s 125 lékaři z jednoho malého města ve státě Illinois a žádali je, aby zvlášť vyjmenovali tři doktory, s nimiž nejčastěji diskutovali o lékařských postupech, tři, které žádali o radu ohledně nějakého léčiva, a tři, které považovali za přátele. Tyto seznamy jim dovolily rekonstruovat složitou síť sociálních vazeb a ovlivňování v rámci lékařské obce.

Výsledky ukazovaly, že mezi lékaři jsou značné rozdíly. Některé z nich uváděla značná část jejich kolegů jako ty, kdo mají značný vliv na jejich každodenní rozhodování. To byla centra lékařské komunity. Většina však hrála roli mnohem menší. Když se začal rozšiřovat tetracyklin, pak lékaři uvádění jako přátelé třemi či více kolegy přijímali nový lék s třikrát větší pravděpodobností než ti, které neuváděl nikdo.

Ze záznamů o předpisech z lékáren dokázali badatelé sledovat šíření léku podél sociálních vazeb. Ukázalo se, že k prvním uživatelům a k rychlejší polovině většiny se řadili hlavně lékaři s velkým počtem sociálních vazeb. Tito dobře zapojení doktoři byli s větší pravděpodobností ve styku s novátory, a tak se o novém léku dozvěděli dosti rychle. Jakmile si lék osvojili tito lékaři, šířil se z těchto center k jejich méně zapojeným kolegům z pomalejší poloviny. Nakonec přišli váhavci, doktoři, kteří nové léčivo do poslední chvíle odmítali.

Studie firmy Pfizer ukázala, že inovace se šíří od novátorů k centrům. Centra zase svými početnými vazbami rozesílají informaci dál a zasahují tak většinu lidí v rámci dané sociální nebo profesní sítě. Centra, integrální součásti bezškálových sítí, jsou statisticky vzácní jedinci, kteří jsou vysoce zapojení a drží sociální síť pohromadě. V epidemii AIDS se homosexuální steward Gaetan Dugas dá určitě označit za významné centrum. A zcestovalý Pavel, se svým rozsáhlým okruhem přátel a následovníků, byl jedním z nejvlivnějších center raného křesťanství.

Centra, jimž marketingoví odborníci říkají „tvůrci veřejného mínění“, „klíčoví uživatelé“ nebo „ovlivňovatelé“, jsou jednotlivci, kteří si o určitém produktu vyměňují názory s větším počtem lidí než průměrný člověk. Díky svým početným sociálním kontaktům jsou mezi prvními, kdo zaznamenají a využijí zkušenosti novátorů. Třebaže sami nutně novátory nemusí být, jejich obrácení je klíčem k rozběhu nějaké myšlenky nebo inovace. Pokud centra produktu vzdorují, vytvoří natolik neproniknutelnou a účinnou zeď, že inovace musí zkrachovat. A přijmou-li ji centra, ovlivní velké množství lidí.

Sociologové a marketingoví experti si vliv těchto tvůrců veřejného mínění plně uvědomují. Donedávna se však jimi zabývali jako samostatným jevem a příliš nevěděli, proč se vyskytují a kolik jich je. Modely sociálních sítí existenci center nepodporovaly. Schéma předložené bezškálovými sítěmi poskytlo centrům poprvé takovou legitimitu, jakou si zaslouží. Jak uvidíme, centra mění téměř všechny naše vědomosti o šíření idejí, inovací a virů.

* * *

Intenzivně propagovaný kapesní počítač Newton, který spatřil světlo světa roku 1993 jako ideové dítě Johna Sculleyho, výkonného ředitele odchovaného u firmy Pepsi, se nikdy nedožil úspěchu. Přesto však odstartoval revoluci.

Dnes jsou po světě miliony podobných zařízení kapesních rozměrů. Navzdory tomuto obrovskému počtu si spousta lidí myslí, že jsme stále na začátku zvonovité křivky jejich pronikání na trh. Problémem firmy Apple je to, že žádný z těchto užitečných přístrojků není Newton. Palm, Handspring, nejrůznější PocketPC a jejich nespočetní bratránci převzali a přepracovali applovskou vizi, a tím jasně dokázali, že první na tahu nemá vždycky výhodu. V Newtonu, vůbec prvním zařízení svého druhu, se setkalo mnoho nových technologií, které slibovaly, že se sen stane skutečností. Nebylo to ale tak snadné. Noční můra začala sérií špatných recenzí, které se posmívaly

chabým schopnostem tohoto kapesního počítače rozpoznávat rukou psaný text. Kritici poukazovali na to, že hladově spotřebovával baterie po pouhých dvaceti minutách používání. Zklamání střídalo zklamání a prodej MessagePadu, předělané verze Newtona, vrcholil na neveselé hodnotě 85 000 kusů v roce 1995. Po třech letech, poté co byl do funkce prozatímního výkonného ředitele znovu uveden Steve Jobs, byla výroba produktu ve snaze redukovat ztráty zastavena.

Krach handheldu Newton a mnoha jiných produktů si žádá vysvětlení. Proč některé vynálezy, zvěsti a viry obletí planetu, zatímco jiné se rozšiřují jen částečně nebo prostě vymizí? Proč a čím se vítězové liší od poražených? Určitě nestačí svádět vše na reklamu. Newton koneckonců zklamal navzdory enormní marketingové mašinerii duhového jablka Apple. Otázka za miliardu dolarů: Jak rozeznat zkažená jablka?

* * *

Ve snaze vysvětlit vymizení některých módních vln a virů a šíření jiných vyvinuli sociologové a epidemiologové velmi užitečný nástroj zvaný *prahový model*. Lidé se navzájem liší svou ochotou přijímat inovace. Obecně se dá říct, že každého lze přesvědčit, aby přijal novou ideu, pokud se mu předloží dostatek pozitivních důkazů. Přitom se ale od jedné osoby k druhé liší úroveň, kdy začíná svědectví věřit. Model bere naši rozdílnost v úvahu tím, že každému jednotlivci přiřadí určitý práh, který kvantitativně vyjadřuje pravděpodobnost, že danou inovaci přijme. Například ti, kdo si koupili Newton hned po tom, co se dostal na trh, měli práh pro kapesní počítače blízký nule. Většina z nás však vytáhne své kreditní karty, teprve až vidí, jak nový produkt funguje. Většina z nás má tedy vyšší práh.

Navzdory podstatným rozdílům ve svém důrazu a v detailech předvídají všechny modely šíření tentýž jev: každá inovace má dobře definovanou *rychlost šíření*, která představuje pravděpodobnost, že osoba, které bude inovace předvedena, ji akceptuje. Rychlost šíření například zahrnuje pravděpodobnost, že poté co vám ukážou nový handheld, vás to bude ponoukat, abyste si ho koupili. K tomu, abychom rozhodli, jaký osud inovaci potká, ale nestačí pouhá znalost rychlosti šíření. Musíme ještě vypočítat *kritický práh*, veličinu určenou vlastnostmi sítě, v níž se inovace šíří. Jestliže je rychlost šíření inovace menší než kritický práh, inovace se zakrátko ztratí. Jestliže však práh přesáhne, pak počet lidí, kteří si novinku pořídí, bude exponenciálně narůstat - a nakonec ji bude používat každý, kdo jen může.

Poznání, že nutnou podmínkou pro šíření módních vln a virů je překonání kritického prahu, bylo patrně tím nejdůležitějším pokrokem v chápání šíření čehokoli, nemocí, myšlenek či vynálezů. Dnes se kritický práh objevuje ve všech teoriích šíření. Pracují s ním epidemiologové, když modelují pravděpodobnost, že se nová infekce zvrhne v epidemii, jak se to stalo s virem AIDS, hovoří o něm učebnice marketingu, když odhadují šance, že se produkt prosadí na trhu, nebo když vysvětlují, proč se to jiným nepodařilo. Sociologové jej používají k vysvětlení, jak se metody kontroly porodnosti šíří mezi ženami. Odvolává se na něj politologie, když vysvětluje životní cyklus politických stran a hnutí nebo když modeluje pravděpodobnost, že se pokojná demonstrace zvrhne v násilnosti.

Po desítky let ovládalo náš přístup k problémům šíření jednoduché, ale mocné paradigma. Když jsme chtěli odhadnout pravděpodobnost, s jakou se bude inovace šířit, potřebovali jsme znát jen její rychlost šíření a kritický práh, který před ní stojí. Nikdo toto paradigma nezpochybňoval. Poslední doba nás však poučila, že některé viry a inovace na to neberou ohled.

* * *

Virus Love Bug, původem z Filipín, nejškodlivější počítačový virus vůbec, zasáhl v několika hodinách každý počítačem vybavený kout světa. 8. května 2000, jak slunce vycházelo postupně nad všemi kontinenty, se počítače hroutily po tisících. Tento globální dominový efekt se přehnal od východu k západu. Sotva začali experti na počítačovou bezpečnost pomáhat prvním obětem v Hongkongu, už správci systému velkého německého deníku s hrůzou sledovali, jak virus požírá jejich 2 000 digitálních fotografií. Když zasáhl Belgii, ochromil tamější bankomaty a odřízl zoufalé zákazníky od jejich peněz. Londýn, který se probudil o hodinu později, byl svědkem uzavření parlamentu. Než se virus posunul dále z Evropy, bylo v troskách 70 % švédských, německých a holandských počítačů. Apokalypsa se pak přesunula do Spojených států, kde virus pronikl do počítačů na Kapitolu ve Washingtonu, nakazil 80 % všech federál-

ních úřadů, včetně ministerstva obrany a zahraničí, a přerušil e-mailovou komunikaci Bushovy předvolební kampaně.

Love Bug, který celosvětově způsobil škody za více než 10 miliard na 45 milionech zlikvidovaných počítačích, byl velmi dobře vymyšlenou psychologickou nástrahou, které těžko mohl někdo odolat. Copak byste dokázali okamžitě neotevřít zprávu s nadpisem MILOSTNÝ DOPIS PRO VÁS? Pokud jste podlehli pokušení, aktivovaný virus z vašeho harddisku vymazal řadu dokumentů; obzvlášť mu chutnaly soubory typu jpeg a mp3, které obsahují digitální obrázky a hudbu. Pak se virus porozhlédl po e-mailovém programu Microsoft Outlook Express. A jakmile ho našel, zaslal nové kopie milostného dopisu všem přátelům a známým, jejichž e-mailové adresy jste si tam uložili.

Počítačová zhouba se zpomalila, když Richard Cheng a Maricel Soriano z Filipín vytvořili protilátku, program schopný imunizovat počítač proti tomuto škůdci. Na viru Love Bug je však zarážející, že navzdory široce a volně dostupné protilátce stále existuje. Podle *Virus Bulletinu*, internetového zpravodajství, které sbírá informace o výskytu virů, byl v dubnu 2001, rok po zveřejnění programu, který jej detekuje a dezaktivuje, Love Bug stále sedmým nejaktivnějším virem. Dostal jsem ho dokonce ještě v červnu 2001.

Svádí to k úvahám, že je snad Love Bug tak virulentní, že je skutečně nemožné jej vymýtit. Jeho přetrvávání však nelze vysvětlit jen samotnou virulencí, jak zjistili dva fyzici, Romualdo Pastor-Satorras a Alessandro Vespignani, kteří ukázali, že na rozdíl od jasných předpovědí prahových modelů v reálných sítích nezaručuje vysoká virulence šíření viru.

* * *

Jedinečné severoitalské město Terst nemá jen pestrou a bouřlivou historii, je i sídlem prestižního Mezinárodního centra pro teoretickou fyziku. Založil a desítky let jej řídil pákistánský fyzik Abdus Salam, nositel Nobelovy ceny, a fyzikům z rozvojových zemí nabízí bezpečný a intelektuálně stimulující přístav, kde se dostanou do kontaktu s kolegy z celého světa. Španělský fyzik Romualdo Pastor-Satorras ukončil v tomto centru dvouletý postdoktorátní pobyt v roce 1999 a pak se vrátil do Barcelony, kde získal profesuru. V létě 2000 byl v Terstu na dvouměsíční návštěvě, při níž se chystal dokončit několik nedotažených projektů, které se svým vedoucím Alessandrem Vespignanim zahájil za svého dřívějšího pobytu. Když sestavoval seznam literatury pro nový rukopis, náhodou narazil na článek z informatiky s názvem *Otevřené problémy ve výzkumu počítačových virů*, jehož autorem byl Steve R. White, expert na počítačové viry u firmy IBM. Článek dovozoval, že biologicky motivované modely epidemií nepopisují správně šíření viru Love Bug a dalších počítačových virů.

Tento postřeh badatele natolik zaujal, že se rozhodli problém důkladně rozpitvat. S použitím záznamů ve *Virus Bulletinu*, internetovém zdroji pro prevenci počítačových virů, určili pravděpodobnost, že virus bude po několika měsících od svého prvního výskytu stále existovat. A dospěli k fascinujícímu poznání: Charakteristická doba života většiny virů se pohybuje od šesti do čtrnácti měsíců. To znamená, že viry infikují počítače ještě rok po svém prvním výskytu a předpokládaném vyhubení. Jak říkají Pastor-Satorras a Vespignani, „je zarážející, jak jsou tyto charakteristické časy dlouhé, když je srovnáme s prodlevou, s jakou se na trhu objeví antivirový software (obvykle několik dnů či týdnů od ohlášení prvního výskytu)". Tak jako hororová mumie* se viry znovu a znovu probouzejí ve svých sarkofázích a není jim dopřán odpočinek.

Badatelé při popisu šíření počítačových virů normálně používají různé verze standardních prahových modelů. V těchto modelech může být každý počítač buď zdravý, nebo infikovaný. V každé chvíli může být zdravý počítač nakažen virem, dostane-li se do kontaktu s nějakým nakaženým počítačem. Jakmile se nakažený počítač uzdraví, začíná být opět citlivý k infekci. Když předpokládáme, že počítače jsou navzájem spojeny náhodně, potvrzuje tento model klasický scénář šíření viru: virulentní virus, jehož nakažlivost přesahuje kritický práh, se dostane k většině počítačů. Naproti tomu pokud je virulence viru menší než kritický práh, počet nově nakažených počítačů rychle klesá a virus nakonec zahyne.

V srpnu 2000 dospěli Pastor-Satorras a Vespignani k závěru, že White měl pravdu: počítačové viry se neřídí předpověďmi klasických modelů epidemií. Stále jim však nebylo jasné, proč tomu tak je. Štěstí tomu přálo, že právě tentýž týden se na obálce časopisu *Natu-*

* Narážka na klasický filmový horor *Mumie* s Borisem Karloffem v titulní roli (pozn. překl.).

re objevil článek mé výzkumné skupiny. Když si jej přečetli, rázem nalezli chybějící kamínek. Na internetu nejsou počítače navzájem spojeny náhodně, ale odpovídající síť má bezškálovou topologii. Počítačové viry se tedy nesmějí modelovat na náhodné síti, jak se to dělalo v předcházejících studiích, ale na síti bezškálové. Pastor-Satorras a Vespignani se do toho urychleně pustili a jako první prozkoumali šíření na realistické bezškálové síti. Výsledky je velice překvapily. V bezškálových sítích práh epidemie zázračně zmizel! To znamená, že i když není virus příliš nakažlivý, šíří se a přežívá. Viry putující bezškálovými sítěmi popírají veškerou moudrost nahromaděnou za padesát let studia jejich šíření a nezdá se, že by si všímaly nějakého prahu. Jsou prakticky nezadržitelné.

Toto dosti nečekané chování vyvěrá z nerovnoměrné topologie internetu. V bezškálových sítích hrají hlavní roli centra. Jelikož každé centrum je spojeno s velkým počtem ostatních počítačů, s velkou pravděpodobností bude jedním z nich infikováno. Jakmile je centrum nakaženo, může poslat virus dál všem počítačům, s nimiž je spojeno. Vysoce propojená centra tedy poskytují virům jedinečný prostředek, jak přežívat a šířit se. Zatímco virulentní druhy se rychle dostanou ke všem uzlům jakékoli sítě, v bezškálovém prostředí mají velkou šanci na přežití i jejich mírně nakažlivé obdoby.

Tyto výsledky se neomezují na počítačové viry. Modely Pastora-Satorrase a Vespignaniho nabízejí, s malými modifikacemi, jednoduchý popis šíření myšlenek, inovací a nových produktů stejně jako rozšiřování infekčních chorob. Svým hrubým přiblížením vystihují i procesy, které pomáhaly šířit náboženství: Pavel, vysoce propojené a pohyblivé centrum, napomohl tomu, že se víra raného křesťanství dostala k co největšímu počtu lidí. Myšlenky a inovace se šíří od člověka k člověku podél vláken pavučiny lidské společnosti. Jelikož se zdá, že sociální sítě mají bezškálovou topologii, anomálie pozorované u počítačových virů by se měly vyskytovat i v těchto systémech.

* * *

Každý z nás má stovky sociálních vazeb, ale jen pár je jich dostatečně intimních, aby se jimi šířily pohlavní choroby. AIDS tedy postupuje velmi řídkou podsítí naší vysoce provázané sociální sítě. Vzhledem k poměrně malé nakažlivosti této nemoci by se epidemie měla

už dávno zpomalit a zastavit. Navzdory tomu už AIDS onemocnělo přibližně 50 milionů lidí a jejich počet stále stoupá. Je svůdné vzít studii z Terstu tak, jak je, a přisoudit rychlé šíření AIDS bezškálové topologii sociální sítě. Ale protože ne všechny sociální vazby představují sexuálně aktivní styky, musíme se ptát, jaká je topologie sexuální sítě, která přenáší tuto vražednou nemoc?

Jednoho dne na sklonku listopadu 2000 se Carina Moodová Romanová, postgraduální studentka sociologie na univerzitě ve Stockholmu, snažila pochopit velice roztažený graf, který dostala, když pracovala na jedné školní úloze. Měla v úmyslu předpovědět počet sexuálních partnerů skupiny Švédů. Švédsko, jedna z prvních zemí, které umožnily legální soužití nesezdaných párů, je, co se týče sexuálních zvyklostí, poměrně liberální. Švédsko se také pyšní svým pozoruhodným a rozsáhlým systémem zdravotnictví a sociálních služeb. Když se začínal AIDS rozmáhat v severní Evropě, švédští badatelé se pustili do rozsáhlého výzkumu sexuálních kontaktů v naději, že najdou prostředky, jak epidemii zpomalit.

Získat mapu sexuální sítě, která spojuje lidi skrze sexuální vztahy, je prostě nemožné. Prozradili byste jména všech, s nimiž jste měli intimní vztah, když byste věděli, že je pak všechny budu kontaktovat a ptát se i na jejich sexuální vazby? Naštěstí nepotřebujeme úplnou mapu sexuální sítě, abychom rozhodli, zda je bezškálová, nebo náhodná. Potřebujeme změřit jenom rozdělení konektivit, a to tak, že se zeptáme reprezentativního vzorku společnosti, kolik sexuálních partnerů každý měl. Když nepožadujeme, aby zkoumané osoby prozradily identitu svých partnerů, máme najednou před sebou mnohem méně náročný úkol. V roce 1996 vedli švédští vědci tisíce rozhovorů s náhodným vzorkem 4 781 jedinců ve věku od osmnácti do sedmdesáti čtyř let, aby zjistili jejich sexuální zvyklosti. Získali odpověď od 59 % z nich a tak dostali počet vazeb pro 2 810 uzlů švédské sexuální sítě.

Dnes se často dávají studentům starší nashromážděná data, aby si na nich procvičovali různé statistické metody. Romanová se se svými daty obrátila na svého spolubydlícího Fredrika Liljerose, aby jí pomohl s interpretací jejího grafu. Na začátku studia sociologie na Liljerose tak zapůsobila série přednášek z matematické sociologie, že se tomuto oboru začal věnovat a zaměřil se na vývoj sociální organizace. Při tomto výzkumu přišel do styku s širokým spektrem matematických nástrojů a pojmů, včetně samoorganizace a mocnin-

ných zákonů. Ve svých dvaceti a něco letech má sice typicky nordickou fyziognomii, ale když jde o vědu, opouští ho stereotypní klid a rezervovanost jeho krajanů. „To vypadá jako mocninný zákon," zařval na svou spolubydlící, jakmile uviděl graf na obrazovce jejího počítače. Místo aby jí pomáhal s úkolem, vyžádal si od ní data a pokračoval v ověřování své předtuchy. Pak poslal kopii Luisi Amaralovi z Bostonské univerzity, s nímž už dříve spolupracoval. Amaral, který se nedávno začal věnovat komplexním sítím a je autorem několika zásadních prací o bezškálové topologii, okamžitě viděl, že data, která mu Liljeros poslal, obsahují klíčovou informaci k odpovědi na otázku, jaká je topologie sexuální sítě.

Každá studie našich sexuálních zvyklostí se musí potýkat s vážnou zátěží týkající se paměti: Zdá se, že si muži pamatují více sexuálních partnerů než ženy. Osoby zkoumané ve švédské studii byly tudíž nejprve požádány, aby sdělily, kolik sexuálních partnerů měly v posledním roce, a předpokládalo se, že odpovědi budou poměrně přesné. Bylo jasné, že jejich odpovědi ohledně počtu sexuálních partnerů, které si pamatují za celý život, budou silně ovlivněny zapomínáním a fantazií. Navzdory této potenciální zátěži do sebe výsledky zapadaly. Ukazovaly, že většina tázaných měla za celý život od jednoho do deseti sexuálních partnerů, ale někteří jich měli několik desítek nebo i více. Pár jich mělo dokonce několik set. Rozdělení splňovalo mocninný zákon, bez ohledu na to, zda se zkoumalo období jednoho roku nebo šlo o všechny sexuální partnery a zda šlo o muže či ženy. Ve svém souhrnu představovala data překvapivý důkaz, že síť našich sexuálních vztahů má bezškálovou topologii, a tento závěr byl posílen dalším výzkumem zaměřeným na americkou populaci.

Zdálo se, že Gaetan Dugas byl se svými 250 sexuálními partnery za rok rekordmanem, ale tvrzení Wilta Chamberlaina, že spal s neuvěřitelnými 20 000 ženami, toto číslo jasně převyšuje. „Ano, je to tak, 20 000 různých žen," napsal. „S ohledem na můj věk to znamená, že jsem spal s 1,2 ženy denně, každý den, od svých patnácti let." Síň slávy americké NBA z něho udělala hromosvod kritiky těch, jež uráželo jeho promiskuitní chování. Spolupráce skupin ze Stockholmu a Bostonu však ukázala, že není zas tak výjimečný. Bezškálová topologie znamená, že i když většina lidí má jen několik málo sexuálních vazeb, síť sexuálních kontaktů drží pohromadě hierarchie vysoce propojených center. To jsou ti Wiltové Chamberlainové

a Gaetanové Dugasové, kteří nasbírali neuvěřitelný počet sexuálních partnerů.

Ve světle těchto výsledků nabízejí předpovědi z Terstu nový pohled na epidemii AIDS. Smrtonosný virus musel sledovat stejnou trasu, jakou jsme objevili při šíření inovací a počítačových virů: díky svým početným sexuálním kontaktům jsou centra vždy mezi prvními nakaženými. Jakmile se nakazí, rychle infikují stovky dalších. Kdyby naše sexuální síť byla homogenní, náhodná, pak AIDS mohl už dávno vymizet. Bezškálová topologie, kterou může AIDS využívat, dovoluje viru šířit se a přežívat.

* * *

Když jsme v roce 1997 poprvé zaznamenali pokles úmrtnosti na AIDS ve Spojených státech, mysleli jsme si, že nejhorší máme za sebou. Mýlili jsme se. V současnosti se na celém světě nakazí 15 000 lidi denně a většina z nich během deseti let na tuto nemoc zemře. Když je vám dnes v Botswaně patnáct let, máte téměř 90% jistotu, že v životě chytíte AIDS a že na něj zemřete. Ve skutečnosti bychom v této nebo v několika dalších zemích subsaharské Afriky stěží našli dospívajícího člověka, který dříve nebo později nepodlehne této pandemii. A to navzdory tomu, že na trhu už je několik poměrně účinných prostředků proti této hrozné nemoci. Samozřejmě, žádný z těchto prostředků ji nevyléčí, ale všechny z ní udělají chorobu chronickou, s níž může většina pacientů žít téměř neomezeně. Největší problém spočívá v tom, že celková léčba jednoho pacienta stojí 15 000 dolarů ročně, což je mimo finanční možnosti většiny zemí kromě Evropy a Severní Ameriky.

Nejhorší krizi čelí Afrika. Problémem není jen to, že většina afrických zemí nemůže zaplatit léky. I kdyby ceny léků klesly, schází těmto zemím infrastruktura k distribuci a řízení léčby. Dvacet let po propuknutí je epidemie AIDS morbidní celebritou. Díky demonstracím a podpoře všeobecně známých osobností od Billa Gatese po kdejakou popovou hvězdu se aktivismus spojený s AIDS dostal do středu pozornosti a to přinutilo velké farmaceutické firmy, aby chudým zemím dodávaly léky za přijatelnou cenu. To je však jen první krok. Je jasné, že navzdory mezinárodnímu fondu disponujícímu několika miliardami dolarů nebude peněz dost, aby se zaplatilo léčení každému ani za zvýhodněnou cenu. Takže komu lék podat?

Zatímco zpočátku se šíření AIDS přisuzovalo v prvé řadě homosexuálnímu styku, dnes se šíří hlavně stykem heterosexuálním. Jak jsme zjistili, hrají v tomto procesu klíčovou úlohu centra. Jejich jedinečné postavení vnuká smělé, ale kruté řešení: dokud budou zdroje omezené, měli bychom léčit jen centra. To znamená, že když léčba existuje, ale není dostatek peněz, aby se dostalo na každého, kdo ji potřebuje, měla by se poskytnout pomoc především centrům. Takový byl závěr, k němuž dospěly dvě nedávné studie, jedna od Pastora-Satorrase a Vespignaniho a ta druhá od Zoltána Dezsőa, doktoranda z mé výzkumné skupiny. Výsledky ukazují, že když poskytneme léčení všem uzlům s konektivitou větší, než je nějaká předem zvolená hodnota, pak ať je tato hranice zvolena jakkoli, práh epidemie nabude konečné hodnoty. Čím více center léčíme, tím vyšší je práh epidemie, a tedy tím vyšší je pravděpodobnost, že virus vymizí.

Problém je v tom, že nevíme jistě, kdo jsou ta centra. Proto jsme se spolu se Zoltánem Dezsőem pustili do zkoumání obtížnější otázky. Zatímco nevíme, jak s dostatečnou jistotou identifikovat centra, desítky let výzkumů přinesly řadu sociologických metod k určení jak rizikových skupin, tak jednotlivců, kteří jsou v dané komunitě nejpravděpodobnějším zdrojem nákazy. Svoji úlohu hraje společenské postavení, věk, zaměstnání a řada dalších faktorů. S určitou pravděpodobností tudíž dokážeme identifikovat centra. Není pochyb o tom, že mnoho center zůstane neobjeveno, a přitom se na seznamu objeví několik lidí, kteří nejsou centry. Musíme se však ptát, zda je taková nepřesná metoda k něčemu dobrá. Dokážeme přimět práh epidemie, aby opět fungoval, i když ztroskotává veškeré úsilí najít centra? K zodpovězení této otázky je nutné předpokládat, že uzly nejsou léčeny náhodně, ale že se zdravotnické organizace řídí politikou, která upřednostňuje jedince s mnoha sexuálními vazbami a dělá z nich pravděpodobnější kandidáty léčení než z těch s málo vazbami. Tento přístup nám dovoluje srovnat takové postupy zdravotní politiky, které velmi efektivně nacházejí a léčí vysoce propojené uzly, s politikou, která rozděluje léčení náhodně. Výsledky Zoltána Dezsőa, který toto srovnání provedl, nás překvapily. Pokaždé když se léčba rozdělovala náhodně, byl práh epidemie stále nulový a nedokázala virus zastavit. Ale jakýkoli postup, který upřednostňoval ty propojenější uzly, třeba jen nepatrně, obnovil nenulový práh epidemie. To znamená, že i když nedovedeme úspěšně nalézt všechna centra, má smysl se o to snažit, protože tím snížíme rychlost šíření nemoci.

Každá selektivní politika vyvolává závažné etické otázky. Naše výsledky ukazují, že když máme omezené prostředky, budeme nakonec odměňovat promiskuitu, neboť čím více sexuálních partnerů jedinec má, tím spíš bude vybrán k léčbě. Čím lépe budeme umět vyhledávat a léčit promiskuitní jednotlivce, tím méně lidí se s nemocí setká. Jsme vůbec připraveni na to, že opustíme méně propojené pacienty ve prospěch populace jako celku? Jsme ochotni nabízet léky spíš vysoce propojeným chudým prostitutkám než bohatší, ale sexuálně méně propojené střední třídě?

Jedno řešení by takovéto morální úvahy odsunulo mezi akademické debaty: vakcína. Dnes se na světě vynakládá 350 milionů dolarů ročně na výzkum vakcíny proti AIDS. Toto číslo bledne ve srovnání s více než 3 miliardami dolarů utracenými ročně za léky proti AIDS v Americe a Evropě nebo s více než miliardou dolarů za jeden bitevní letoun. Zatímco se stále nedokážeme rozhodnout, co má být pro nás přednější, zdá se mi, že bychom měli mezitím dělat všechno pro to, abychom zadrželi šíření nemoci, třebaže kvůli tomu budeme muset zvýhodňovat promiskuitu.

* * *

Od průkopnické studie z Iowy naše chápání „trháků" a „propadáků", epidemií a módních vln značně pokročilo. V posledních desetiletích jsme byli svědky neuvěřitelného zájmu o toto téma. Zjistili jsme, že studium přejímání nových plodin nám může pomoci pochopit, jak se šíří AIDS a jak se objevují šlágry. Zjistili jsme, že i když je v každém procesu šíření přítomna náhoda, proces samotný se řídí zákony, které se dají formulovat přesnými matematickými pojmy. A začali jsme chápat, jak důležitou roli v těchto procesech hrají sítě.

Hodně se za těch posledních padesát let změnilo. Celosvětová sociální síť se smrštila, jak se rozšířily vysokorychlostní komunikační prostředky, od faxů po e-maily, které nás navzájem svazují tak jako dosud nikdy v dějinách. Cítíme, že je potřeba pochopit, jak toto smrštění ovlivňuje zákony šíření. Jak roste nebezpečí bioterorismu a neustále se šíří AIDS, je životně nutné, abychom v našem čím dál proměnlivějším světě byli schopni předpovědět a sledovat dráhu smrtících virů, když nakažení jedinci mohou naskočit do letadla a lokální

epidemie tak přeroste v celosvětovou pandemii. Ve světě, který čím dál tím více závisí na počítačích, jsme vytvořili nové plemeno virů, které nebere ohled na hranice států. Tito bratránci viru Love Bug jsou víc než jen na obtíž. Představují hmatatelné nebezpečí pro naši bezpečnost a náš způsob života a snadno vyvolají smrtelně nebezpečné krizové situace. S tím, jak se šíří, se objevila i nová sorta epidemiologů, expertů na počítačovou bezpečnost, kteří ostražitě monitorují zdraví našeho internetového vesmíru.

Inovace a biologické či počítačové viry se šíří nehomogenními sítěmi, v nichž hlavní slovo mají centra. Podle terstské studie nás čeká ještě nejedno překvapení ohledně naší znalosti rozšiřování virů. Myslím si, že dosavadní výsledky představují pouze špičku ledovce. Zatím známe jen obecné, univerzální vlastnosti šíření, ale jednotlivé systémy mají i své jedinečné rysy, a ty jsou často stejně důležité jako obecné zákony. Bylo by neuvěřitelně troufalé myslet si, že na základě modelování počítačových virů si můžeme utvořit dobrou představu o epidemii AIDS. Abychom mohli detailně předpovědět rozšiřování této nemoci, musel by model zahrnovat řadu podrobností, které jsou pro tuto pandemii specifické. A to je stále hudba budoucnosti. Pochopení základních zákonů, které řídí šíření, je však prvním klíčovým předpokladem úspěchu. Nedávné pokroky v tomto směru poskytují silnou motivaci podívat se znovu na problémy sahající od marketingu po šíření chřipky a kriticky prověřit jejich zásadní předpoklady. Jsem přesvědčen, že jak v této cestě budeme pokračovat, vynoří se spousta dalších překvapení a průlomových objevů.

Nedávné změny paradigmatu ve studiu epidemií a šíření vůbec byly možné díky obrovskému množství dat, která poskytuje internet, jedna z nejčastěji mapovaných sítí. Internet nám především pomohl objevit bezškálové sítě. Viry, které internetem putují, nám dodaly nezbytná data a umožnily nám proniknout do podstaty věci, díky čemuž mohla vzniknout terstská studie a objev, že u některých epidemií neexistuje žádný práh nakažlivosti. Jakmile jsme pochopili tohle, nezbylo nám než znovu revidovat všechny naše znalosti, od módních vln po epidemii AIDS. Vraťme se nyní o krok zpět a podívejme se na propletené médium, které tyto objevy umožnilo, a nakresleme si síť, která se za ním skrývá.

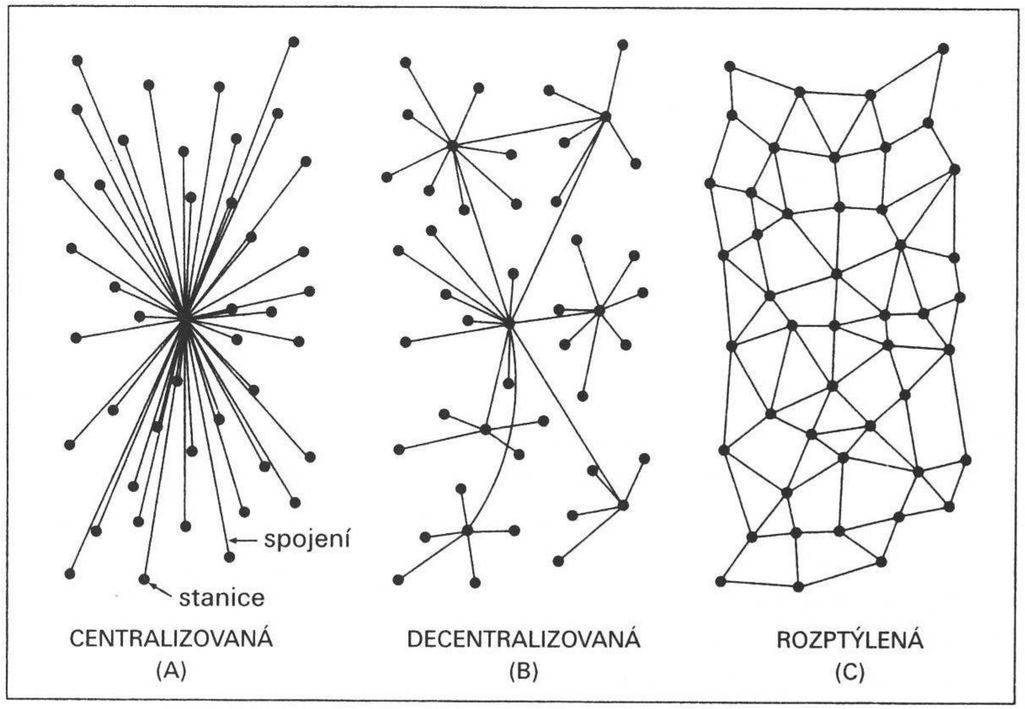
Vlákno jedenácté

Probouzející se internet

Když si Paul Baran s týdenním zpožděním zapisoval svou první přednášku z informatiky na Pensylvánské univerzitě, věděl, že už přišel o první lekci, ale příliš ho to netrápilo. První hodinu se toho stejně moc neudělá. A tak se dostavil na druhou přednášku, která měla probírat booleovskou algebru, matematický základ počítačové logiky. Vzpomíná na to slovy: „Přednášející přišel k tabuli a napsal 1 + 1 = 0. Rozhlédl jsem se po třídě, jestli někdo jeho divokou aritmetiku neopraví. Neozval se nikdo. Došlo mi, že mi tady cosi uniká, a víckrát jsem nepřišel.“ Stejně ale se k tomuto tématu vrátil, a to o deset let později ve svém čtvrtém zaměstnání po absolvování univerzity. Tentokrát se potýkal s jiným problémem: přišel příliš brzy.

Sotva třicetiletý a pár měsíců poté, co nastoupil na nové místo u RAND Corporation, dostal ohromný úkol: vyvinout komunikační systém, který by přežil jaderný úder. V roce 1959 nebyly úvahy o sovětských jaderných hlavicích padajících z nebe žádnou sci-fi, ale scénářem možné války, a podle toho se jich lidé patřičně obávali. Baranův zaměstnavatel, kalifornský mozkový trust založený roku 1946, aby poskytoval intelektuální zázemí pro budování jaderného arzenálu, měl značné zkušenosti s vymýšlením válečných scénářů a potenciálních katastrofických následků. Tak chmurné úkoly jako předvídání smrti milionů lidí při jaderném útoku nikdy nebyly zdrojem sympatií tisku, který společnost často srovnával s filmovou postavou dr. Strangelovea.* Baranův úkol, vyvinout komunikační systém, který by dokázal přežít, byl pro zaměření RAND typický. Baran vzal práci vážně a ve dvanácti svazcích výzkumných zpráv RAND velmi pečlivě popsal zranitelná místa stávající komunikační infrastruktury a navrhl něco lepšího: internet.

* Dr. Strangelove je titulní postava protiválečného parodického filmu z roku 1964. Česky byl uveden pod názvem *Dr. Divnoláska aneb Jak jsem se naučil nedělat si starosti a mít rád bombu* (pozn. překl.).



Sítě Paula Barana. V roce 1964 začal Paul Baran přemýšlet o optimální struktuře internetu. Naznačil, že pro takovou síť existují tři možné architektury – centralizovaná, decentralizovaná a rozptýlená –, a varoval, že jak centralizovaná, tak decentralizovaná struktura, dominující komunikačním systémům, jsou příliš zranitelné. Místo toho navrhl, že by měl internet mít rozptýlenou architekturu připomínající rybářskou síť (reprodukováno se svolením Paula Barana).

Viděl, že zranitelnost systému velení v padesátých letech tkvěla v topologii existující komunikační sítě. Jelikož jaderný úder vyřadí z činnosti veškerá zařízení v dosahu výbuchu, navrhl systém, v němž by uživatelé mimo tento dosah neztratili vzájemný kontakt. Když zkoumal komunikační systémy té doby, zjistil, že se dají rozdělit do tří kategorií (obr. nahoře). Vyloučil síť hvězdicovou, jelikož usoudil, že „centralizovaná síť je zjevně zranitelná, protože destrukce jediného centrálního uzlu zlikviduje komunikaci mezi koncovými stanicemi". Stávající systém popisoval jako „hierarchickou strukturu souboru hvězdic spojených do tvaru větší hvězdy", a tak už kdysi dávno popsal bezškálovou síť. S neuvěřitelnou předvídavostí dospěl k závěru, že tato síť je příliš centralizovaná, takže by těžko útok přežila. Měl v hlavě ideální odolnou architekturu, jakousi rozprostřenou rybářskou síť, podobnou soustavě dálnic, která má dostatek

nadbytečné kapacity, takže když se některé uzly odmlčí, náhradní cesty udrží spojení mezi ostatními uzly.

Stále se udržuje mýtus, že internet byl navržen tak, aby přežil sovětský jaderný úder. Ve skutečnosti bylo Baranovou hlavní motivací opravdu navrhnout takový systém, který by nebyl vyřazen z provozu sovětským jaderným arzenálem, jenže armáda jeho myšlenky a inovace dlouhodobě zcela ignorovala. Proto má také dnešní topologie internetu jen málo společného s jeho vizí. Změna topologie, kterou Baran prosazoval, však nebyla tím důvodem, který vyvolával u všech, od vojáků po průmyslníky, rozhodný odpor proti jeho koncepci. Námitky byly proti jeho návrhu rozdělit zprávy na malé balíčky, pakety, jednotné velikosti, které by mohly navzájem nezávisle putovat sítí. S existujícím analogovým komunikačním systémem by se to podařit nemohlo. Tento krok byl příliš odvážný, než aby jej firma AT&T, která měla v té době monopol na komunikace, dokázala unést. A tak Jack Osterman z AT&T Baranovu představu odmítl slovy: „Zaprvé by to nejspíš nefungovalo, a kdyby přece jen, pak bychom byli blázni, kdybychom dovolili, aby nám vyrostla konkurence." Baranovy myšlenky, na každém kroku prohrávající s vojáky a průmyslem, byly teprve mnohem později znovu objeveny, to když Agentura pro pokročilé výzkumné projekty, která o Baranových výsledcích nic nevěděla, dospěla nezávisle k téže představě. V té době však už kráčel internet vlastní cestou.

Pochopení struktury internetu je prvním předpokladem, chceme-li navrhnout nástroje a služby, které poskytují rychlou a spolehlivou komunikační infrastrukturu. Ačkoli je dílem člověka, nemá internet centrální plán. Svou strukturou se podobá spíše ekosystému než švýcarským hodinkám. Pochopit internet není tedy jen úkol pro inženýra nebo matematika. V jeho topologii se významným způsobem odráží historie. Zamotaný příběh sbližujících se myšlenek a soupeřících motivací zanechal na struktuře internetu svoji stopu a vytvořil tak spleť informací, kterou by měli rozmotat historici spolu s počítačovými odborníky.

* * *

Agentura pro pokročilé výzkumné projekty neboli ARPA, to byla odpověď prezidenta Eisenhowera na vypuštění první družice Sputnik Sovětským svazem. Původně měla ARPA rozsáhlou kontrolu nad

nejpokročilejšími projekty vojenského výzkumu a vývoje, zejména nad protiraketovými a družicovými programy. Svůj vliv ztratila, když vesmírný program převzala NASA.

Ve snaze najít si nové poslání se ARPA zaměřila na koordinaci dlouhodobého výzkumu s vojenským významem, na rozdíl od bezprostředních vývojových projektů, které nejrůznější vojenské agentury rozpracovávaly samostatně. Internet vystoupil na scénu kolem roku 1965 nebo 1966, když se Bob Taylor, ředitel počítačových projektů v této agentuře, náhle začal zajímat o obrovské plýtvání federálními prostředky, které právě objevil.

V šedesátých letech už ARPA velkoryse financovala počítačový výzkum. A investice to vyžadovalo opravdu značné. Od revoluce osobních počítačů nás dělilo ještě několik desetiletí a počítače stály něco mezi půl milionem a několika miliony dolarů. ARPA rozmístila několik takových monster do výzkumných laboratoří po celé zemi. Problém spočíval v tom, že ani počítače v téže místnosti spolu nemohly mluvit, a napojit se na počítačový výkon umístěný na jiném pracovišti bylo nemyslitelné. Bob Taylor měl báječný nápad. Aby se už dále takto neplýtvalo, proč tyto nekompatibilní stroje nějak vzájemně nepropojit? V únoru 1966 svou vizi předložil Charliemu Herzfeldovi, řediteli ARPA, a odcházel od něj s čerstvým milionem ve svém rozpočtu a s novým posláním.

Myšlenka propojení počítačů napadla i Donalda Daviese, ředitele informatického oddělení v britské Národní fyzikální laboratoři v Teddingtonu, městě nedaleko Londýna. Davies pilně pracoval na realizaci své myšlenky a vynalezl pakety a jejich přepínání dávno předtím, než se dozvěděl o Baranově starší práci. Jeho skupina tyto představy předložila roku 1967 na sympoziu v Gatlinburgu v Texasu: představila své a Baranovy myšlenky výzkumné skupině podporované ARPA. Všem bylo okamžitě jasné, že přepínání paketů na rychlejších linkách je tím správným krokem ke skutečně efektivní komunikační síti. Konečně se deset let stará Baranova vize začala uskutečňovat. Tak se zrodila síť dnes nazývaná internet.

Slovo *internet* se často používá k označení všeho, co se týká našeho počítačového světa, včetně samotných počítačů, směrovačů, optických kabelů a také world wide webu. Zde budeme tímto slovem myslet jen fyzickou infrastrukturu spojující počítače. Internet je síť směrovačů, které spolu komunikují prostřednictvím protokolů, předvídaných Paulem Baranem, a které se staly skutečností díky štědré

podpoře ARPA. Je ironií, že principy, jimiž se dnešní internet řídí, odpovídají původní Baranově vizi ve všech ohledech kromě vůdčího principu, který motivoval jeho práci: skoncovat se zranitelností vůči útoku. Baranova rozprostřená, dálnicím podobná síť se mohla stát skutečností jen v tom případě, že by internet i nadále kontrolovala a udržovala armáda. Avšak internet začal žít svým vlastním životem.

* * *

V komunitě počítačových odborníků je Bill „Ches" Cheswick, výzkumník firmy s názvem Lumeta, odštěpené od Lucentu, odnože Bellových laboratoří, nejvíce známý kvůli své práci na firewallech, chránících počítače před útokem zvenku, a jiných prvcích počítačové bezpečnosti. Ale veřejnost si jej stále více spojuje s barevnými mapami internetu, jež společně se svým kolegou z Lumety Halem Burchem vytváří a prodává prostřednictvím stránky peacockmaps.com. Na mapě tisíciletí, zobrazující topologii internetu 1. ledna 2000, se před námi rozprostírá hustě propletená džungle směrovačů a spojovacích vláken tvořící pozoruhodně krásnou síť. Její složitost se dá srovnat snad jenom s lidským mozkem. Mezi nimi je však jeden podstatný rozdíl. Zatímco velikost lidského mozku už po staletí stagnuje, internet stále bez jakékoli známky zpomalení exponenciálně roste.

Cheswick není vůbec osamělým vědcem s uměleckými ambicemi. Nachází se ve výjimečné společnosti. DARPA, následnice ARPA, dnes poskytuje miliony dolarů výzkumným skupinám po celých Spojených státech, které dělají přesně totéž co Cheswick: mapují internet. Nejviditelnější z těchto projektů je Sdružená asociace pro analýzu internetových dat* neboli CAIDA, výzkumné konzorcium provádějící tomografii internetu, která sídlí na Kaliforské univerzitě v San Diegu a jejímž hlavním cílem je sledovat všechny možné charakteristiky internetu, od provozu na něm po jeho topologii. Na druhé straně Atlantiku, ale jen jedno kliknutí odtud, je pestrá webová stránka cybermaps.com s úžasnou sbírkou map zviditelňujících internet, kterou spravuje Martin Dodge, badatel z Centra pro pokročilou vesmírnou analýzu** na University College v Londýně.

* Cooperative Association for Internet Data Analysis.
** Center for Advanced Spatial Analysis.

Napadlo vás někdy nakreslit přesné schéma svých náramkových hodinek, čipu Pentium ve svém počítači nebo auta, jímž denně jezdíte do práce? Stěží. Pokud byste skutečně chtěli vědět, co je pod kapotou, patrně byste se obrátili na výrobce, aby vám dal plány auta. Než inženýři zkonstruují nové hodinky, čip nebo auto, vyhotoví stovky schémat a podrobně popíšou nejen každou součástku, ale i její umístění a vztahy s ostatními díly. Třebaže je dnes tovární halou americké ekonomiky internet, pořád nemáme jeho podrobné schéma. Od té doby, co se na začátku roku 1995 Národní vědecký fond vzdal správcovství internetu, žádná centrální autorita neřídí ani nedokumentuje jeho růst a strukturu.

Dnes se internet vyvíjí na základě lokálních, decentralizovaných rozhodnutí podle toho, „co je zrovna potřeba". Všichni, od velkých firem po vzdělávací ústavy, přidávají uzly a vazby bez jakéhokoli povolení od centrální autority. Už to ani není jediná síť. Nezávisle tady koexistují a fungují navzájem propojené sítě skrývající se pod jmény jako WNET, vBNS nebo Abilene.

Možná si myslíte, že snad existuje někdo, kdo by to celé mohl vypnout, kdyby bylo potřeba. Kdepak. Nějakou jednotlivou instituci snad můžete přesvědčit, aby zavřela tu část sítě, která spadá pod její pravomoc, ale žádná společnost nebo osoba nekontroluje víc než jen zanedbatelnou část celého internetu. Síť v pozadí je už natolik rozptýlená, decentralizovaná a jen lokálně hlídaná, že i tak obyčejný úkol jako získat její přehlednou mapu je prakticky neproveditelný.

* * *

K hledání globální mapy internetu nás vedou závažné praktické důvody. Nebudeme-li znát topologii internetu, těžko se nám budou navrhovat lepší nástroje a služby. Současné internetové protokoly byly vyvinuty na malé síti a z hlediska potřeb a technologie sedmdesátých let. Jak síť rostla a objevovaly se nové aplikace, nedokázaly tyto protokoly často uspokojit všechny naše požadavky. Většina dnešních aplikací internetu byla pro konstruktéry jeho základní infrastruktury zcela nepředstavitelná, nicméně tato infrastruktura je stále v provozu. Například e-mail vznikl tak, že dobrodružný hacker Ray Tomlinson, zaměstnaný u BBN, malé poradenské firmy v Cambridgi v Massachusetts, přišel na to, jak modifikovat protokol k přenosu souborů, aby přenášel poštovní zprávy. Dlouhou dobu si nechá-

val svůj velký objev pro sebe. Když jej poprvé ukázal jednomu z kolegů, dostalo se mu varování: „Nikomu to neříkej! To není to, na čem bychom měli pracovat." Elektronická pošta se však stejně dostala na světlo a stala se jednou z dominantních aplikací internetu v jeho raném stadiu.

Totéž se dá říct o world wide webu. Infrastruktura na něj nikdy nebyla připravená. Je to nádherný příklad „katastrofálního úspěchu", konstrukce nové funkce, která unikla do reálného světa a rozmnožila se nevídanou rychlostí dříve, než byla konstrukce plně hotova. Dnes internet slouží téměř výlučně pro přístup k webu a e-mailu. Kdyby to jeho někdejší tvůrci předvídali, navrhli by patrně úplně jinou infrastrukturu, s níž bychom měli mnohem příjemnější zkušenosti. Místo toho zjišťujeme, že stále věžíme v technologii, která se jen velmi těžko adaptuje na různorodé a bouřlivě se rozvíjející požadavky kladené stále kreativnějším používáním internetu.

Až do poloviny devadesátých let se veškerý výzkum soustředil na navrhování nových protokolů a komponent. Později si však čím dál více výzkumníků kladlo nečekanou otázku: Co jsme to vlastně vytvořili? Ačkoli je internet zcela lidský výtvor, žije si dnes svým vlastním životem. Má všechny charakteristiky komplexního vyvíjejícího se systému a spíš se podobá buňce než počítačovému čipu. K fungování systému přispívá mnoho různých nezávisle vyvinutých komponent a internet se stává něčím mnohem víc než souhrnem svých částí. Badatelé se tedy stále víc proměňují z konstruktérů na průzkumníky. Jsou v podobné situaci jako biologové nebo ekologové, kteří stojí před neuvěřitelně komplexním systémem, který, ať na něj pohlížíme z jakéhokoli praktického úhlu, existuje nezávisle na nich. Tajemství jde však ještě o něco hlouběji. Zatímco biologové se desítky let snažili přijít na to, jak vypadají proteiny a jak navzájem interagují, všechny podrobnosti týkající se internetu jsou plně k dispozici pro detailní průzkum. Ani informatici, ani biologové však nevědí, jak globální struktura povstává ze spojení jednotlivých součástí.

* * *

Vern Paxon a Sally Floydová, počítačoví vědci z Centra pro výzkum internetu na Mezinárodním ústavu informatiky* v kaliforn-

* International Computer Science Institute Center for Internet Research.

ském Berkeley, ve svém vlivném a často citovaném článku z roku 1997 označili omezenou znalost topologie internetu za hlavní překážku lepšího pochopení internetu jako takového. Dva roky poté tři bratři-informatici pocházející z Řecka, Michalis Faloutsos z Kalifornské univerzity v Riverside, Petros Faloutsos z Torontské univerzity a Christos Faloutsos z Univerzity Carnegieho Mellona, učinili překvapivý objev. Zjistili, že distribuce konektivity internetových směrovačů splňuje mocninný zákon. Ve svém revolučním článku s názvem „O mocninných zákonitostech v topologii internetu" ukázali, že internet, soustava směrovačů spojených různými fyzickými linkami, je bezškálová síť. Jejich objev vedl ke stručnému závěru, který se mezi vědci brzy rozšířil: všechny nástroje používané k modelování struktury internetu před rokem 1999, založené na myšlenkách vyrůstajících z teorie náhodných sítí, byly zkrátka špatné.

Bratři Faloutsosové nevěděli o souběžně probíhajících objevech mocninných zákonů ve struktuře webu. Když se obě větve výzkumu setkaly, získalo jejich zjištění nový význam a pozvedlo internet ze světa náhodných sítí do pestré říše bezškálových topologií. To bylo dosti nečekané. Internet se koneckonců skládá z fyzických vedení a směrovačů. Je to samý hardware. Jak by se mohly tyto nákladné a těžké měděné a optické spoje řídit týmiž pravidly jako lidé, když navazují své nevažitelné sociální vazby nebo přidávají odkazy na své webové stránky?

* * *

V říjnu 1969 dostal Charley Kline úkol realizovat vůbec první přenos zprávy od jednoho počítače k druhému po obyčejné telefonní lince. Pracoval tehdy jako programátor v laboratoři Leonarda Kleinrocka na Kalifornské univerzitě v Los Angeles (UCLA) a účastnil se projektu, který se pokoušel o spojení s jediným dalším internetovým uzlem, umístěným na Stanfordově univerzitě. Jakmile bylo navázáno spojení, Kline začal psát: „login". Napsal *l* a ze Stanfordu dostal zpětné hlášení, echo, potvrzující, že písmeno bylo doručeno. Pokračoval písmenem *o* - a zase dostal odpovídající echo. Pak se pustil do *g*. To už však novorozený systém neunesl, spojení se zhroutilo a komunikace vzala zasvé.

Brzy se však podařilo spojení znovu navázat, a když uzly na UCLA a na Stanfordu byly spolehlivě v provozu, přidaly se další.

Podle Johna Naughtona, autora knihy *Stručná historie budoucnosti*,* měly třetí a čtvrtý uzel Kalifornská univerzita v Santa Barbaře a Utažská univerzita, a to v listopadu a prosinci 1969. Na začátku roku 1970 byl instalován pátý u BBN, poradenské firmy z Massachusetts, společně s prvním celostátním okruhem: druhou linkou, spojující počítače v Los Angeles se stroji BBN v Bostonu. Do léta 1970 byly instalovány uzly číslo šest, sedm, osm a devět na MIT, RAND, System Development Corporation a na Harvardu. Do konce roku 1971 sestával internet z patnácti uzlů, o rok později jich měl třicet sedm. „Systém začínal rozpínat křídla," říká Naughton, „anebo - pro ty, kdo mají podezřívavou povahu - vystrkovat svá tykadla."

Jak jste si nejspíš všimli, internet se řídí klasickým scénářem rostoucí sítě. Dnes, po dvou desetiletích, narůstá stále uzel po uzlu - což je první a nezbytná podmínka k tomu, aby vznikla bezškálová topologie. Druhá podmínka, preferenční připojování, už však tak zřejmá není. Proč by si někdo připojoval svůj počítač kamkoli jinam než k nejbližšímu směrovači? Pokládat delší kabel je koneckonců dražší.

Ukazuje se, že délka kabelu není tím omezujícím faktorem, který by určoval růst či stagnaci internetu. Když se nějaká instituce rozhodne připojit své počítače k internetu, má na zřeteli pouze jeden parametr: cenu komunikace. Vezmeme-li v úvahu kapacitu linky, která měří, kolik bitů za vteřinu dokáže spojení přenést, nebývá často nejbližší uzel tou nejlepší volbou. Když se posuneme o několik kilometrů dál, můžeme získat přístup k rychlejším směrovačům.

Směrovače, které poskytují větší kapacitu, budou mít pravděpodobně i více vazeb. A tak když si síťoví inženýři vybírají dobré místo k připojení, nutně je to táhne k silněji propojeným přístupovým místům. Tento jednoduchý jev je možným zdrojem preferenčního připojování. Nevíme jistě, zda je to zdroj jediný, ale není sporu o tom, že se preferenční připojování na internetu vyskytuje. To ukázali poprvé Soon-Hyung Yook a Hawoong Jeong, oba z mé výzkumné skupiny, když porovnali mapy internetu zaznamenané v několikaměsíčních odstupech. Když si kreslili, jak internet uzel po uzlu narůstá, dostali kvantitativní důkaz, že uzly bohaté na vazby nabírají více vazeb než ty s málo vazbami.

* *A Brief History of the Future.*

Růst a preferenční připojování by měly stačit k vysvětlení bezškálové topologie internetu, kterou objevili bratři Faloutsosové. Na internetu je to však o něco složitější. I když to není to nejdůležitější, přece jen záleží na vzdálenosti. Nelze popřít, že je dražší položit dva kilometry optického kabelu než pět set metrů. Musíme navíc vzít v úvahu, že uzly se na mapě neobjevují náhodně. Směrovače přibývají tam, kde je po nich poptávka, a ta zase závisí na tom, kolik lidí chce internet používat. Existuje tedy silná korelace mezi hustotou populace a hustotou internetových uzlů. Rozmístění směrovačů na mapě Severní Ameriky vytváří fraktální množinu, soběpodobný matematický objekt, který v sedmdesátých letech objevil Benoît Mandelbrot. Když se snažíme modelovat internet, musíme tudíž současně vzít v potaz souhru růstu, preferenčního připojování, závislosti na vzdálenosti a fraktální strukturu v pozadí.

Každá z těchto sil by sama o sobě, kdyby byla hnána do extrému, dokázala bezškálovou topologii zničit. Například kdyby při rozhodování, kam se připojit, byla hlavní starostí délka drátu, výsledná síť by měla exponenciální rozdělení konektivity a vznikla by topologie velmi podobná dálniční soustavě. Úžasné na tom je, že tyto koexistující mechanismy se navzájem jemně vyvažují a udržují bezškálový internet. A tato rovnováha sil je právě vlastní Achillovou patou internetu.

* * *

Firma MAI Network Services, malý poskytovatel internetových služeb se sídlem v McLeanu ve Virginii, je vlastníkem několika vysokorychlostních směrovačů připojených k obrovitým sítím, jejichž majiteli jsou Sprint a UUNet. V pátek 25. dubna 1977 ráno vydala MAI upravenou směrovací tabulku pro své směrovače. Směrovače navádějí pakety, které se k nim dostanou, k jejich adresátům tak, že srovnávají adresu na paketu se směrovací tabulkou. Tyto směrovací tabulky jsou cestovními mapami internetu. Jak se topologie sítě neustále mění, periodicky se upravují i směrovací tabulky. V půl deváté ráno rozesílá MAI upravenou informaci o směrování svým vlastním směrovačům. Kvůli chybné konfiguraci se změna nezastavila na hranicích MAI, ale unikla ven a způsobila přepsání směrovacích tabulek velkého počtu směrovačů vlastněných Sprintem a UUNetem. Dostaly tak instrukci posílat veškerý provoz na několik směrovačů firmy MAI.

Bylo to jako hledět na vodu tryskající z protržené přehradní hráze a ničící všechno, co jí stojí v cestě. MAI s hrůzou sledovala, jak se veškerý internetový provoz rázem přesměrovává na ni. Protože nikdy neměla dostatečnou kapacitu ani na zvládnutí zlomku takové záplavy, stala se MAI černou dírou, která neuvěřitelnou rychlostí pakety pohlcovala. O pětačtyřicet minut později se musela firma sama vypnout, aby pohromu zastavila. Mezitím poskytovatelé internetu bezmocně sledovali, jak všechen jejich provoz mizí v černé díře vzniklé chybným překonfigurováním. Sprint se vzpamatoval teprve poté, co ručně změnil všechny směrovací tabulky ve svém vlastnictví, a totéž udělala řada velkých i malých poskytovatelů, které problém zasáhl.

Jelikož se problém rychle vyřešil a protože internet ještě nebyl tak široce populární, věnoval svět této příhodě pramálo pozornosti. Názorně však předvedla, jak rychle se chyby na síti šíří: za několik minut po svém zveřejnění se chybně nakonfigurovaná směrovací tabulka stala součástí několika velkých sítí a spustila klasickou ukázku kaskádového selhání.

Když Paul Baran navrhoval prototyp internetu, měl na mysli velmi specifickou hrozbu, totiž že sovětské jaderné hlavice zasáhnou vojenská a zpravodajská velitelství a to potenciálně povede k naprostému selhání komunikace a zastavení toku informací. Ani on, ani první průkopníci internetu neuvažovali o možnosti, že by jednoho dne lidé z kterékoli země na světě mohli mít k této infrastruktuře přístup. Mnoho let odmítaly Spojené státy poskytovat některé technologie zemím, které byly označené za nepřátelské. Zakusil jsem to na vlastní kůži, protože nenáviděný seznam COCOM oficiálně vylučoval Maďarsko z přístupu k internetu až do pádu berlínské zdi. Internet však byl příliš nakažlivý, takže ho ani takové umělé zábrany nemohly zastavit. Díky důmyslu lokálních správců systémů komunikovala řada lidí z východoevropských univerzit pravidelně e-mailem se svými západními kolegy dávno předtím, než byla omezení zrušena. Dnes je k internetu připojen skutečně každý stát na Zemi. Tato politika volného přístupu s sebou však přinesla i neočekávaná nebezpečí. Jsme díky ní zranitelnější a náš provázaný svět je stále ohroženější.

Jeden z nejvytíženějších uzlů ve Spojených státech, patřící společnosti AT&T, je přísně hlídané podzemní zařízení v Schaumburgu v Illinois, na předměstí Chicaga. Tento a několik podobně silně stře-

žených klíčových uzlů poskytuje falešný pocit bezpečnosti, že internet nelze narušit cílenými útoky. Jak si však čím dál více uvědomujeme souhru mezi architekturou sítě a jejími protokoly, nabízí se nám jiný obrázek. Několik dobře vycvičených crackerů by dokázalo síť zlikvidovat během třiceti minut odkudkoli na světě. Existuje mnoho způsobů, jak toho dosáhnout, od proniknutí do počítačů, na nichž běží několik klíčových směrovačů, po útok typu odepření služby proti nejvytíženějším uzlům.

Červ Code Red, který se šířil jako virus a v létě 2001 infikoval tisíce počítačů po celém světě, je příkladem technologie, která je právě takového ničení schopná. Zpočátku vypadal jako zcela neškodný typ viru, protože neubližoval svému hostiteli. Ale najednou, poté co celé dny nehybně prospal, udělal ze všech nakažených počítačů poslušné otroky, kteří ve stejnou chvíli zaplavovali síť požadavky na adresu whitehouse.gov. Code Red se spokojil s tím, že prokázal funkčnost principu a předvedl, co by mohly automatizované viry dokázat. Propracovanější verze by mohly napáchat nevídané škody. Vyřazení několika velkých uzlů z činnosti by sice ještě nerozložilo síť na kusy, ale kaskádové selhání, které by bylo důsledkem přesměrování provozu na menší uzly, by zkázu dovršilo.

Většina crackerů či hackerů, kteří vědí jak na to, by neměla zájem zlikvidovat celý internet. Úspěšný útok by jim přece sebral oblíbenou hračku a ani oni by nemohli pracovat na síti. Akce velkého rozsahu, která by zasáhla celý internet, by nikdy nebyla dílem skutečných hackerů. Snadno se ale může stát cílem zločineckých států a teroristů. Když budeme rozumět topologii internetu, pomůže nám to jej chránit.

* * *

30. srpna 2001 vysílala stanice National Public Radio pětiminutový pořad o našem posledním výzkumu, který byl tentýž den publikován v britském časopise *Nature*. Nebylo to poprvé, co o naší práci informovala média. Ale druhý den ráno, když jsem nevěřícně zíral na počitadlo přístupů na webové stránky našeho projektu, které přes noc zaznamenalo více než 10 000 návštěv, jsem si uvědomil, že tentokrát jde o něco trochu jiného. Moje e-mailová schránka byla zaplavena nespočetnými zprávami. Většinou pozitivními, ale některé mě dosti vyděsily. „Kčertu, nepřibližujte se k mému počítači!" napsal vysoce postavený úředník společnosti zabývající se vývojem obranného softwaru. „Opravdu nerad bych viděl, jak dalšího východoevropského počítačového experta poslala americká vláda za mříže," končilo jiné nepříliš přátelské psaní, které mi připomnělo, jak nedávno americké úřady zatkly jistého ruského hackera. „Žádám vás o ujištění, že tento program nebyl a ani v současné době není zaměřen na žádné počítače v našich sítích," psal výkonný ředitel jedné norské společnosti. „Upozorňuji vás, že jakékoli neoprávněné užití zdrojů umístěných na těchto IP adresách* je nezákonné a může vést k právním krokům a požadavkům na kompenzaci." Jak mohl výzkumný článek zamýšlený jen pro akademické publikum a uveřejněný v jednom z nejprestižnějších vědeckých časopisů vyvolat tak ostrou a okamžitou reakci?

James McAdams, vedoucí oddělení pro studia mezinárodních vztahů na univerzitě Notre Dame, měl začátkem roku 2000 báječnou myšlenku. Dal dohromady sedm profesorů z nejrůznějších oborů, včetně ekonomie, fyziky, práva, chemické technologie, informatiky a asijských jazyků, aby neformálním způsobem diskutovali o dopadu internetu na všechno možné, od demokracie po školství. Setkávali jsme se jednou za měsíc u snídaně nebo u oběda a střídali jsme se v navrhování diskusních témat a zadávání studijních materiálů pokrývajících otázky od počítačového zákonodárství po sociální hnutí na webu. Jednou při snídani na takovém setkání informatik Jay Brockman poznamenal, že v přeneseném smyslu je web počítačem. Jeho poznámka mi vrtala hlavou. Jistě, internet se skládá z počítačů, které si dovedou vyměňovat webové stránky a e-maily, ale tato omezená komunikace řízená uživatelem ještě nedělá z world wide webu jeden počítač.

Dalo by se to nějak změnit? Můžeme přimět počítače, aby navzájem řídily svou aktivitu? Jen tak pro začátek, dokázal bych přinutit nějaký vzdálený počítač, aby prováděl výpočty mým jménem? Právě touto zajímavou otázkou jsem se chtěl zabývat. Nakonec jsme dali dohromady malou výzkumnou skupinu, abychom se na to zkusili podívat. K Brockmanovi a mně se brzy přidal Vincent Freeh, expert na internetové protokoly, a můj dlouholetý kolega Hawoong Jeong.

* Každý počítač připojený k internetu má přiřazenu jedinečnou IP adresu (dvanáctimístné číslo), která ho jednoznačným způsobem identifikuje (pozn. překl.).

Po mnoha diskusích a úvodních lekcích o tom, jak spolu počítače komunikují, se objevila kontroverzní idea: *parazitní počítání.*

Posílání zprávy internetem je sofistikovaný proces řízený vrstvami složitých protokolů. Když například kliknete na odkaz, abyste si zobrazili nějakou webovou stánku, rozdělí se váš požadavek na malé pakety a ty se pak přenášejí na počítač, jemuž tato webová stránka patří. Tam se požadavek sestaví dohromady, vyhodnotí a přiměje vzdálený počítač, aby vám poslal žádaný webovský dokument. Takový zdánlivě jednoduchý úkol jako kliknutí na odkaz tudíž při svém provádění zahrnuje značný objem výpočtů. Při parazitním počítání jsou prostřednictvím tohoto systému počítače nuceny provádět výpočty na pokyn řídícího stroje prostě tím, že zapojí počítače do komunikace. Abychom toho dosáhli, zamaskovali jsme složité výpočetní problémy coby legitimní internetové požadavky. Když počítač obdržel paket, provedl běžnou kontrolu, aby zjistil, zda paket nebyl po cestě porušen. Tím, jak počítač počítal, řešil zároveň náš problém, který byl zakódován do paketu.

Naše realizace parazitního počítání ukázala, že *dokážeme* zotročit počítače vzdálené stovky kilometrů a přinutit je, aby prováděly výpočty za nás. Tato základní zranitelnost internetu vyvolala záplavu otázek z výpočetní, etické i právní oblasti. Co když někdo tuto metodu vylepší, zefektivní a začne s ní podnikat ve velkém? Kdo je vlastníkem prostředků, které jsou dávány k dispozici každému prostřednictvím internetu? Mohlo by to značit zrod internetového počítače? Bude na konci této cesty nová inteligentní bytost?

Hnáno do extrému parazitní počítání naznačuje, že by si v budoucnu mohly počítače vyměňovat informace a služby podle toho, kde jsou potřeba. V dnešní době je komunikace v rámci jednoho čipu o několik řádů rychlejší než komunikace prostřednictvím internetu. S přicházející vysokorychlostní komunikací se tento rozdíl bude zmenšovat. Brzy začne být dokonale rozumné žádat jiné počítače, aby přispěly svou nevyužitou kapacitou k řešení komplexních problémů, na něž nestačí jediný počítač nebo výzkumná skupina.*

* Tato možnost v sobě skrývá i potenciální hrozby. Uveďme jen jednu: bezpečnost běžných šifrovacích algoritmů s veřejným klíčem, na nichž stojí například veškeré elektronické obchodování, spočívá v tom, že žádný *jednotlivý* počítač nedokáže kód rozluštit v rozumném čase. Kdyby ale někdo uměl spojit přes internet tisíce či desetitisíce běžných „pécéček", obyčejné „zabezpečené" připojení by dokázal bez problémů odposlouchávat (pozn. překl.).

V malém měřítku tuto možnost už využíval projekt SETI@home se sídlem v Berkeley, který shromažďuje nevyužitý čas milionů osobních počítačů k hledání mimozemské inteligence.

Model projektu SETI vyžaduje dobrovolnou spolupráci. Většina z nás je prostě příliš líná na to, abychom se ho zúčastnili. Jestliže se však protokoly umožňující vyměňování služeb a informací stanou normou, bude z toho možné vytěžit ohromné nevyužité zdroje. A internet se může stát nezávislým na lidském dozoru, protože bude umět sám řídit chod většiny informací a zdrojů, které potřebuje k řešení specifických problémů. To by mohlo mít nepředvídatelné důsledky i pro topologii internetu a ještě více by se uplatnila samoorganizace. Dokážu si představit, že když v budoucnu dostanete na nějakou otázku odpověď od vašeho internetového prohlížeče, ani vy, ani váš počítač nebude vědět, odkud přišla. A víte koneckonců, kde máte ve svém mozku uloženo písmeno *A*?

* * *

Naše pokožka je mistrovský kus pokročilé technologie. Má schopnost měřit a cítit změny teploty a pohyb vzduchu. Odhadne velikost předmětů a rozpozná jejich stavbu. Dosahuje toho pomocí obrovského počtu nepatrných integrovaných chemických čidel, která spolu hovoří skrze nervový systém. Jak zdůraznil Neil Gros v časopise *Business Week*, právě teď se Země obaluje podobně citlivou pokožkou. Miliony měřicích přístrojů, kamer, mikrofonů, termostatů a měřičů teploty, světelných a pohybových senzorů a detektorů znečištění rostou všude jako houby po dešti a krmí stále rychlejší a dokonalejší počítače informacemi. Odborníci předpovídají, že do roku 2010 bude na jednoho obyvatele planety připadat 10 000 telemetrických zařízení. Toto číslo není samo o sobě zas tak zajímavé - senzory tu máme už dlouho, od bezpečnostních kamer v supermarketech po detektory aut ukryté v dlažbě, které přepínají semafory na křižovatkách. Novinkou je to, že tyto senzory poprvé dodávají informace do jediného integrovaného systému. Brzy budou na internet připojeny 3 miliardy mobilních telefonů a téměř 16 miliard počítačů zabudovaných do všeho možného, od opékačů topinek po extravagantní oblečení. Malinké senzory této planetární pokožky budou špehovat všechno, od životního prostředí až po dálnice a naše tělo. Nejdůležitější je však to, že všechny budou navzájem propojené. Naše plane-

ta se promění v jeden obrovitý počítač složený z miliard navzájem propojených procesorů a senzorů. Mnozí z nás si však kladou otázku, kdy si tento počítač uvědomí sebe sama? Kdy se z miliard propojených modulů spontánně vynoří myslící stroj o několik řádů rychlejší než lidský mozek?

Je nemožné předpovědět, kdy si internet uvědomí sebe sama, ale rozhodně už teď žije svým vlastním životem. Roste a vyvíjí se nevídanou rychlostí a při tom se řídí stejnými zákony, jaké vytvořila příroda soukající své vlastní sítě. Opravdu se v mnohém podobá reálným organismům. Tak jako se v buňce odehrávají miliony chemických reakcí, běhají vlákny internetu každý den terabajty* informací. Překvapující na tom je to, že některé z těchto informací se velice těžko hledají. To nás přivádí ještě k další síti: world wide webu.

* Terabajt = 2^{40} bajtů, přibližně 1 000 000 000 000 bajtů (pozn. překl.).

Vlákno dvanácté

Potrhaná pavučina

Autoři vědecko-fantastické literatury a vizionáři, jejichž knihy jsem hltal jako dítě, mě naučili věřit, že na přelomu století budou všechny všední práce provádět roboti vyhlížející jako lidé. Avšak vstoupili jsme do nového tisíciletí a po těchto ponížených služebnících nikde ani vidu ani slechu. Jenže roboti se možná vynořili nenápadně. Nemají zlatoleské vzezření obávaných C-3PO ani nedokážou vyloudit spokojené pohvizdování R2-D2.* Moudře se vyhnuli tomu, aby s námi sdíleli přeplněný eukleidovský prostor, kde mají největší hodnotu nemovitosti. Roboti 21. století jsou neviditelní a nehmotní. Usídlili se ve virtuálním světě, který jim se záviděníhodnou snadností umožňuje přeskakovat z jednoho kontinentu na druhý. Neodhalíme je zíráním na obrazovku počítače. Když si ale dáte tu práci a prohlédnete si na svém počítači soubory, které detailně zaznamenávají, kdo navštívil vaše webové stránky, chytíte je při činu. Uvidíte, jak se neúnavně pachtí s jednou z nejnevděčnějších a nejnudnějších činností, které lidstvo vymyslelo: pročítáním a indexováním milionů webových stránek.

Tito roboti, sportovní vozy webu, navržení tak, aby byli rychlí a efektivní, ve zlomcích vteřiny procházejí po odkazech a na své cestě vyčenichají prakticky všechno. I když tito borci zastiňují malého broučka, kterého sestavil Hawoong Jeong k mapování webu, byl jsem na něj skutečně hrdý. Bylo to jako první ojeté auto, které si konečně můžete dovolit. Třebaže měl každý druhý den poruchu a často se dostával do problémů, když nevědomky stáhl webové stránky chráněné proti čtení robotem.**

* Roboti C-3PO a R2-D2 jsou jedni z mnoha bytostí vystupujících v *Hvězdných válkách* (pozn. překl.).

** Tvůrce webové stránky do ní může vložit kód, který žádá, aby stránku neprohlížel žádný robot. „Slušně vychovaní" roboti tento kód respektují za cenu mírné komplikace svého programu. Z toho, co autor uvádí, lze nejspíš hádat, že jejich robot byl natolik jednoduchý, že v sobě neměl naprogramováno, aby kód proti robotům respektoval (pozn. překl.).

Brzy bylo jasné, že mapování celého webu je sen přesahující schopnosti našeho drobečka. Ale přestože se jen tak plížil a často stál na místě, stáhl zhruba 300 000 webových stránek, dost na to, abychom v nich zahlédli bezškálovou síť. V tu chvíli jsme ho vypnuli - možná trochu předčasně. Kdybychom ho nechali zajít dále a dovolili mu, aby donesl větší vzorek webu, mohli jsme objevit jiné rysy komplexních sítí, které z našeho malého vzorku nebyly tak zřejmé. Vyhledávače skutečně vidí mnohem větší úsek webu, než jsme spatřili my při našich experimentech. Badatelé, kteří studují tyto obrovské vzorky, učinili některé fascinující objevy. Zjistili, že web je roztříštěný na kontinenty a společenstva, což omezuje a předurčuje naše chování v internetovém vesmíru. Paradoxně nás i poučili, že tam někde existují i nepoznané země, celé webovské kontinenty, které roboti nikdy nenavštívili, dokonce ani nezahlédli. A co je nejdůležitější, dozvěděli jsme se, že struktura world wide webu má vliv na všechno, od surfování po demokracii.

* * *

Před pár lety jsme si mysleli, že víme všechno, co se o webu vědět dá. Poznámky typu „Když to nemůžeš najít AltaVistou, nejspíš to tam není" nebo „HotBot je první vyhledávací robot, který dokáže prohledat a uložit do databáze *celý* web" byly na denním pořádku. Věřili jsme, že vyhledávače pokrývají web a dodávají ho až k nám. To se rázem změnilo v dubnu 1998. „Dáváme přednost indexování kvalitních stránek před větší kvantitou stránek," znělo nové stanovisko mluvčího jednoho významného vyhledávače. Jiní šli ještě dál a tvrdili, že „spousty stránek nemá cenu indexovat". Co se to stalo? Tento náhlý posun nálady vyprovokoval článek uveřejněný 3. dubna 1998 v časopise *Science*. Jeho tři stránky naprosto změnily naše představy o přístupnosti informace uložené na webu.

Steve Lawrence a Lee Giles rozhodně neměli v úmyslu podkopat důvěru v internetové vyhledávače. Tito výzkumníci z firmy NEC v Princetonu (New Jersey) se zajímali o strojové učení, rychle se rozvíjející podobor informatiky. Postavili metavyhledávač, robot zvaný *Inquirus*, který se dokázal vyptávat každého z velkých vyhledávačů na dokumenty odpovídající zadanému dotazu. Když byli v polovině, uvědomili si, že jejich robot by měl na víc, než se po něm původně chtělo: že by jim mohl pomoci odhadnout velikost webu.

Inquirus požádal několik vyhledávačů, aby vypsaly všechny dokumenty, které obsahují dané slovo, například *krystal*. Kdyby všechny vyhledávače procházely a indexovaly celý web, musely by vracet tentýž seznam dokumentů. Ve skutečnosti jsou seznamy vypsané různými vyhledávači zřídkakdy identické, do značné míry se ale překrývají. Například z 1 000 dokumentů obsahujících slovo *krystal* a nalezených AltaVistou bylo 343 i na seznamu HotBotu. Když podělíme počet shodných dokumentů počtem dokumentů vyjmenovaných AltaVistou, zjistíme, jakou část webu HotBot pokrývá. Protože HotBot v prosinci 1997 uváděl, že indexuje 110 milionů dokumentů, odhadovala skupina z NEC, že world wide web má v té době přibližně 110 milionů děleno 0,343, tedy 320 milionů dokumentů. Dnes se toto číslo nezdá příliš velké, ale v roce 1997 to bylo nejméně dvakrát více, než kolik činily nejlepší odhady velikosti webu.

Před rokem 1998 jsme věřili všemu, co nám o velikosti webu řekly vyhledávače. Měly by to koneckonců vědět. Přelomová studie Lawrence a Gilese udělala z webu objekt vědeckého zkoumání - něco, co se dá a musí studovat systematickými a reprodukovatelnými metodami. Ale to, co nám studie řekla o schopnostech vyhledávačů mapovat web, nám mnoho důvodů k radosti neposkytlo.

* * *

Podle výzkumu firmy NEC prohlédl v roce 1997 největší počet dokumentů HotBot - získal tak pověst vyhledávače s největším pokrytím. To byla pro tuto firmu báječná reklama. David Pritchard, ředitel marketingu u HotBotu, to hrdě komentoval: „Jsme největší index na světě - v této zprávě není nic, co by nás překvapovalo." No, něco by tam bylo. Špatnou zprávou bylo, že HotBot pokrývá jen 34 % celého webu, tedy že 66 % všech webových stránek nevidí. AltaVista, v té době nejpopulárnější vyhledávač, se dostala až na druhou pozici, protože její roboti vyčenichali jen 28 %. Některé vyhledávače, jako například Lycos, zjistily pouhá 2 %. Reakce se dala předvídat: „Zcela upřímně, já k těmto zprávám nemám valnou důvěru. Nesoustředíme se na kvantitu, ale na kvalitu," prohlásil Rajive Mathur, vysoce postavený manažer u firmy Lycos Inc.

Někdo by si mohl myslet, že studie firmy NEC bude vyhledávače motivovat k tomu, aby své pokrytí zvýšily. Nestalo se tak. O rok později, v únoru 1998, Lawrence a Giles svá měření zopakovali; zjistili,

že se velikost webu více než zdvojnásobila a narostla na 800 milionů dokumentů, ale vyhledávače s takovým nárůstem neudržely krok. Ve skutečnosti se jejich pokrytí ještě zhoršilo. Tentokrát se dostal do čela Northern Light, pokrývající pouhých 16 % webu. HotBot a AltaVista výrazně ztratily půdu. Jejich pokrytí kleslo na 11 % a 15 %. Google indexoval pouze 7,8 % z odhadovaných 800 milionů existujících stránek. A všechny vyhledávače dohromady pokrývaly kolem 40 % celého webu. To znamená, že šest z deseti stránek týkajících se vašeho dotazu vám neukáže *žádný* vyhledávač. Prostě je nikdy neuvidí.

Nakonec ale studie společnosti NEC skutečně odstartovala nelítostnou konkurenci mezi vyhledávači. Najednou záleželo na velikosti. Rozvinul se boj o nadvládu mezi AltaVistou a novým vyhledávačem, provozovaným firmou FAST. Už jeho adresa, alltheweb.com, tedy „celýweb.com", nenechávala nikoho na pochybách, jaké jsou cíle společnosti. V lednu 2000 prolomil alltheweb.com hranici 300 milionů stránek. Brzy jej následovala AltaVista. Do června se vážným protivníkem stal nový hráč v ringu, Google: překonal hranici 500 milionů. Zanedlouho se mu vyrovnal Inktomi a stejně tak další nováček, WebTop.com. A v červnu 2001 dosáhl Google nového rekordu, když překročil magickou hranici jedné miliardy pokrytých stránek.

Prozatím si Google udržuje vedení. Alltheweb.com, sledující svůj sen zmapovat nakonec celý web, se drží na druhém místě s více než 600 miliony dokumenty, následuje AltaVista s 550 miliony. Jejich vyhledávače jsou čím dál tím lepší. To je báječné. Problémem však je, že web roste ještě rychleji.

Většina vyhledávačů se ani nesnaží dosáhnout celého webu, a to z prostého důvodu: vyhledávač s největším počtem dokumentů nemusí nutně být ten nejlepší. Jistě, když hledáte nějakou informaci, kterou je těžké najít, je nejlepší vsadit na vyhledávač s větším pokrytím. Jde-li ale o něco, co zajímá kdekoho, nedává větší index nutně lepší výsledky. Většina z nás je už teď zahlcena tisíci stránkami, které vyhledávač vrací na jednoduché dotazy. Mít jich ještě o milion víc, by bylo to poslední, co bychom chtěli. V určité chvíli se tudíž vyplatí spíše vylepšit algoritmus tak, aby vybral tu *nejlepší* stránku z už tak enormní databáze vyhledávače, než ponořit se hlouběji do webu. Když jde o surfování na webu, ať už jednotlivci nebo roboty, ekonomické pobídky (nebo jejich nedostatek) nejsou jediným omezením.

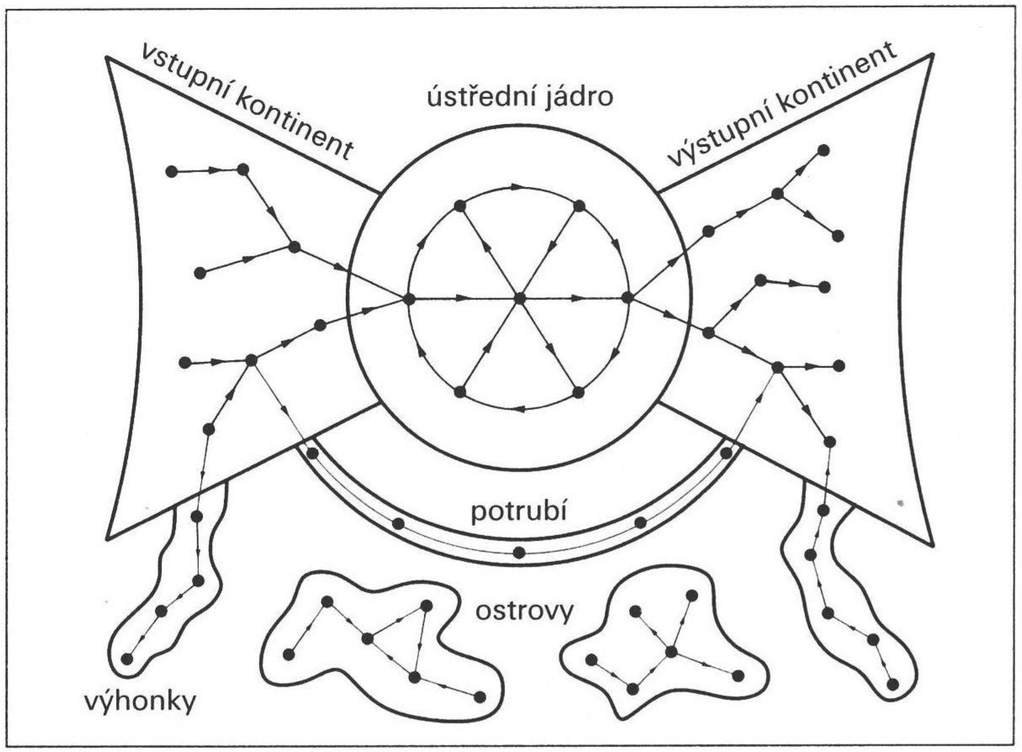
Samotná topologie webu omezuje naši schopnost vidět cokoli, co v něm je. World wide web je bezškálová síť, ovládaná centry a uzly s velkým počtem vazeb. Avšak, jak ještě uvidíme, tato topologie na velké škále koexistuje s četnými strukturami na malých škálách a ty silně omezují, kam až se můžeme při zkoumání dostat prostým klikáním od odkazu k odkazu.

* * *

Třebaže je na webu miliarda dokumentů, to, že jsou devatenáct kroků od sebe, naznačuje, že webem lze snadno proplouvat. Je velký, a přece malý. Malý svět skrývající se ve webu je však trochu zavádějící. Jistě, pokud mezi dokumenty existuje cesta, pak je většinou krátká, ale ve skutečnosti se nedají všechny stránky navzájem spojit. Když začneme z libovolné stránky, dosáhneme jen asi k 24 % všech dokumentů. Zbytek je pro nás neviditelný, při surfování se k němu nedostaneme.

Je to důsledek faktu, že z různých technických důvodů jsou vazby na webu orientované. Jinými slovy, podél daného odkazu můžeme cestovat jen jedním směrem. Jestliže mezi dvěma uzly orientované sítě není přímá vazba, můžete je propojit prostřednictvím jiných uzlů. Když chcete například jít z A do D, můžete vyrazit z uzlu A, pak jít do uzlu B, který má vazbu na uzel C, jenž míří k D. Cestu tam i zpět však vykonat nemůžete. Na neorientované síti, kde můžete vazbami chodit v obou směrech, existence cesty $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ znamená, že nejkratším spojením z D do A je obrácená cesta $D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$. V orientované síti však není žádná záruka, že obrácená cesta existuje. S největší pravděpodobností budete muset absolvovat jinou cestu zpět. Možná že než se dostanete zpátky od D k A, budete muset navštívit desítky mezilehlých uzlů. Web je plný takových nesouvislých orientovaných cest. Ty podstatně ovlivňují možnosti pohybu po webu.

Orientované sítě nepředstavují zásadně novou třídu sítí. Ať je síť bezškálová nebo náhodná, vazby mohou být buď orientované, nebo neorientované. Zatím jsme se zabývali povětšinou neorientovanými vazbami. Většina sítí, od sociálních po sítě vzájemného působení proteinů v buňce, je skutečně neorientovaná. Ale jiné, například web nebo potravní sítě, mají vazby orientované. Tato orientovanost se promítá do topologie sítě. V kontextu world wide webu se těmito



Kontinenty orientované sítě. Orientované sítě, jako je world wide web, se přirozeně rozpadají na několik snadno rozpoznatelných kontinentů. V ústředním jádře se dostaneme do každého uzlu z kteréhokoli jiného uzlu. Uzly ve vstupním kontinentu jsou uspořádány tak, že když procházíte vazbami, dostanete se nakonec do ústředního jádra, ale začnete-li v jádře, nedovolí vám vrátit se do vstupního kontinentu. Zato všechny uzly ve výstupním kontinentu jsou dosažitelné z jádra, ale jakmile do nich dorazíte, žádné spoje vás nedovedou zpátky do jádra. Konečně potrubí spojují přímo vstupní a výstupní kontinent, některé uzly tvoří výhonky, připojené pouze k vstupnímu a výstupnímu kontinentu, a pár uzlů tvoří izolované ostrovy, nedosažitelné z ostatních uzlů.

důsledky poprvé zabýval Andrei Broder z AltaVisty a jeho spolupracovníci z IBM a Compaqu. Studovali vzorek 200 milionů uzlů, téměř pětinu všech webových stránek existujících v roce 1999, a přitom zjistili, že nejdůležitějším důsledkem orientovanosti je to, že web netvoří jednotnou homogenní síť, ale že se rozpadá na čtyři velké kontinenty (obr. nahoře). Při pohybu v každém z nich jsme nuceni řídit se jinými dopravními předpisy.

První z těchto kontinentů obsahuje kolem čtvrtiny všech webových stránek. Často se mu říká ústřední jádro a jsou v něm doma všechny významné webové stránky, od Yahoo! po CNN.com. Jeho významným rysem je to, že se v něm lze snadno pohybovat, protože

existuje cesta mezi každými dvěma dokumenty, které k němu patří. To neznamená, že mezi každými dvěma uzly ústředního jádra je přímé spojení, ale že existuje cesta procházející uzly patřícími k jádru, která vám dovolí surfovat mezi libovolnými dvěma uzly.

Druhý a třetí kontinent, *vstupní* a *výstupní*, jsou stejně velké jako ústřední jádro, mnohem obtížněji se však v nich pohybuje. Ze stránek ve *vstupním kontinentu* se sice dostanete do ústředního jádra, ale neexistuje žádná cesta, která by vás dovedla zpátky do vstupní země. To do uzlů patřících k *výstupnímu kontinentu* se snadno dostanete z ústředního jádra, ale jakmile jednou jádro opustíte, žádné spoje vás nedovedou nazpátek. Výstupní země je zabydlena webovými stránkami společností, na které se lze snadno dostat zvnějšku, ale jakmile jste jednou uvnitř, nedostanete se ven. Čtvrtý kontinent tvoří *výhonky* a nesouvislé *ostrovy*, izolované skupiny propojených stránek, které jsou z ústředního jádra nedosažitelné a nemají spojení zpátky k němu. Některé z těchto izolovaných skupin mohou obsahovat tisíce webovských dokumentů. Na takových ostrovech či výhoncích se nachází asi čtvrtina všech webovských dokumentů. Obecně nemá umístění webové stránky na webu příliš společného s jejím obsahem, je spíše určeno jejími vztahy, zprostředkovanými přicházejícími a odcházejícími odkazy k jiným dokumentům.

Mapa těchto čtyř kontinentů podstatně omezuje možnost pohybu na webu. Jak daleko při surfování dospějeme, záleží na tom, kde začneme. Odstartujeme-li z uzlu, který patří k ústřednímu jádru, můžeme dojít ke všem stránkám, které k tomuto velkému kontinentu patří. Avšak bez ohledu na to, kolikrát jsme ochotni kliknout, asi polovina webu bude pro nás stále neviditelná, protože vstupní země a izolované ostrovy jsou z jádra nedosažitelné. Když z tohoto jádra vykročíme do výstupní země, brzy se ocitneme ve slepé uličce. Zahájíme-li svou cestu z výhonku nebo izolovaného ostrova, bude web vypadat velice malý, protože budou dosažitelné pouze dokumenty na témž ostrově. Pokud je vaše webová stránka na ostrově, vyhledávače ji nikdy neobjeví, ledaže byste jim poslali svou adresu.

Naše schopnost zmapovat celý world wide web není tedy jen otázkou peněz nebo ekonomických stimulů. Orientovanost vazeb vytváří z webu velice potrhanou pavučinu* ovládanou čtyřmi hlavními kontinenty. Internetové vyhledávače si snadno poradí s mapováním

* Web = pavučina (pozn. překl.).

asi tak poloviny webu, s dobře propojenou centrální komponentou a s výstupní zemí, protože uzly, které k nim patří, jsou dosažitelné z libovolného uzlu často navštěvovaného ústředního jádra. Zato zbylá polovina webu, tvořená ostrovy a vstupní zemí, je beznadějně izolovaná. Ať se roboti snaží sebevíc, dokumenty nacházející se v nich nenajdou. Proto většina vyhledávačů nabízí možnost, abyste jim zaslali adresu vaší webové stránky. Když to uděláte, mohou odtamtud začít proplouvat internetem a možná odhalí vazby na oblasti webu, v nichž ještě nikdy nebyly. Odmítnete-li se dobrovolně přihlásit, mnoho uzlů může sídlit po řadu příštích let v nepoznaných krajích.

Přetrvá tato roztříštěná struktura i v budoucnu? Anebo rozvíjející se a narůstající web nakonec pohltí tyto čtyři kontinenty do jediného, plně propojeného jádra? Odpověď je nasnadě: Dokud vazby zůstanou orientované, taková homogenizace nikdy nenastane. Tyto kontinenty nejsou v žádném případě nějakou zvláštností world wide webu. Objevují se ve všech orientovaných sítích. Vezměme například v úvahu síť, bez níž bychom nedokázali nalézt vědecké informace: citační síť. Každý vědecký článek cituje jiné články, které mají vztah k rozebírané práci. Matematický článek bude citovat jiné matematické články, které se zaměřují na podobné problémy, a příležitostně i nějaký článek z biologie nebo fyziky, pro ilustraci aplikace získaných výsledků. Všechny vědecké publikace jsou tudíž součástí sítě vědy, jejímiž uzly jsou výzkumné publikace spojené citacemi. Tyto vazby jsou orientované. Sledováním odkazů na literaturu na konci této knihy můžete najít citované práce, ale žádný z těchto článků by vás nemohl odkázat na tuto knihu, protože vyšla později než ony. Citační síť je velmi zvláštní orientovaná síť, v níž vstupní a výstupní komponenty odrážejí časové uspořádání článků a ústřední komponenta, pokud vůbec existuje, je velmi malá. Orientované sítě se vyskytují také v přírodě. V potravních sítích jsou druhy spojeny vazbami, které nám říkají, které druhy se stávají kořistí druhů jiných. Vazby těchto sítí jdou zřídkakdy oběma směry: lev požírá antilopu a nikdy naopak.

Podstatné je zde to, že *všechny* orientované sítě se rozpadají na tytéž čtyři kontinenty. Jejich existence neodráží žádný organizační princip typický pro web. Ať už jde o síť náhodnou nebo bezškálovou, pokud jsou vazby orientované, tyto kontinenty se zákonitě objeví. To nedávno dokázali Sergej N. Dorogovcev, José F. F. Mendes a Alexandr N. Samuchin z univerzity v portugalském Pôrtu. Ukázali, že se

velikost a struktura těchto kontinentů dá analyticky předpovědět. V závislosti na speciálních vlastnostech sítě se samozřejmě mění relativní velikost těchto kontinentů, ale tyto výsledky naznačují, že bez ohledu na to, jak složitý a velký web jednou bude, čtyři kontinenty přetrvají.

* * *

Když v červnu 2000 Cass Sustein, profesor práv na Chicagské univerzitě, prováděl náhodný průzkum šedesáti webových stránek věnovaných politice, zjistil, že jen 15 % z nich obsahuje odkazy na stránky s opačnými názory. Naproti tomu až 60 % má odkazy na podobně orientované webové stránky. Studie zaměřená na demokratickou debatu na webu došla k podobnému závěru: jen asi 15 % webových stránek nabízí odkazy na opačná stanoviska. Sustein se obává, že omezením přístupu k rozporným hlediskům povzbuzuje vznikající internetový svět segregaci a sociální roztříštěnost. Mechanismy stojící v pozadí sociální a politické izolace na webu skutečně samy sebe posilují a mění i topologii webu, čímž celý internet štěpí. Ony čtyři kontinenty nejsou tudíž jedinými izolovanými strukturami na webu. V menším měřítku jsou tyto kontinenty poseté vesnicemi a městy pulzujícími životem. Jsou to webové stránky spojené dohromady společnou myšlenkou, koníčkem nebo místem a tvoří komunity se společnými zájmy. Fanoušci jazzu stejně jako milovníci ptactva tvoří dobře vymezenou webovou komunitu. Náboženští fundamentalisté ve východní Evropě sdílejí virtuální prostor se svými ideovými souputníky ve Spojených státech. Antiglobalizační aktivisté v Evropě spojují síly se svými soudruhy v Japonsku a koordinují s nimi strategie a aktivity.

Komunity jsou podstatnou složkou sociálních dějin lidstva. Granovetterovy skupinky přátel, základní stavební kameny komunit, na tento fakt poukazovaly. Poslední dobou se však, možná aniž by si to jejich členové uvědomovali, tyto komunity stále více vtiskly do topologie webu. Vedlejším efektem našeho digitálního života je to, že naše přesvědčení a angažovanost jsou všem na očích. Pokaždé když se spojíme s nějakou webovou stránkou, podporujeme její význam pro svou intelektuální zvídavost. Odkazy vášnivého pozorovatele ptáků nás tak mohou dovést k webovým stránkám podobného zaměření a to nám dovoluje zmapovat komunitu milovníků ptactva.

Vyhledávání takových webových komunit má nesmírný praktický význam. Když výrobce automobilů nalezne komunitu fanoušků sportovních aut, může mnohem efektivněji nabízet své nové modely tak, že začne umísťovat reklamu na několik center této komunity. Aktivisté zabývající se AIDS mohou využít znalosti o komunitě k tomu, aby zburcovali ty, kdo se o tuto nemoc silně zajímají, a zformovali z nich efektivní nátlakovou a akční skupinu. Organizátoři festivalů etnické kultury mohou s výhodou použít informace o webovských etnických komunitách k propagaci chystaných podniků a k pěstování lokálních organizací základní úrovně. Problém je, že máme více než miliardu stránek. Dokážeme na tak obrovité síti takové komunity nalézt?

Soudce Nejvyššího soudu Potter Stewart pronesl roku 1964 slavnou větu: „Nebudu se dnes dále pokoušet o definici [obscenity] ... a možná že by se mi to nikdy nepodařilo srozumitelným způsobem. Ale když ji vidím, poznám ji." S podobným problémem se setkáme, když se snažíme najít správnou definici „webových komunit". Všichni je poznáme, jakmile je uvidíme, ale každý je posuzuje podle poněkud odlišných kritérií. Jedním z důvodů je to, že mezi různými komunitami nejsou ostré hranice. Jedna webová stránka může skutečně patřit k různým skupinám. Například stránka nějakého fyzika může míchat odkazy na fyziku, hudbu a horolezectví a kombinovat tak profesionální zájmy a koníčky. K jaké komunitě pak takovou stránku zařadit? I velikost komunit je velmi proměnlivá. Například zatímco komunita zajímající se o kryptografii je malá a poměrně snadno k nalezení, komunita zbožňovatelů anglické literatury se určuje mnohem obtížněji a je také roztříštěná na mnoho menších skupin, od shakespearovských nadšenců po fanoušky Kurta Vonneguta.

Gary Flake, Steve Lawrence a Lee Giles z firmy NEC přednedávnem navrhli, aby se dokumenty považovaly za součásti téže komunity tehdy, mají-li více vazeb mezi sebou než ke stránkám vně komunity. Tato definice je dostatečně přesná, aby se s její pomocí mohly vyvíjet algoritmy k identifikaci různého seskupování, máme-li dánu topologii world wide webu. Ukazuje se však, že skutečně tyto komunity najít je problém proslulý svou obtížností. Takové hledání patří k třídě takzvaných *NP úplných* problémů, což znamená, že ačkoli v principu se komunity nalézt dají, neexistuje efektivní algoritmus, který by to dokázal v rozumném čase. Obtížnost hledání komunit na webu se tedy podobá řešení slavného problému obchodního cestujícího nalézt nejkratší cestu procházející daným počtem měst, za předpokladu, že nesmí navštívit totéž město dvakrát. Jediným algoritmem, který při hledání komunit nebo cesty obchodníka zaručeně funguje, je vyzkoušet všechny možné kombinace. V případě komunit roste čas potřebný k provedení takové prohlídky exponenciálně s velikostí webu. S dostatečně rychlými počítači bychom mohli být schopni nalézt komunity ve vzorku stovky dokumentů. Vyloupnout je z miliardy webových stránek však prostě nepřichází v úvahu.

Když zkombinujeme obsah stránek s topologií, problém se poněkud zjednoduší. Například se můžeme soustředit jen na ty dokumenty, které obsahují jedno nebo dvě klíčová slova. Lada Adamicová ze Stanfordovy univerzity nedávno zkoumala komunity objevené vyhledáváním frází „potrat-právo volby" a „potrat-právo na život". Otázka na právo na život ji dovedla k jádru o jedenačtyřiceti dokumentech, v němž se můžete dostat z každé stránky na všechny ostatní. Naproti tomu hnutí pro právo volby bylo roztříštěné na mnoho nesouvisejících stránek.

Takové rozdíly ve struktuře soupeřících komunit mají závažné důsledky pro jejich schopnost se zviditelnit a organizovat se pro společnou věc. Podle Adamicové se kampaň proti potratovému zákonu, zahájená někde mezi příznivci hnutí pro život, snadno dostane k jiným podobným stránkám, protože je navzájem pojí mnoho vazeb. Kromě toho se díky odkazům na stránky práva volby o kampani dozvědí i návštěvníci stránek práva volby. Bylo by však potřeba dělat reklamu na několika nesouvisejících webových stránkách práva volby, aby se dosáhlo stejně účinné kampaně na podporu tohoto zákona. Nejenže je tedy komunita bojující za právo na život lépe zabydlená na webu, ale je i lépe organizovaná – její stránky toho o sobě navzájem mnohem více vědí.

Web není ani zdaleka homogenním mořem uzlů a vazeb, ale je rozdělen do čtyř kontinentů, z nichž každý hostí mnoho vesnic a měst, které se projevují jako překrývající se komunity. Každý z nás, kdo chce nastoupit svou virtuální existenci, patří k jedné nebo k několika z nich. Jistě, k plnému porozumění této jemné struktury webu máme ještě daleko, ale mnoho sil, od obchodních zájmů po vědeckou zvídavost, nás stále více motivuje, abychom usilovali o víc. Jsem přesvědčen, že jak pronikáme hlouběji, narazíme na mnohá překvapení, která nám nabídnou ještě jasnější pohled na tento komplexní, beztvarý, stále se měnící internetový vesmír.

* * *

20. listopadu 2000 rozhodl ve Francii soudce Jean-Jacques Gomes v bezprecedentním rozsudku, že Yahoo! musí znemožnit francouzským zákazníkům přístup na všechny ty své stránky, které nabízejí k prodeji nacistické starožitnosti. Opíral se při tom o francouzský zákon zakazující prodej takových věcí ve Francii. O právních důsledcích rozhodnutí soudu se stále diskutuje po celém světě. Společnost Yahoo! argumentovala, že internet je svou podstatou zbavený všech zeměpisných a státních hranic a podřízení americké společnosti národním zákonům po celém světě je tudíž vážným narušením základní filozofie internetu. Jiní nesouhlasili; argumentovali, že internet nepřináší nic zásadně nového a že pro něj musí platit stejné dohody o mezinárodním obchodu jako pro kterékoli jiné mezinárodní podnikání.

Kromě právních důsledků je hlubším problémem program - software skrývající se za webem. Francouzský soud vzal v potaz, že když uvážíme podstatu webu, neexistuje způsob, jak udržet Francii v úplné izolaci od světa. Přesvědčili ho však experti, kteří tvrdili, že firma Yahoo! by mohla nainstalovat filtrovací mechanismus, který by odblokoval nejméně 70-80 % francouzských občanů, kteří by se rádi na nacistické stránky na Yahoo! dostali. A tak soud firmě Yahoo! nařídil, aby pozměnila program. To je přesně ten typ akce, jakou předvídal Lawrence Lessig, profesor práva na Stanfordově univerzitě, ve své významné knize *Kód a další zákony kyberprostoru*.* Podle Lessiga „ponechán sám sobě se kyberprostor stane dokonalým nástrojem kontroly ... neviditelná ruka kyberprostoru staví architekturu, která je pravým opakem té, která tu byla, když se kyberprostor zrodil."

Lessig, který slovem *architektura* myslí souhrn veškerého softwaru běžícího na webu, dochází k závěru, že jediný způsob, jak chování v kyberprostoru ovlivnit, je regulovat kód čili program. Naznačuje, že se právě k tomu účelu spojily dvě síly. Zaprvé, vlády mají těžkou hlavu s dohledem nad chováním na webu. Je snadné vydat zákony, které omezují přístup k čemukoli, od pornografie po klíče ke kryptografickým kódům, jenže v kybersvětě bez hranic je téměř nemožné dodržování těchto zákonů vynutit. Když vlády prosadí

* *Code and Other Laws of Cyberspace.*

možnost regulovat web, obchod se tomu přizpůsobí. Firmy hledající bezpečnější podnikatelské prostředí, v němž mohou z různých důvodů, ať už z obavy o bezpečnost nebo z marketingových důvodů, identifikovat zákazníky, budou tlačit kód směrem k větší kontrole. Obyvatelé sítě úplně ztratí svoji anonymní existenci mimo prostor, jak se technika bude vyvíjet, aby splnila obchodnické touhy.*

Případ Yahoo! a dalších na jednu stranu ukázal, že některé z Lessigových chmurných vizí se staly skutečností. Na druhé straně, podle mého názoru, abychom opravdu rozuměli kyberprostoru, musíme pečlivě rozlišovat mezi *programem* a *architekturou*. Programy - tedy software - to jsou cihly a malta kyberprostoru. Architektura je to, co stavíme s použitím programů jako stavebních kamenů. Velcí architekti minulosti od Michelangela Buonarottiho po Franka Lloyda Wrighta předvedli, že zatímco výběr surovin je omezený, možnosti architektury nemají hranice. Program může omezovat chování a skutečně ovlivňuje architekturu, ale jednoznačně ji neurčuje.

Tak jako budova vzniká spojením materiálu a myšlenky, je architektura webu výsledkem souhry dvou stejně důležitých vrstev: *programu* a *kolektivních lidských činností*, které program využívají. Ta první může být regulována soudy, vládou i firmami. Tu druhou však může ovlivňovat každý jednotlivý uživatel nebo instituce, protože web nemá žádný ústřední plán - je samoorganizovaný. Vyrůstá z individuálních akcí milionů uživatelů. V důsledku toho je jeho architektura mnohem bohatší než součet jeho částí. Většina opravdu důležitých rysů a vlastností, které se objevují, pochází z jeho dalekodosahové samoorganizované topologie.

Dobrým příkladem je demokracie na webu. Viděli jsme, že bezškálová topologie znamená, že obrovitá většina dokumentů je stěží viditelná, protože všechny vazby shrábla vysoce oblíbená menšina. Ano, na webu máme svobodu slova, je ale pravděpodobné, že naše hlasy budou příliš slabé, aby je bylo slyšet. Stránky s pouze malým počtem příchozích vazeb nenajdete náhodným procházením, ale pořád a pořád vás to táhne směrem k centrům. Je lákavé myslet si,

* Tato vize se může stát brzy realitou masovým zavedením digitálních podpisů. Už dnes se v Evropské unii zavádí zákaz nevyžádaných e-mailových zpráv. Ten je možné snadno vynutit, pokud každý e-mail bude muset být digitálně podepsaný. Jestliže by navíc každá sebejednodušší transakce na webu musela nést digitální podpis, bylo by možné do nejmenších detailů sledovat chování kohokoli na webu (pozn. překl.).

že roboti mohou této pasti popularity uniknout. Mohli by, ale neunikají. Pravděpodobnost, že nějaký dokument bude indexován vyhledávačem, je totiž silně závislá na počtu příchozích odkazů. Dokumenty pouze s jednou příchozí vazbou mají šanci méně než 10 %, že je nějaký vyhledávač zaznamená. Zato roboti najdou a indexují téměř 90 % stránek, které mají jedenadvacet až sto příchozích vazeb.

Lessig má pravdu. Architektura webu řídí skoro všechno, od přístupu k zákazníkům po pravděpodobnost, že vaši stránku někdo navštíví při surfování po odkazech. Vědecké studie webu však stále více dokazují, že tato architektura představuje vyšší úroveň organizace než pouhý program. Vaše schopnost najít moji webovou stránku je ovlivněna jen jedním faktorem: umístěním mé stránky na webu. Když moji stránku shledá zajímavou hodně lidí a vytvoří si na mě odkaz, bude se z mého uzlu pomalu stávat menší centrum a vyhledávače si toho určitě všimnou. Ale budou-li všichni moji stránku ignorovat, udělají vyhledávače totéž. Ocitnu se v záplavě neviditelných webových stránek, které beztak tvoří většinu. A tak dalekodosahová topologie webu - tedy jeho skutečná architektura - omezuje naše chování a naši viditelnost na webu víc, než by kdy dokázala vláda nebo průmysl tím, že se bude vrtat v programu. Regulace přicházejí a odcházejí, ale topologie a základní přírodní zákony, které ji řídí, se s časem nemění. Dokud budeme nechávat na jednotlivci, kam se má připojit, nebudeme schopni podstatně změnit dalekodosahovou topologii webu a s jejími důsledky se budeme muset smířit.

* * *

Na webu je báječné to, že naše webové stránky dospívají spolu s námi. Jakmile svou osobní stránku změníme, nikdo nás nemůže obtěžovat s opačnými názory, které jsme možná zastávali před desetiletími. Pamatujete se na toho kluka, s nímž jste se rozešla před pár lety? Samozřejmě že ano, ale nejspíš doufáte, že všichni ostatní už zapomněli. Jasně, všechny jeho fotky z vaší webové stránky jsou pryč. A co to provolání na střední škole, za něž se ještě pořád stydíte? Nebo ta sbírka odkazů na Demokratickou stranu, kterou jste si sestavil pouhé dva roky předtím, než jste se ocitl na republikánské kandidátce? Nic z toho se nedá vystopovat. Anebo alespoň máme sklon si to myslet. To proto, že většina obyvatel internetového světa nikdy neslyšela o Brewsteru Kahleovi. Pravda je, že Kahle dost možná má kopii všech těch obrázků a dokumentů, které jste tak pečlivě odstranili ze svých webových stránek a už jste na ně zapomněli.

Kahle, vynálezce informačních serverů širokého dosahu a zakladatel firmy Alexa Internet, jednoho z velkých vyhledávačů, je veteránem webu. Poté co roku 1999 prodal Alexu firmě Amazon.com, použil výtěžek na vytvoření nevýdělečné organizace Internet Archives, sídlící v Presidiu, bývalé vojenské základně v centru San Franciska. Jeho cíl je prostý: snaží se zabránit tomu, aby obsah webu zmizel v hlubinách minulosti.

Když jsem jej v březnu 2000 v Archives navštívil, abych pronesl přednášku na workshopu o internetových archivech, připomenul mi Kahle starodávnou alexandrijskou knihovnu. Věřilo se, že má kopii všech knih sepsaných v antickém světě, a ty všechny zmizely, když knihovna vyhořela do základů. Připoměl mi také osud velkých sbírek starých filmů, které byly dány do sběru kvůli stříbru v nich obsaženému. Bez kulturních výtvorů nemá lidstvo žádnou paměť a bez paměti se těžko poučí ze svých úspěchů a proher. I na world wide webu necháváme historii mizet nezaznamenanou. Aby se historie neopakovala, Internet Archives, Kahleovo intelektuální dítko, pečlivě uchovává všechny dokumenty, k nimž se Alexa dostala od roku 1996. Sbírka se dnes rozrostla na 100 miliard webových stránek, což představuje kolem 100 terabajtů informace. Pro srovnání - všechny knihy a dokumenty archivované v Knihovně Kongresu obnášejí pouze asi 20 terabajtů.

Sbírka Archives má neporovnatelnou hodnotu jak pro historiky, tak pro sociology a topografy webu. Když budete psát historii prezidentských voleb v roce 2000, začnete u Archives. Mají tam stroj času, který vám dovolí nahlédnout do stránek kandidátů, projít instrukce pro voliče a webové stránky politických stran, přesně takové, jak vypadaly během kampaně. Chcete sledovat krok za krokem reakci internetového světa na teroristické útoky z 11. září 2001? Měsíc po těchto událostech už měli v Archives sbírku 200 milionů dokumentů k tomuto tématu. Chcete-li jako topograf webu pochopit architekturu této sítě, jsou Archives vynikajícím startovním bodem. Dovolí vám vystopovat, kdy a kde se přidávaly a rušily webové stránky a odkazy, jak se některé nově vzniklé stránky staly přes noc populárními a jak bývalá centra ztratila svůj lesk. Srovnáním map webu sejmutých v různých časových odstupech můžete sledovat zrod a krystalizaci virtuálních komunit. V Archives mají všechny údaje nutné pro

rekonstrukci chaotické evoluce uzlů a vazeb, což pomáhá odhalit mechanismus zodpovědný za dnešní architekturu webu.

Archives mají mnoho nadšených příznivců z mnoha různých oborů, ale badatelé, kteří by z nich mohli těžit, většinou buď nevědí o jejich existenci, nebo jim chybějí znalosti programování, aby se k nim dostali a efektivně je využívali. Tak zůstává jejich plný potenciál nevyužitý jak badateli, tak veřejností. Doufám však, že Internet Archives jsou jen začátkem naší probouzející se historické zodpovědnosti za internetový svět. Archives zdaleka nepodchycují všechno, co existuje. Hlavní sbírka pochází z Alexy, vyhledávače založeného roku 1996 Kahlem a Brucem Gilliatem. Jak už víme, vyhledávače pokrývají jen malý zlomek webu a Alexa se nikdy neproslavila snahou o vysoké pokrytí. Navzdory svému enormnímu rozsahu tudíž současná sbírka u Archives představuje jen nepatrný zlomek webu; většinou jsou to hojně navštěvované webové stránky. Alexa se dostala k centrům; zbytek, obrovská většina méně zapojených stránek, ignorovaných jejími roboty, mizí v zapomnění rychlostí milionů denně.

* * *

Mimozemšťanovi, který by se přibližoval k naší sluneční soustavě, bude Země připadat jako obyčejný kulatý míč. Z větší blízkosti si možná všimne kontinentů. Jasná světla Paříže, New Yorku, Londýna a Tokia naznačí něco o inteligentním životě. Když se dostane ještě blíž, rozezná menší komunity a vyjeví se mu jemná struktura spojujících je dálnic a silnic. Musel by však přijít opravdu blízko, aby viděl lidské bytosti zodpovědné za toto rozsáhlé uspořádání viditelné z vesmíru.

Náš výzkum world wide webu šel úplně stejnou cestou. Nejdříve jsme objevili rozsáhlou nehomogenní topologii a pochopili jsme, že je stejně nevyhnutelná jako kulový tvar většiny planet. Z bližšího pohledu jsme zaznamenali čtyři velké kontinenty, z nichž každý se řídí jinými zákony. Když jsme zaostřili na více podrobností, začali jsme vidět komunity, shluky webových stránek, které drží pohromadě společné zájmy. Tyto průniky do neznáma zásadním způsobem proměnily naše chápání world wide webu. Dozvěděli jsme se, že internetový vesmír je mnohem větší, než kdokoli někdy předvídal, a že roste rychleji, než jsme si vůbec mysleli. K velkému zděšení jsme navíc zjistili, že je mnohem méně zmapovaný, než jsme byli ochotni

připustit. Před dvěma lety nebylo šest z deseti stránek navštíveno žádným internetovým vyhledávačem. Můžeme-li věřit trendům, vidí dnešní vyhledávače ještě menší zlomek webu. Dobrou zprávou je, že konkurence je nutí pracovat lépe. Nikdy bychom však neměli zapomínat, že ať je konkurence sebetvrdší, web je ještě větší.

Neměli bychom ani podceňovat obrovskou službu, kterou nám vyhledávače a jejich roboti poskytují. Často celí zoufalí vzdycháme a naříkáme, že web je „džungle". Jenže bez robotů by to byla černá díra. Prostor by se kolem něj zakřivil, takže nic, co by do něj spadlo, by se nikdy nedostalo ven. Roboti brání tomu, aby se world wide web zhroutil pod tíhou své narůstající složitosti. Narovnávají prostor zpět a udržují pořádek v chaosu uzlů a vazeb.

Naše životy ovládá web čím dále tím více. Přesto věnujeme pozoruhodně málo pozornosti a prostředků tomu, abychom mu porozuměli. Možná by stačilo jen málo, a měli bychom tu novou revoluci v přístupu k informacím. Jednou se to stane. Otázkou je, co mezitím ztratíme.

Ve společnosti, které stále více vládne internet, má pochopení world wide webu nesmírnou hodnotu samo o sobě. Pro mě je tu ale ještě větší odměna. Jedním z nejvíce vzrušujících aspektů tohoto výzkumu byl objev zákonů, jejichž platnost se nezastaví u bran kyberprostoru. Tyto zákony, platné stejně tak pro buňku jako pro ekosystém, ukazují, jak jsou přírodní zákony univerzální a jak samoorganizace zásadně přetváří svět kolem nás. Díky své digitální povaze a nesmírné velikosti představuje world wide web modelový systém, jehož všechny detaily lze odhalit. Nikdy jsme se nedostali k žádné síti tak blízko. Zůstane stále zdrojem inspirace a myšlenek pro každého, kdo se snaží pochopit vlastnosti našeho pavučině podobného světa.

Vlákno třinácté

Mapa života

V únoru 1987 přinesl časopis *Nature* zprávu o převratném objevu: byl nalezen gen pro maniodepresivní psychózu čili podle modernějšího názvosloví bipolární poruchu. Tato duševní porucha postihuje 1–5 % dospělých ve Spojených státech a celých 20–25 % z nich se aspoň jednou pokusí o sebevraždu. Protože riziko, že maniodepresivní psychóza vypukne, je pětkrát až desetkrát větší u těch, kdo mají nějakého blízkého příbuzného s touto chorobou, převažuje názor, že tato nemoc je podmíněná geneticky. Jakmile se přišlo na to, jak spojit nemoci se specifickými geny, začaly závody v hledání maniodepresivního genu. Zdá se, že vytoužené prvenství si získali autoři článku v *Nature* roku 1987, kteří lokalizovali gen na chromozomu 11, když studovali velkou rodinu amišů* v Lancasteru v Pensylvánii. Dva roky poté badatelská skupina své výsledky odvolala. Nepříjemný omyl však další lovce genů neodradil. Spíš jim dodal novou motivaci k hledání toho pravého genu. Roku 1996, téměř deset let po první publikované studii, oznámily tři nezávislé skupiny vztahy k genům na jiných chromozomech. Jiný výzkum u amišů dával vinu chromozomům 6, 13 a 15. Výzkum zaměřený na izolovanou populaci v oblasti Valle Central v Kostarice dokumentoval vztahy ke chromozomu 18 a výsledky vyvozené z jedné velké skotské rodiny naznačovaly zapojení chromozomu 4. Výzkumy jiné velmi významné duševní poruchy, schizofrenie, vypadaly obdobně a svazovaly nemoc se dvěma různými oblastmi na chromozomu 1, a přitom jiná výzkumná skupina vinila o pár let později chromozom 5.

Roztržití vědátoři? Špatná práce? Ani zdaleka! Nejde o rozporné výsledky. Jen to ukazuje, že za většinu nemocí, od maniodepresivní psychózy po rakovinu, nemůže jeden špatně fungující gen, ale že je za ni zodpovědných současně několik genů, vzájemně na sebe působících skrze komplexní síť skrytou uvnitř našich buněk. Tváří v tvář

* Uzavřená náboženská komunita, jejíž kořeny sahají pravděpodobně ke švýcarským novokřtěncům (pozn. překl.).

gigantickému úkolu rozpoznat stavební součásti buňky, od DNA po proteiny, se vědci donedávna soustřeďovali spíš na klasické otázky biologie než na sítě. Ale když dnes má postgenomová biologie v ruce skladebné součásti, couvá o krok zpět, aby zachytila širší perspektivu. Nové a vzrušující objevy, které znamenaly revoluci v biologii i v medicíně, nám říkají zcela jasně: Chceme-li rozumět životu a nakonec se vypořádat s nemocemi, nesmíme zapomínat na sítě.

* * *

„Dnes se učíme jazyku, jímž Bůh stvořil život," prohlásil prezident Bill Clinton 26. června 2000 na slavnosti v Bílém domě, kde ohlásil dekódování 3 miliard chemických „písmen" lidského genomu. Je to pravda? Byla lidstvu předána „kniha života"? Jsou Francis Collins a Craig Venter, ti dva pánové, kteří stáli každý po jednom boku prezidenta, proroky 21. století? Koneckonců Collins a Venter, reprezentující obě instituce, které dekódovaly lidský genom, z veřejných prostředků financovaný Human Genome Project a soukromou firmu Celera Genomics, nám takovou knihu ukázali.

Když otevřete „knihu života", uvidíte „text" asi o 3 miliardách písmen zaplňujících na 10 000 výtisků nedělního vydání *The New York Times*. Každá řádka vypadá nějak takto:

TCTAGAAACA ATTGCCATTG TTTCTTCTCA TTTTCTTTTC ACGGGCAGCC

Tato písmena, zkratky molekul tvořících DNA, by mohla klidně znamenat, že anonymní dárce, jehož genom byl sekvenován, bude v padesáti plešatý. Nebo by mohla odhalit, že jej v sedmdesáti postihne Alzheimerova choroba. Neustále slyšíme, že všechno, od naší osobnosti po naše budoucí choroby, je zaznamenáno v této knize. Dokážete ji přečíst? Pochybuji o tom. Dovolte mi podělit se s vámi o tajemství: ani biologové či lékaři to nedovedou.

Jistě, sekvenování lidského genomu je triumf, je to výsledek schopnosti molekulární biologie redukovat složité živé systémy na jejich nejmenší součástky. Je to bezpochyby katalyzátor nové éry jak v medicíně, tak v biologii. Díky Projektu lidského genomu si však lidé uvědomili něco víc: že se chování živých systémů zřídkakdy dá redukovat na jejich molekulární komponenty.

Nejlepším dokladem je to, že nejsme schopni najít jediný gen zodpovědný za maniodepresivní psychózu. Seznam podezřelých genů nestačí. K léčbě většiny chorob potřebujeme pochopit živé systémy v jejich celistvosti. Potřebujeme rozluštit, jak a kdy různé geny spolupracují, jak uvnitř buňky obíhají signály, které reakce probíhají či neprobíhají v daném okamžiku a jak se účinek reakce šíří komplexní molekulární sítí. Abychom toho dosáhli, musíme zmapovat síť uvnitř buňky. Právě tato síť života určuje, zda se z buňky vyvine částečka pokožky, nebo bude bez ustání pracovat v srdci, rozhoduje o odezvě buňky na vnější podněty, je klíčem k přežití v neustále se měnícím prostředí, říká buňce, kdy se má rozdělit a kdy zemřít, a je zodpovědná za nejrůznější nemoci od rakoviny po nemoci psychické. Historický článek v *Science*, který ohlásil rozluštění lidského genomu, končí slovy: „ ... nejsou dobré ani špatné geny, ale pouze sítě, které existují na nerůznějších úrovních."

* * *

Rozluštění lidského genomu nám poskytuje soupis součástek buňky. Vrátíme-li se k naší automobilové analogii, je to jako mít na dvorku tisíce součástek z auta. Chcete-li ještě někdy vidět auto zase v provozu, musíte najít výkresy, mapu, která vám řekne, jak je máte sestavit. Pro většinu buněk víme dnes o této mapě skoro stejně málo jako před patnácti lety, na začátku Projektu lidského genomu. To, že chybí buněčná analogie internetového vyhledávače, je jen jednou částí problému. Největší potíž je v tom, že v každé buňce je mnoho úrovní organizace, z nichž každou bychom mohli považovat za komplexní síť. Abychom pochopili síť života, musíme se s některými z nich seznámit.

V dnešní společnosti posedlé štíhlou linií je všeobecně známo, že buňky spalují potravu tak, že štěpí složité molekuly a tak vytvářejí stavební prvky buněk a získávají energii potřebnou k přežití. Toho se dosahuje prostřednictvím sítě stovek mnohastupňových nitrobuněčných biochemických reakcí, jimž se souhrnně říká *metabolická síť*. Uzly této sítě mohou být buď jednoduché chemikálie, jako je voda nebo oxid uhličitý, anebo složitější molekuly typu ATP, tvořené desítkami atomů. Vazby sítě jsou biochemické reakce, které se mezi těmito molekulami odehrávají. Pokud dvě molekuly, *A* a *B*, spolu reagují za vzniku *C* a *D*, pak všechny čtyři jsou spojeny v komplexním metabolismu buňky.

Představte si buněčný metabolismus jako motor vašeho auta. Se samotným motorem byste se moc daleko nedostali. Potřebujete kola, nápravy, brzdy, světla a spoustu dalších součástek, z nichž každá je důležitá pro bezpečný provoz po silnici. A podobné je to i u buňky. Potřebuje komplikovanou *regulační síť*, která řídí všechno, od metabolismu po buněčnou smrt. Uzly této sítě jsou geny a proteiny zakódované v obrovité molekule DNA. Vazby jsou různé biochemické interakce mezi těmito komponentami. Geny se nejdříve zkopírují do specifických molekul mRNA a ty se poté přeloží do proteinů. Některé proteiny se vážou na DNA a vyvolávají nebo potlačují čtení dalších genů, opravují náhodné poruchy v DNA, kopírují dva řetězce DNA, když se buňka dělí apod. Jiné proteiny interagují navzájem a tvoří velké proteinové komplexy. Velmi významným příkladem je hemoglobin, komplex složený ze čtyř proteinů, které se spolu vážou, aby přenášely kyslík naším krevním řečištěm. Proteiny můžeme tedy považovat za uzly komplexní sítě vzájemných interakcí, v níž dva proteiny jsou propojeny, pokud se na sebe dokážou fyzicky navázat. Celá síťovitá molekulární architektura buňky je zakódována v *buněčné síti*, souhrnu všech buněčných komponent (genů, proteinů a jiných molekul), spojených všemi fyziologicky významnými interakcemi, od biochemických reakcí po fyzická spojení. Tato síť života obsahuje veškeré metabolické interakce mezi proteiny navzájem a mezi proteiny a DNA, které v buňce probíhají.

Není tomu tak dávno, co se obecně věřilo, že všechno, na čem v biologické historii organismu záleží, je zakódováno v genech. Postgenomová biologie je sice ještě v plenkách, ale už svádí důležitou bitvu. Snaží se korigovat názory, které z historických důvodů všechno přisuzují jednotlivým genům. Samozřejmě že geny hrají *strukturální* roli neboli určují pole působnosti a stavbu proteinů a předávají tuto informaci dědičným způsobem následujícím generacím. Nedávno navíc vědci objevili, že geny mají i významnou *funkční* roli jako prvky komplexní buněčné sítě. Tato funkční role je zjevná pouze v dynamickém kontextu, v němž jednotlivý gen interaguje s mnoha jinými součástmi buňky. Strukturální roli genu lze vyčíst z jeho sekvence. Dnes máme k dispozici úplnou sekvenci DNA několika klíčových organismů, například bakterie *Escherichia coli* nebo člověka. Jsme ale na samém začátku druhého, stejně revolučního vědeckého podniku: odhalení funkční role genu. Abychom toho dosáhli, potřebujeme druhý projekt genomu, mapu-

jící tentokrát síť uvnitř buňky. „Knihu života“ už máme. Teď potřebujeme *mapu života*.

* * *

Když jsme se roku 1998 potkali, měl Zoltán Oltvai, buněčný biolog na Lékařské fakultě Severozápadní univerzity v Chicagu, na svém kontě už několik významných a často citovaných objevů. Tou dobou jsme oba bydleli v Oak Parku, předměstí Chicaga, jehož ráz určují výškové budovy postavené Frankem Lloydem Wrightem. Měli jsme děti podobného stáří a tak jsme se začali pravidelně navštěvovat. Když jsme vyčerpali všechny náměty týkající se kultury a politiky, obvykle se naše konverzace stočila k vědě a biologii. Tehdy se má skupina usilovně snažila zkoumat web a internet. Naše víkendové rozmluvy se nevyhnutelně posouvaly k podobnostem a rozdílům mezi sítí života a jinými komplexními sítěmi. Brzy se z toho stala trvalá diskuse. Bezškálový charakter webu a sítě herců se objevil díky růstu a preferenčnímu připojování, což jsou procesy, které se v obou sítích dají snadno identifikovat. Naproti tomu buňka je jiná. Jistě, první soustavy, které se podobaly buňkám, mohly vznikat podobně jako rostoucí síť, ale během posledních 3 miliard let se vlády ujala evoluce a přírodní výběr. V této době buněčná síť už téměř nerostla, jen se neustále předělávala, zefektivňovala a optimalizovala. I kdyby se tedy bezškálová topologie vyvinula, když neživé molekuly dělaly své první kroky na cestě k životu, mohla se vytratit v důsledku dalekosáhlých změn způsobených evolucí. Na druhé straně je těžké si představit, že by komplexní biochemická síť v buňce byla zcela náhodná. Je tedy mapa života náhodná, podobně jako Erdősova-Rényiho síť, anebo je bezškálová, tak jako web? Jak popsat komplexní topologii buňky?

Když nám došly argumenty, které by nás přesvědčily ať už tak či onak, rozhodli jsme se, Oltvai a já, že se místo laických diskusí podíváme na skutečná data o síti života. Naštěstí se po většinu 20. století biologie a biochemie věnovaly identifikaci různých molekul v buňce a jejich vzájemných vtahů. James Watson, spoluobjevitel struktury dvojité šroubovice DNA, ve svém dnes už klasickém díle *Molekulární biologie* napsal: „Již známe nejméně pětinu a možná více než třetinu všech metabolických reakcí, které kdy budou popsány [u bakterie *Escherichia coli*],“ a naznačoval, že „se během nejbližších deseti nebo dvaceti let přiblížíme stavu, kdy bude možné popsat v podstatě všechny metabolické reakce“. Watsonova vize se vyplnila. Dnes bakteriologové věří, že komplexní síť o více než sedmi stech uzlech a téměř tisíci vazbách představuje dosti úplný seznam reakcí pohánějících metabolismus *Escherichia coli*. V roce 1970 si Watson těžko mohl představit, že o třicet let později budou internetové databáze shromažďovat sítě metabolických reakcí pro stovky organismů. Zatímco detailní metabolická mapa vysoce komplexní lidské buňky nám stále chybí, o několika jednodušších organismech už víme téměř vše.

A tak naše diskuse s Oltvaiem nemohly přijít v příhodnější chvíli. O pár let dříve by byla snaha studovat topologii proteinové sítě buňky v mé laboratoři uvázla na nedostatku dat. Na sklonku roku 1999 jsme však na několika webových stránkách našli právě takové mapy, jaké jsme hledali. Když jsme prošli dostupné databáze, soustředili jsme se na jednu novou, kterou spravuje Argonnská národní laboratoř poblíž Chicaga. Má přezdívku „Kdo tam?“ a soustřeďuje metabolické sítě čtyřiceti tří různých organismů. Hawoong Jeong opět předvedl svá počítačová kouzla a napsal program, který stáhl z internetu každou jednotlivou reakci. Oltvai a já jsme mu civěli za zády, jak dával dohromady tuto extrémně složitou síť a shromažďoval krok za krokem úplnou metabolickou mapu pro těchto čtyřicet tři organismů. Když s tím byl hotov, dal se do charakterizace těchto sítí a spočítal, kolika reakcí se každá z molekul účastní. Výsledky se opakovaly s šokující pravidelností. Ať jsme zkoumali kterýkoli z organismů, naráželi jsme na jasnou bezškálovou topologii. Každá buňka vypadala jako malinká síť, extrémně nestejnoměrná, v níž je několik málo molekul, center metabolismu, zapojeno do téměř všech reakcí, zatímco většina molekul se účastnila jen jedné nebo dvou.

* * *

Vybavíme-li si opět naše sociální sítě, pak když se dvě molekuly účastní téže reakce, je jejich vzdálenost jedna. Jsou-li však k jejich propojení potřebné dvě reakce, je jejich vzdálenost dva. Když dáme všechny uzly a vazby dohromady, bude tato komplexní síť v buňce mít vlastnosti malého světa?

Měření vzdálenosti mezi molekulami není výplodem naší posedlosti principem šesti kroků od sebe. Rozměr sítě – neboli odstup

mezi uzly - má biologický význam. Kdybychom například zjistili, že nejkratší chemická dráha mezi dvěma molekulami je sto, pak by každá změna v koncentraci první molekuly musela projít stovkou mezilehlých reakcí, než by dospěla k druhé molekule. Každá výchylka se na tak dlouhé cestě utlumí a zanikne.

K našemu velkému překvapení měření ukázala, že typická délka dráhy je mnohem kratší než sto. Ve skutečnosti jsou buňky malé světy s *třemi kroky od sebe*. To znamená, že většina dvojic molekul je spojena dráhou o třech reakcích. Výchylky tudíž nejsou nikdy lokalizované: každá změna v koncentraci nějaké molekuly rychle ovlivní většinu jiných molekul. Toto zjištění podpořil výzkum Andrease Wagnera z Novomexické univerzity a Davida A. Fella z Brooksovy univerzity v Oxfordu, kteří nezávisle dospěli k závěru, že metabolická síť *Escherichia coli* je bezškálová a má vlastnosti malého světa.

I když byla vzdálenost *tří* kroků nečekaně krátká, nebyla na našem objevu tím nejzajímavějším. Protože každý z čtyřiceti tří organismů měl jinou velikost,* předpokládali jsme, že vzdálenost bude stoupat s velikostí organismu, právě tak jako rozměr webu vzrůstá s počtem dokumentů. Měření překvapivě ukázala, že ať se procházíme nepatrnou sítí malé parazitické bakterie nebo vysoce rozvinutým systémem dopravních tepen mnohobuněčného organismu, jako je květina, bude vzdálenost totožná. Ačkoli rozdíly ve stavbě buňky mezi primitivní bakterií a buňkou z mnohobuněčného organismu mohou být stejně velké jako rozdíl mezi zapadlou vesničkou a New Yorkem, když z buňky vypustíme všechno až na dynamicky důležité sítě, stane se ze všech maloměsto. Když se ponoříme hlouběji, zjistíme, že většina buněk sdílí i táž centra. To znamená, že pro většinu organismů je deset nejvíce zapojených molekul totožných. Adenosintrifosfát (ATP) je téměř vždy největším centrem, za nímž těsně následuje adenosindifosfát (ADP) a voda.

Jistě, úloha ATP, ADP a vody jako prominentních center nás vůbec nepřekvapila. V buňkách slouží ATP jako výhodná a univerzální zásobárna energie pohánějící stovky biochemických reakcí. Jak ATP dodává těmto reakcím energii, mění se na ADP a odštěpí fosfátovou skupinu. Jak ATP, tak ADP jsou tedy v metabolické síti svázány s obrovským počtem molekul účastnících se energeticky náročných reakcí. Ve svém souhrnu byl však seznam deseti nejvíce propojených molekul dosti objevný. Podle hlavní předpovědi bezškálového modelu jsou uzly s vysokým počtem vazeb ty, které byly k síti přidány hned v počátcích jejího vývoje. V řeči metabolismu by to znamenalo, že nejpropojenější molekuly by měly být ty nejstarší, které v buňce jsou. A analýza Wagnera a Fella skutečně ukázala, že nejvíce propojené molekuly mají i dávnou evoluční historii. Některé z těchto molekul se považují za pozůstatky takzvaného světa RNA, evolučního stupně předcházejícího DNA, zatímco o jiných se ví, že patří k těm nejstarším metabolickým drahám. Zdá se, že výhoda prvního příchozího prostupuje životem od samého počátku.

Pokud mají všechny organismy touž bezškálovou topologii a stejnou vzdálenost mezi uzly a sdílejí táž centra, jak se potom liší buňky různých organismů jedna od druhé? Je vůbec nějaký rozdíl mezi chemickou architekturou bakterie a buňky lidského těla? Ukazuje se, že rozdíly mezi nimi jsou, a to závažné. Když jsme srovnávali metabolické sítě čtyřiceti tří organismů, zjistili jsme, že jen 4 % molekul se objevují v každé z nich. Zatímco centra jsou identická, pokud jde o méně propojené molekuly, má každý organismus své vlastní odlišné varianty. Život vypadá jako předměstí, kde všechny domy navrhl tentýž architekt, ale na konečné úpravy, od materiálu podlah po velikost a konstrukci oken, byli zjednáni jiní stavitelé a bytoví návrháři. Na letecké fotografii vypadají všechny domy stejně, ale čím jdete blíže, tím více si začínáte všímat rozdílů.

Metabolismus představuje jen jednu, byť důležitou, složku buněčné sítě. Bude stejnou bezškálovou architekturu mít i regulační síť - ta síť, která odpovídá za fungování buňky? Zajímá nás nakonec úplná síťová architektura živých organismů. Řídí se různé komponenty této sítě týmiž zákony a stavebními postupy, anebo příroda vynašla pro každou komponentu odlišné řešení? Pochopíme-li základní rysy buněčné stavby a její regulační síť, bude to mít i důležité praktické důsledky. Ano, genetické poruchy jsou důsledkem špatné funkce uzlů regulační sítě. Robustnost této sítě vůči selháním uzlů tedy určuje, jak se náš organismus bude umět vypořádat s různými nemocemi i jak se bude výzkumníkům dařit navrhovat preparáty schopné léčit ty poruchy, s nimiž si naše tělo tak snadno neporadí.

* * *

* Autor má na mysli velikost měřenou jako počet uzlů v metabolické síti (pozn. překl.).

Pekařská kvasinka, jedna z nejjednodušších eukaryontních buněk, má kolem 6 300 genů, kódujících zhruba tentýž počet proteinů. Třebaže je to pětkrát méně než odhadovaných 30 000 různých genů obsažených v lidské buňce, je to pořád velké číslo. Obecně řečeno, když proteiny na sebe vzájemně působí tak, že se k sobě přilepí, mají k tomu dobrý důvod. Většina interakcí hraje v životě buňky důležitou funkční roli. Abychom tedy pochopili, jak buňka pracuje, musíme identifikovat všechny páry proteinů, které na sebe mohou působit. Pro pekařskou kvasinku to vyžaduje vyzkoušet 6 300krát 6 300 dvojic - tedy skoro 40 milionů potenciálních interakcí. Se standardními nástroji molekulární biologie by se na takovém úkolu lopotily stovky lidí několik desítek let. Přesto se dvěma výzkumným týmům podařilo nezávisle na sobě detailní mapu proteinové sítě kvasinky získat. Uspěly díky významnému technickému pokroku, takzvané metodě dvouhybridních mutantů. Tato metoda, vyvinutá roku 1989 Stanleym Fieldsem, poskytuje poměrně rychlou poloautomatickou techniku pro detekci vzájemné interakce dvojic proteinů. Ačkoli je známo, že často vede k nespolehlivým výsledkům, mapa, kterou poskytuje, nabízí bezprecedentní příležitost, jak nahlédnout do organizace buněčné regulace.

To, co jsme pochopili při topologické analýze buněčného metabolismu, nás natolik vzrušilo, že jsme se - já, Oltvai, Jeong a mladý student Sean Mason - začali zajímat o strukturu interakční sítě proteinů. Data z metody dvouhybridních mutantů, publikovaná několik měsíců předtím, byla pro takovou studii výtečnou příležitostí. Poté co jsme z webu stáhli všechny známé vzájemné interakce proteinů, jsme rekonstruovali proteinovou síť kvasinky a začali studovat její globální rysy. A opět nám výsledky jasně ukázaly, že interakční síť proteinů má bezškálovou topologii. To znamená, že většina proteinů v buňce hraje velmi specifickou úlohu a interaguje jen s jedním nebo dvěma proteiny. Několik málo proteinů se však dokáže fyzicky připojit k velkému počtu dalších proteinů. Tato centra mají zásadní význam pro správné fungování buňky a její přežití. Byli jsme schopni ukázat, že odstranění genu zodpovědného za jeden z centrálních proteinů zabije buňku v 60-70 % případů. Mutace postihující slabě zapojený protein je naproti tomu zhoubná s pravděpodobností méně než 20 %.

Tato zjištění byla potvrzena sérií souběžných výsledků. Andreas Wagner dospěl nezávisle k názoru, že proteinová síť kvasinky má

bezškálovou topologii. Stefan Wuchty, mladý badatel pracující v Evropských mediálních laboratořích, objevil podobnou architekturu ještě u jiné sítě vyskytující se v buňce. Studoval takzvanou síť proteinových domén, kde uzly jsou různá vazebná místa, jimiž se proteiny vážou jeden na druhý, přičemž dvě vazebná místa se pokládají za propojená, objevují-li se společně na témže proteinu. Jong Park a jeho spolupracovníci z Evropského ústavu bioinformatiky v Británii si všimli bezškálové topologie, když rekonstruovali interakční síť proteinů kvasinky z údajů uložených v proteinové databázi. Naše výzkumná skupina našla stejnou strukturu u organismu velice odlišného od kvasinky, u bakterie *Helicobacter pylori*, což naznačuje, že bezškálová povaha interakční sítě proteinů je společná všem organismům.

Když to shrneme, naznačuje podobná globální topologie metabolické sítě a interakční sítě proteinů, že v architektuře buňky je přítomna harmonie vysokého stupně. Ať zkoumáme kteroukoli organizační úroveň, narážíme na bezškálovou topologii. Tyto procházky buňkou ukazují, že Hollywood a web jen znovuobjevily topologii, kterou život vyvinul už o 3 miliardy let dříve. Buňky jsou skutečně malými světy, které s mnoha jinými nebiologickými sítěmi sdílejí společnou topologii, jako by architekt života nedokázal navrhnout nic jiného.

Jak dospěl život k takové architektuře? Téměř okamžitě, jak jsme si tuto otázku položili, jsme znali odpověď. Zhruba půl roku poté, co jsme uveřejnili naše zjištění o topologii interakční sítě proteinů, jsem během jednoho měsíce dostal tři e-maily. Každý z nich obsahoval rukopis od jiné výzkumné skupiny. K mému úžasu všechny tyto tři týmy navrhly nezávisle stejné elegantní vysvětlení, že totiž bezškálová topologie buňky je výsledkem běžných chyb, které buňky dělají, když se množí.

* * *

Buňky se množí tak, že zdvojí svůj obsah a rozdělí se na poloviny. Detaily tohoto procesu se mohou lišit podle toho, jde-li o jednoduchou bakterii nebo o složitou lidskou buňku. Některé kroky jsou však univerzální. Zaprvé, aby se vytvořila geneticky identická dceřiná buňka, musí se DNA věrně zkopírovat. Tento proces však neprobíhá bezchybně. Ačkoli komplikovaný kopírovací mechanis-

mus buňky zaručuje, že se sekvence DNA dědí s neobyčejnou přesností, zhruba jedno písmeno z tisíce se náhodně změní každých 200 000 let. Jinou běžnou chybou je duplikace genů. Prostřednictvím vzácné náhody v průběhu kopírování se může gen zdvojit, když se konce rozlámaných molekul DNA spojí napřeskáčku, a v genomu potomstva se pak objeví dvakrát segmenty různé délky. Takové chyby kopírování mohou někdy buňku zahubit, ale v jiných případech mají vícenásobné kopie téhož genu evoluční výhodu a jsou předány dalším generacím. Dobře známým případem je hemoglobin.

Původně měly buňky jen jeden gen pro hemoglobin. Asi před 500 miliony let, během evoluce pokročilejších druhů ryb, došlo k sérii duplikací genu a výsledkem byly čtyři kopie genu hemoglobinu, roztýlené v genomu. Dnes každý z těchto genů kóduje jednu ze čtyř složek proteinového komplexu hemoglobinu.

Duplikace genů má značný dopad na buněčnou síť. Vyústí ve dva identické geny, které produkují identické proteiny a ty zase interagují s týmiž proteiny. Tak vznikl nový uzel, protein kódovaný duplikovaným genem. Jeho sousedé, proteiny, s nimiž duplikovaný protein interaguje, budou nyní interagovat jak s rodičovským, tak s identickým dceřiným proteinem. Každému proteinu, který je v síti spojen s duplikovaným proteinem, přitom přibude jedna vazba. V této hře mají vysoce propojené proteiny přirozenou výhodu: s větší pravděpodobností mají vazbu na duplikovaný protein než jejich méně zapojení bratránci. Ne že by se centra duplikovala častěji. Je to tím, že centra jsou v kontaktu s více proteiny a tak jsou s větší pravděpodobností spojena s duplikovaným uzlem, a to jim poskytuje jednu vazbu navíc. Jde opět o skrytou formu preferenčního připojování.

Na tomto mechanismu je nejdůležitější to, že sleduje původ bezškálové topologie zpátky k dobře známému biologickému mechanismu, duplikaci genů. Ukazuje, že tato duplikace má obě základní ingredience: růst sítě přidáváním nových proteinů a preferenční připojování v důsledku toho, že se nové vazby připojují větší rychlostí k zapojenějším proteinům. Je zatím příliš brzy na to, abychom rozhodli, zda je to jediné vysvětlení, protože je myslitelné, že i díky jiným, ještě neprozkoumaným mechanismům může vznikat tatáž topologie. Není také jasné, zda to vysvětluje bezškálovou strukturu pozorovanou v metabolismu. Ukazuje to nicméně, že buněčné po-

chody dokážou generovat bezškálovou topologii. Tím se dostáváme k další důležité otázce: Pomůže nám mapa života lépe chápat příčiny nemocí? Budeme díky ní úspěšnější při jejich léčbě?

* * *

Rakovina je nejvíce zkoumanou lidskou chorobou vůbec. Výjimečná pozornost, kterou jí lékařská komunita věnovala, přinesla řadu významných objevů. Nejdůležitější je pravděpodobně objev genu p53. Objevili jej už v roce 1979 David Lane a Arnold J. Levine, ale teprve na sklonku osmdesátých let byla jeho role plně oceněna díky pracím Berta Vogelsteina. Vogelstein rozpoznal, že protein p53, vytvořený genem p53, je supresorem nádorového bujení neboli zabraňuje buňkám nekontrolovaně se množit. Tak jako šlápnutím na brzdu zastavíte své auto, geny supresorů nádorového bujení zpomalují a zastavují replikaci DNA a dělení na nové buňky. Zdravé buňky si udržují přítomnost malého počtu molekul p53. Když buňku poškodí záření nebo něco jiného, začne buňka produkovat více p53 a nemůže se tedy dále množit prostřednictvím buněčného dělení. Buňka tím získá čas opravit závadu dříve, než začnou vznikat další kopie špatně fungující buňky. Nepodaří-li se poškození opravit, pak protein p53 aktivuje skupinu genů, která buňku zabije.

Když buněčná brzda - protein p53 - funguje špatně, může se buňka vymknout kontrole. Rakovinné buňky se od zdravých buněk liší svou schopností velmi rychle se množit. Kolem 50 % lidských karcinomů skutečně obsahuje mutace na genu p53. Toto pozorování spustilo lavinu výzkumu s úctyhodnou produkcí více než 17 000 publikací od roku 1989. Ústřední role molekuly p53 při vzniku rakoviny vedla roku 1993 časopis *Science* k tomu, že ji vyhlásil „molekulou roku". Když uvážíme, jaké pozornosti se této molekule dostalo, mohli bychom očekávat, že bychom dnes měli mít lék na rakovinu. Koneckonců jediné, co potřebujeme, je vyvinout léčiva, která zabezpečí, aby molekula p53 vždy konala svou práci. Proč se tedy takový intenzivní výzkum nevtělil v univerzální lék na rakovinu?

I přes významnou roli, kterou gen p53 při vzniku rakoviny má, nevede samotné jeho odhalení k léčbě této strašné choroby. Proč je tomu tak, nedávno formulovali titíž lidé, kteří postavili p53 do centra výzkumu rakoviny: Vogelstein, Lane a Levine. V listopadu 2000 uveřejnili v *Nature* společný článek, v němž hlavním argumentem

byly sítě. Naznačili v něm, že rakovinu chápeme zatím tak málo proto, že buňka je cosi jako internet.

Podle nich musíme skoncovat se svou posedlostí všudypřítomnou molekulou p53 a zaměřit se místo toho na to, co nazývají *síť p53*, tedy na souhrn všech molekul a genů, které s molekulou p53 interagují. „Síť p53 můžeme pochopit třeba tak," tvrdí autoři, „že ji porovnáme s internetem. Buňka, stejně jako internet, je podle všeho ‚bezškálová síť': malý podsoubor proteinů je vysoce propojen (svázán) a řídí aktivitu velkého množství jiných proteinů, zatímco většina proteinů interaguje jen s několika málo dalšími. Proteiny v této síti slouží jako uzly a nejvíce propojené uzly jsou centra. V takové síti se výkonnost téměř nemění při náhodném odstranění uzlů. Ale takový systém má svou Achillovu patu."

„Achillova pata" sítě, jak si jistě pamatujete, je spojena se zranitelností center. Vyřazení méně propojených molekul z činnosti nemá na buňku žádný dramatický dopad, kdežto mutace v molekule p53, jednom z jasných center buněčné sítě, mění buňku na rakovinnou a nakonec organismus zabije. To vysvětluje, proč kombinované farmaceutické útoky na molekuly, které interagují s molekulou p53, mají na buňku stále větší vliv a podobají se útoku na samotnou molekulu p53.

Vogelsteinův, Laneův a Levinův článek v *Nature* ukázal sílu a všudypřítomnost síťového myšlení. Teorie vypracované kvůli lepší obraně internetu a předvídání účinku hackerských útoků padly na úrodnou půdu v buněčné biologii, která se zabývá obranou zdravých lidských buněk proti všem škodlivým organismům. Svou podstatou jsou problémy objevující se při výzkumu internetu podobné těm, jimiž se zabývá buněčná biologie. Prvním krokem je zmapování sítě tvořící kostru těchto systémů. Pak z těchto map potřebujeme vyvodit zákony, které vládnou sítím. V tomto stadiu se sejdou internetový topograf, webový kartograf a badatel o rakovině na jedné lodi.

Výsledky výzkumu sítě p53 však odkazují dále než jen k základní analogii mezi buňkami a internetem. Směřují k novým přístupům k farmakoterapiím a vývoji léčiv. Konečným cílem zkoumání sítě p53 je najít lék na rakovinu. Jak ještě uvidíme, je to do značné míry postup metodou pokusu a omylu. Ve většině případů se terapie rakoviny zaměřuje na destrukci: zabít rakovinné buňky narušením jejich buněčné sítě, a to buď léčivem, nebo ozářením. Hlubší pochopení sítě p53 nabízí jinou perspektivu: nejprve musíme rozluštit

přesnou topologii této sítě a plně pochopit všechny vzájemné interakce. A až budeme mít jejich mapu, pustíme se rovnou na nejslabší místo protivníka pomocí léků, které obnoví funkce molekuly p53, aniž by rozrušily síť kolem ní.

* * *

Donedávna jsme u nemocí, jako je rakovina, nemoci srdce a psychické poruchy, mohli léčit pouze jejich symptomy. Hledali jsme vzácné chemické látky, kde se dalo, v chemických laboratořích i v deštných pralesích, a doufali jsme, že mezi nimi budou zázračné léky na některé choroby. Podle některých odhadů se léky, které jsou k dostání na trhu, zaměřují pouze na 500 z 30 000 proteinů v lidském těle. A i když máme na řadu nemocí několikeré léky, často musíme projít sérií pokusů, než se ukáže, co u daného pacienta funguje.

Kdybychom znali celou biochemickou síť v buňce, už bychom takto dále tápat nemuseli. Poznají-li v budoucnu lékaři přesné schéma reakcí v buňce a budou-li mít diagnostické nástroje schopné změřit sílu různých nitrobuněčných interakcí, budou moci testovat odezvu vašich buněk na lék ještě dřív, než jej začnete užívat. Díky mapě života, která obnáší detailní znalost toho, jak geny spolupracují, budeme jednou schopni diagnostikovat nemoci, jako je maniodepresivní psychóza nebo rakovina, ještě předtím, než se objeví jejich první symptomy. Tato znalost nám pomůže vyvinout léky tak dobře vyladěné a tak přesně cílené, že zasáhnou jen špatně fungující buňky, zdravé buňky nechají na pokoji. Jinými slovy - poskytnou skutečnou léčbu.

Změna koncentrace nějaké chemikálie v našem těle po podání léčiva může potlačit symptomy určité choroby. Jenže buňka je řízena složitou sítí s vlastnostmi malého světa, a tak výchylka způsobená lékem ovlivní zákonitě i spoustu dalších chemikálií a vyvolá možná i nežádoucí vedlejší účinky. Pacienti léčení na maniodepresivní psychózu mohou zemřít na chorobu srdce, která je předtím nikdy netrápila. Mimoto lék, který u vás vyvolá srdeční chorobu, by u jiného jedince nemusel mít žádné vedlejší účinky. Máme koneckonců každý jinou barvu vlasů a očí a jiné rysy tváře, takže nijak nepřekvapuje, že i jinak metabolicky zpracováváme léky. S mapou života v ruce a s nástroji, jako jsou nedávno vyvinuté DNA čipy, které monitorují vazby mezi geny, získají lékaři podrobný seznam všech

molekul a genů ovlivněných daným léčivem. Zkoumání vedlejších účinků už nebude pouhým hádáním. Budeme mít medicínu šitou každému na míru, což dovolí schválení a prodej léčiv, která účinkují jen na 10 % populace a jsou potenciálně smrtelná pro všechny ostatní.

* * *

Pokud jste někdy trpěli maniodepresivní psychózou, pak vaše první návštěva u lékaře pravděpodobně začala dlouhou rozmluvou o vašich myšlenkách a pocitech. Nakonec jste odcházeli s receptem na nějaké prášky. Jestliže jste si nikdy předtím nepřipouštěli, kolik z vaší mozkové aktivity a duševní pohody je otázkou chemických pochodů v mozku, pak jste to museli uznat poté, co jste si vzali prášek. Dávka chemikálií vpravená do vašeho těla rychle převzala kontrolu nad vaším chováním a pohnutkami. Přistihli jste se, že děláte věci a máte pocity, jaké jste nikdy předtím neměli. Ve většině případů první lék nefungoval. Možná jste pak byli hyperaktivní anebo jste propadli ještě větší depresi. O pár týdnů později vám doktor musel předepsat nějaké jiné léky, v naději, že budou zabírat lépe. Pacienti běžně vyzkoušejí pět až šest léků během několika měsíců, než se zjistí, co nejlépe funguje. Tyto léky vám sice uleví, ale vaši nemoc nevyléčí. Dočasně změnily chemické procesy ve vašem mozku a vykompenzovaly změny způsobené špatnou funkcí vaší genetické sítě. Kdybyste je přestali brát, chemická nerovnováha by se vrátila a s ní symptomy maniodepresivní psychózy.

Ode dneška za dvacet let bude možná taková léčba vypadat úplně jinak. U téhož doktora budete mít pětiminutový rozhovor, tak jako když máte obyčejnou chřipku. Sestra vám odebere pár kapek krve a vrátíte se domů s prázdnýma rukama. Lék si vyzvednete večer v nejbližší lékárně. Nazítří se vzbudíte stejně svěží a šťastní, jako jste bývali, než se objevily příznaky choroby. Jak manické, tak depresivní stavy se rozplynou.

Jak k tomuto pokroku dojde? Především do té doby bude úplně zmapována biochemická síť lidské buňky, což nám dovolí detailně porozumět tomu, jak různé geny a molekuly spolupracují. Zadruhé, v každé ordinaci už budou čipy testující DNA a proteiny, nové technologie, které se nyní vyvíjejí. To lékaři umožní monitorovat, které geny či proteiny ve vašem těle špatně fungují. Zatímco mapování lidské buněčné sítě zabere pravděpodobně více než jedno desetiletí, okamžité monitorování aktivity genů je v některých výzkumných laboratořích možné už dnes.

Do roku 2020 taková revoluce zcela promění medicínu. Děti nebudou muset chodit k lékaři s bolením v krku - maminka bude mít příruční zařízení s výměnným čipem, který odhalí, že Tomíkův bolavý krk je streptokoková infekce, a identifikuje i kmen bakterií. Matka pak jen připojí toto zařízení k počítači a pošle e-mail s výsledky lékaři do ordinace, takže když Tomík přijde do školy, bude mít lék připravený na ošetřovně. A hlavně, Tomíkova medicína nebude bombardující antibiotikum, které v jeho těle hubí všechny bakterie, ať jsou škodlivé nebo ne. Bude navržena a namíchána podle potřeby tak, aby odstranila jen ten organismus, který má na svědomí Tomíkův bolavý krk. Bude neúčinná na všechny ostatní bakterie, což bude minimalizovat nebezpečí, že se u Tomíka vyvine rezistence vůči antibiotikům.

Nemyslím si, že taková vize je přehnaná. Ve skutečnosti je dosti umírněná, možná dokonce krátkozraká. Je to jen prostá extrapolace nástrojů, které se už dnes nacházejí ve většině výzkumných laboratoří po celém světě. Pokrok vychází ze základního posunu v našem pohledu na vše, na život i na smrt. Je důsledkem toho, že vidíme buňku jako celek - jako síť -, a ne jako pytel nezávislých chemikálií.

* * *

Projekt sekvenování genomu je nejvyšší oslavou *genu*. Donedávna jsme si mysleli, že úplná biologická historie lidské bytosti je zakódována v 3 miliardách písmen šroubovice DNA. Jistě, mapování lidského genomu znamenalo revoluci v biologickém výzkumu. Ukázalo však také, jak malý zlomek ohromného světa opravdu známe a o kolik větší je oblast, kterou ještě zbývá prozkoumat.

V roce 1996 šokovalo vědeckou komunitu dekódování genomu kvasinky: obsahuje celých 6 300 genů. Čekala se jen asi čtvrtina z nich a jen těm se dala vágně přiřadit funkce. Se sebevědomým pocitem důležitosti člověka jako vrcholu evoluce biologové opatrně odhadovali, že lidský genom bude mít alespoň 100 000 genů. Věřilo se, že je to dostatečný počet na to, aby vysvětlil vysoce složitého *Homo sapiens*. Pak přišel únor 2001 a publikace lidského genomu.

Ukázalo se, že máme méně než třetinu očekávaného počtu genů – jen asi 30 000. Pouhý nárůst o třetinu genů tedy musí vysvětlit rozdíl mezi námi a prajednoduchou hlísticí *Caenorhabditis elegans* – což je docela provokující myšlenka, když uvážíme, že 20 000 genů tohoto červa je potřeba k zakódování pouhých tří set neuronů, zatímco našich 10 000 genů navíc má vysvětlit miliardy nervových buněk, které máme v mozku.

Dnes už je zkrátka jasné, že počet genů není úměrný pozorované složitosti. Ale co potom znamená být složitý? Odpověď nám nabízejí sítě. V jazyce sítí zní naše otázka takto: Kolik potenciálně odlišných chování může genetická síť projevovat při témž počtu genů? V principu se mohou dvě buňky, které jsou identické, až na to, že jeden gen je v první buňce *zapnutý* a v druhé *vypnutý*, chovat odlišně. Za předpokladu, že každý gen je možné vypnout a zapnout nezávisle na ostatních, může buňka s N geny vykazovat 2^N rozdílných stavů. Přijmeme-li za míru komplexity potenciální počet různých chování typické buňky, je rozdíl mezi červem a člověkem ohromující: lidi jsou $10^{3\,000}$ krát složitější než naši červí příbuzní!*

Zatímco 20. století lze považovat za století fyziky, všeobecně se předpokládá, že 21. století bude stoletím biologie. Před desítkou let by bylo svůdné nazvat jej stoletím genu. Dnes, když jsme právě práh nového století překročili, si to už troufá říct jen málokdo. S největší pravděpodobností to bude století komplexity. Určitě to bude i století biologických sítí. Pokud existuje obor, v němž síťové myšlení může odstartovat skutečnou revoluci, pak jsem si jist, že je to biologie.

* Ve skutečnosti se ve fyzice *komplexita* systému měří jako logaritmus počtu potenciálních stavů dělený počtem částic. Takto definovaná komplexita „jednoduchých" systémů, jako například vody nebo vzduchu, je nulová. Kdyby byly všechny geny (částice) nezávislé, pak by stavů bylo 2^N a komplexita by byla log 2. Jelikož ale geny na sebe složitým způsobem působí, je výpočet počtu stavů nesmírně komplikovaný a otázka výpočtu komplexity živého tvora daleko přesahuje možnosti současné vědy (pozn. překl.).

Vlákno čtrnácté

Síťová ekonomika

Před deseti lety jistá prakticky neznámá začínající internetová firma zoufale potřebovala peněžní hotovost. Jeden z členů správní rady této firmy byl náhodou i manažerem společnosti Time Warner a ihned v tom zavětřil příležitost pro zábavní gigant, u něhož pracoval. Navrhl tedy vysoce postavenému funkcionáři Time Warner, aby začínající firmě pomohli z nesnází. Za pouhých 5 milionů dolarů mohl mediální konglomerát vlastnit 11 % této firmy. Pro společnost Time Warner by to byla bezvýznamná částka a otevřela by jí přístup k internetu, v té době zbrusu novému distribučnímu kanálu. „Kdybychom to udělali," odpověděl funkcionář, a myslel tím přijetí internetu jako životaschopného distribučního kanálu pro Time Warner, „pak by všechno, co jsme dělali od roku 1923, vyletělo oknem."

Ve svém odhadu akcií se rozhodně příšerně spletl: o deset let později by ta pětimilionová investice mohla mít hodnotu více než 15 miliard dolarů. A onen nákup by změnil historii. O deset let později Steve Case, výkonný ředitel společnosti America Online (AOL), kdysi neznámé začínající internetové firmy, a Jerry Levin, prezident Time Warner, ohlásili na tiskové konferenci konané na Manhattanu sloučení těchto dvou společností. Pár let předtím mohla společnost Time Warner internetovou firmu snadno pohltit. Ale roku 2000 to byla AOL, společnost, o níž před deseti lety sotvakdo slyšel, kdo spolkl mediálního giganta.

Společnost Time Warner měla zboží a AOL zase prostředky, jak je dodat zákazníkovi. Právě předtím, než se na jaře 2000 zhroutily nafouknuté ceny v NASDAQ, tlačili na Jerryho Levina, aby se vrhl na internet, aby si jej všimli na Wall Streetu, a Steve Case potřeboval přístup k Time Warnerovým kabelům, aby se dostal k vám do obýváku. I když tyto dvě společnosti představovaly velmi odlišnou kulturu, ekonomičtí analytikové nás ze všech sil přesvědčovali, že to byl svazek požehnaný nebesy. Titíž analytikové nám tvrdili, že když roku 1998 Daimler-Benz převzal Chrysler, byl to pro obě strany sňatek z rozumu. Totéž platí i pro fúzi průmyslových titánů Exxon

a Mobil v roce 1998, čtyři měsíce po další velké koupi, při níž společnost British Petroleum koupila Amoco. Tím však seznam fúzí vzbuzujících pozornost nekončí. Jen v samotném roce 1998 se Bell Atlantic spojil s GTE, SBC Communications koupila Ameritech, BankAmerica se spojila s bankovním domem NationsBank a Citicorp splynula s Travelers Group.

Mají takové fúze nějaký smysl? Popřáváte-li sluchu antiglobalizačním aktivistům, kteří obviňují velké korporace z toho, že diktují všechno, od politiky po módu, pak ne. Jsou ale nevyhnutelné, pohlížíme-li na ekonomiku jako na komplexní síť, jejímiž uzly jsou společnosti a jejíž vazby představují rozličná ekonomická a finanční pouta, která je spojují. Ano, v síťové ekonomice musí centra růst spolu s růstem sítě. Aby ukojily svůj hlad po vazbách, naučily se uzly podnikatelské sítě polykat menší uzly, což je nový trend, u jiných sítí nevídaný. Jak globalizace tlačí uzly, aby rostly, stávají se fúze a nákupy přirozeným důsledkem rostoucí ekonomiky.

Renesance sítí ve fyzice a matematice motivovala řadu nových objevů a ty dokumentovaly, jak jsou sítě důležité všude, od struktury firem po tržní prostředí. Zjistili jsme, že řídká síť několika málo vlivných členů správních rad kontroluje všechny významné funkce ve společnostech z *Fortune 1000**, že síť aliancí rozhoduje o úspěchu biotechnologického průmyslu, že struktura sítě uvnitř firmy je zodpovědná za schopnost organizace rychle se adaptovat na měnící se podmínky trhu a že strategie využívající síťové vlastnosti spotřebitelské základny vedly k nevídaným úspěchům v prodeji. Jak vazby a spojení nabývají na významu, začíná být chápání síťových efektů klíčem k přežití v rychle se rozvíjející nové ekonomice.

* * *

Bez ohledu na průmyslové odvětví a obor podnikání má síť v pozadí všech korporací 20. století stejnou strukturu: je to *strom*, v jehož kořeni sedí výkonný ředitel** a jehož rozbíhající se větve představují stále specializovanější nepřekrývající se úlohy manažerů nižší

* Žebříček 1 000 největších amerických firem, sestavovaný magazínem *Fortune*, viz www.fortune.net (pozn. překl.).

** Autor má na mysli představu stromu kořenem vzhůru a s listy úplně dole (pozn. překl.).

úrovně a dělníků. Když se pohybujete dolů větvemi, zodpovědnost klesá, a na samém konci jsou pasivní vykonavatelé příkazů vymyšlených v kořenech.

Přestože se korporativní strom vyskytuje všude, je s ním spoustu problémů. Zaprvé musí být informace, jak stoupá hierarchií vzhůru, pečlivě filtrována. Je-li filtrování menší, než by bylo potřeba, může se nejvyšší úroveň stromu, kde se všechny větve setkávají, katastrofálně zahltit. Jak se společnost rozšiřuje a strom narůstá, množství informací na nejvyšší úrovni nutně explozivně narůstá. Zadruhé, integrace vede k nečekané organizační nepružnosti. Typickým příkladem jsou Fordovy automobilové továrny, jedny z prvních výrobních závodů, které hierarchickou organizaci zavedly naplno. Problém byl, že to dělaly příliš dobře. Fordovy montážní linky byly najednou tak těsně integrované a optimalizované, že i nepatrné změny v konstrukci automobilu vyžadovaly uzavření továren na týdny a měsíce. Optimalizace vede k tomu, čemu někteří říkají *byzantské monolity*, k organizacím tak přeorganizovaným, že jsou naprosto nepružné a neschopné reagovat na změny v podnikatelském prostředí.

Model stromu se nejlépe hodí pro masovou produkci, což byl donedávna způsob, jak dosáhnout ekonomického úspěchu. V dnešní době je však hodnota v myšlenkách a informacích. Dostali jsme se do situace, že umíme vyrobit všechno, nač jen pomyslíme. Těžší je rozhodnout se, co bychom vlastně měli chtít.

Jak firmy čelí informační explozi a nikdy předtím nevídané potřebě pružnosti na rychle se měnícím trhu, korporativní model je právě na cestě k úplné proměně. To neznamená povrchní posun v popisu práce několika málo jednotlivců. Je to od základu přebudovaná koncepce toho, jak odpovídat na nové podnikatelské prostředí v postindustriální éře, prostředí informační ekonomiky.

Nejviditelnějším prvkem této přestavby je posun od stromu k síťové organizaci, jednoúrovňové a se spoustou příčných vazeb mezi uzly. Jak se cenné zdroje přesouvají od materiálního jmění k bitům a informacím, operace se posunují od vertikální integrace k virtuální, rozsah podnikání čím dál víc přerůstá hranice států a stává se globálním, doba obratu zásob se snižuje z měsíců na hodiny, podniková strategie se mění ze systému shora dolů na zdola nahoru a z dělníků se stávají zaměstnanci nebo agenti na volné noze.

Nové produkty vyžadují nové typy spolupráce jak uvnitř, tak vně

společnosti, což si žádá novou topologii. Proto byly zrušeny střední úrovně managementu. Zaměstnanci, kteří předtím hráli druhé housle, dostávají ze dne na den na starost důležité produkty. Projektové týmy, aliance uvnitř a vně organizace a subdodavatelský systém potkáváme stále častěji. Společnosti bojující o přežití na každou minutu se měnícím trhu se přesouvají od statického optimalizovaného stromu k dynamické a vyvíjející se síti, nabízející tvárnější a pružnější strukturu řízení. Ty, které této změně odolávají, mohou být snadno vytlačeny na okraj.

Vnitřní přestavba sítě v rámci firmy je jen jedním z důsledků síťové ekonomiky. Jiným je zjištění, že společnosti nikdy nepracují osamoceně. Spolupracují s jinými institucemi a přejímají podnikatelské strategie, které se osvědčily v jiných organizacích. Rozhodující spojení na nejvyšší úrovni se zbytkem světa korporací často udržuje výkonný ředitel a správní rada. Jak uvidíme, v těchto interakcích hrají sítě fundamentální úlohu.

* * *

„Chci vám rozhodně a nedvojznačně sdělit, že mi paní Lewinská řekla naprosto jasným způsobem, že neměla sexuální vztah s prezidentem," četl Vernon Jordan na narychlo svolané tiskové konferenci, když byl skandál Clinton - Lewinská v plném proudu. Brzy však musel „zapojit některé z nejpromyšlenějších únikových triků své kariéry - jak vykličkovat z léčky, kterou si sám připravil", napsal v časopise *Time* Eric Pooley, když na Jordana všichni tlačili, aby uspokojivě vysvětlil čtyři schůzky a sedm telefonních hovorů, které měl s bývalou stážistkou z Bílého domu, když se jí snažil sehnat práci u některé z velkých firem.

Jordanova úloha při hledání zaměstnání pro Moniku Lewinskou u nějaké korporace nebyla pro znalce vnitřních poměrů ve Washingtonu žádným překvapením. To, že nedokázal odvrátit pozornost od své osoby, bylo však něco nového. V sedmdesátých letech byl Jordan vedoucím aktivistou hnutí za občanská práva a roku 1980 jej střelil do zad bělošský radikál, který si ho vybral jako náhradní oběť místo Jesseho Jacksona, na něhož se chystal, ale jenž se zrovna zdržoval mimo město. Od té doby se Jordan pečlivě vyhýbal tomu být středem zájmu a stal se nejmocnější šedou eminencí ve Washingtonu, zprostředkovatelem dohod na nejvyšší úrovni

a velevýznamným právníkem mezi oním mediálně sledovaným washingtonským zástupem. Jak napsal Pooley v *Time*, Jordan „vydělává ročně milion dolarů svou právnickou praxí, při níž nemusí psát formální dopisy a navštěvovat soudní síně, protože jeho úřední hodiny se spíš odehrávají v nóbl restauracích, při telefonování přes mobil a na kůži potažených zadních sedadlech luxusních limuzín - tu šikovně někoho někomu představí, tam popostrčí nějakého zákonodárce a situaci hrozící skandálem obrátí v žert, dříve než se to dostane do novin".

Netypické bylo, že se Jordan *sám* roku 1998 ocitl v novinách po celé zemi a jeho schůzky a telefonáty posuzoval každý, od médií po nezávislého žalobce Kennetha Starra. Projevil se jako prominentní uzel zašmodrchané sítě skandálu Clinton - Lewinská, které se často říkalo „šest kroků od Moniky".

Jordan nebyl v malých světech nováčkem. Své postavení dokonalého znalce washingtonského zákulisí si vydobyl tím, že úspěšně surfoval jednou z nejvlivnějších sítí malého světa v americké ekonomice, sítí korporací. V letech, která předcházela skandálu Clinton - Lewinská a Clintonově prezidentskému působení, se ocitl v samotném centru sítě správních rad, úzké společenské elity, která řídí svět velkého podnikání z *Fortune 1000*.

Správní rada mívá většinou něco přes deset členů a je vybavena neobyčejnou mocí dohlížet na úspěšnost společnosti. Zodpovídá za všechna důležitá rozhodnutí, od vyhazovu špatně pracujícího výkonného ředitele po schvalování velkých fúzí a nákupů. Společnosti se proto ze všech sil snaží přetáhnout do správní rady co nejzkušenější osoby s mnoha styky. Často nadbíhají úspěšným výkonným ředitelům, právníkům a politikům a slibují jim hory doly, aby zasedali současně ve více správních radách.

Navzdory obavám, že takovým lidem působícím ve velkém počtu rad nezbude čas, aby se všem pořádně věnovali, většina společností usiluje o to, aby v jejich správních radách zasedali členové se zkušenostmi z jiných rad. Jak členové správních rad užívají znalostí a zkušeností, které získali v jedné radě k ovlivňování otázek, které stojí před jinou radou, hraje tato provázaná síť členů rad klíčovou roli při šíření podnikatelských praktik a při udržování politického a ekonomického vlivu velkých společností.

Jelikož správní rady hrají významnou roli při utváření světa korporací v Americe, rozebírá se často síť členů správních rad v pod-

nikatelské literatuře. Ale teprve nedávno, s příchodem metod analýzy komplexních sítí, jsme začali chápat, do jaké míry je moc této sítě zakořeněna v propletené topologii.

V síti členů správních rad je každým uzlem člen rady a je spojen se členy, kteří s ním sedí v téže radě. Společností máme několik tisíc a každá z jejich rad má kolem tuctu členů, takže jde o docela velkou síť. Gerald F. Davis, Mina Yoová a Wayne E. Baker z Obchodní fakulty Michiganské univerzity studovali nedávno nejvlivnější složku této sítě a zaměřili se na síť společností z *Fortune 1000*, která zahrnuje 10 100 míst ve správních radách, obsazených 7 682 lidmi. Kdyby měl každý člen zasedat jen v jedné radě, rozštěpila by se síť na malinké, plně propojené kroužky o velikosti jednotlivých rad. Tak tomu ale není. Zatímco 79 % členů zasedá jen v jedné radě, 14 % je členem dvou a kolem 7 % jich sedí ve třech nebo více správních radách. Analýza ukázala, že těchto pár překrývajících se členů správních rad tvoří síť malého světa s pouhými pěti kroky od sebe. Vzdálenost mezi kterýmikoli dvěma členy patřícími do hlavního shluku, který obsahuje 6 724 členů správních rad, je v průměru 4,6 podání ruky.

To, že má síť správních rad povahu malého světa, je zásluha 21 % členů, kteří zasedají ve více než jedné radě, neboť právě oni drží tuto komplexní síť pohromadě. A Vernon Jordan hraje mezi nimi velice speciální úlohu. Jako člen deseti rad, v nichž se pravidelně setkává s 106 dalšími členy z *Fortune 1000*, je nejústřednějším členem správní rady mezi podnikatelskou smetánkou a od většiny dalších členů jej dělí nanejvýš tři podání ruky.

* * *

Jordanova kariéra je skvělou ukázkou toho, jak provázaná povaha malého světa správních rad rozhoduje o obsazení většiny důležitých funkcí v životě korporací. Ve skutečnosti ve většině případů, kdy Jordan zaujal místo v radě, znal už alespoň jednoho z jejích členů díky svému působení v jiných radách. Na začátku sedmdesátých let jako prezident National Urban League, vlivné organizace hájící občanská práva, opakovaně vyzýval k přijetí černochů do vlivné elity korporací. V roce 1972 mu John Brooks, prezident Celanese Corporation, výrobce nejrůznějších chemikálií, řekl: „Myslím, že byste měl uvést svá slova ve skutek... Hovoříte o černoších ve správních radách. Proč nepřijdete do rady u Celanese?“

Brzy poté co přijal tuto výzvu, obdržel hned dvě další nabídky na členství ve správní radě, a to od Marine Midland Bank a od Bankers Trustu. Protože se nemohl rozhodnout, kterou z nabídek má přijmout, zavolal Johnu Brooksovi, aby mu poradil. „Nemáte na vybranou. Je to Bankers Trust,“ zněla stručná odpověď. Když chtěl Jordan vědět proč, Brooks prostě odpověděl: „Proč myslíte, že jste byl nominován do správní rady Bankers Trustu? Já jsem v radě. Já jsem vás navrhl.“ U Bankers Trustu byl Jordan společně s Williamem M. Ellinghausem a ten seděl i ve správní radě JC Penney. O rok později vyzvali Jordana, aby se stal členem rady JC Penney.

O tři roky později požádal Jordan Petera McCullougha, výkonného ředitele firmy Xerox, aby se stal ředitelem National Urban League. Ten nabídku přijal s podmínkou: „Budu u vás ředitelem, pokud se vy stanete členem rady Xeroxu.“ A Jordan souhlasil. Tři roky poté, co se stal členem správní Xeroxu, dostal pozvání do rady American Expressu, kde už zasedali dva jiní členové správní rady Xeroxu. Nebylo proto žádným překvapením, když v roce 1980 Jordan rozšířil počet členů správní rady RJ Reynolds. Ano, jak výkonný ředitel Celanese, tak ještě jiný člen správní rady JC Penney seděli ve správní radě RJ Reynolds a Jordan měl úzké styky i s výkonným ředitelem RJ Reynolds, který s ním byl ve správní radě Celanese.

Předchozí známosti umožňují členům správních rad zaručit se za potenciální kandidáty. Dynamika malého světa tedy napomáhá vzniku „sítě starých kamarádů“, korporativní elity, která pak ve svých rukou soustřeďuje neuvěřitelnou moc v ekonomickém a politickém životě. Dokonce i Jordanovo působení u jedné z největších právnických kanceláří ve Washingtonu, Akin, Gump, Strauss, Hauer & Feld, lze vystopovat až k této síti starých kamarádů: Robert S. Strauss, společník, na jehož doporučení kancelář Jordana najala, s ním sdílel místo ve správní radě Xeroxu.

A Jordanova životní dráha není koneckonců výjimečná. Je známo, že síťové efekty působí v průmyslu všude. Například rozsáhlé přesuny pracovníků mezi společnostmi v Silicon Valley vytvářejí hustou síť osobních vazeb. Tyto jemné sociální sítě se rozsáhle využívají k najímání nových zaměstnanců a přetahování manažerů. Protože se stávající zaměstnanci mohou zaručit za ty, s nimiž je pojí sociální vazby, právě tak, jak to dělají členové správních rad u svých kolegů z rady, zaměstnanci přijatí prostřednictvím sociál-

ních sítí méně často odcházejí a pracují lépe než ti, kteří byli získáni jiným způsobem.

Komplikovaná a propletená povaha členství ve správních radách a zaměstnanců v Silicon Valley, to jsou jen dva příklady komplexní sociální a mocenské sítě stojící v pozadí americké ekonomiky. Abychom však poznali, jak ekonomika skutečně funguje, musíme porozumět vzájemným vztahům společností a dalších ekonomických institucí řízených těmito vysoce propojenými členy správních rad.

* * *

Ačkoli se univerzity a od nich odvozené malé biotechnologické firmy staly v poslední době hybnou silou vývoje nových léčiv, hotové peníze a zkušenosti potřebné k zahájení rozsáhlých klinických testů a celosvětové distribuční kanály zůstávají stále doménou velkých chemických a farmaceutických firem. Protože vývoj a distribuce nového léčiva může stát 150 až 500 milionů dolarů, různí hráči na tomto poli, od univerzit a výzkumných laboratoří po vládní agentury, chemické a farmaceutické společnosti a firmy investující do rizikových oblastí, byli donuceni navazovat strategická partnerství. Tyto aliance, i vzhledem k relativnímu mládí biotechnologického průmyslu, ukazují neobyčejně dobře dokumentovaný případ formování sítě, což nám dovoluje sledovat a pochopit vznik sítí v ekonomických systémech.

Od svého počátku se v biotechnologickém průmyslu projevovaly základní rysy rostoucí sítě. Jeho růst zachytili Walter W. Powell, Douglas White a Kenneth W. Koput ve svém dynamickém grafu zobrazujícím biotechnologickou síť v různých stadiích vývoje mezi lety 1988 a 1999. Roku 1988, v začátcích tohoto odvětví, bylo vazeb mnohem méně než uzlů: sedmdesát devět organizací spojených pouhými jedenatřiceti vazbami. Podle slavné předpovědi Erdőse a Rényiho by tato síť měla být roztříštěná na mnoho velmi malých shluků. Ve skutečnosti však uzly tvořily jen dvě velké navzájem nesouvisející skupinky, jednu s dvaceti sedmi a druhou se čtyřmi organizacemi. Žádná z jedenatřiceti vazeb nebyla zbytečná - každá přispěla k rozvoji velké komponenty kolem několika málo biotechnologických firem, což vedlo k takovému stupni propojenosti, jaký by v náhodné síti nebyl možný. Pár center viditelných už v tomto počátečním stadiu představovaly vůbec první biotechnologické společnosti,

jako například Centocor, Genzyme, Chiron, Alza a Genentech. Bez nich by se biotechnologická síť rozpadla na spoustu malinkých nesouvislých uzlů.

Existence menšího počtu firem s velkým počtem partnerů, které připomínají centra, nám však nestačí ke stanovení povahy sítě. Na to musíme analyzovat rozdělení konektivit a o to se nedávno pokusili dva ekonomové z univerzity v Sieně, Massimo Riccaboni a Fabio Pammolli, ve spolupráci s fyzikem Guidem Caldarellim z univerzity La Sapienza v Římě. Svůj výzkum založili na datech soustředěných v databázi farmaceutického průmyslu umístěné na univerzitě v Sieně, která poskytuje informace o 3 973 dohodách týkajících se výzkumu a vývoje mezi 1 709 firmami a institucemi. Analýza ukazuje, že centra, jichž si všimli Walter W. Powell, Douglas White a Kenneth W. Koput, nejsou náhodná, ale vycházejí z bezškálové povahy sítě farmaceutického průmyslu. Počet společností, které uzavřely partnerství s právě *k* jinými institucemi, neboli počet vazeb, které v rámci sítě mají, se řídil mocninným zákonem, což je známka bezškálové topologie. Hierarchie dobře propojených velkých společností dala dohromady velké množství malých firem a všechny hráče tím hladce propojila do vyvíjející se bezškálové ekonomiky.

Jak se výzkum, inovace, vývoj produktu a jeho prodej stále více specializují a jsou si čím dál vzdálenější, přibližujeme se k síťové ekonomice, kde jsou strategické aliance a partnerství prostředkem přežití ve všech odvětvích průmyslu. Dodavatelské a subdodavatelské vazby mezi firmami jsou dobře dokumentované v jihozápadním Německu a v centrální části severní Itálie; japonské podniky dlouho spoléhaly na spolupráci firem, aby rozprostřely zodpovědnost za technické inovace. Korejský model podnikání sdružuje celý zástup nejrůznějších společností zastřešených velkými konglomeráty. Silicon Valley pravidelně těží z transferu technologie, když dává dohromady začínající firmy se zavedenými společnostmi. Tyto proměnlivé aliance, které se pravidelně znovu navazují, jak se posunuje trh nebo se mění zaměření účastníků, nám dávají tušit budoucnost světového podnikatelského prostředí.

* * *

Navzdory významné úloze, kterou tyto přechodné aliance v ekonomice mají, věnuje ekonomická teorie sítím překvapivě malou po-

zornost. Donedávna se ekonomové dívali na ekonomiku jako na soubor autonomních a anonymních jedinců, kteří se navzájem ovlivňují pouze prostřednictvím systému cen. Takovému pohledu se často říká *standardní model* ekonomiky. Předpokládalo se, že individuální akce firem ovlivňují stav trhu jen minimálně. Stav ekonomiky se nejčastěji popisoval agregátními veličinami, jako je zaměstnanost, výkon nebo inflace, a přehlíželo se vzájemně provázané chování na nejnižší úrovni, které je za tato celková měřítka zodpovědné. Na společnosti a korporace se nenahlíželo tak, že interagují se sebou navzájem, ale s „trhem", mytickou entitou zprostředkovávající veškeré ekonomické interakce.

Ve skutečnosti není trh nic jiného než orientovaná síť. Společnosti, firmy, korporace, finanční instituce, vlády a všichni potenciální ekonomičtí hráči jsou uzly. Vazby kvantitativně vyjadřují různé interakce mezi těmto institucemi: koupě a prodeje, společné výzkumné a marketingové projekty atd. Vazby jsou orientovány směrem od poskytovatele k příjemci a *váha* těchto vazeb vystihuje hodnotu transakce. Struktura a evoluce této vážené a orientované sítě určují výsledky všech makroekonomických procesů.

Walter W. Powell ve své knize *Ani trh, ani hierarchie: Síťové formy organizace* píše: „ ...na trzích je standardní strategií vytěžit největší možný zisk z bezprostřední výměny. V sítích se často dává přednost dlouhodobému pěstování vzájemné zavázanosti a spolehlivosti." V síťové ekonomice tedy kupující a dodavatelé navzájem nesoupeří, ale jsou partnery. Vztahy mezi nimi trvají často velmi dlouho a jsou stabilní.

Stabilita těchto vazeb dovoluje společnostem soustředit se na svůj hlavní obor činnosti. Když se tato partnerství rozpadnou, může to mít vážné následky. Ve většině případů ochromí roztržka pouze zúčastněné partnery. Čas od času se však kvůli ní otřese celá ekonomika. Jak uvidíme dále, makroekonomická selhání mohou uvrhnout celé státy do finančního chaosu a selhání vztahů mezi firmami může těžce poškodit výdobytky nové ekonomiky.

* * *

Toho 5. února 1997 neměla thajská realitní společnost Somprasong Land na zaplacení úroků ve výši 3,1 milionu dolarů z půjčky v eurech. V globalizované ekonomice, kde biliony dolarů putují den-

ně z ruky do ruky, je to bezvýznamná částka. Nepřekvapuje proto, že tato událost snadno unikla pozornosti průměrného investora. Většina lidí toto jednotlivé selhání nezaznamenala, nicméně šlo o jiskru, která vedla k rozkladu světové finanční architektury.

O měsíc později učinila thajská vláda první ze série zoufalých pokusů zachránit ekonomiku země před hrozícím kolapsem: ohlásila, že koupí od finančních institucí špatné pohledávky v realitách v hodnotě 3,9 miliardy dolarů. O pár dnů později svůj slib odvolala, což někteří finanční experti považovali za známku stability. Výkonný ředitel Mezinárodního měnového fondu Michel Camdessus, později kritizovaný za úlohu, kterou sehrála jeho instituce v asijské finanční krizi, prohlásil: „Nevidím důvod, proč by se tato krize měla dále prohlubovat."

Následující události ukázaly, že se mýlil. O dva týdny později se otřásal finanční sektor v Malajsii, což přimělo centrální banku, aby omezila půjčky. Současně s tím Sammi Steel, největší firma z šestadvacátého největšího korejského konglomerátu, požádala soud o ochranu před věřiteli, což byl první krok k bankrotu. V květnu naznačilo Japonsko, že zvýší úrokovou míru, aby zastavilo pokles jenu (což se nikdy nestalo), a tím odstartovalo globální výprodej východoasijských měn a otřáslo lokálními burzami. Týden poté se Thajsku nepodařilo zachránit svou největší finanční společnost, Finance One, a ta se zhroutila. Tato událost zahájila silný spekulační útok na thajskou měnu, která, navzdory opakovaným slibům vlády, byla 2. července ponechána svému osudu.

Dokumentace lavinového zhroucení společností a finančních institucí v Thajsku, Indonésii, Malajsii, Koreji a na Filipínách by zabrala stovky stran. Stejně dlouhá by byla kronika vzájemného obviňování, zahrnující takové perličky, jako byl ostrý výpad malajského premiéra Mahathira Mohamada na „ničemné spekulanty", který vyvrcholil v projevu prosloveném na výroční konferenci Mezinárodního měnového fondu a Světové banky, v němž prohlásil obchodování s měnami za nemorální. George Soros, prominentní mezinárodní finančník, o den později kontroval: „Doktor Mahathir je hrozbou pro svou vlastní zemi."

Někteří ekonomové dávali za finanční zhroucení vinu „strukturálním a politickým deformacím v zemích regionu", ale prezident Clinton a jeho ekonomičtí poradci ve zprávě pro Kongres v roce 1999 zastávali názor, že krize „nebyla způsobena problémy s ekonomic-

kou základnou“. Za necelý rok po těchto událostech shrnul Paul Krugman, profesor ekonomie a mezinárodních vztahů v Princetonu, všeobecný pocit: „Zdá se, že je možné s jistotou tvrdit, že nikdo nepředvídal nic podobného současné asijské krizi.“ Pár malých lokalizovaných finančních potíží spustilo řetězovou reakci krachů, která se valila přes hranice států a způsobila obrovskou devalvaci měny a burzovní krachy od Asie po Jižní Ameriku. Nakonec vyvolala vůbec největší okamžitý pokles Dow Jonesova indexu, který 27. října 1997 spadl o 554,26 bodu.

Jak mohlo zhroucení sice velké, ale zdaleka ne dominantní realitní společnosti otřást největší světovou burzou a přinutit prezidenta „nejmocnější země světa“ ještě dva roky poté, aby podával vysvětlení? Podíváme-li se na ekonomiku jako na vysoce propojenou síť společností a finančních institucí, začneme přicházet těmto událostem na kloub. V takových sítích má selhání nějakého uzlu malý vliv na celistvost systému. Čas od času však selhání některých správně zvolených uzlů spustí kaskádu krachů, která otřese celým systémem.

Asijská krize byla příkladem kaskádového finančního zhroucení ohromného rozsahu, podobného tomu, co jsme rozebírali v 9. kapitole, a byla přirozeným důsledkem propojenosti a vzájemné závislosti. Nešlo ale o příklad první. Jižní Amerika a Mexiko zakusily podobná kaskádová selhání o dva roky dříve. A nebude to určitě ani případ poslední, navzdory všem opatřením, která, jak se zdá, učinily banky a vlády, aby se tomu vyhnuly.

Tyto události těžko vysvětlíme v rámci schématu, v němž všechny organizace interagují pouze s mytickým trhem. Kaskádová selhání jsou přímým důsledkem síťové ekonomiky, vzájemných závislostí, způsobených tím, že v globální ekonomice nemůže žádná instituce fungovat osamoceně. Sítě nám pomohou pochopit vzájemné makroekonomické závislosti, takže budeme moci předvídat a potlačovat budoucí krize. Síťové myšlení nás může poučit, jak monitorovat postup poškození a vybudovat obranný val tak, že rozpoznáme a posílíme ty uzly, které mohou zastavit šíření makroekonomických katastrof.

Neměli bychom podlehnout víře, že taková kaskádová zhroucení, jako byla asijská krize a její latinskoamerické obdoby, jsou vedlejšími efekty nestabilních finančních systémů rychle se rozvíjejících zemí. I zavedené ekonomiky, jako je ta ve Spojených státech, s dostatkem peněz a zkušeností, aby takové krachy vykořenily dříve, než

se globalizují, nejsou vůči kaskádovým selháním imunní. Zranitelná místa způsobená vzájemnou propojeností existují i ve stabilních ekonomikách, jak ukazuje splasklá „dot.com“ bublina internetových firem.

* * *

Na konci roku 1999 se největším hitem společnosti Compaq stal kapesní počítač PocketPC. Jak se rozebíralo v nedávné studii ve *Strategy & Business*, předstihla poptávka po přístroji nabídku pětadvacetkrát a někteří z vedení Compaqu už snili o tom, že by taková kapesní zařízení mohla brzy ovládat větší trh než tradiční osobní počítače. Pak se začaly objevovat problémy.

Compaq, Cisco Systems a některé další společnosti jsou vůdčími silami nové obchodní strategie: subdodavatelského systému neboli outsourcingu. Není to tak dávno, co se firma Cisco chystala stát první společností s hodnotou bilionu dolarů. Dnes je hnací silou v pozadí této nové strategie. Dosáhla ročního růstu výnosů o 30–40 %, a to novým a agresivním přístupem k produkci: nevyrábí nic z toho, co prodává, a místo toho organizuje pevné vazby na velké množství výrobců, kteří vyrábějí a montují díly prodávané pod značkou Cisco. Compaq a mnoho jiných firem se začalo chovat podobně.

Subdodavatelský systém vyžaduje těsnou integraci dodavatelů. Jen tak je možné zajistit, že všechny díly dorazí právě včas. Když pak někteří dodavatelé nebyli schopni dodat určité základní komponenty, například kondenzátory nebo paměti flash, byla síť firmy Compaq paralyzována. Nemohla uspokojit 600 000 až 700 000 objednávek těchto kapesních zařízení. PocketPC v ceně 499 dolarů se v aukcích na eBay a Amazon.com prodával za 700 až 800 dolarů. Společnost Cisco postihl jiný, ale stejně zničující problém: když vyschl proud objednávek, zapomněla přerušit svůj dodavatelský řetězec a její zásoby se tím nafoukly o 300 %.

Konečná čísla jsou děsivá: od března 2000 do března 2001 přesáhla úhrnná tržní ztráta dvanácti velkých společností, které aplikovaly subdodavatelský systém – Cisco, Compaq, Gateway, Apple, IBM, Lucent, Hewlett-Packard, Motorola, Ericsson, Nokia a Nortel 1,2 bilionu dolarů. Bolestná zkušenost těchto společností a jejich investorů je živou ukázkou, kam to může dojít, když se ignorují síťové efekty.

Sebestředný postoj, kdy je jediným cílem okamžitá finanční rovnováha firmy, brzdí síťové myšlení. Nepochopení účinků, které mají akce jednoho uzlu na jiný, snadno paralyzuje celé úseky sítě.

Experti se shodují v tom, že takové ztráty, které proběhnou celým systémem, nejsou nevyhnutelným rubem síťové ekonomiky. Tvrdí, že tyto společnosti postihla krize spíše proto, že přesunuly svou výrobu na subdodavatele, aniž plně porozuměly změnám, které si vyžadují jejich podnikatelské modely. Hierarchické myšlení se nehodí pro síťovou ekonomiku. V tradičních organizacích se v rámci organizace dají dělat rychlé přesuny a všechny vzniklé ztráty lze nahradit ziskem jiných stupňů hierarchie. V síťové ekonomice musí každý uzel prosperovat. Protože to nepochopili, vystavili se velcí hráči síťové hry rizikům propojenosti, aniž získali prospěch z jejích výhod. Když se objevily problémy, nebyli schopni udělat správná tvrdá rozhodnutí, například v případě Cisco uzavřít dodavatelský řetězec, a dostali se do ještě větších potíží.

Jak na makroekonomické, tak na mikroekonomické úrovni tady síťová ekonomika zůstane. Navzdory některým široce publikovaným ztrátám bude subdodavatelský systém stále běžnější. Vzájemná finanční závislost, která překračuje hranice států a kontinentů, bude s postupem globalizace jen posílena. Chystá se revoluce managementu. Bude potřeba nový, na sítě orientovaný pohled na ekonomiku, a aby přechod byl hladký, je třeba pochopit, k čemu propojenost vede.

* * *

Sabeer Bhatia nevěděl, jak se prodávají firmy. Ale protože se narodil a vyrostl v Indii, věděl, jak se kupuje cibule. Musíte smlouvat. A teď měl na prodej hodně ostrou cibuli. On a jeho společník, Jack Smith, spustili 4. července 1996 službu nenabízející nic jiného než e-mail - zdarma komukoli na světě. Nazvali ji Hotmail. Koncem roku měli už milion přihlášených klientů, z nichž každý si denně prohlédne webovou reklamu zobrazenou na svém e-mailovém účtu, což je pro Hotmail hlavní zdroj příjmů. Když o rok později zaklepal na jeho dveře Microsoft, mělo u Hotmailu účet téměř 10 milionů uživatelů. Sotva osmadvacetiletý Bhatia obešel všech dvacet šest budov v microsoftském impériu v Redmondu ve státě Washington, potřásl si rukou s Billem Gatesem a pak byl uveden do místnosti, v níž se tís-

nilo dvanáct vyjednávačů Microsoftu. Nabídli mu 160 milionů dolarů. „Dám vám vědět," řekl a odešel.

Dnes má Hotmail asi čtvrtinu veškerých e-mailových účtů. Je největším poskytovatelem služeb e-mailu ve Švédsku a v Indii, v zemích, kde nikdy nedělal reklamu. Microsoft nakonec zaplatil 400 milionů dolarů za společnost, která o rok později, předtím, než praskla bublina internetových „dot.com" podniků, měla hodnotu 6 miliard dolarů.

Jak se podfinancované začínající firmě podařilo získat smlouvy se čtvrtinou všech uživatelů e-mailu? Odpověď je nabíledni: využila sílu sítí při zbrusu nové marketingové technice zvané virový marketing. Virový marketing funguje na stejném principu, jaký viru Love Bug dovolil během několika hodin obletět planetu. Počítačový virus se dostal ke každému tak, že prohledal seznam e-mailových adres uložených v programu Microsoft Outlook, a na každou z adres poslal svou vlastní kopii. Díky podobné inovaci nabízejí uživatelé Hotmailu dobrovolně stejnou službu.

Tim Draper z investorské firmy Draper, Fisher and Jurvetson, zaměřené na rizikové podnikání, poté co poskytl 300 000 dolarů startovního kapitálu na rozjezd Hotmailu, přesvědčil Bhatiu a Smithe, aby na konec každého e-mailu přidali ještě navíc řádek s textem: „Zařiďte si zdarma svůj soukromý e-mail na http://www.hotmail.com." Takže kdykoli uživatelé Hotmailu posílají e-maily svým kamarádům, dělají reklamu firmě a podporují ji. Zpráva o Hotmailu cestuje bezškálovou sítí a využívá přesně tytéž dráhy, které napomáhaly šíření viru Love Bug. Protože kritický práh pro šíření inovace na takových sítích se blíží nule, bylo pravděpodobné, že Hotmail uspěje. Nečekané a překvapivé však bylo, jak rychle a do jaké míry se mu to podařilo.

Co je zdrojem fenomenálního úspěchu Hotmailu? Odpověď je částečně obsažena v terstské studii rozebírané v 10. kapitole. Inovace a produkty s vyšší rychlostí šíření mají větší šanci, že se dostanou k velké části sítě. Hotmail zvýšil rychlost svého šíření tím, že odboural prvotní bariéru, přes niž se jedinci musejí dostat. Především je zadarmo. Nemusíte tedy myslet na to, jestli děláte moudrou investici. Zadruhé, díky webovému rozhraní Hotmailu je zřízení účtu velmi jednoduché. Za dvě minuty jej máte a nestojí vás to tedy téměř žádný čas. Zatřetí, jakmile se přihlásíte, pak pokaždé když posíláte e-mail, poskytujete Hotmailu zdarma reklamu. Dejte si tyto tři rysy

dohromady, a dostanete službu, která má velmi vysokou nakažlivost a zabudovaný mechanismus šíření. Tradiční teorie marketingu vám řeknou, že kombinace bezplatné služby, jednoduchého učení a rychlé cesty k zákazníkovi prostřednictvím zákaznického marketingu posunula produkt nad práh šíření a právě proto se dostal ke každému. Na základě nového pochopení difuze v komplexních sítích dnes víme, že to je jen část pravdy. Ano, dosáhnete velmi vysoké rychlosti šíření, ale kromě toho nemáte ani žádný práh. Produkty a myšlenky se šíří díky tomu, že si je přisvojí centra, vysoce propojené uzly spotřebitelské sítě.

Dá se úspěch Hotmailu zopakovat? Na to nesázejte. Například společnost EpidemicMarketing.com, která při dvaatřicátém finále amerického fotbalu v roce 2000 utratila za reklamu 2,1 milionu dolarů, snila o tom, jak využije moc sítí. V její reklamě je muž, který si jde odskočit na záchod a dostane od hlídače záchodu spropitné, místo aby mu sám spropitné dal, jak je obvyklé. Jak skvěle ukazoval jejich spot, plánovali u Epidemic odměňovat lidi za to, co každodenně tak jako tak dělají. Jejich model podnikání spočíval v tom, že platili zákazníkům za to, že na svých odesílaných e-mailech připojí odkazy na internetové obchody. Čekalo se tedy, že informace o společnosti či propagace se budou lavinovitě šířit od úst k ústům a zopakuje se fenomenální úspěch Hotmailu. V jejich modelu však chyběl klíčový prvek virového marketingu: váš kamarád má pramalý zájem předat odkaz svým známým. Nepřekvapí tedy, že firma Epidemic zavřela krám a v červnu 2000 propustila svých šedesát zaměstnanců, když promrhala 7,6 milionu dolarů, které se jí podařilo sehnat.

Hotmail ukazuje sílu spotřebitelských sítí. Některé produkty nepotřebují k tomu, aby prorazily, žádný nákladný televizní marketing či reklamy v novinách a televizi. Šíří se prostě ústně jako virus. I když to nemusí fungovat u všech produktů, zahrnutí některých prvků virového marketingu může zlepšit prodej skoro všeho. Krach Epidemic však ukazuje, že není snadné Hotmail kopírovat. Zkušenost s Hotmailem by spíš měla sloužit jako odrazový můstek pro nové přístupy k marketingu, pro přístupy kombinující tradiční strategie s lepším pochopením síťových efektů.

* * *

Síťové efekty se ve světě podnikání uplatňují čím dál víc. Viděli jsme Vernona Jordana, jak úspěšně proplouvá komplexní sítí velkých společností a stává se vlivným členem korporátní elity. Viděli jsme, jak Hotmail využívá bezškálovou povahu spotřebitelské sítě a stává se celosvětově největším poskytovatelem e-mailu. Tím seznam nekončí. Spousty nových firem, povzbuzeny vývojem trhu, v poslední době přísahaly, že síťové myšlení bude jádrem jejich podnikatelské strategie. Nezdá se, že by jim to přinášelo nějaké úžasné výsledky.

Vezměme si například SixDegrees.com, začínající společnost se sídlem v New Yorku. Ta po svých členech požadovala, aby jí zaslali jména svých přítel a nabídli jim, ať se také připojí. Ti, pokud se zapsali, zaslali i jména *svých* přátel. Krok za krokem získala firma SixDegrees podrobnou mapu sociální sítě kolem každého ze svých členů, a to jí umožnilo dostat se ke komukoli vzdálenému dva kroky. Tento virový marketing, v němž vedoucí úlohu má spotřebitel, dovolil společnosti SixDegrees získat více než 3 miliony spotřebitelů. Přesto tato začínající firma ukončila 30. prosince 2000 činnost. Nepodařilo se jí proměnit síť malého světa v životaschopný podnikatelský záměr.

Prasklá bublina „dot.com" firem se často přisuzuje jednorozměrnému myšlení mnoha internetových nadšenců. Většina začínajících firem byla založena na prosté představě, že stačí nabízet věci na internetu, aby se zopakoval příběh o úspěších nové ekonomiky. Až na několik málo těch, kdo začali včas, jako Amazon.com, AOL nebo eBay, však většina podobných firem zkrachovala. Skutečné poslání internetu není v tom, že vzniknou tisíce nových internetových firem, ale že se transformují stávající podniky. Že se to skutečně děje, můžeme vidět všude, od rodinných podniků po nadnárodní konglomeráty.

Sítě nenabízejí zázračný lék, strategii, která vás učiní neporazitelným v jakémkoli podnikatelském prostředí. Jejich skutečně důležitá role spočívá v tom, že pomáhají existujícím organizacím přizpůsobit se rychle se měnícím podmínkám trhu. Už samotný pojem sítí v sobě zahrnuje ohled na současný vliv mnoha faktorů.

Různorodost sítí v podnikání a v ekonomice je ohromující. Existují sítě strategií, vlastnické sítě, sítě spoluprací, organizační sítě, síťový marketing - zbytek si doplňte sami. Bylo by nemožné integrovat tyto různorodé interakce do jediné všezahrnující pavučiny. Ať se

však díváme na jakoukoli organizační úroveň, setkáváme se se stejnými stabilními a univerzálními zákony, jako jsou ty, které vládnou v přírodních sítích. Úkolem jak ekonomického, tak síťového výzkumu je uvést tyto zákony do praxe.

Vlákno poslední

Pavučina bez pavouka

Do března 1998, kdy jsem v náhlém hnutí mysli pozval Réku Albertovou na oběd, měla sice za sebou jen půldruhého roku svých doktorských studií, ale už sepsala dostatečný počet publikací, aby mohla získat doktorát. Jeden z jejích článků, o granulárních materiálech a hradech z písku, se objevil na obálce časopisů *Nature* a *Science News*, a předběžné výsledky jejích dalších projektů byly také slibné. Proto se můj návrh tak trochu vymykal zdravému rozumu: chtěl jsem ji přesvědčit, aby nechala výzkumu, který se jí tak dařil, a začala něco úplně jiného. Řekl jsem jí o svém snu studovat sítě.

Čtyři roky předtím, na podzim 1994, s čerstvým doktorátem z teoretické fyziky v kapse, jsem začínal jako postdok v legendární slonovinové věži firmy IBM – ve Výzkumném centru T. J. Watsona v Yorktown Heights ve státě New York. Když jsem měl za sebou čtyři měsíce, vypůjčil jsem si z knihovny, snad ovlivněn duchem místa, populární knížku o informatice, abych měl co číst o vánočních prázdninách. Jak jsem se tak nořil do algoritmů, grafů a booleovské logiky, uvědomoval jsem si, jak málo je obecně známo o sítích. Ať jsem četl co jsem četl, všude se tvrdilo, že miliony elektrických, telefonních a internetových kabelů nacpaných pod dlažbou Manhattanu tvoří v zásadě náhodnou síť. Čím více jsem o tom přemýšlel, tím víc jsem byl přesvědčen, že musí existovat nějaké principy organizace, které řídí komplexní sítě kolem nás. Snil jsem o tom, že najdu náznaky nějakého řádu, a začal jsem studovat teorii sítí, počínaje klasickými pracemi Erdőse a Rényiho. Než jsem na podzim roku 1995 odešel od IBM přednášet fyziku na Univerzitu Notre Dame, odeslal jsem k publikaci svůj první výzkumný článek o komplexních sítích.

Na Notre Dame jsem se bez valného úspěchu snažil využít internetové vyhledávače k získání dat o topologii webu. Pod tlakem na publikování a získávání grantů jsem postupně nahradil sítě bezpečnějším a konvenčnějším výzkumem. Začátkem roku 1998 jsem však byl připraven vrátit se k přemýšlení o uzlech a vazbách. A teď jsem žádal jednu ze svých nejlepších studentek, aby nechala všeho, co

dělá, a přidala se ke mně na mé riskantní výpravě. V té době jsem jí mohl nabídnout jen pramálo povzbuzení. Musel jsem se přiznat, že můj jediný článek o sítích odmítli otisknout ve čtyřech časopisech, takže zůstal v šuplíku. Varoval jsem ji, že riskuje náhlý konec úspěšné kariéry, která ji dosud provázela. Řekl jsem jí ale také, že někdy musíme být připraveni riskovat a že podle mého stojí za to zkusit sítě prozkoumat.

V roce 1994 nebo i začátkem roku 1998 by stěží mohl někdo předvídat tu záplavu objevů, které měly v následujících letech od základu proměnit chápání našeho propojeného světa. Při onom obědě s Albertovou, když jsem tak horoval pro sítě, jsem jí ještě nemohl povídat o malých světech. Ani v nejdivočejších snech se mi nezdálo o mocninných zákonech nebo bezškálových sítích. Nemohl jsem mluvit ani o odolnosti vůči chybám a útokům, protože tato témata ve výzkumu sítí v té době neexistovala. Ve skutečnosti se každá otázka, která stála za prozkoumání a o níž jsem jí mohl říct, později ukázala jako špatně postavená nebo jednoduše irelevantní.

Teprve robot Hawoonga Jeonga nás přinutil přemýšlet netradičním způsobem. Jeong přišel do mé výzkumné skupiny jako postdok v srpnu 1998, pět měsíců po Albertové, a jako námět výzkumu jsem mu zadal sítě. Krátce předtím ukončil prestižní Národní univerzitu v Soulu a jeho fascinace počítači i jeho znalosti byly úžasné. Jednoho dne, po diskusi pozdě v noci, jsem se ho náhodou zeptal, zda by nedokázal dát dohromady robota, který by zmapoval world wide web. Nic neslíbil. Ale o měsíc později už jeho robot pilně stahoval uzly a vazby. Tou dobou jsme už z klasické literatury zabývající se náhodnými grafy a sítěmi přece jen něco věděli. Bylo tedy okamžitě jasné, že mocninné zákony pozorované robotem stavějí na hlavu všechno, co se tehdy o sítích vědělo. Ale teprve po vytvoření bezškálového modelu jsme plně pochopili, nakolik jsou reálné sítě odlišné od náhodného světa načrtnutého Erdősem a Rényim.

Dnes víme, že ačkoli reálné sítě nejsou tak náhodné, jak si to představovali Erdős a Rényi, náhoda přece jen hraje v jejich tvorbě důležitou úlohu. Reálné sítě nejsou statické, jako byly donedávna všechny modely z teorie grafů. Klíčovou roli při formování jejich topologie hraje růst. Nejsou tak centralizované, jako je síť ve tvaru hvězdy. Drží je pohromadě spíše hierarchie center, velmi silně propojený uzel, za nímž těsně následuje několik uzlů méně propojených a dále pak desítky ještě menších uzlů. Uprostřed pavoučí sítě nesedí žádný

centrální uzel, který by řídil a monitoroval každou vazbu a uzel. Neexistuje žádný jednotlivý uzel, který kdybychom odstranili, síť by se rozpadla. Bezškálová síť je pavučina bez pavouka.

Není-li tu pavouk, neskrývá se za těmito sítěmi ani žádný důmyslný projekt. Reálné sítě jsou samoorganizované. Představují živoucí příklad toho, jak nezávislá činnost milionů uzlů a vazeb vyústí ve velkolepé emergentní chování.* Jejich nepavoučí bezškálová topologie je nevyhnutelným důsledkem jejich evoluce. Pokaždé když se příroda, neschopná uniknout svým vlastním zákonům, chystá tkát novou síť, vytváří strukturu, jejíž základní rysy se shodují s desítkami jiných sítí usoukaných předtím. Stabilita zákonů řídících vznik komplexních sítí vysvětluje všudypřítomnost bezškálové topologie, která popisuje tak odlišné systémy, jako je síť v pozadí jazyka, vazby mezi proteiny v buňce, sexuální vztahy mezi lidmi, schéma zapojení počítačového čipu, metabolismus buňky, internet, Hollywood, world wide web, síť vědců propojených spoluautorskými vazbami a složitou pavučinu spolupráce v pozadí ekonomiky, abychom vyjmenovali jen několik příkladů.

* * *

Jednou z nejvíce fascinujících věcí při zrodu nové vědy je nový jazyk, který vytváří a který nám dovoluje nenuceně konverzovat o myšlenkách a tématech, které jsme se předtím jen s námahou snažili popsat. Znovuzrozená teorie sítí poskytla tuto službu našemu propojenému světu. Prostředníci naší společnosti, hollywoodské hvězdy a klíčové druhy v ekosystému, jsou najednou projevy téže reality a jejich nepřehlédnutelný význam v rámci jejich okolí se dá přisoudit jejich postavení jakožto center v jejich sítích. Síťové myšlení se chystá zaplavit všechny oblasti lidské aktivity a většinu oborů lidského bádání. Více než co jiného je užitečnou perspektivou a nástrojem. Sítě jsou svou podstatou tkanivem většiny komplexních systémů a uzly a vazby vnikají hluboko do všech strategií snažících se přiblížit nám náš provázaný vesmír.

Dramatická ukázka pronikavosti tohoto nového jazyka nás čeka-

* Emergentní chování, emergence = takové chování, které nevyplývá z vlastností jednotlivých součástí systému, ale objevuje se jako výsledek složité součinnosti těchto součástí (pozn. překl.).

la po 11. září 2001, kdy dostaly sítě význam, který většině z nás předtím nic neříkal. Většina z toho, co vedlo k této tragédii, dává dokonale smysl z hlediska sítí. Al-Káida, teroristická síť, jíž se připisuje zodpovědnost za tyto útoky, nevznikla zázračně ze dne na den. Náboženské představy a nespokojenost se stávajícím sociálním a politickým pořádkem přitahovaly tisíce lidí k této radikální organizaci po celou řadu let. Síť narůstala uzel po uzlu a získávala všechny charakteristiky pavučiny bez pavouka. Al-Káida se skutečně nedokázala stát sítí typu hvězda, která umožňuje ústřednímu vůdci kontrolovat všechny detaily. Vyhnula se i stromovité struktuře, řetězci velení typickému pro armádu a velké firmy 20. století. Vyvinula se spíš v samoorganizovanou nepavoučí síť, kde organizaci drží pohromadě hierarchie center.

Po 11. září sestavil Valdis Krebs, specialista na management, který běžně používá teorii sítí k analýze komunikace mezi korporacemi, mapu devatenácti únosců na palubě čtyř útočících letadel a patnácti mužů, kteří s nimi podle oficiálních údajů byli ve spojení. Krebs pečlivě zadal všechny veřejně odhalené kontakty mezi těmito třiceti čtyřmi jedinci a vazbám přiřadil váhu založenou na známé intenzitě jejich vztahu. Každý, kdo chce pochopit vnitřní fungování zákeřné skupinky, která tyto útoky provedla, se může z Krebsova schématu hodně poučit. Ti, kdo už znají struktury reálných sítí, tam najdou opět starou známou topologii. Muhammad Atta, předpokládaný organizátor útoků, je sice skutečně nejpropojenějším uzlem, ale přesto měl přímý kontakt pouze se šestnácti z dvaceti tří uzlů. Za ním těsně následuje Marwan aš-Šehhí, druhý nejvíce propojený uzel, který má vazby na čtrnáct uzlů. Jak postupujeme seznamem dolů, dostáváme se k početným uzlům s malým počtem vazeb, řadovým pěšákům smrtící organizace.

Schéma také ukazuje, že navzdory jeho ústřední roli by odstranění Atty buňku nezneškodnilo. Ostatní centra by síť držela pohromadě a možná provedla útok bez jeho pomoci. Řada lidí se domnívá, že struktura buňky zodpovědné za útoky z 11. září charakterizuje celou teroristickou organizaci. Díky své rozprostřené samoorganizované topologii je Al-Káida tak rozptýlená a soběstačná, že ani eliminace Usámy bin Ládina a jeho nejbližších podřízených by možná nevykořenila nebezpečí, které vyvolali. Je to pavučina bez opravdového pavouka.

Nejnebezpečnější útočníci v dnešním světě, od Al-Kaidy po kolumbijské drogové kartely, nejsou vojenské organizace s divizemi, ale samoorganizované teroristické buňky. Jelikož nenesou jasně patrné známky organizace a řádu, říkáme jim často „nepravidelné armády". Tím však zase klademe rovnítko mezi komplexitu a náhodnost. Ve skutečnosti se teroristické sítě řídí přísnými zákony, které rozhodují o jejich topologii a struktuře, a tudíž i o jejich akceschopnosti. Zneužívají všechny přirozené výhody samoorganizovaných sítí, včetně jejich plastičnosti a tolerance k vnitřním selháním. Naším nejhorším nepřítelem je možná neznalost tohoto nového řádu a chybějící jazyk pro formalizaci našich zkušeností.

Jistě, bitvu s Al-Káidou lze dovést až do vítězného konce ochromením její sítě, buď tak, že se zlikviduje dostatečný počet jejích center a tím se dosáhne kritického bodu fragmentace, nebo tím, že bude odříznuta od svých zdrojů, což připraví půdu pro vnitřní kaskádové selhání. Ale zhroucením Al-Káidy válka neskončí. Na její místo bezpochyby nastoupí jiné sítě s podobnými cíli a ideologií. Bin Ládin a jeho věrní teroristické sítě nevynalezli, svezli se jen na zuřivé vlně islamistických bojovníků a cestou využívali zákonů samoorganizace. Chceme-li vůbec tuto válku vyhrát, je naší jedinou nadějí vypořádat se se základními sociálními, ekonomickými a politickými kořeny, které růst sítě pohánějí. Rozhodně musíme vymýtit potřebu a touhu uzlů vytvářet vazby na teroristické organizace, a to tím, že jim dáme příležitost zapojit se do konstruktivnějších a smysluplnějších sítí. Bez ohledu na to, jak se nám bude dařit vyhrávat jednotlivé síťové bitvy, pokud nebudeme schopni potlačit touhu po vazbách, základní podmínku formování těchto zhoubných samoorganizovaných pavučin, nebude mít válka sítí konce.

* * *

23. června 1995 přinesly *The New York Times* na titulní straně velkou fotografii německého parlamentu, sto let staré budovy Reichstagu. Bylo pět let po sjednocení Německa a skoro na den čtyři roky poté, co Bundestag, sídlící v Bonnu, odhlasoval, že hlavním městem sjednoceného Německa bude opět Berlín. Obnovený celosvětový zájem o Reichstag nijak nesouvisel s politikou a se zhroucením komunismu. Skutečnou atrakcí pro 5 milionů návštěvníků, kteří v následujících dvou týdnech zaplavili Berlín, bylo to, že žádný z nich ve skutečnosti neviděl ani čtvereční centimetr této budovy. Typické

střízlivě šedé stěny Reichstagu, temní a tiší svědkové sta let bouřlivé německé historie, byly zcela neviditelné. Tento nejvyšší symbol moci byl celý, od schodiště po vlajkovou žerď, zahalen do stříbřité fólie, a tak se proměnil v monumentální umělecké dílo pod širým nebem. Více než 100 000 čtverečních metrů hustě tkaného polypropylénového plátna svázaného dvěma kilometry modrého lana pokrývalo každý kousek stavby a nabízelo jednu z nejúžasnějších uměleckých podívaných naší doby.

Ke škále výtvorů výtvarníka bulharského původu Christa a jeho partnerky, francouzské umělkyně Jeanne-Claude, patří taková monumentální díla jako „Zabalený Pont Neuf", slavný pařížský most pokrytý žlutou draperií, a úžasné „Ohraničené ostrovy", kvůli nimž rozmístili téměř milion čtverečních metrů růžového plátna kolem jedenácti ostrovů v zátoce Biscayne v Miami na Floridě. Z mnoha hledisek byl jejich „Zabalený Reichstag" vyvrcholením jejich mnoho desítek let trvající baličské činnosti. Bylo by však příliš prostoduché vidět v těchto umělcích jen baliče budov, mostů a jiných objektů. Jejich práce má silný filozofický náboj: „zjevení skrytím". Tím, že ukryjí detaily, nám dovolí zaměřit se plně na formu. Zabalení zbystří náš zrak, díky němu jsme všímavější a pozornější a z obyčejných předmětů se stanou monumentální plastiky a architektonické výtvory.

V určitém smyslu jsme se v této knize dívali na svět ve stejném duchu jako Christo a Jeanne-Claude. Abychom se podívali na sítě v pozadí tak komplexních systémů, jako je buňka nebo lidská společnost, zakryli jsme všechny detaily. Tím, že jsme viděli jen uzly a vazby, mohli jsme snáze pozorovat architekturu komplexity. A když jsme se vzdálili od jednotlivostí, zahlédli jsme obecné principy organizace těchto komplexních systémů. Zakrytí odhalilo fundamentální zákony řídící evoluci síťovitého světa kolem nás a pomohlo nám pochopit, jak tato propletená architektura ovlivňuje všechno, od demokracie po léčbu rakoviny.

Kam se vydat teď? Odpověď je prostá. Musíme rozbalit obal. Cílem, který před námi stojí, je pochopení komplexity. Abychom toho dosáhli, musíme se dostat za strukturu a topologii a začít se zaměřovat na dynamiku pulzující podél vazeb. Sítě jsou jen kostrou komplexity, jsou dálnicemi nejrůznějších procesů, jimiž klokotá náš svět. Abychom popsali společnost, musíme dodat vazbám sociální sítě skutečné dynamické interakce mezi lidmi. Abychom pochopili život, musíme začít zkoumat dynamiku reakcí probíhajících podél vazeb

metabolické sítě. Abychom pochopili internet, musíme se podívat na provoz v jeho propletených spojích. Abychom chápali, proč mizí některé druhy v ekosystému, musíme vzít v úvahu, že některou kořist je snazší chytit než jinou.

Ve 20. století jsme došli při odhalování a popisu složek komplexních systémů tak daleko, jak jsme uměli. Na své cestě k pochopení přírody jsme narazili na skleněný strop, protože ještě nevíme, jak součástky složit dohromady. Složité otázky, které před námi stojí v různých oblastech, od komunikačních systémů po buněčnou biologii, vyžadují zcela nové přístupy. Vydat se bez mapy na cestu, která je před námi, by bylo beznadějné. Naštěstí nám probíhající síťová revoluce poskytla mnoho veledůležitých map. Třebaže máme před sebou stále mnoho míst, „kde jsou lvi", vynořují se už obrysy nového světa, kontinent za kontinentem. Nejpodstatnější je, že jsme pochopili zákony síťového zeměpisu, což nám při setkání s novými sítěmi umožňuje nakreslit nové mapy. Teď musíme jít podle těchto map, abychom došli až na konec cesty a spojili součásti navzájem, uzel po uzlu, vlákno za vláknem, a vystihli jejich dynamickou souhru. Máme devadesát osm let na to, abychom si neprobádaná území podrobili a učinili 21. století stoletím komplexity.

Poděkování

Není možné náležitě ocenit všechny ty vědce, jejichž bádání mě inspirovalo. O některých jsem se v knize zmiňoval, jiní se objevují v poznámkách. Drtivá většina se však do vyprávění nedostala. Nejsou však o nic méně důležití. Tvoří různými způsoby základ této knihy.

Nečerpal jsem jen z publikovaných materiálů. Hodně jsem získal od všech těch studentů a kolegů, kteří mě během let kontaktovali s otázkami a nápady týkajícími se sítí. Tyto rozhovory a e-maily sehrály zásadní roli při utváření obsahu této knihy a otevřely mi cestu k síťovému myšlení v mnoha různých oblastech.

Tato kniha by nikdy nevznikla bez pomoci mých opravdu výjimečných bývalých i současných studentů, Réky Albertové, Ginestry Bianconiové, Zoltána Dezsőa, Illése Farkase, Erzsébet Ravaszové a Soon-Hyunga Yooka, kteří si zvolili výzkum sítí. Díky neobyčejné zručnosti a vytrvalosti Hawoonga Jeonga, bývalého postdoka v mé výzkumné skupině, byla naše cesta k reálným sítím schůdná a zábavná. Jsem také zavázán četným spolupracovníkům, mezi nimi Ericu Berlowovi, Jay Brockmanovi, Imremu Derényimu, Jennifer Dunneové, Vincentu Freeovi, Byungnamu Kahngovi, Jánosi Kertészovi, Neo Martinezovi, Zoltánu Nédovi, Zoltánu Oltvaiovi, Peteru Schifferovi, Andrási Schubertovi, Bálintu Tomborovi, Yuhai Tuovi, Tamási Vicsekovi a Richovi Williamsovi, za mnoho nápadů a pomoc, jež mi během posledních několika let poskytli.

Pár lidí mi podalo informace, které se mi pak velice hodily, když jsem sbíral materiál pro tuto knihu. Už roku 1999 mi Tibor Braun poslal Karinthyho povídku o pěti krocích a Thomas Bass mi objasnil Milgramovu práci o šesti krocích. Luis Amaral, Eric Bonabeau, Guido Caldarelli, Christopher R. Edling, Lee Giles, Mark Granovetter, Byungnam Kahng, Jeff Kantor, Judith Kleinfeldová, Valdis Krebs, Steve Lawrence, Fredrick Liljeros, Sid Redner, Ricard V. Solé a Alessandro Vespignani mi dali k dispozici své nepublikované rukopisy a prameny.

Mnoho lidí věnovalo dobrovolně svůj čas pročtení a komentování různých stadií rukopisu. Zoltán Oltvai udělal skutečně heroickou práci, když mi řádek po řádku dával návrhy, jak text vylepšit. Velký užitek mi přinesly i poznámky a postřehy Réky Albertové, Kevina Barryho, Steva Buechlera, Reuvena Cohena, Gábora Forgácse, Viktora Gyurise, Boldizsára Jankóa, Hawoonga Jeonga, Geralda Jonese, Jima McAdamse, Marka Newmana, H. Eugena Stanleyho, Alessandra Vespignaniho, Tamáse Vicseka, Eda Vielmettiho a Eduarda Zambranda. Skutečně stimulující diskuse při obědech s členy Web Group, skupiny pedagogů z Notre Dame řízené Jimem Mcadamsem, mi pomohla vyjasnit některé z myšlenek, které se nakonec dostaly do této knihy. V této skupině byli Sheri Alpertová, Kevin Barry, Patricia Louise Belliaová, Kathy Biddicková, Jay Brockman, Leo Burke, David S. Hachen, Martin Haenggi, Lionel M. Jensen, Lee Byung Joo, Jeffrey C. Kantor, Barry Patrick Keating, Gregory Madey, Gail Hinchion Manciniová, Khalil Matta, Kajal Mukhopadhayay, Daniel Myers, Susan Ohmerová a Richard Pierce.

Mí kolegové z fyzikální fakulty, kteří mi byli oporou v dramatických přemetech, které během posledních pár let moje práce prodělala, vytvořili stimulující atmosféru podporující mé bádání a psaní této knihy. Chtěl bych zvlášť poděkovat Brucei Bunkerovi, Margaret Dobrowolské, Jacku Furdynovi, Boldizsáru Jankóovi, Geraldu Jonesovi a Kathie Newmanové za jejich soustavnou podporu. Jennifer Maddoxová a její profesionální a optimistický přístup ke každému logistickému problému, na jaký jsem pomyslel, mi ušetřily nespočetné hodiny, jež mohly být věnovány této knize.

Deborah Justiceová strávila spoustu hodin úpravami raných stadií rukopisu a pomáhala mi prokousat se spletí anglické gramatiky a stylu. Kniha by nebyla nikdy dokončena bez obětavé technické pomoci Lesleyho Kruegera, který byl očitým svědkem proměny hrubého náčrtu v hotovou knihu. Enikő Jankóová a Zoltán Dezső strávili mnoho hodin opravováním nekonečných verzí rukopisu a byli k dispozici na zavolání i v tu nejnevhodnější dobu. Jsem hluboce zavázán Hawoongu Jeongovi, který znovu a znovu prokazoval svůj kouzelný styl a trpělivost při přípravě konečných verzí obrázků do této knihy.

Pracovníci nakladatelství Perseus mi ve všech fázích psaní a výroby nadmíru pomáhali. Neumím si představit lepší redaktory, než byly Amanda Cooková a Joan Benhamová, díky jejichž redakčnímu

vedení je kniha mnohem čitelnější. Elizabeth Carduffová, Chris Coffin a Marco Pavia provedli rukopis s výjimečnou rychlostí bludištěm výroby. Mé tisíceré díky patří i Lisse Warrenové, která mi pomohla najít správná slova. Jsem vděčný Katince Matsonové a firmě Brockman, Inc., že mě dali dohromady s Perseem.

Knihu *V pavučině sítí* bych nikdy nezačal psát – neřkuli dopsal – bez vlídného povzbuzování Janet Kelleyové, která mi dodávala sílu vždycky, když jsem toho chtěl nechat. Jen těžko mohu vyjádřit slovy, co pro mě její podpora znamenala.

Poznámky

Vlákno první: Úvodem

Str. 10 Příběh MafiaBoye se podrobně rozebíral v tisku. Sbírku odkazů najdete na http://www.mafiaboy.com/. Fráze „Ano, slyším tě" pochází z článku C. Taylora „Pozadí hackerského útoku" uveřejněného v *Time Magazine* 21. února 2000.

Str. 11 Život svatého Pavla a jeho úloha při šíření křesťanství byly námětem nesčetných knih a monografií. Viz např. C. J. Den Heyer, *Paul: A Man of Two Worlds* (Harrisburg, Penn., Trinity Press International, 1998), a Robert Jewlett, *A Chronology of Paul's Life* (Philadelphia, Fortress Press, 1979).

Str. 14 Komplexita, poslední dobou vzkvétající nový vědní obor, se snaží pochopit, jak se chovají systémy složené z milionů rozličných komponent a jak pod vládou zákonů samoorganizace vzniká řád z chaosu a náhodnosti. Zabývají se jí lidé z desítek disciplín, od matematiky a fyziky po ekologii a podnikání. Jako populární knihy a úvodní texty k této problematice viz například knihy, které napsal Murray Gell-Mann: *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex* (New York, W. H. Freeman, 1995); *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity* (Cambridge, Mass., Perseus, 1996); Ricard V. Solé a Brian Goodwin: *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology* (New York, Basic Books, 2001); Yaneer Bar-Yam: *Dynamics of Complex Systems* (Cambridge, Mass., Perseus, 1997).

Vlákno druhé: V říši náhody

Str. 16 Eulerův život se stručně popisuje na mnoha různých místech. Z nedávných prací viz např. biografickou poznámku v knize Williama Durhama *Euler: The Master of Us All* (Washington, D. C., Mathematical Association of America, 1999).

Str. 16 Eulerův život v Petěrburgu byl dosti bouřlivý. Ztratil ženu, s níž žil třicet let, a tři roky poté si vzal její nevlastní sestru. Vyhořel mu dům a byly zničeny všechny jeho knihy a poznámky; sám unikl díky srdnatosti jednoho dalšího Švýcara, který vběhl do ohně a vynesl svého učeného krajana na zádech.

Str. 17 Svěžest a jasnost Eulerova stylu je pozoruhodná. Jeho nadšení pro věc

vnímáme i po staletích. Dnes, kdy je vědecký sloh pro nezasvěcence stěží pochopitelný, mu můžeme jednoduchý jazyk jeho článků jen závidět. Strávil asi čtvrt století v Berlíně na pozvání pruského krále Bedřicha Velikého a v té době se po něm požadovalo, aby dával lekce přírodních věd anhaltsko-desavské princezně, králově neteři. Čtyřsetstránková práce sepsaná při příležitosti tohoto úkolu, *Eulerovy dopisy na různá témata z přírodní filozofie, adresované německé princezně*, se dotýká prakticky všech vědních oborů a rozebírá otázky sahající od přitažlivosti Měsíce po přirozenost duchů. *Dopisy německé princezně* se brzy staly mezinárodním trhákem. Je to nejskvělejší příklad popularizace vědy z pera učence pracujícího v první linii svého oboru. Viz Leonhard Euler, *Letters of Euler on Different Subjects in Natural Philosophy Addressed to a German Princess* (New York, Arno Press, 1975).

Str. 18 Pěkný výklad počátků teorie grafů včetně historického pozadí a anglického překladu nejdůležitějších článků v oboru najdete v knize *Graph Theory: 1736–1936* od Normana L. Biggse, E. Keitha Lloyda a Robina J. Wilsona (Oxford, Clarendon Press, 1976). Tato kniha obsahuje také Eulerův původní článek o královecých mostech.

Str. 19 Abychom lépe pronikli do Eulerovy argumentace, uvažme například uzel *D*, který má tři vazby a představuje souši spojenou třemi mosty, *e*, *f* a *g*. Osoba snažící se přejít všechny tři mosty právě jednou musí navštívit uzel *D* aspoň dvakrát. Například může přijít mostem *f* a odejít po *e* a pak opět přijít po *g*. Problém je, že pak už nemůže odejít, protože už nezbývá žádný nenavštívený most. Takže *D* je buď počáteční, nebo koncový bod pouti. To ale neplatí jen pro uzel *D*: snadno ověříme, že *všechny uzly* s *lichým* počtem vazeb mají tuto vlastnost. To znamená, že v takových uzlech musí osoba, která chce navštívit všechny uzly, svoji cestu začínat nebo končit. Tuto vlastnost sdílejí čtyři uzly *A*, *B*, *C* a *D*, protože všechny mají po třech vazbách. To znamená, že všechny, *A*, *B*, *C* i *D*, musí být zároveň buď počátečním, nebo koncovým bodem pouti.

Str. 19 Problém čtyř barev, který se datuje od roku 1852, zůstával bez důkazu do roku 1976. Zadání problému je velmi jednoduché: Dokažte, že každá mapa se dá obarvit čtyřmi barvami tak, že žádné sousedící země nemají stejnou barvu. Každý, kdo zkoušel obarvit nějakou mapu, se může snadno přesvědčit, že čtyři barvy opravdu stačí. Ale důkaz matematikům unikal více než sto let a stal se prvním velkým teorémem, jehož důkaz byl získán s použitím počítače.

Str. 20 Erdősův život inspiroval řadu populárních historek. Příběh v úvodu se zakládá na vyprávění Andráse Várzsonyiho, který byl oním čtrnáctiletým chlapcem v obuvnickém krámě a později se stal druhým nejmladším nositelem doktorátu z matematiky v tehdejším Maďarsku (po Erdősovi) a byl Erdősovým celoživotním přítelem. Viz Fan Clung a Ron Graham, *Erdős on Graphs: His Legacy and Unsolved Problems* (Wellesley, Mass., A. K. Peters, 1998). Jako populární Erdősovy životopisy viz Paul Hoffman, *The Man Who Loved Only Numbers* (New York, Hyperion, 1998), a Bruce

Schechter, *My Brain Is Open* (New York, Touchstone, 1998). Viz také András Hajnal a Vera T. Sós, „Paul Erdős Is Seventy", *Journal of Graph Theory* 7 (1983), 391–393.

Str. 20 Slavný seznam osmi článků Erdőse a Rényiho, které založily teorii grafů, najdete v článku Michala Karonského a Andrzeje Rucinského „The Origins of the Theory of Random Graphs" v *The Mathematics of Paul Erdős*, ed. R. L. Graham a J. Nešetřil (Berlin, Springer, 1997). Jsou to: „On Random Graphs I", *Math. Debrecen* 6 (1959), 290–297; „On the Evolution of Random Graphs", *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* 5 (1960), 17–61; „On the Evolution of Random Graphs", *Bull. Inst. Internat. Statist* 38 (1961), 343–347; „On the Strength of Connectedness of a Random Graph", *Acta Math. Acad. Sci. Hungary* 12 (1961), 261–267; „Asymmetric Graphs", *Acta Math. Acad. Sci. Hungary* 14 (1963), 295–315; „On Random Matrices", *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci.* 8 (1964), 455–461; „On the Existence of a Factor of Degree One of a Connected Random Graph", *Acta Math. Acad. Sci. Hungary* 17 (1966), 359–368; „On Random Matrices II", *Studio Sci. Math. Hung.* 13 (1968), 459–464.

Str. 23 Dodejme, že Erdős a Rényi a *většina* matematiků nevěděla, že náhodné grafy byly zavedeny deset let před klasickou Erdősovou a Rényiho prací, v článku Ray Solomonoffa a Anatola Rapoporta, „Connectivity of Random Nets", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 13 (1951), 107–227. Zajímavé je, že tento článek odvodil klasický výsledek, opět přisuzovaný Erdősovi a Rényimu, že když průměrná konektivita dosáhne jedné, objevuje se gigantický shluk. Těžko říct, proč tento článek nebyl nikdy uznán jako předchůdce Erdősovy a Rényiho práce. Možná byla pro matematiky přitažlivým aspektem matematická krása Erdősova důkazu, něco, co rozhodně scházelo heuristickému odvození Solomonoffa a Rapoporta.

Str. 26 Naproti tomu Rényiho život byl mezinárodním tiskem mnohem méně sledovaný. Pro přehled o životě a díle viz sérii článků publikovaných brzy po jeho smrti (v maďarštině) v *Matematikai Lapok* 3–4 (1970); Turán Pál, „Rényi Alfréd munkássága", 199–210; Révész Pál, „Rényi Alfréd valószinüségszámitási munkássága", 211–231; Csiszár Imre, „Rényi Alfréd információelméleti munkássága", 233–241; Katona Gyula a Tusnády Gábor, „Rényi Alfréd pedagógiai munkássága", 243–244; B. Mészáros Vilma, „Quibus Vivere est Cogitare", 245–248. Dnes jeho jméno nese líheň maďarské matematiky, Matematický ústav Alfréda Rényiho v Budapešti.

Str. 27 I když se Arnoldu Rossovi nepodařilo přitáhnout Erdőse mezi kmenové pracovníky Notre Dame, pokračoval velmi plodnou kariérou ve vědecké výchově. Založil Rossův program, intenzivní letní kurs matematiky pro talentované středoškolské studenty a pedagogy. Svůj program zahájil roku 1947 na Notre Dame a přesunul jej roku 1964 na Ohijskou státní univerzitu, kde se od té doby pořádá každé léto. Viz např. Allyn Jackson, „Interview with Arnold Ross", *Notices of the American Mathematics Society* 48 (2001), 691–697.

Str. 28 Rozdělení konektivit v náhodném grafu odvodil B. Bollobás, „Degree Sequences of Random Graphs," *Discrete Mathematics*, sv. 33 (1981), 1.

Str. 29 Ve zpětném pohledu není jasné, nakolik byla Erdősova a Rényiho práce motivována touhou modelovat náš provázaný svět a nakolik matematickou krásou dotyčného problému. Ve svém zakladatelském článku z roku 1959 skutečně zmiňují potenciální aplikace: „Zdá se pravděpodobné, že když uvažujeme náhodný růst komplikovanějších struktur..., můžeme obdržet docela rozumné modely složitějších reálných růstových procesů (například růstu složité komunikační sítě sestávající z různých typů spojů a také organických struktur živé hmoty atd.)." Navzdory této neuvěřitelné intuici o budoucím vývoji byla patrně jejich práce v této oblasti motivována spíše hlubokou zvídavostí, jaké matematické taje problém skýtá, než jeho aplikacemi.

Str. 30 Jak budeme postupovat při cestě naším propojeným světem, bude pro nás často Erdősova a Rényiho teorie náhodných sítí referenčním bodem. Přesto však nedostatky modelu nesnižují náš obdiv a respekt k Erdősovu a Rényiho monumentálnímu odkazu. Naše občasná kritika směřuje na všechny ty z nás, kdo jako jejich následovníci desítky let bez rozlišování aplikovali na reálný svět náhodný pohled, který oni vykreslili.

Vlákno třetí: Šest kroků od sebe

Str. 31 V maďarštině je řada knih o Karinthyho životě a díle. Viz např. posmrtný svazek Karinthy Frigyes, *A humor a teljes igazság*, ed. Mátyás Domokos (Budapest, Nap Kiadó, 1998), což je sbírka příběhů o Karinthym sepsaná přáteli a kolegy, z nichž většina byli spisovatelé. Viz také Dolinszky Miklós, *Szószerint (A Karinthy Passió)* (Budapest, Magvető, 2001), a Levendel Júlia, *Így élt Karinthy Frigyes* (Budapest, Móra Könyvkiadó, 1979).

Str. 32 Frigyes Karinthy, „Láncszemek", *Minden másképpen van* (Budapest, Athneum Irodai es Nyomdai R.-T. Kiadása, 1929), 85–90. Jsem hluboce zavázán Tiboru Braunovi, který mě na tuto povídku upozornil a poslal mi roku 1999 její výtisk, brzy poté, co se o našem výzkumu devatenácti kroků na world wide webu zmiňovala maďarská média. Nemyslím, že tato povídka byla někdy přeložena do angličtiny. Nebyla přeložena ani do češtiny. V češtině vyšel například výbor povídek *Vzkaz v láhvi*, Odeon, Praha 1975, nebo dva fantastické cestopisy *Kapilárie* a *Cesta do Faremida*, SNKLHU, Praha 1960.

Str. 33 Jinou ranou ukázku pojmu šesti kroků od sebe nalezneme v knize *The Death and Life of American Cities* od Jane Jacobsové (New York, Random House, 1961). Je to jedna z nejvýznamnějších knih, které byly kdy sepsány o plánování měst, a znamenala začátek obnovy starých zpustlých čtvrtí. V této knize autorka vzpomíná: „Když jsme já a moje sestra poprvé přijely z malého města do New Yorku, bavívaly jsme se hrou, které jsme říkaly Zvěsti. Spočívala v tom, že jsme vybraly dva strašlivě odlišné jedince – řekněme náčelníka lovců z Šalomounových ostrovů a ševce z Rock Islandu v Illinois – a řekly jsme si, že jeden z nich musí druhému doručit ústní cestou nějakou zvěst; pak jsme každá v duchu vymýšlely pravděpodobný, nebo alespoň možný řetězec lidí, jejichž prostřednictvím může zvěst putovat. Vyhrával ten, kdo dokázal vytvořit kratší pravděpodobný řetězec kurýrů."

Str. 33 Milgramova studie o šesti krocích byla publikována na několika místech. Viz například Stanley Milgram, „The Small World Problem", *Physiology Today* 2 (1967), 60–67. Jeho práci o poslušnosti, která je sama o sobě fascinujícím čtením, najdeme v knize Stanley Milgram, *From Obedience to Authority* (New York, Harper and Row, 1969).

Str. 34 Více o Milgramově životě a díle se lze dočíst ve stati Thomase Blasse, „The Social Psychology of Stanley Milgram", in: *Advances in Experimental Social Psychology*, ed. M. P. Zanna (San Diego, Academic Press, 1992), 25: 277–328, a v knize Thomas Blass, ed., *Obedience to Authority: Current Perspectives on the Milgram Paradigm* (Mahwah, N. J., Lawrence Erlbaum, 2000). Další informace a odkazy jsou na http://www.stanleymilgram.com.

Str. 35 Poznamenejme, že metodologii použitou Milgramem k dosažení závěru o šesti krocích nedávno zpochybnila Judith S. Kleinfeldová, která prohlédla Milgramovy archivy a poznámky a stejně tak sbírku dopisů, které se dostaly až ke svému adresátovi a které uchovává archiv Yaleovy univerzity. Nedávné studie zejména naznačují, že náš svět je hluboce rozdělen podle společenských tříd a ras, což dosti znesnadňuje procházení takovými sociálními bariérami. Viz např. Judith S. Kleinfeld, „The Small World Problem", *Society* 39 (leden–únor 2002), 61–66, a „Six Degrees of Separation: An Urban Myth", *Psychology Today* (2002).

Str. 35 Je známo, že technické aspekty Milgramovy práce o naší sociální propojenosti byly inspirovány prací Anatola Rapaporta, matematika a koncertního klavíristy ruského původu, který publikoval několik základních článků o sociálních sítích. Zavedl nezávisle pojem náhodných grafů a měl nesmírný vliv na sociologii. Mezi jeho nejvýznamnější články patří: R. Solomonoff a A. Rapaport, „Connectivity of Random Nets", *Bulletin of Mathematical Biophysics* 13 (1951), 107–117, a A. Rapaport, „Contribution to the Theory of Random and Biased Nets", *Bulletin of Mathematical Biophysics* 19 (1957), 257–277.

Str. 35 John Guare, *Six Degrees of Separation* (New York, Random House, 1990).

Str. 36 Ranou historii world wide webu v podání tvůrce webu najdete v knize: Tim Berners-Lee, Mark Fischetti, *Weawing the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by Its Inventor* (San Francisco, Harper, 1999).

Str. 36 Pokud jde o velikost world wide webu, viz Steve Lawrence a C. Lee Giles, „Searching the World Wide Web", *Science* 280 (1998), 98–100, a „Ac-

cessibility of Information on the Web", *Nature* 400 (1999), 107–109. Viz také rozsáhlou diskusi v 12. kapitole.

Str. 39 Studie odhalující devatenáct kroků na world wide webu byla publikována v: R. Albert, H. Jeong a A.-L. Barabási, „Diameter of the World Wide Web", *Nature* 401 (1999), 130–131. Metoda použitá k zjištění poloměru celého webu je v literatuře známá pod jménem škálování na konečný objem.

Str. 39 Vzdálenosti v potravní síti viz Richard J. Williams, Neo D. Martinez, Eric L. Berlow, Jennifer A. Dunne a Albert-László Barabási, *Two Degrees of Separation in Complex Food Webs*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/01-07-036abs.html; José M. Montoya a Ricard V. Solé, *Small World Patterns in Food Webs*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/00-10-059abs.html.

Vzdálenosti uvnitř buňky viz 13. kapitolu a práce: Hawoong Jeong, Bálint Tombor, Réka Albert, Zoltán N. Oltvai a Albert-László Barabási, „The Large-Scale Organization of Metabolic Networks", *Nature* 407 (2000), 651; Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Centrality and Lethality of Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42; Andreas Wagner a David Fell, „The Small World Inside Large Metabolic Networks", *Proceedings of the Royal Society of London, Series B Biological Sciences*, 268 (2001), 1 803–1 810. Síť vědců a malý svět, který vytvářejí, viz A.-L. Barabási, H. Jeong, E. Ravasz, Z. Néda, T. Vicsek a A. Schubert, *Evolution of the Social Network of Scientific Collaborations*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0104162 (má vyjít v roce 2002); M. E. J. Newman, *Who is the Best Connected Scientist? A Study of Scientific Coauthorship Networks*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/00-12-064abs.html; M. E. J. Newman, The „Structure of Scientific Collaboration Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98 (2001), 404–409. Malý svět v neuronových sítích viz D. J. Watts a S. H. Strogatz, „Collective Dynamics of ‚Small-World' Networks", *Nature* 393 (1998), 440–442.

Str. 40 Naši jednoduchou předpověď můžeme testovat na dvou dobře známých sítích: lidské společnosti a webu. U společnosti potřebujeme vědět, kolik lidí průměrný člověk zná. I když to vypadá jako jednoduchý výpočet, sociologové se nedokážou shodnout a odhady se pohybují od 200 po 5 000! Jak mi nedávno řekl Duncan Watts, matematik, který se stal sociologem na Columbijské univerzitě, nalezení správné odpovědi komplikuje obtížnost definice pojmu *známý*: „Nejspíš znám jména pár tisíců lidí, ale zavolal bych jim, kdybych navštívil jejich město? Cítil bych se dobře, kdybych je o něco požádal? Svěřil bych se jim?" Abychom tento problém překonali, předpokládejme, že průměrný člověk má kolem 1 000 známých, s nimiž si tyká, což je asi na půli cesty mezi nejkonzervativnějšími a nejoptimističtějšími odhady. S 6 miliardami lidí nám naše formule říká, že vzdálenost ve společnosti se blíží 3. Tatáž formule aplikovaná na world wide web, s použitím miliardy dokumentů a průměrné konektivity 7, předpovídá vzdálenost 10. Obě předpovědi se pohybují na dolní hranici, ale nejsou příliš daleko od „správných" odpovědí (6 a 19). Matematická formule smazává všechny rozdíly v počtu uzlů, až na řádovou velikost, což vysvětluje, proč obecně dostáváme tak malou vzdálenost.

Odchylka od „správné" odpovědi podtrhuje základní východisko této knihy: reálné sítě nejsou náhodné. Kdyby byl world wide web náhodný, pak jelikož je málo pochyb o jeho konektivitě a velikosti, byly by vzdálenosti v něm mnohem bližší předpovědi 10 kliknutí podle formule pro náhodné sítě. To by platilo také pro mnoho dalších sítí v přírodě, pro něž je velikost a konektivita známa dosti přesně. Čísla ale zřídkakdy souhlasí – což naznačuje skrytý řád v našem propleteném světě. Podrobný výčet sítí malého světa, zdůrazňující nesouhlas mezi předpovědí náhodných sítí a reálnou vzdáleností, viz např. R. Albert a A.-L. Barabási, „Statistical Mechanics of Complex Networks", *Review of Modern Physics* 74 (2002), 47–97.

Str. 42 Kochenova poznámka o historii malých světů viz Manfred Kochen, předmluva ke knize: *The Small World*, ed. Manfred Kochen (Norwood, N. J., Ablex, 1989).

Str. 43 O možnosti procházet malými světy viz J. M. Kleinberg, „Navigation in a Small World – It Is Easier to Find Short Chains Between Points in Some Networks Than Others", *Nature* 406 (2000), 845.

Str. 44 Často se namítá, že Milgramova práce podcenila odlehlost mezi lidmi, protože neprovedla korekci na neúplné řetězce. Ve skutečnosti, pokud se dopis nedostal ke své cílové osobě, nebyl brán v úvahu. Jelikož v experimentu v Nebrasce dorazilo k adresátovi jen 42 ze 160 dopisů, většina delších řetězců ve vzorku jasně chyběla. Delší řetězce mají větší pravděpodobnost, že neuspějí, vzorek studovaný Milgramem upřednostňoval kratší dokončené cesty.

Vlákno čtvrté: Malé světy

Str. 47 První výsledky o shlukování v naší společnosti byly publikovány v: Mark S. Granovetter, „The Strength of Weak Ties", *American Journal of Sociology* 78 (1973), 1 360–1 380. Granovetter vzpomínal na příhody spojené s jejím uveřejněním v krátkém článku otištěném v *Current Contents* (Sociology and Behavioral Sciences Edition, vol. 18, no 49 [1986] 24) při příležitosti zařazení svého článku mezi klasické citace. Viz také „The Strength of Weak Ties: A Network Theory Revisited", *Sociological Theory* 1 (1983), 201–233; Mark S. Granovetter, *Getting a Job* (Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1994).

Str. 49 Rytmický potlesk se obšírně studoval ve fyzikální literatuře jako projev synchronizace. První podrobná měření byla uvedena v článku: Z. Néda, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, a A.-L. Barabási, „Self-Organizing Processes: The Sound of Many Hands Clapping", *Nature* 403 (2000), 849–850. Podrobnější výklad viz Z. Néda, E. Ravasz, T. Vicsek, Y. Brechet a A.-L. Barabási, „Physics of the Rhythmic Applause", *Physical Review*

E 61, (2000), 6 987. Populární výklad tohoto výzkumu viz Henry Fountain, „Making Order Out of Chaos When a Crowd Goes Wild", *The New York Times*, 7. března 2000, a Josie Glausiusz, „Joining Hands", *Discover* 21 (červenec 2000).

Str. 50 John Buck a Elisabeth Buck, „Synchronous Fireflies", *Scientific American*, květen 1976, 74–85. Novější kniha o synchronizaci viz Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum a J. Kurths, *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences* (Cambridge, Cambridge University Press, 2001). Viz také Ian Stewart a Steven H. Strogatz, „Coupled Oscillators and Biological Synchronization," *Scientific American*, prosinec 1993, 68.

Str. 51 Příběh v pozadí Wattsova-Strogatzova objevu viz Duncan J. Watts, *Small Worlds* (Princeton, N. J., Princeton University Press, 1999).

Str. 51 Zatímco sítě odklonily zájem Duncana Wattse od synchronizace, řada badatelů znovu prozkoumala vztah mezi sítěmi a synchronizací. Viz například J. Jast a N. P. Jog, „Spectral Properties and Synchronization in Coupled Map Lattices", *Physical Review E* 67 (2002), 016201; X. F. Wang a G. R. Chen, „Synchronization in a Scale-Free Dynamical Network: Robustness and Fragility", *IEEE Transaction on Circuits and Systems I* 49 (2002), 54–62; M. Barahona a L. M. Pecora, „Synchronization in Small-World Systems", http://arxiv.org/abs/nlin.CD/0112023; J. Ito a K. Kaneko, „Spontaneous Structure Formation in a Network of Chaotic Units with Variable Connection Strengths", *Physical Review Letters* 88 (2002), 02801.

Str. 51 Pojem *koeficient shlukování* byl poprvé použit Wattsem a Strogatzem v práci D. J. Watts a S. H. Strogatz, „Collective Dynamics of ‚Small-World' Networks", *Nature* 393 (1998), 440–442. Tatáž veličina se pod názvem „hustota tranzitivních trojic" používá v sociologické literatuře. Viz např. nyní již klasické dílo S. Wasserman a K. Faust, *Social Network Analysis: Methods and Applications* (Cambridge, Cambridge University Press, 1994).

Str. 52 Obsáhlá diskuse o Erdősových číslech: Jerrold W. Grossman, http://www.oakland.edu/~grossman.erdoshp.html. Seznam slavných vědců a jejich Erdősových čísel naleznete v: Rodrigo De Castron a Jerrold W. Grossman, „Famous Trails to Paul Erdős", *Mathematical Intelligencer* 21 (léto 1999), 51–63.

Str. 52 Poznamenejme, že v částicové fyzice, což je velmi aktivní podobor fyziky, je běžné, že stovky fyziků rozptýlených po mnoha kontinentech, kteří se často ani osobně nesetkají, přispívají k objevu nové elementární částice. Pro ně se tedy spoluautorství nedá považovat za známku známosti nebo sociálních vazeb. Ve většině vědních oblastí jsou však tak velké spolupracující skupiny spíše výjimkou než pravidlem.

Str. 53 Naše práce o sítích spolupráce u matematiků a neurovědců je shrnuta v: A.-L. Barabási, H. Jeong, R. Ravasz, Z, Néda, T. Vicsek a A. Schubert, *On the Topology of Scientific Collaboration Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0104162 (*Physica A*, 2002). Podobné výsledky nezávisle získal Mark Newman, který se zaměřil na fyziky, informatiky a další obory. Viz M. E. J. Newman, „The Structure of Scientific Collaboration Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (2001), 404–409; „Scientific Collaboration Networks: I. Network Construction and Fundamental Results", *Physical Review E* 64 (2001), 016131; „Scientific Collaboration Networks: II. Shortest Paths, Weighted Networks, and Centrality", *Physical Review E* 64 (2001), 016132.

Str. 53 Co by nám model náhodné sítě mohl říct o koeficientu shlukování? Protože koeficient shlukování je pravděpodobnost, že dva z mých přátel jsou spojeni, pro Erdősův-Rényiho model to není nic jiného než pravděpodobnost, že *kterékoli* dva uzly mají mezi sebou vazbu. Koeficient shlukování můžeme ve skutečnosti vypočítat pro náhodný graf s N uzly tak, že vydělíme celkový počet vazeb, které jsou v systému, celkovým počtem možných vazeb $N(N\text{-}1)/2$, čímž dostáváme $C=2L/N(N\text{-}1)$. To, jak se ukazuje, je řídící parametr Erdősova-Rényiho modelu, který se často označuje p a označuje pravděpodobnost, že kterékoli dva uzly jsou navzájem spojeny. Jinými slovy, koeficient shlukování je dán výrazem $C = \langle k \rangle / N$, kde $\langle k \rangle$ je průměrný počet vazeb na jeden uzel v síti.

Str. 53 Když se trochu obeznámíme s tím, jak vědci spolupracují, snadno pochopíme, odkud se bere enormní shlukování, které odhalily Newmanovy a naše studie. Mnoho vědeckých článků je skutečně napsáno třemi a více autory. Každý takový článek vytváří úplný graf, podobný našemu kroužku přátel, protože každý autor je spojen se všemi ostatními autory článku. Je tedy graf spoluprací posetý malinkými úplnými grafy, z nichž každý má vysoký koeficient shlukování, což zvyšuje průměrné shlukování celé sítě. Ale je tu i sociální faktor. I kdyby dva z mých doktorandů nenapsali v průběhu doktorátu společný článek, jsou stejně pouze dva kroky od sebe, protože všichni psali články se mnou. Když budou pokračovat ve stejném oboru dále pokračovat, někdy v budoucnu pravděpodobně napíšou spolu článek, což zvýší můj koeficient shlukování.

Str. 54 Další informace o *Caenorhabditis elegans* viz http://elegans.swmed.edu/ nebo http://www.nematodes.org/.

Str. 54 Zatímco schéma zapojení neuronů hlístice *Caenorhabditis elegans* bylo úplně zmapováno, bylo by nemožné snažit se o něco podobného pro lidský mozek. A to ne proto, že k mapování jsou tu miliardy neuronů, některé z nich s tisíci vazeb na ostatní neurony, ale spíš proto, že spoje mezi neurony v lidském mozku se mění, vytvářejí se nové vazby a přerušují staré, jak se učíme a stárneme. *Caenorhabditis elegans* se svým staticky zapojeným mozkem, v němž jsou všechny spoje předurčeny geneticky, je však vynikajícím studijním objektem.

Str. 54 O topologii schématu zapojení u *Caenorhabditis elegans* viz D. J. Watts a S. H. Strogatz, „Collective Dynamics of ‚Small-World' Networks", *Nature* 393 (1998), 440–442, kde je také obsažena studie elektrorozvodné sítě a hollywoodských herců. Viz také S. Horita, K. Oshio, Y. Osama, Y. Funabashi, K. Oka, K. Kawamara, „Geometrical Structure of the Neuronal Network of Caenorhabditis Elegans", *Physica A*, 298 (2001), 553–561.

Str. 55 Pro shlukování ve world wide webu viz L. A. Adamic, „The Small World

Web", *Proceedings of the European Conference on Digital Libraries 1999 Conference* (Berlin, Springer Verlag, 1999), 443. O shlukování v topologii internetu viz např. Soon-Hyung Yook, Hawoong Jeong, Albert-László Barabási, *Modeling the Internet's Large-Scale Topology*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107417; a Romualdo Pastor-Satorras, Alexei Vazquez a Alessandro Vespignani, „Dynamical and Correlation Properties of the Internet", *Physical Review Letters* 25 (2001), 258701. Shlukování v ekonomice se rozebírá v: Bruce Kogut a Gordon Walker, „The Small World of Germany and the Durability of National Networks", *American Sociological Review* 66 (2001), 317–335. Shlukování v ekologických sítích viz Richard J. Williams, Neo D. Martinez, Eric L. Berlow, Jennifer A. Dunne a Albert-László Barabási, *Two Degrees of Separation in Complex Food Webs*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/01-07-036abs.html.

Str. 55 Pro další příklady shlukování v komplexních sítích viz R. Albert a A.-L. Barabási, „Statistical Mechanics of Complex Networks", *Reviews of Modern Physics* 74, (2002), 47–97.

Str. 57 Původní model Wattse a Strogatze z *Nature* 393 (1998), 440–442, nepřidával vazby navíc, ale přepojoval některé z existujících vazeb ke vzdáleným uzlům, což mělo tentýž efekt. Verzi popsanou zde navrhl M. Newman a D. J. Watts; viz např. „Renormalization Group Analysis of the Small-World Network Model", *Physics Letters A* 263 (1999), 341. Díky algoritmické jednoduchosti tohoto modelu mu ti, kdo se snaží vypočítat vlastnosti modelu, často dávají přednost před původním Wattsovým-Strogatzovým modelem.

Vlákno páté: Centra a prostředníci

Str. 59 Malcolm Gladwell, *The Tipping Point* (New York, Little, Brown, 2000).

Str. 59 Test s použitím telefonního seznamu byl vynalezen sociology k odhadu počtu sociálních vazeb mezi lidmi. Nedávný přehled metod měření rozsahu sociálních vazeb lidí viz Linton C. Freeman a Claire R. Thompson, „Estimating Acquaintanceship Volume", in *The Small World*, ed. Manfred Kochen (Norwood, N. J., Ablex, 1989), 147–158.

Str. 61 Pokud jde o technické provedení, je snadné zjistit, kolik má daná stránka vycházejících odkazů, prostě tak, že se na stránku podíváme a spočítáme, kolik je na ní URL. Je však těžší spočítat počet přicházejících odkazů. Přicházející odkazy představují vazby z jiných webových stránek, které míří na daný dokument. Například moji doktorandi mají každý svou webovou stránku a každá z nich odkazuje na mou. Když navštívíte jejich stránku, jedním kliknutím se dostanete na moji. Abyste zjistili, kolik má moje webová stránka příchozích odkazů, musíte navštívit každou z miliardy stránek, které na webu jsou, a zjistit, zda obsahují odkaz na moji webovou stránku. Počet příchozích odkazů, které webová stránka má, odráží její popularitu: čím více příchozích odkazů stránka má, tím

více lidí ji muselo navštívit a oblíbit si ji. A co je nejdůležitější, čím více má příchozích odkazů, tím snadněji se najde při procházení webu. Pokud nikdo na vaši webovou stránku neodkazuje, pak z praktického hlediska neexistuje.

Str. 61 Některé vyhledávače, jako je Google nebo AltaVista, dovolí každému najít stránky, které odkazují na danou webovou stránku. K této funkci se můžete dostat tak, že napíšete do okna hledání „link:" a potom příslušné URL. Například abyste nalezli odkazy mířící na www.nd/~networks, napíšete link:http//www.nd.edu/~networks.

Str. 61 O webových stránkách univerzity Notre Dame viz Réka Albert, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, „Diameter of the World Wide Web", *Nature* 401 (1999), 130–131. Nezpracovaná data poskytující informaci o tom, která stránka je spojena s kterou jinou stránkou, což vám dovolí rekonstruovat síť skrytou v tomto vzorku webu a určit, kolik je tam center, jsou k dispozici na http://www.nd.edu/~networks/database/index.html.

Str. 61 Souhrn výzkumu 200 milionů webových stránek viz článek A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul, P. Raghavan, S. Rajagopalan, R. Stata, A. Tomkins, J. Wiener, „Graph Structure in the Web", prezentovaný na IX. mezinárodní konferenci o world wide webu, http://www9.org/w9cdrom/160/160.html.

Str. 61 Rozdělení konektivit, které mi dovolilo identifikovat konektivitu většiny vysoce propojených uzlů zmíněných v textu v souvislosti se vzorkem 200 milionů stránek, poskytl A. Tomkins.

Str. 61 Počet vycházejících odkazů, k_{out}, závisí plně na tvůrci webové stránky, protože jen on je může do dokumentu vkládat. Kolik takových odkazů jsme očekávali, že na typické stránce uvidíme? Síla webu spočívá v tom, že je to hypertext, který dovoluje návrháři webové stránky vytvořit strukturu informací na stránkách a podstránkách připojených k domovské stránce. Každá slušná kniha o návrhu webových stránek nás tedy bude varovat, abychom svoji webovou stránku nezahltili. První stránka by měla být rozcestím, informativní a snadno čitelná. Všechny podrobnosti mají být v pozadí, na dodatečných stránkách, organizovaných hierarchicky podle stále vzrůstající specializace dokumentů. Kolik dokumentů je vhodné na stránku umístit, aby nebyla příliš přecpaná? Obvykle máme místo na několik set slov, včetně 5–15 odkazů. Kdyby se každý řídil radami knih o navrhování na webu, měla by většina stránek optimální počet odkazů, vystihující zdravou střední cestu mezi maximálním obsahem informace a čitelností. Některé stránky samozřejmě mohou mít více, jiné méně než tento optimální počet, v závislosti na estetických schopnostech správce webu, ale bude tu zlatá střední cesta a jen málokdo ji bude hrubě narušovat. V tomto ideálním světě by rozdělení konektivit mělo vyhovovat zvonovité křivce neboli matematickým jazykem Gaussovu rozdělení, které má maximum kolem optimálního k_{out} a velmi se podobá předpovědi modelu náhodné sítě.

Str. 61 Vysoce propojené uzly na world wide webu se často nazývají centra. Máme přitom na mysli uzly s mnoha odcházejícími nebo přicházejícími

odkazy. Viz např. J. Kleinberg. „Authoritative sources in a Hyperlinked Environment", *Proceedings of the 9th Association for Computing Machinery - Society for Industrial and Applied Mathematics. Symposium on Discrete Algorithms* (1998); rozšířená verze viz *Journal of the ACM* 46 (1999), 604–632.

Str. 62 Craig Fass, Mike Ginelli a Brian Turtle, *Six Degrees of Kevin Bacon* (New York, Plume, 1996).

Str. 63 Stránka *Baconovo orákulum* ve Virginii je k nalezení na http://www.cs.virginia.edu/oracle.

Str. 63 Významnou roli, kterou mají v Hollywoodu herecká centra, ilustruje fakt, že nejkratší cesty, které vedou od Marilyn Monroe, Mikea Meyera nebo Charlieho Chaplina k Baconovi, vedou přes téhož herce, Roberta Wagnera. Wagner je nejvýznamnějším centrem v Baconově okolí a je to jeho klíčová spojnice k historii Hollywoodu. Hrál v nejméně 101 filmech a nasbíral 2 017 vazeb. Ačkoli není nejpropojenějším hercem, obsadil prominentní 24. místo, což je úroveň, kterou by mu Bacon mohl závidět.

Str. 64 Pořadí hollywoodských herců vychází z měření, které provedl roku 2000 Hawoong Jeong poté, co stáhl databázi IMDb.com a rekonstruoval síť v pozadí Hollywoodu. Výsledky podobných měření se často citují v tisku. Protože data byla odečtena v jinou dobu, mohou zde být menší rozdíly, pokud jde o přesné pořadí, v němž se objevují nejpropojenější herci, nebo v počtu vazeb, které mají. Měření jsou ale konzistentní co do identity nejpropojenějších herců a jejich odlišení od zbytku Hollywoodu.

Str. 66 Ukázky center v molekulární síti buňky viz např. 13. kapitola a Hawoong Jeong, Bálint Tombor, Réka Albert, Zoltán N. Oltvai a Albert-László Barabási, „The Large-Scale Organization of Metabolic Networks", *Nature* 407 (2000), 651; Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Centrality and Lethality of Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42; Andreas Wagner a David Fell, „The Small World Inside Large Metabolic Networks", *Proceedings of the Royal Society of London B*, 268 (2001), 1 803–1 810.

Str. 67 Centra v topologii internetu viz M. Faloutsos, P. Faloutsos a C. Faloutsos, „On Power-Law Relationships of the Internet Topology", *Proceedings of ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, 1999 (Cambridge, Mass., Aug. 1999).

Str. 67 Graf telefonních hovorů viz J. Abello, P. M. Pardalos a M. G. C. Resende, *Disc. Math. and Theor. Comp. Sci.*, DIMACS ser., 50 (1999), 119; William Aiello, Fan Chung, Linyuan Lu, *A Random Graph Model for Massive Graphs, Proceedings of the 32nd ACM Symposium on Theor. Comp.* (2000).

Str. 67 Emanuel Rosen, *The Anatomy of Buzz* (New York, Doubleday, 2000).

Str. 67 Síť známostí F. D. Roosevelta rozebírá H. Rosenthal, *Acquaintances and Contacts of Franklin Roosevelt* (diplomová práce, MIT, 1960); viz také Linton C. Freeman a Claire R. Thompson, „Estimating Acquaintanceship Volume", 147–158, in: *The Small World*, ed. Manfred Kochen (Norwood, Ablex, NJ, 1989).

Str. 67 Diskuse o centrech v síti p53 v buňce viz Bert Vogelstein, David Lane a Arnold J. Levine, „Surfing the p53 Network", *Nature* 408 (2000), 307–310.

Str. 67 O klíčových druzích viz Simon Levin, *Fragile Dominion* (Cambridge, Mass., Perseus, 1999). Centra a klíčové druhy viz Ricard V. Solé a José M. Montoya, *Complexity and Fragility in Ecological Networks*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/00-11-060abs.html.

Vlákno šesté: Pravidlo 80/20

Str. 69 Tato anekdota o Paretovi se připomíná na několika místech. Viz např. biografická poznámka Arthura Livingstonea v anglickém překladu knihy *Trattato di Sociologia Generale, The Mind and Society* (New York, Harcourt Brace, 1942).

Str. 70 Zákon 80/20 vyvolal početné články ve světě podnikání a nakonec se dočkal vlastní knihy. Viz Richard Koch, *The 80/20 Principle - The Secret to Success by Achieving More with Less* (New York, Currency, 1998).

Str. 70 Naše zjištění, že mocninný zákon popisuje topologii world wide webu, bylo publikováno v článku Réka Albert, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, „Diameter of the World Wide Web", *Nature* 401 (1999), 130–131. Existuje studie, která dospěla nezávisle k témuž závěru: viz R. Kumar, P. Raghavan, S. Rajalopagan a A. Tomkins, „Extracting Large-Scale Knowledge Bases from the Web", *Proceedings of the 9th ACM Symposium on Principles of Database Systems* 1 (1999).

Str. 71 Ve vědeckých článcích se to, že rozdělení konektivit má ráz mocninného zákona, zapisuje ve formě pravděpodobností. Pravděpodobnost, že náhodně vybraný uzel má právě k vazeb, splňuje $P(k) \sim k^{-\gamma}$, kde γ se nazývá exponent rozdělení konektivity.

Str. 71 Úvod do mocninných zákonů a jejich výskytu v různých systémech viz Mark Buchanan, *Ubiquity: The Science of History...Or Why the World Is Simpler Than We Think* (New York, Crown Publishers, 2001). Pro mocninné zákony objevující se v jiném intenzivně studovaném kontextu viz Per Bak, *How Nature Works* (Oxford, Oxford University Press, 1996).

Str. 72 Mocninný zákon pro sítě hollywoodských herců viz Albert-László Barabási a Réka Albert, „Emergence of Scaling in Random Networks", *Science* 286 (1999), 509–512; Albert-László Barabási, Réka Albert a Hawoong Jeong, „Mean-Field Theory for Scale-Free Random Networks", *Physica A*, 272 (1999), 173–187.

Str. 72 Mocninné zákony ve vědecké spolupráci viz A.-L . Barabási, H. Jeong, E. Ravasz, Z. Néda, T. Vicsek, A. Schubert, *On the Topology of the Scientific Collaboration Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0104162. Podobné výsledky nezávisle obdržel Mark Newman, který se zaměřil na fyziky, informatiky a další. Viz M. E. J. Newman, „The Structure of Scientific Collaboration Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (2001), 404–409; „Scientific Collaboration Networks: I. Network Construc-

tion and Fundamental Results", *Physical Review E* 64 (2001), 016131; „Sientific Collaboration Networks: II. Shortest Paths, Weighted Networks, and Centrality", *Physical Review E* 64 (2001), 016132.

Str. 72 Pro mocniné zákony v buňce viz H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z. N. Oltvai a A.-L. Barabási, „The Large-Scale Organization of Metabolic Networks", *Nature* 407 (2000), 651–654; Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Lethality and Centrality in Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42; Andreas Wagner a David A. Fell, „The Small World Inside Large Metabolic Networks", *Proceedings of the Royal Society, London*, 268 (2001), 1 803–1 810.

Str. 72 Frekvence vědeckých citací viz Sid Redner, „How Popular Is Your Paper? An Empirical Study of the Citation Distribution", *European Physical Journal B*, 4 (1998), 131; viz také S. Bilke a C. Peterson, „Topological Properties of Citation and Metabolic Networks", *Physical Review E* 64 (2001), 036106.

Str. 73 Mapa linek v USA je samozřejmě pečlivě navržena leteckými přepravci tak, aby maximalizovala zisk. V důsledku toho, jak ukázali Luis Amaral a jeho kolegové z Bostonské univerzity, rozdělení počtu pasažérů navštěvujících nějaké letiště má exponenciální chvost. Ale protože topologii sítě ovládají centra, má všechny viditelné atributy mocninných sítí, takže představuje výtečný příklad pro zapamatování hlavních rysů bezškálových sítí. O výzkumech systému letecké přepravy viz L. A. N. Amaral, A. Scala, M. Barthélémy a H. E. Stanley, „Classes of Small-World Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000), 11 149–11 152.

Str. 76 Obsáhlá, ale fascinující kniha o vodě určená široké veřejnosti viz Philip Ball, *Life's Matrix* (New York, Farrar, Straus and Giroux, 1999).

Str. 78 Jako vynikající úvod do kritických jevů před objevem renormalizační grupy viz klasická kniha: H. Eugene Stanley, *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena* (Oxford, Oxford University Press, 1971).

Str. 78 Všimněme si, že ačkoli jak voda, tak magnetické systémy procházejí fázovým přechodem, chovají se přitom velmi odlišným způsobem. Přechod voda – led je to, co fyzikové nazývají fázový přechod prvního druhu, což znamená, že důležité termodynamické veličiny se chovají nespojitě v bodě přechodu (tedy mají tam skok). U magnetických systémů se naproti tomu projevuje takzvaný fázový přechod druhého druhu (tedy termodynamické veličiny se chovají spojitě v bodě přechodu). Ukazuje se, že teoretické nástroje potřebné k popisu těchto rozdílných fázových přechodů mají sice tentýž základ, ale jsou zcela odlišné, když se dostaneme k jádru věci. Jsou to právě fázové přechody druhého druhu, které vždy vedou k mocninným zákonům, když se přibližujeme ke kritickému bodu.

Str. 79 Na Kadanoffův vánoční objev se v kontextu historie kritických jevů vzpomíná v knize Leo P. Kadanoffa, *From Order to Chaos, Essays: Critical, Chaotic and Otherwise* (Singapore, World Scientific, 1993), 157–163. Kadanoff se o zásluhy dělí s jinými vědci, protože myšlenky škálování, které zavedl, byly nezávisle objeveny několika dalšími badateli, např. Michalem

Fischerem, Benem Widomem, A. Z. Patašinským a V. L. Pokrovským. Panuje názor, že Wilson obdržel nerozdělenou Nobelovu cenu za kritické jevy právě proto, že se příliš mnoho lidí zasloužilo o objev základního nezbytného předpokladu, pojmu škálování. Bohužel tak zůstalo několik skutečně zásadních příspěvků nedoceněných. Mnozí fyzici cítí, že uznání by si zasloužily i klíčové příspěvky několika dalších lidí.

Str. 79 Dvě Wilsonovy základní práce viz Kenneth G. Wilson, „Renormalization Group and Critical Phenomena: I. Renormalization Group and the Kadanoff Scaling Picture", *Physical Review B* 4 (1971), 3 174–3 183; „Renormalization Group and Critical Phenomena. II. Phase-Space Cell Analysis of Critical Behavior", *Physical Review B* 4 (1971), 3 184–3 205. Moderní pedagogický přehled oboru viz J. J. Binney, N. J. Dowrick, A. J. Fisher a M. E. J. Newman, *The Theory of Critical Phenomena: An Introduction to the Renormalization Group* (Oxford, Oxford University Press, 1992).

Str. 80 Fázové přechody druhého druhu jsou normálně vratné, což znamená, že pozorujeme mocninné zákony nezávisle na směru, když překračujeme kritický bod, ať jdeme od uspořádání k neuspořádání nebo opačným směrem, od neuspořádání k uspořádání.

Str. 81 Univerzalita se stala vůdčím principem pro pochopení mnoha rozličných jevů. Říká nám, že ať se podíváme kamkoli, fyzikální zákony řídící komplexní systémy a přechod od nepořádku k pořádku jsou jednoduché, reprodukovatelné a všudypřítomné. Dnes víme, že tytéž obecné mechanismy, které jsou zodpovědné za tvar sněhových vloček, řídí také tvar neuronů v sítnici oka. Mocninné zákony a univerzalita se objevují v ekonomických systémech, popisujících, jak rostou společnosti a kolísají ceny bavlny. Vysvětlují, jak se ptáci a ryby shlukují v hejna a jak se od sebe odlišují zemětřesení podle své síly. Jsou vůdčím principem v pozadí dvou nejzávažnějších objevů druhé poloviny 20. století: chaosu a fraktálů. V důsledku toho se druhá revoluce ve statistické fyzice, k níž došlo v osmdesátých a devadesátých letech, soustředila na důležitou otázku, jak se mohou mocninné zákony objevovat v mnoha rozdílných systémech, z nichž u některých se nezdá, že by podstupovaly fázový přechod. Samoorganizované kritično, podobor statistické fyziky, sjednotilo mnoho badatelů usilujících nalézt obecné odpovědi na tuto otázku.

Str. 81 Zatímco ocenit zásluhy za pojem škálování a renormalizační grupu je poměrně snadné, mnohem těžší je zachytit počátek pojmu *univerzality*. Kadanoff jej používá rok po svém základním článku v přehledové stati. Vzpomíná, že jej slyšel v levné moskevské stravovně během rozhovoru se Sašou Poljakovem a Sašou Migdalem, dvěma prominentními ruskými fyziky pracujícímu na pomezí fázových přechodů a teorie pole, fyzikálního odvětví, v němž se pohybovali často jak částicoví fyzici, tak fyzici pevných látek. Ve statistické fyzice jej ale používalo několik dalších lidí v různých kontextech. Málo známým faktem však je, že univerzalita postupně převzala nový význam vyjadřující, že vlastnosti dosti odlišných systémů jsou totožné, když dochází k přechodu od nepořádku k pořádku.

Vlákno sedmé: Bohatí bohatnou, chudí chudnou

Str. 84 Článek sepsaný v letadle vyšel asi pět měsíců poté jako: Albert-László Barabási a Réka Albert, „Emergence of Scaling in Random Networks", *Science* 286 (1999), 509–512.

Str. 85 Pokud jde o množství informace, které bude na webu uloženo během deseti let, viz Phil Bernstein, Michael Brodie, Stefano Ceri, David DeWitt, Mike Franklin, Hector Garcia-Molina, Jim Gray, Jerry Held, Joe Hellerstein, H. V. Jagadish, Michael Lesk, Dave Maier, Jeff Naughton, Hamid Pirahesh, Mike Stonebraker a Jeff Ullman, „The Asilomar Report on Database Research", *ACM Sigmod Record* 27, č. 4 (1998), 74–80.

Str. 86 Informace týkající se růstu hollywoodské sítě se zakládá na údajích soustředěných Hawoongem Jeongem z databáze IMDb.com.

Str. 87 Podrobná analýza modelu A viz Albert-László Barábasi, Réka Albert a Hawoong Jeong, „Mean-Field Theory for Scale-Free Random Networks", *Physica A*, 272 (1999), 173–187.

Str. 87 Údaje o rozpočtu na internetovou reklamu viz Michell Jeffers a Evanthei Schibsted, „The Sizzle: What's New and Now in Marketing and Advertising for E-Business and E-Commerce", *Business 2.0* (květen 2000), 161–162.

Str. 88 Pokud jde o zdroje informací, máme všichni podobné preference a směřujeme k několika málo stránkám, které si mohou dovolit přinášet nám inteligentní a okamžité zpravodajské přehledy. Když ale dojde na méně obvyklé záležitosti, jsou naše volby méně předvídatelné, a tedy náhodnější. Ano, možná že nikdo kromě nás nemá na svých stránkách odkaz na stránku našeho přítele ze střední školy, ale ve většině případů budeme všichni poslouchat nevědomé tíhnutí a připojovat se s vyšší pravděpodobností k více propojeným uzlům.

Str. 89 Našel se přímý kvantitativní důkaz existence preferenčního připojování v sítích tak odlišných, jako je internet, Hollywood, sítě spoluprací a citační sítě. Viz H. Jeong, Z. Neda, A.-L. Barabási, „Measuring Preferential Attachment for Evolving Networks", http://arxiv.org/abs/cored-mat/0104131; M. E. J. Newman, „Clustering and Preferential Attachment in Growing Networks", *Physical Review E* 64, (2001), 025102; Romualdo Pastor-Satorras, Alexei Vazquez a Alessandro Vespignani, „Dynamical and Correlation Properties of the Internet", *Physical Review Letters* 87 (2001), 258701; K. A. Eriksen a M. Hornquist, „Scale-Free Growing Networks Imply Preferential Attachment", *Physical Review E* 65, (2001), 017102.

Str. 89 Bezškálový model, spolu s dvěma základními pojmy, růstem a preferenčním připojováním, byl zaveden v: Albert-László Barabási a Réka Albert, „Emergence of Scaling in Random Networks", *Science* 286 (1999), 509–512; Albert-László Barabási, Réka Albert a Hawoong Jeong, „Mean-Field Theory for Scale-Free Random Networks", *Physica A* 272 (1999), 173–187. Všimněme si, že i když jsme pro jednoduchost v příkladu rozebíraném v této knize zvolili připojení nových uzlů k přesně dvěma jiným uzlům, obecně se dají připojit k libovolnému počtu uzlů, aniž by se změnily základní rysy modelu.

Str. 91 Skutečnost, že bezškálový model vytváří mocninný zákon s exponentem rovným 3, byl exaktně dokázán některými z bývalých Erdősových spolupracovníků. Viz B. Bollobás, O. Riordan, J. Spencer, G. Tusnády, „The Degree Sequence of a Scale-Free Random Graph Process", *Random Structures and Algorithms* 18 (2001), 279–290.

Str. 92 Rozšíření bezškálového modelu tak, aby zahrnoval vnitřní vazby, bylo publikováno v: Réka Albert a Albert-László Barabási, „Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality", *Physical Review Letters* 85 (2000), 5 234.

Str. 92 Práce skupiny z Bostonské univerzity o stárnutí byla publikována v: L. A. N. Amaral, A. Scala, M. Barthélémy a H. E. Stanley, „Classes of Small-World Networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000), 11 149–11 152.

Str. 93 Skupina z Pôrta publikovala dva velmi podobné články, viz S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes, „Evolution of Reference Networks with Aging", *Physical Review E* 62 (2000), 1 842; S. N. Dorogovtsev, F. F. Mendes a A. N. Samukhin, „Structure of Growing Networks with Preferential Linking", *Physical Review Letters* 85 (2000), 4 633.

Str. 93 Účinek nelinearit na topologii bezškálových sítí, který bere v úvahu skutečnost, že rychlost připojování může být úměrná k^{γ}, byl publikován v: P. L. Krapivsky, S. Redner a F. Leyvraz, „Connectivity of Growing Random Networks", *Physical Review Letters* 85 (2000), 4 629–4 632.

Str. 94 Podrobný souhrn různých rozšíření bezškálového modelu a obecný souhrn oboru komplexních sítí viz dva nedávné přehledové články: S. N. Dorogovtsev a J. F. F. Mendes, „Evolution of Networks", *Advances in Physics* 51 (2002), 1 079–1 187; Réka Albert a Albert-László Barabási, „Statistical Mechanics of Complex Networks", *Reviews of Modern Physics* 74 (2002), 47–97.

Str. 95 Bezškálovou povahou jazyka se zabývalo několik badatelských skupin. Se Soon-Hyungem Yookem a Hawoongem Jeongem jsme spojili všechna synonyma vazbami a zjistili jsme, že síť, kterou jsme dostali, má bezškálovou topologii. Výsledky jsme nikdy nepublikovali. Několik skupin však publikovalo vynikající články analyzující síť v jazyku, s použitím různých kritérií pro vazby, a pokaždé zjistili bezškálovou topologii. Viz např. Ramon Ferrer i Cancho a Ricard V. Solé, „The Small-World of Human Language", *Proceedings of the Royal Society of London B* 268 (2001), 2 261–2 265; Mariano Sigman and Guillermo Cecchi, „Global Organization of the Wordnet Lexicon", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (2002), 1 742–1 747. S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes, „Language as an Evolving Word Web", *Proceedings of the Royal Society of London B* 268 (2001), 2 603–2 606.

Str. 96 Yahoo! opustilo Inktomi Corp. jako svou hlavní vyhledávací službu 26. června 2000 a nahradilo ji Googlem. Všechna významná zpravodajství se o této události zmiňovala. Nečekalo se, že zrušený kontrakt bude mít bezprostřední dopad na finanční budoucnost firmy Inktomi, protože tou dobou měla více než 80 zákazníků a partnerství s Yahoo! obnášelo méně než 2 % jejích výnosů. Přesto akcie Inktomi spadly o víc než 25 5/16 bodu na nějakých 115 1/16 na trhu NASDAQ.

Str. 96 Kolokvium o Internet Archives se konalo 8. a 9. března 2000 v Presidiu v San Francisku, v sídle Archives. Další informace o cílech Archives viz 12. kapitolu.

Str. 97 Detailní popis zrodu handheldu Newton firmy Apple viz Doug Menuez, Markos Kounalakis a Paus Saffo, *Defying Gravity: The Making of Newton* (Hillsboro, Ore., Beyond Words, 1993). Tato kniha bohužel končí tam, kde věci začínají být zajímavé, když se totiž Newton dostal na trh.

Str. 97 Detailní popis úspěšných opozdilců v podnikání viz Joan Indiana Rigdon, „The Second-Mover Advantage", *Red Herring*, 1. září 2000.

Str. 99 Model se zdatností byl publikován v: G. Bianconi, A.-L. Barabási, „Competition and Multiscaling in Evolving Networks", *Europhysics Letters* 54 (2001), 436–442. Pro rozšíření modelu, která zahrnují další efekty, k nimž dochází v reálných sítích, jako je aditivní a multiplikativní zdatnost, viz G. Ergun a G. J. Rodgers, „Growing Random Networks with Fitness", *Physica A* 303 (2002), 261–272.

Str. 101 Podrobný výklad vztahu mezi Einsteinem a Bosem a také zrodu idejí v pozadí Boseho-Einsteinovy kondenzace viz William Blanpied, „Einstein as Guru? The Case of Bose", in: *Einstein: The First Hundred Years*, ed. Maurice Goldsmith, Alan Mackay a James Woudhuysen (Oxford, Pergamon Press, 1980), 93–99. Viz také Albrecht Fölsing, *Albert Einstein: A Biography* (New York, Viking, 1997).

Str. 103 Bizarní projev Boseho-Einsteinovy kondenzace objevili Pjotr Kapica a John F. Allen roku 1938. Helium, lehký plyn používaný v aerostatech a nafukovacích baloncích, podstupuje Boseho-Einsteinovu kondenzaci pod 2,2 kelvinu, kdy se stává supratekutým. Fascinujícím projevem nového stavu helia je ztráta viskozity, což této kapalině dovoluje plazit se vzhůru po stěnách a ven z nádoby. Představte si, že by se vaše ranní káva vyplížila z konvice a utekla. Přesně to ale helium dělá – viditelně tak předvádí Boseho-Einsteinovu kondenzaci.

Str. 103 Elementární popis nových objevů týkajících se Boseho-Einsteinovy kondenzace a jejich možných aplikací viz Graham P. Collins, „The Coolest Gas in the Universe", *Scientific American* (prosinec 2000), 92–99; Wolfgang Ketterle, „Experimental Studies of Bose-Einstein Condensation", *Physics Today* 52 (prosinec 1999), 30–35; Eric A. Cornell a Carl E. Wieman, „The Bose-Einstein Condensate", *Scientific American* (březen 1998), 40–45.

Str. 104 Vztah mezi sítěmi a Boseho-Einsteinovou kondenzací byl publikován v: G. Bianconi a A.-L. Barabási, „Bose-Einstein Condensation in Complex Networks", *Physical Review Letters*, 86 (2001), 5 632–5 635. Několik dalších badatelů tuto práci rozšířilo a ukázalo, že fenomén vítěze, který bere vše, lze popsat, aniž bychom se odkazovali ke kvantové mechanice. Viz S. N. Dorogovtsev a J. F. F. Mendes, „Evolution of random networks", *Advances in Physics* 51 (2002), 1 079–1 187.

Str. 105 Boseho-Einsteinova kondenzace není jedinou oblastí, kde se ukázaly nástroje kvantové mechaniky jako užitečné při studiu komplexních sítí. Spektrální vlastnosti náhodných matic, odvětví, ve kterém průkopnicky pracoval v šedesátých letech Eugene Wigner, byla startovním bodem studia spektrálních vlastností komplexních sítí. Viz například I. J. Farkas, I. Derényi, A. L. Barabási, T. Vicsek, „Spectra of ‚Real-World' Graphs: Beyond the Semi-Circle Law", *Physical Review E* 64 (2001), 026704; K. I. Goh, B. Kahng, D. Kim „Spectra and Eigenvectors of Scale-Free Networks", *Physical Review E* 64 (2001), 051903. Nástroje teorie pole, matematicky pokročilého odvětví kvantové mechaniky, také nalezly aplikace v komplexních sítích. Viz A. Krzywicki, „Defining Statistical Ensembles of Random Graphs", http://arxiv.org/abs/cond-mat/0110574; Z. Burda, J. D. Correia, A. Krzywicki, „Statistical Ensembles of Scale-Free Random Graphs", *Physical Review E* 64 (2001), 046118.

Str. 106 Všimněme si, že jev velmi podobný Boseho-Einsteinově kondenzaci se předpovídá v sítích s nelineárním preferenčním připojováním. Viz P. L. Krapivsky, S. Redner a F. Leyvraz, „Connectivity of Growing Random Networks", *Physical Review Letters* 85 (2000), 4 629–4 632.

Str. 107 Síť popisující trh operačních systémů je takzvaný *bigraf*. Bigrafy se skládají ze dvou různých množin uzlů, a to takových, že každý uzel se smí spojit jen s uzlem patřícím do opačné množiny. Přímé vazby mezi uzly patřícími do téže množiny jsou zakázány. V případě Microsoftu jsou jednou množinou uzlů operační systémy a druhou početní zákazníci, kteří si volí operační systém (spojují se s ním). Podobný bigraf popisuje i Hollywood. Tam jsou jednou množinou herci a druhou jsou filmy, v nichž hráli. V tomto bigrafu nejsou herci spojeni navzájem, ale každý herec se váže jen k filmům. Z tohoto bigrafu se dá snadno zjistit herecká síť probíraná v 5. kapitole, a to tak, že se spojí všichni herci, kteří mají vazbu na tentýž film. Pro výklad o bigrafech viz např. M. E. J. Newman, S. H. Strogatz a D. J. Watts, „Random Graphs with Arbitrary Degree Distributions and Their Applications", *Physical Review E* 64, (2001), 026118; Steven H. Strogatz, „Exploring Complex Networks", *Nature* 410 (2001), 268–276.

Str. 107 Osobní pohled na historii operačních systémů viz Neal Stephenson, *In the Beginning Was the Command Line*, http://www.cryptonomicon.com.

Str. 107 Údaje týkající se podílu výrobců počítačů na trhu pocházejí od IDC a jsou k dispozici na http://www.idc.com.

Str. 108 Informace o podílech na trhu operačních systémů pochází z: Stephanie Miles a Joe Wilcox, „Windows 95 Remains the Most Popular Operating System", *Cnet.com*, 20. června 1999.

Str. 109 Příkladem systému, kde k vysvětlení topologie sítě musíme zahrnout zdatnost, je internet. Viz např. Romualdo Pastor-Satorras, Alexei Vazquez, a Alessandro Vespignani, „Dynamical and Correlation Properties of the Internet", *Physical Review Letters*, 87 (2001), 258701.

Vlákno deváté: Achillova pata

Str. 110 Barvité vylíčení událostí v Denveru, jak se odehrály 2. července 1996, během denverského výpadku eletrické sítě, viz např. L. M. Collins, „Power Grid Fails, Blackout Affects 1.5 Million in West", *Denver News-Times*, 3. července 1996; „Power Grid Fails, Blackout Affects Millions in West", Nando.net, 2. července 1996. Srpnové opakování téže události viz *Sagging power lines, hot weather blamed for blackout*, CNN, 11. srpna 1996.

Str. 111 Různé výpadky elektrického proudu, které postihly Spojené státy, a zranitelnost elektrické sítě široce rozebírá jak populární tisk, tak různé profesní organizace. Viz např. Massoud Amin, „Toward Self-Healing Infrastructure Systems", *IEEE Computer* (srpen 2000), 2–11; D. N. Kosterev, C. W. Taylor a W. A. Mittlestadt, „Model Validation of the August 10, 1996 WSCC System Outage", *IEEE Transactions on Power Systems* 14 (1999), 967–977. Pro obecnou diskusi o deregulaci a jejím dopadu na infrastrukturu viz Alan Weisman, „Power Trip: The Coming Darkness of Electricity Deregulation", *Harper's*, říjen 2000, 76–85.

Str. 111 O počtu druhů na Zemi, biodiverzitě a vymíráních viz např. Robert M. May, „How Many Species Inhabit the Earth?", *Scientific American*, říjen 1992, 42–48; Joel L. Swerdlow, „Biodiversity: Taking Stock of Life", *National Geographic* 192 (únor 1999), 2–41; Virginia Morell, „The Sixth Extinction", *National Geographic* 192 (únor. 1999), 43–59.

Str. 112 Mnohokrát citovaným zdrojem robustnosti v přírodě je *redundance*, vlastnost zabudovaná ve všech sítích, ale naprosto chybějící ve většině lidských konstrukcí. Ve většině sítí existuje obrovské množství alternativních cest mezi většinou dvojic uzlů. Ačkoli vám váš senátor může zprostředkovat krátkou cestu k prezidentu republiky, není ve skutečnosti vůbec nezbytný. Pokud vás odmítne prezidentovi představit, je tu mnoho jiných cest, často stejně krátkých. Podobná redundance je zabudována v internetu. Jestliže nějaký směrovač nefunguje, přesměrují se zprávy po alternativních cestách. Redundance se vyskytuje i v ekosystémech. Predátor se jen velmi zřídka živí jedním druhem. Poté co se myši úspěšně pozvedly na úroveň domácích miláčků, kočka neochotně přežívá na konzervách. Alternativní cesty jsou důležitým zdrojem redundance a odolnosti k chybám. To znamená, že ve většině přirozených systémů není špatné fungování několika uzlů něčím fatálním, protože cesty vyřazené jejich nepřítomností jsou nahrazeny jednou z mnoha alternativních cest. Mnoho z nás tento jev poznalo na vlastní kůži, když jsme si vybírali alternativní cestu k cíli poté, co rádio hlásilo zácpu na nejkratší cestě nebo když nás špatné počasí či zrušený let nasměrovaly na jiné centrum během naší letecké pouti. Ale mohlo by být něco více než redundance, pokud jde o robustnost?

Str. 113 Rozpad náhodné sítě při náhodném odstraňování uzlů je opačným problémem než perkolace. Teorie perkolace nám říká, že přechod od roztříštěné k plně propojené síti je fázový přechod druhého druhu. Přehled o perkolaci viz D. Stauffer a A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory* (London, Taylor and Francis, 1994), či A. Bunde a S. Havlin, edd., *Fractals and Disordered Systems* (Berlin, Springer, 1996), či A. Bunde a S. Havlin, edd., *Fractals in Science* (Berlin, Springer, 1995).

Str. 113 Náš článek o odolnosti k chybám, ukazující, že bezškálové sítě nejsou zranitelné při útocích, byl publikován v: Réka Albert, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, „Attack and Error Tolerance of Complex Networks", *Nature* 406 (2000), 378. Souhrn a pohled do budoucna viz doprovodný článek ze sekce News & Views, Yuhai Tu, „How Robust Is the Internet?", *Nature* 406 (2000), 353–354.

Str. 113 O stabilitě Internetu viz např. Craig Labovitz, Abha Ahuja a Farnam Jahanian, „Experimental Study of Internet Stability and Wide-Area Backbone Failures", *Proceedings of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Symposium on Fault-Tolerant Computing FTCS* (Madison, Wis., 1999).

Str. 114 Když uvažujeme o robustnosti, nemůžeme pominout dynamické vlastnosti komplexních systémů. Většina systémů, o nichž se ví, že jsou robustní, má četné řídící zpětnovazební smyčky, které zaručují, že tyto systémy přežijí chyby a selhání. Internetové protokoly byly skutečně navrženy tak, aby „obcházely problémy" a vyhýbaly se směrovačům, které mají poruchu. Buňky mají četné zpětnovazební mechanismy pro opravu chyb, které likvidují špatné proteiny a vypínají porouchané geny. Naše počítačové simulace však ukázaly nový prvek v odolnosti proti chybám. Dozvěděli jsme se, že příroda pečlivě vyselektovala strukturu těch nejsložitějších proteinů a poskytla jim neporovnatelný stupeň odolnosti k chybám a útokům. Jen díky své topologii mají tyto systémy vysokou úroveň odolnosti – *topologickou stabilitu*.

Str. 115 Výpočet perkolačního prahu bezškálových sítí byl publikován v Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben-Avraham a Shlomo Havlin, „Resilience of the Internet to Random Breakdowns", *Physical Review Letters* 85 (2000), 4 626. Podobné výsledky byly získány nezávisle v D. S. Callaway, M. E. J. Newman, S. H. Strogatz a D. J. Watts, „Network robustness and fragility: Percolation on random graphs", *Physical Review Letters* 85 (2000), 5 468–5 471.

Str. 116 Pro detailní seznam odkazů týkajících se MafiaBoye viz http: www.mafiaboy.com.

Str. 116 Ne všichni věří tomu, že operace Kvalifikovaný likvidátor skutečně existovala. Někteří kritici tvrdí, že nejde o nic víc než o vymyšlenou historku z Pentagonu, která se omílala novinářům. Viz např. http://www.soci.niu.edu/~crypt/other/eligib.html.

Str. 116 Podle Computer Currents Internet Dictionary (http://www.computeruser.com/resources/dictionary.html) je *cracker* „osoba, která se vloupá do počítačového systému a používá jej bez oprávnění, a to buď se zlým úmyslem, nebo pouze aby se předvedla". Naproti tomu *hacker* je „ten, kdo má velké znalosti počítačů a tvůrčím způsobem počítače programuje, což obvykle znamená, že dokáže programovat v assembleru nebo jazycích nízké úrovně. Hacker může být programátorský expert, který nachází speciální triky k obcházení překážek a posouvání mezí systému." K odlišení od hackerů s dobrými úmysly používáme termín *cracker* pro ty, kdo mají za cíl spustit zákeřné útoky na internet. Detailnější diskuse viz Pekka Himanen, *The Hacker Ethic and the Spirit of the Information Age* (New York, Random House, 2001); Richard Power, *Tangled Web: Tales of Digital Crime from the Shadows of Cyberspace* (Indianapolis, Ind., Que, 2000); Steven Levy, *Hackers: Heroes of the Computer Revolution* (New York, Penguin Books, 1994).

Str. 117 Zranitelnost sítí při útocích se poprvé rozebírala v téže publikaci, kde se hovořilo o toleranci k chybám: Réka Albert, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, „Attack and Error Tolerance of Complex Networks", *Nature* 406 (2000), 378.

Str. 118 Analytický přístup k problému útoků viz např. Reuven Cohen, Keren Erez, Daniel ben-Avraham a Shlomo Havlin, „Breakdown of the Internet under Intentional Attack", *Physical Review Letters* 86 (2001), 3 682; D. S. Callaway, M. E. J. Newman, S. H. Strogatz a D. J. Watts, „Network robustness and fragility: Percolation on random graphs", *Physical Review Letters* 85 (2000), 5 468–5 471.

Str. 118 O odolnosti proteinové sítě k mutacím a chemickým útokům viz Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Lethality and Centrality in Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42.

Str. 118 Diskuse o rozpadu ekosystémů při odstranění klíčových druhů viz např. Ricard V. Solé a José M. Montoya, *Complexity and Fragility in Ecological Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0011196; a Ferenc Jordan a István Scheuring, „Can Keystones Help in Background Extinction?" (preprint, 2000). O účinku lidské činnosti na stabilitu a potenciální rozpad ekosystému viz např. Stuart L. Pimm a Peter Raven, „Biodiversity: Extinction by Numbers", *Nature* 403 (2000), 843–845. Úžasná fotografická exkurze do těchto exponovaných míst je v: Russell A. Mittermeier, Norman Myers, Patricio Robles Gil a Cristina G. Mittermeier, *Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions* (Mexico City, Cemex Conservation International, 2000).

Str. 118 Spojení *Achillova pata* aplikované na sítě a internet mi navrhla Janet Kelleyová, poté co jsem jí vysvětlil naše výsledky. Původně byla tato fráze v názvu našeho článku v *Nature*, ale nakonec se objevila jen na obálce časopisu.

Str. 118 Pojem klíčových druhů byl zaveden Robertem Painem v článku R. T. Paine, „A note on Trophic Complexity and Community Stability", *American Naturalist*, 103 (1969), 91–93. Pro obecnou diskusi o mořských vydrách viz 1. kapitolu v: Simon Levin, *Fragile Dominion: Complexity and the Commons* (Cambridge, Mass., Perseus, 1999).

Str. 119 Podrobnosti o elektrickém výpadku z léta 1996 viz D. N. Kosterev, C. W. Taylor a W. A. Mittlestadt, „Model Validation of the August 10, 1996, WSCC System Outage", *IEEE Transactions on Power Systems* 14 (1999), 967–977.

Str. 121 Diskuse o kaskádových selháních viz např. Duncan J. Watts, *A Simple Model of Fads and Cascading Failures*, http://www.santafe.edu/sfi/publications/Abstracts/00-12-062abs.html.

Vlákno desáté: Viry a módní vlny

Str. 123 Příběh Gaetana Dugase jako nultého pacienta se připomíná v knize: Randy Shilts, *And the Band Played On* (New York, St. Martin's Press, 2000), pohnuté a děsivé každodenní kronice epidemie AIDS. Pro nejnovější přehled o stavu epidemie AIDS viz „Nature Insight-AIDS", *Nature* 410 (2001), 961–1007.

Str. 124 Příběh Mikea Collinse a karikatury floridských hlasovacích lístků vyprávěl Collins Robbu Mandelbaumovi, „Only in America", *The New York Times Magazine*, 26. listopadu 2000.

Str. 126 Informace o epidemiích a nemocech viz Rob DeSalle, ed., *Epidemic! The World of Infectious Disease* (New York, New Press, 1999).

Str. 126 Všimněme si, že mezi různými procesy šíření, např. mezi šířením virů a myšlenek, existují závažné rozdíly. Z moha nemocí se můžete vyléčit a už nemůžete šířit virus dál anebo u vás vznikne imunita, takže se už nemůžete nakazit. U myšlenek je to tak, že je sice můžete odmítnout, ale jakmile je přijmete, budete je pořád šířit. Některé viry, jako např. ebola, také rychle zabíjejí své hostitele a tím poskytují jen krátký čas, aby byly předány dále. Ani tento jev se nevyskytuje při šíření většiny módních vln a myšlenek. Navzdory těmto odlišnostem je mnoho základních rysů šíření módy a biologických či počítačových virů dosti podobných, a proto je často budeme vyšetřovat společně.

Str. 127 Studie o farmářích z Iowy byla publikována v: Bryce Ryan a Neal C. Gross, „The Diffusion of Hybrid Seed Corn in Two Iowa Communities", *Rural Sociology* 8, č. 1 (1943), 15–24.

Str. 127 Jednoduchý popis zvonovité křivky a její dopad na šíření klepů a marketing viz Emanuel Rosen, *The Anatomy of Buzz* (New York, Doubleday, 2000), 94–95.

Str. 128 Studie o lékařích viz James Coleman, Elihu Katz a Herbert Menzel, „The Diffusion of an Innovation Among Physicians", *Sociometry* 20, č. 4 (1957), 253–270. Starší studie o tvůrcích veřejného mínění viz Elihu Katz a Paul F. Lazarsfeld, *Personal Influence: The Part Played by People in the Flow of Mass Communications* (Glencoe, Ill., Free Press, 1955).

Str. 130 Prahové modely viz Mark Granovetter, „Threshold Models of Collective Behavior", *American Journal of Sociology* 83, č. 6 (1978), 1 420–1 443. Pro obecný přehled problematiky viz také Thomas W. Valente, *Network Models of the Diffusion of Innovations* (Cresskill, N. Y., Hampton Press, 1995); Eric Abrahamson a Lori Rosenkopf, „Social Network Effects on the Extent of Innovation Diffusion: A Computer Simulation", *Organization Science* 8, č. 3 (1997), 289–309.

Str. 131 Deníkový záznam epidemie viru Love Bug pro nejširší publikum viz Lev Grossman, „Attack of the Love Bug", *Time*, 15. května 2000.

Str. 132 Počítačové viry přenášené elektronickou poštou, jako je Love Bug, se šíří podél sociální sítě, jejímiž uzly jsou uživatelé spojení tehdy, když si navzájem posílají e-maily. Němečtí vědci nedávno ukázali, že tato síť je bezškálová. Viz Holger Ebel, Latz-Ingo Mielsch a Stefan Bornholdt, *Scale-Free Topology of Email Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0201476.

Str. 133 Obecný článek o šíření počítačových virů viz Jeffrey O. Kephart, Gregory B. Sorkin, David M. Chess a Steve R. White, „Fighting Computer Viruses", *Scientific American* (listopad 1997), 88–93. Podrobnější přístup viz Jeffrey O. Kephart, Gregory B. Sorkin, William C. Arnold, David M. Chess, Gerald J. Tesauro a Steve R. White, „Biologically Inspired Defenses Against Computer Viruses", in: *Machine Learning and Data Mining: Methods and Applications*, ed. R. S. Michalski (New York, John Wiley, 1998); Steve R. White, „Open Problems in Virus Research", *Internatio-nal Virus Bulletin* (Munich, Germany), 22.–23. října 1998.

Str. 134 Vymizení prahu při šíření na bezškálové síti popsali Romualdo Pastor-Satorras a Alessandro Vespignani, „Epidemic Spreading in Scale-Free Networks", *Physical Review Letters* 86 (2001), 3 200–3 203; „Epidemic Dynamics and Endemic States in Complex Networks", *Physical Review E* 63 (2001), 066117. Pro přehled o těchto výsledcích viz Alun L. Lloyd a Robert M. May, „How Viruses Spread Among Computers and People", *Science* 292 (2001), 1 316.

Str. 136 Fredrik Liljeros, Christofer R. Edling, Luis A. Nunes Amaral, H. Eugene Stanley a Yvonne Aberg, „The Web of Human Sexual Contacts", *Nature* 411 (2001), 907–908. Příběh stockholmsko-bostonského objevu mi vyprávěli Fredrick Liljeros a Christopher R. Edling, první dva z autorů studie.

Str. 136 Terstská studie předpovídá, že práh pro šíření na bezškálové síti vymizí, když je exponent rozdělení konektivity γ menší než 3. Pro exponenty větší než tato kritická hodnota se práh znovu objevuje a chování je podobné tomu, které vidíme u náhodných sítí, tedy méně nakažlivé viry vymřou. Exponenty získané ve stockholmsko-bostonské spolupráci v tomto směru neposkytují jednoznačné vodítko. Pro údaje týkající se jednoho roku obdrželi $\gamma = 3{,}54 \pm 0{,}2$ (ženy) a $\gamma = 3{,}31 \pm 0{,}2$ (muži), zatímco rozsáhlejší (ale také možná více tendenčně zatížená) data o veškerých partnerech dávají $\gamma = 3{,}1 \pm 0{,}3$ (ženy) a $\gamma = 2{,}6 \pm 0.3$ (muži). Zatímco první dva exponenty jsou jasně větší než tři, poslední dva jsou menší nebo se

nacházejí na hranici. Je jasné, že definitivní zodpovězení otázky si vyžádá rozsáhlejší výzkumy.

Str. 136 Slavnou zmínku o 20 000 ženách uveřejnil Wilt Chamberlain, *A View from Above* (New York, Villard Books, 1991).

Str. 137 Přehled o dvaceti letech epidemie AIDS a jejím vlivu na společnost viz např. Sharon Begley, „AIDS at 20", *Newsweek*, 11. června 2001.

Str. 138 Podrobný popis zákonů, jimiž se řídí šíření virů, viz Martin A. Nowak a Robert M. May, *Virus Dynamics: Mathematical Principles of Immunology and Virology* (Oxford, Oxford University Press, 2000).

Str. 139 Přesně řečeno naše simulace předpokládaly, že centra, jakmile se podrobí léčení, se mohou znovu nakazit, když se dostanou do styku s jiným nakaženým uzlem. Jak to dnes vypadá, tak ti, kdo jsou léčeni dostupnými léčivy, nosí skutečně menší počet virových částic a šíří tedy nemoc s menší pravděpodobností. Pokud jde o AIDS, musíme brát v úvahu řadu dalších detailů. Našim cílem bylo jen ukázat, že práh epidemie se znovu objeví, jakmile se zaměříme na centra. Bez ohledu na podrobnosti procesu šíření by tedy bylo vyléčení center mnohem účinnější politikou než náhodné rozdělování léků, předpokládáme-li, že počet dávek je omezený. Cílem by samozřejmě bylo, aby se mohl léčit každý, kdo to potřebuje. Viz Zoltán Dezső, Albert-László Barabási, *Can We Stop the AIDS Epidemic?* http://arxiv.org/abs/cond-mat/ 0107420, a také Romualdo Pastor-Satorras, Alessandro Vespignani, „Immunization of Complex Networks", *Physical Review E* 65 (2002), 036104.

Vlákno jedenácté: Probouzející se internet

Str. 141 Baranův citát pochází z knihy: John Naughton, *A Brief History of the Future* (Woodstock, NY, Overlook Press, 2000), 93. Více o Baranově životě se lze dočíst v 6. kapitole Naughtonovy knihy.

Str. 143 V poslední době se na historii internetu zaměřila řada knih a článků. Kromě výše citované Naughtonovy knihy viz např. James Gillies a Robert Cailliau, *How the Web Was Born: The Story of the World Wide Web* (Oxford, Oxford University Press, 2000). Tato kniha se zaměřuje převážně na web, ale zabývá se i některými základními fakty z historie internetu.

Str. 143 Historické články Paula Barana u firmy RAND jsou k dispozici na webu na adrese http://www.rand.org/publications/RM/baran.list.html. Ten, který nás zajímá s ohledem na topologii sítě, je Paul Baran, *Introduction to Distributed Communications Networks*, RM-3420-PR – je k dispozici na téže webové stránce. Odtamtud pochází obrázek na str. 142.

Str. 144 Uveďme, že zrod myšlenky přepínání paketů byl v poslední době předmětem debat. Někteří jsou toho názoru, že také Leonard Kleinrock došel k této myšlence nezávisle na Baranovi a Daviesovi. O historické polemice viz Katie Hafner, „A Paternity Dispute Divides Net Pioneers", *The New York Times*, 8. listopadu 2001.

Str. 144 Jak rozebírají James Gillies a Robert Cailliau v citované knize *How the Web Was Born*, navzdory zdání je pracovní princip internetu bližší poště než telefonní síti. Když v tradičním analogovém telefonním systému někomu zavoláte ze svého telefonu, je váš přístroj spojen přes řadu drátů a přepínačů přímo k telefonu osoby, s níž si přejete mluvit. Jakmile se spojení uskuteční, je fyzická linka plně obsazena, slouží jen vám dvěma a není dostupná volání kohokoli jiného, ať už něco říkáte nebo ne. Poštovní systém funguje na jiném principu. Poštovní úřady jsou spojeny systémem cest. Dopisy shromážděné každým poštovním úřadem se roztřídí podle adres a naloží na kamiony a letadla, které přepravují všechny dopisy se společnou cestou. Na rozdíl od telefonního systému nikdy nenecháte jediné auto převážet váš dopis přímo do domu adresáta. Podobně na internetu komunikují počítače tak, že zprávy se rozdějí na malé balíčky zvané pakety. Každý paket, stejně jako dopis, obsahuje informaci o svém adresátovi. Pokaždé když nějaký směrovač obdrží paket, vyhledá adresu a odešle jej na směrovač nejbližší adresátovi. Pakety patřící k téže zprávě často putují jinými cestami, protože existuje několik alternativních cest spojujících každého odesilatele a adresáta. Když dorazí všechny pakety, počítač příjemce je znovu sestaví a vytvoří e-mailovou zprávu nebo webovou stránku zobrazenou na vašem monitoru.

Str. 145 Pro lepší představu o práci skupiny CAIDA viz např. K. C. Claffy, T. Monk a D. McRobb, „Internet tomography", *Nature* (leden 1999). Je k dispozici na http://www.nature.com/nature/webmatters/.

Str. 146 Podrobné a barvité vylíčení úsilí provázejícího mapování webu a internetu viz Martin Dodge a Rob Kitchin, *Atlas of Cyberspace* (New York, Addison-Wesley, 2002). Viz také Martin Dodge a Rob Kitchin, *Mapping Cyberspace* (London, Routledge, 2000).

Str. 147 Obecná diskuse o vlivu samoorganizace na topologii internetu viz např. Albert-László Barabási, „The Physics of the Web", *Physics World* (červenec 2001), 33–38.

Str. 147 Počátky e-mailu viz John Naughton, *A Brief History of the Future* (Woodstock, NY, Overlook, 2000).

Str. 148 Vern Paxson a Sally Floyd, „Why We Don't Know How To Simulate the Internet", *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, ed. S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Withers a B. L. Nelson. Fráze „katastrofální úspěch" pochází také z tohoto článku.

Str. 148 Objev, že internet má bezškálové rozdělení konektivit, byl publikován v: M. Faloutsos, P. Faloutsos a C. Faloutsos, „On Power-Law Relationships of the Internet Topology" [ACM SIGCOMM 99, comp.], *Computer Communications Review* 29 (1999), 251. O novějším měření potvrzujícím toto zjištění na mnohem větších vzorcích viz např. R. Succ a H. Tangmunarunkit, „Heuristics for Internet Map Discovery", *Proceedings of Infocom* (březen 2000).

Str. 149 Postup připojování prvních internetových uzlů: John Naughton, *A Brief History of the Future*.

Str. 150 První model internetu byl zaveden v článku Bernarda M. Waxmana „Routing of Multipoint Connections", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 6 (1988), 1 617–1 622. Waxman umístil velké množství uzlů do roviny a náhodně je pospojoval navzájem. Až potud se tento model nelišil od náhodného modelu Erdőse a Rényiho. Ale kvůli vysokým nákladům na vedení se snažil potlačovat velmi dlouhé vazby. Předpokládal tedy, že pravděpodobnost, že dva uzly na internetu jsou spojené, klesá exponenciálně se vzdáleností mezi nimi. Waxmanův jednoduchý model ovládal modelování internetu desítku let. Byl zpochybněn teprve v roce 1999, kdy byla odhalena bezškálová povaha internetu. Ale exponenciální závislost na vzdálenosti pronikla, spolu s růstem a preferenčním připojováním, i do modernějších modelů internetu. Simulace zaprvé naznačují, že s takovou silnou závislostí na vzdálenosti, jakou nabízí Waxmanův model, se nemohou vyvinout bezškálové sítě. Zadruhé, což je ještě důležitější, měření Yooka a Jeonga naznačují, že pravděpodobnost spojení dvou uzlů o vzájemné vzdálenosti d klesá lineárně s d – což je mnohem slabší závislost než exponenciální tvar předpokládaný Waxmanem.

Str. 150 Přítomnost preferenčního připojování na internetu se rozebírá v několika publikacích, viz např. Soon-Hyung Yook, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, *Modeling the Internet's Large-Scale Topology*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107417; Hawoong Jeong, Zoltán Néda, Albert-László Barabási, *Measuring Preferential Attachment for Evolving Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0104131; Romualdo Pastor-Satorras, Alexei Vazquez, Alessandro Vespignani, „Dynamical and Correlation Properties of the Internet", *Physical Review Letters* 87 (2001), 258701.

Str. 150 Předpokládá se, že uzly se objevují úměrně hustotě populace a že pravděpodobnost, že se nějaký uzel spojí s jiným uzlem s k vazbami umístěným ve vzdálenosti r je úměrná k / r^{σ}, kde σ je volný parametr, který nám dovoluje naladit vliv prostorové komponenty: je-li σ velké, pak na vzdálenosti hodně záleží, kdežto když $\sigma = 0$, je pro vývoj internetu rozhodující pouze preferenční připojování. Simulace dávaly dosti jasnou odpověď: dokud je σ menší než dvě, vzniká bezškálová síť. Ale když je $\sigma > 2$, pak zvítězí omezující vliv vzdálenosti a vývoj sítě vede k exponenciálnímu rozdělení konektivity. Naše měření jasně ukázala, že pro internet platí $\sigma = 1$, proto také navzdory nákladům na pokládání nových kabelů pro zvýšení přenosové kapacity bezškálová topologie přežije. Kromě toho, že vysvětlují, proč je internet bezškálovou sítí, ukazují tyto modely také, jak je důležité kvantitativně odkrýt různé soupeřící principy, které ovládají evoluci sítě. Viz Soon-Hyung Yook, Hawoong Jeong a Albert-László Barabási, *Modeling the Internet's Large-Scale Topology*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107417.

Str. 150 Jiné moderní modely internetu, které berou v úvahu bezškálovou povahu internetu, viz Alberto Medina, Ibrahim Matta a John Byers, „On the Origin of Power Laws in Internet Topologies" [ACM SIGCOMM], *Computer Communications Review* 30, č. 2 (2000), 18–28; G. Caldarelli, R. Mar-

chetti a L. Pietronero, „The Fractal Properties of the Internet", *Europhysics Letters* 52 (2000), 386; K. I. Goh, B. Kahng, D. Kim, „Universal Behavior of Load Distribution in Scale-Free Networks", *Physical Review Letters* 87 (2001), 278701; A. Capocci, G. Caldarelli, R. Marchetti a L. Pietronero, „Growing Dynamics of Internet Providers", *Physical Review E* 64 (2001), 035101.

Str. 150 Fraktály, soběpodobné útvary s netriviálními geometrickými vlastnostmi, zavedl Benoît Mandelbrot. Později se zjistilo, že popisují mnoho přírodních objektů, od sněhových vloček po buněčné kolonie. Viz např. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (New York, W. H. Freeman, 1977). Pro novější přehled viz T. Vicsek, *Fractal Growth Phenomena* (Singapore, World Scientific, 1992).

Str. 150 Selhání směrovačů u MAI se popisovalo v několika novinovýh zprávách; viz např. „Router Glitch Cuts Net Access", *CNET*, 25. dubna 1997.

Str. 152 Diskuse o viru Code Red viz Carolyn Meinel, „Code Red for the Web", *Scientific American*, říjen 2001, 42–51.

Str. 154 O parazitních výpočtech viz Albert-László Barabási, Vincent W. Freeh, Hawoong Jeong a Jay B. Brockman, „Parasitic Computing", *Nature* 412 (2001), 894–897. Pro další informace viz http://www.nd.edu/~parasite/.

Str. 155 Podrobná diskuse o distribuovaném počítání viz např. Ian Foster, „Internet Computing and the Emerging Grid", *Nature* (prosinec 2000), k dispozici na http:// www.nature.com/nature/webmatters.

Str. 156 O skutečně zajímavé diskusi o elektronické pokožce vznikající kolem Země viz Neil Gross, „The Earth Will Don and Electronic Skin", Business Week (30. srpna 1999), 68–70.

Vlákno dvanácté: Potrhaná pavučina

Str. 158 Pokud jde o reakci internetových vyhledávačů na studii firmy NEC, viz článek Thomas E. Weber „Fast Forward: Media in Motion", *Wall Street Journal*, 3. dubna 1998.

Str. 158 Pokud jde o Inquirus, viz Steve Lawrence a C. Lee Giles, „Inquirus: The NECI Meta Search Engine", Seventh International World Wide Web Conference, Brisbane, Australia (Amsterdam, Elsevier Science, 1998), 95–105.

Str. 159 Zjištění skupiny NEC byla publikována ve dvou článcích: Steve Lawrence a C. Lee Giles, „Searching the World Wide Web", *Science* 280 (1998), 98–100, a Steve Lawrence a C. Lee Giles, „Accessibility of Information On the Web", *Nature* 400 (1999), 107–109.

Str. 160 Detailní diskuse o velikosti webu viz http://searchengine.com. Nejnovější statistika velikostí internetovch vyhledávačů viz Danny Sullivan, „Search Engine Sizes", *Search Engine Report*, 15. srpna 2001, přístupné na http://searchengine.com/reports/sizes.html; viz také „Numbers, Numbers - But What Do They mean?", *Search Engine Report*, 3. března 2000, http://searchengine.com/sereport/00/03-numbers.html.

Str. 162 Fragmentované struktuře webu se říká „motýlek" a poprvé ji pozorovali A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul, P. Raghavan, S. Rajagopalan, R. Stata, A. Tomkins a J. Wiener, „Graph structure in the Web", Ninth International World Wide Web Conference, Amsterdam, http://www9.org/w9cdrom/160/160.html.

Str. 164 Jak webové sránky stárnou a dozvídá se o nich více lidí, přirozeným způsobem putují mezi kontinenty. Jejich pozici určuje jak tvůrce webové stránky, tak zájem uživatelů webu o obsah stránky. Jak webových stránek a odkazů neustále přibývá, jsou odstraňovány, měněny a přidávají se do nich a odebírají se z nich odkazy, je obyvatelstvo těchto kontinentů v neustálém pohybu, ve srovnání s nímž velký příliv z Evropy do Spojených států na konci 20. a počátku 21. století je malou, zanedbatelnou událostí. Jediný dobře umístěný odkaz může určit osud a umístění tisíců webových stránek a celá krajina se malými i velkými lavinami přeorganizuje.

Str. 164 Pro aktuální výzkumy vlastností orientovaných sítí viz S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes a A. N. Samukhin, *Giant Strongly Connected Component of Directed Networks*, http://arxiv.org/abs/cond-mat/0103629; M. E. J. Newman, S. H. Strogatz a D. J. Watts, „Random Graphs with Arbitrary Degree Distributions and Their Applications", *Physical Review E* 64 (2001), 026118; B. Tadic, „Dynamics of Directed Graphs: the World Wide Web", *Physica A* 293 (2001), 273–284.

Str. 165 Cass R. Sunstein, *Republic.com* (Princeton, Princeton University Press, 2001).

Str. 166 Výrok soudce Stewarta o pornografii se cituje na mnoha místech, viz např. „The Task of Defining What's Too Explicit to Be Seen", *USA Today*, 26. ledna 1999, k dispozici na http://www.usatoday.com/life/cyber/tech/ctb114.htm.

Str. 166 O práci skupiny NEC o webovských komunitách viz Gary William Flake, Steve Lawrence a C. Lee Giles, „Efficient Identification of Web Communities", *Proceedings of the Sixth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (Boston, Mass., ACM Special Interest Group on Knowledge Discovery in Data and Data Mining, srpen 2000), 156–160. Na velmi podobných problémech pracovalo několik dalších skupin, viz David Gibson, Jon Kleinberg a Pranhakar Raghavan, „Inferring Web Communities from Link Topology", *Proceedings of the 9th ACM Conference on Hypertext and Hypermedia* (1998), Ray R. Larson, *Bibliometrics of the World Wide Web: An Exploratory Analysis of the Intellectual Structure of Cyberspace*, http://sherlock.berkeley.edu/asis96/asis96.html.

Str. 166 Pro diskusi o NP-úplných problémech viz M. Garey a D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness* (San Francisco, H. W. Freeman, 1979).

Str. 167 Lada A. Adamic, „The Small World Web", *Proceedings of ECDL'99*, LNCS 1696 (Springer, 1999), 443–452. Viz také Lada A. Adamic a Eytan Adar, *Friends and Neighbors on the Web*, http://www.hpl.hp.com/shl/papers/web10/.

Str. 168 Lawrence Lessig, *Code and Other Laws of Cyberspace* (New York, Basic Books, 1999).

Str. 171 Chcete-li se dozvědět více o Internet Archives, navštivte jejich webovou stránku http://www.archive.org/.

Str. 171 Stále více se v tvůrčím životě obracíme k webu. Moderní fotograf používá digitální fotoaparát a upravuje snímky tak, aby lépe vyjádřil svou představu. Některé z těchto obrázků se vytisknou a vystaví v galeriích. Většina je však přístupná jen v elektronické podobě na webu. Velké množství poezie se už nepublikuje ve sbírkách, je přístupná ve webových archivech. Web je primárním médiem pro čím dál větší počet vizuálních umělců, jejichž dílo nelze ocenit bez prohlížeče. Ale to všechno bude nenávratně ztraceno kvůli špatně udržovaným stránkám, pokaženým počítačům a ztracenému vybavení. V budoucnu nebudeme mít van Goghy, protože když jejich dílo neocení jejich současníci, nepřežije pro budoucí generace. Tvůrčí géniové internetového světa budou vyhozeni při modernizaci počítače nebo když se změní technologie, a to ne během staletí, ale za pár krátkých let. Existuje jen jediný způsob, jak tuto tragickou ztrátu historie a kreativity uložené dnes na webu zastavit. Musíme archivovat všechno, co tam je, pro budoucí generace. Domnívám se, že musíme podniknout seriózní, možná státem podporovanou akci, abychom se dostali mnohem dál, než kam sahají cíle a možnosti Internet Archives, a zmapovali *celý* web. Do poslední stránky. Musíme komukoli a kdekoli umožnit okamžitý přístup k jeho současnému i minulému obsahu.

Str. 172 Tato kapitola se soustřeďovala hlavně na topologii webu, v poslední době se však objevily práce zkoumající také naše zvyklosti při surfování a naše dynamické chování na webu, které našly další důkazy emergentního chování a mocninných zákonů. Viz Bernardo A. Huberman, Peter L. T. Pirolli, James E. Pitkow a Rajan M. Lukose, „Strong Regularities in World Wide Web Surfing", *Science* 280 (1998), 95–97; Anders Johansen a Didier Sornette, *Download Relaxation Dynamics on the WWW Following Newspaper Publication of URL*, http://arxiv.org/abs/cond-mat /9907371; Bernardo A. Huberman, *The Laws of the Web* (Cambridge, Mass., MIT Press, 2001).

Vlákno třinácté: Mapa života

Str. 174 Hlavní příčiny úmrtí ve Spojených státech (včetně deprese) viz webovou stránku Centra pro kontrolu a prevenci nemocí (CDC), http://webapp.cdc.gov/.

Str. 174 O výzkumu maniodepresivní psychózy viz Nick Craddock a Ian Jones, „Molecular Genetics of Bipolar Disorder", *British Journal of Psychiatry* 174, suppl. 41 (2001), 128–133. O výzkumu deprese a také diskusi o maniodepresivní psychóze viz Charles B. Nemeroff, „The Neurobiology of Depression", *Scientific American* (červen 1998), 42.

Str. 175 O rozluštění lidského genomu se obšírně psalo v tisku, jak při příležitosti oficiálního oznámení Bílého domu 25. června 2000, tak při publikaci genomu 15. a 16. února 2001. Viz *Science* 291 (únor 2001) a *Nature* 409 (únor 2001).

Str. 176 Současná diskuse o postgenomové biologii a měnících se názorech na úlohu genů viz Evelyn Fox Keller, *The Century of the Gene* (Cambridge, Mass., Harvard University Press, 2000).

Str. 176 Pro hlubší vhled do stále vzrůstající úlohy sítí při chápání buňky viz J. Craig Venter et al., „The Sequence of the Human Genome", *Science* 291 (2001), 1 304–1 331, a pak zejména 1 347–1 348.

Str. 177 Pro vynikající úvod do buněčné biologie viz Bruce Alberts, Dennis Bray, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts a James D. Watson, *Molecular Biology of the Cell* (New York, Garland, 1994). Zkrácená verze této knihy, vydaná pod názvem *Essential Cell Biology*, je dostupná v českém překladu: B. Alberts et al., *Základy buněčné biologie*, Espero Publishing, 2000.

Str. 178 Výzkum metabolismu se datuje od 19. století, a to na popud francouzských vinařů, kteří potřebovali řídit pochody, při nichž kvasinkové buňky mění glulózu na alkohol a bublinky kysličníku uhličitého. Toto dědictví přetrvává ve slově *enzym*, jehož kořen znamená „v kvasinkách". Biochemie se tedy dá chápat jako gigantický projekt mapování, který se snaží vytvořit inventář všech možných chemických látek a reakcí, které se mohou vyskytnout v buňce. Pro podrobnou historii mapování metabolismu viz Horace Freeland Judson, *The Eighth Day of Creation: Makers of the Revolution in Biology* (Plainview, NY, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1996).

Str. 178 Všimněme si, že různé podsítě, jako jsou metabolická síť nebo interakční síť proteinů, nejsou navzájem nezávislé. Ve skutečnosti proteiny regulační sítě katalyzují chemické reakce, čímž kontrolují vazby metabolické sítě. Podobně časté interakce proteinů s geny vážou interakční síť proteinů s geny a DNA.

Str. 179 Watsonův citát pochází z: James D. Watson, *Molecular Biology of the Gene*, 2. vyd. (New York, W. A. Benjamin, 1970), str. 99.

Str. 179 Systém WIT (What Is There? neboli Co je tam?) je integrovaný systém pro srovnávací analýzu sekvenovaných genomů. Pro nás je důležité to, že umožňuje i rekonstruovat metabolismus z údajů o sekvenci. Lze se k němu dostat prostřednictvím jeho webové stránky na adrese http://www-unix.mcs.anl.gov/compbio/.

Str. 180 Výsledky o bezškálové podstatě metabolismu jsme publikovali v: H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z. N. Oltvai a A.-L. Barabási, „The large-scale organization of metabolic networks", *Nature* 407 (2000), 651–654.

Str. 181 Práce Andrease Wagnera a Davida A. Fella o metabolismu byla publikována v: „The Small World Inside Large Metabolic Networks", *Proceedings of the Royal Society London, B* 268 (2001), 1 803–1 810.

Str. 181 Srovnání metabolické sítě různých organismů může také osvětlit

evoluční vztahy mezi různými druhy, viz J. Podáni, Z. N. Oltvai, H. Jeong, B. Tombor, A.-L. Barabási a E. Szathmáry, „Comparable System-Level Organization of Archaea and Eukaryotes", *Nature Genetics* 29 (2001), 54–56; C. V. Forst a K. Schulten, „Phylogenetic Analysis of Metabolic Pathways", *Journal of Molecular Evolution* 52 (2001), 471–489.

Str. 182 Metodu dvojhybridních mutantů u kvasinek vyvinuli S. Fields a O. Song, „A Novel Genetic System to Detect Protein-Protein Interactions", *Nature* 340 (1989), 245–246. Pro nedávné pokroky této techniky viz také Li Zhu a Gregory J. Hannon, edd., *Yeast Hybrid Methods* (Natick, MA, Eaton, 2000).

Str. 182 Obšírná mapa interakcí u kvasinky byla publikována v: P. Uetz et al., „A Comprehensive Analysis of Protein-Protein Interactions in *Saccharomyces cerevisiae*", *Nature* 403 (2000), 623–627; T. Ito et al: „Toward a Protein-Protein Interaction Map of the Budding Yeast: A Comprehensive System to Examine Two-Hybrid Interactions in All Possible Combinations Between the Yeast Proteins", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000), 1 143–1 147; „A Comprehensive Two-Hybrid Analysis to Explore the Yeast Protein Interactome", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (2001), 4 569–4 574.

Str. 182 Bezškálovou povahu interakční sítě proteinů rozebírá Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Centrality and Lethality of Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42. Tento článek obsahuje také diskusi vztahů mezi letalitou a topologií. Přehled výsledků viz článek v sekci News and Views, doprovázející náš článek: J. Hasty a J. J. Collins, „Protein Interactions–Unspinning the Web", *Nature* 411 (2001), 30–3 l.

Str. 183 Nezávislé potvrzení mocninných zákonů v proteinové síti kvasinky a potenciální vztah k duplikaci genů viz Andreas Wagner, „The Yeast Protein Interaction Network Evolves Rapidly and Contains Few Redundant and Duplicate Genes", *Molecular Biology and Evolution* 18 (2001), 1 283–1 292.

Str. 183 Výsledky týkající se sítě proteinových domén viz Stefan Wuchty, „Scale-Free Behavior in Protein Domain Networks", *Molecular Biology and Evolution* 18 (2001), 1 694–1 702. Jiný přístup k proteinové síti kvasinky ukazující také bezškálovou strukturu viz Jong Park, Michael Lappe a Sarah A. Teichmann, „Mapping Protein Family Interactions: Intramolecular and Intermolecular Protein Family Interaction Repertoires in the PBD and Yeast", *Journal of Molecular Biology* 307 (2001), 929–938. Výsledky týkající se proteinové sítě u *Helicobacter pylori* viz Hawoong Jeong, Sean Mason, Albert-László Barabási a Zoltán N. Oltvai, „Centrality and Lethality of Protein Networks", *Nature* 411 (2001), 41–42.

Str. 184 O duplikaci genů a jejím významu v evoluci viz John Maynard Smith a Eörs Szathmáry, *The Origins of Life* (Oxford, Oxford University Press, 1999).

Str. 184 Články, které nezávisle na sobě navrhly duplikaci genů jako původ bezškálové topologie v regulačních sítích: A. Bhan, D. J. Galas a T. G. Dewey, „A Gene Duplication Growth Model of Scaling in Gene Expression Networks", *Bioinformatics* 18 (2002), 1 486–1 493; A. Vazquez, A. Flammini, A. Maritan a A. Vespignani, *Modeling of Protein Interaction Networks* (http://arxiv.org/abs/cond-mat/0108043); R. V. Solé, R. Pastor-Satorras, E. D. Smith a T. Kepler, „A Model of Large-Scale Proteome Evolution", *Advances in Complex Systems* 5 (2002), 43–54. Viz také J. Giam, N. M. Luscombe a M. Gerstein, „Protein Family and Fold Occurrences in Genomes: Power-law Behavior and Evolutionary Model", *Journal of Molecular Biology* 313 (2001), 673–681. Z hlediska teorie sítí mají modely duplikace genů řadu fascinujících rysů. Pro detailnější rozbor viz J. Kim, P. L. Krapivsky, B. Kahng a S. Redner, „Evolving Protein in Interactive Networks", http://arxiv.org/abs/cond-mat/0203167.

Str. 185 Lane, Levine a Vogelstein obdrželi veškeré možné pocty a ceny v medicíně, což mnohé lidi vede k názoru, že je jen otázkou času, kdy dostanou také Nobelovu cenu. David Lane, dnes jeden z nejcitovanějších vědců ve Velké Británii, byl královnou Alžbětou v roce 2000 povýšen do šlechtického stavu jako sir David Lane. Arnold J. Levine, který je dnes prezidentem prestižní Rockefellerovy univerzity v New Yorku, se stal prvním laureátem ceny Albany Medical Center, která je se svou hodnotou 500 000 dolarů mezi cenami za medicínu druhá za Nobelovou cenou. Bert Vogelstein, který nyní zastává výzkumnou pozici Howarda Hughese na Lékařské fakultě Johnse Hopkinse, pokračuje v nevídané sérii významných objevů a tři z jeho publikací se nyní umísťují mezi deseti nejcitovanějšími články v medicíně.

Str. 186 Pokud jde o hypotézu o významu sítí pro pochopení rakoviny, viz Bert Vogelstein, David Lane a Arnold J. Levine, „Surfing the p53 Network", *Nature* 408 (2000), 307–310. Tento článek neprovádí kvantitativní analýzu sítě, ale poskytuje přesvědčivé empirické argumenty pro bezškálovou povahu sítě. Analyzovali jsme později topologii sítě a skutečně jsme zjistili, že s dobrým přiblížením je bezškálová (Hawoong Jeong, D. A. Mongru, Z. N. Oltvai a A.-L. Barabási, nepublikováno).

Str. 187 Technologie mikromřížek (microarray), zavedená v roce 1991 Stephenem Fodorem a jeho spolupracovníky (viz S. P. A. Fodor, J. L. Read, M. C. Pirrung, L. Stryer, A. T. Lu a D. Solas, „Light-Directed, Spatially Addressable Parallel Chemical Synthesis", *Science* 251 [1991] 767–773), výzkumníkům dovoluje dešifrovat dynamiku genových interakcí v buňce. V důsledku tohoto převratného objevu se už podstatně změnil způsob biologické práce ve většině laboratoří. Je jen otázkou času, kdy se promění všechno, od stanovení diagnózy v ordinaci lékaře po vývoj léků. *Čip na bázi DNA* neboli *mikromřížka* je křemíková nebo skleněná destička, na níž je vytvořena struktura technikou používanou při výrobě počítačových čipů. Fotolitografické stroje vyleptají mřížku malinkých dírek právě tak velkých, aby dovolily ramenu robota umístit do dírek krátké úseky DNA, přičemž každá dírka obsahuje jiný gen. Tak můžete s 30 000 dírek na jediný

čip umístit kopii všech genů lidského genomu. Když DNA v buňce generuje proteiny, je gen nejprve zkopírován do molekuly mediátorové RNA (mRNA) a ta je pak přeložena do podoby proteinu. Tedy počet a typ molekul mRNA v buňce přesně sleduje příkazy vydávané DNA. Každá molekula mRNA se může navázat jen na jednu dírku v mikromřížce, a to na tu, která obsahuje ten úsek DNA, který především produkoval tuto molekulu mRNA. Když biolog studující vzácnou nemoc umístí kulturu nemocných buněk na DNA čip, dírky odpovídající aktivním genům se zaplní úseky mRNA, zatímco všechny ostatní dírky zůstanou prázdné. Laserové čtecí zařízení prochází od jedné dírky k druhé a ukazuje, které geny jsou zaměstnané výrobou proteinů. Měření vám tedy řekne, které geny fungují normálně a které z nich jsou vypnuty kvůli nějaké genetické poruše.

Str. 188 Velmi obecnou diskusi o dopadu nových biologických nástrojů, jako jsou mikromřížky, na budoucí rozvoj medicíny a vývoj léků obsahuje speciální číslo magazínu *Time* 15. ledna 2001 s názvem „Drugs of the Future".

Str. 188 Nádhernou ukázku schopností mikromřížky sledovat, jak se geny zapínají a vypínají, předvedlo několik nedávných článků, které identifikovaly skupiny genů, které jsou současně aktivní během různých stadií buněčného cyklu. Viz Neal S. Holter, Madhusmita Mitra, Amos Maritan, Marek Cieplak, Jayanth R. Banavar a Nina V. Fedoroff, „Fundamental Patterns Underlying Gene Expression Profiles: Simplicity from Complexity", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000), 8 409–8 414; Orly Alter, Patrick O. Brown a David Botstein, „Singular Value Decomposition for Genome-Wide Expression Data Processing and Modeling", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000), 10 101–10 106.

Str. 190 I když lidský genom obsahuje jen asi 30 000 genů, počet proteinů může být mnohem větší, a to díky procesu, kterému se říká alternativní sestřih, při němž je mediátorová RNA rozsekána a znovu napojena mnoha různými způsoby. Je tedy u eukaryontních buněk počet proteinů mnohem větší než počet genů, což vyvrací biologické dogma o jednoznačném přiřazení genů proteinům, které platí u bakterií.

Str. 190 O komplexitě genomu a úloze genové sítě viz Jean-Michel Claverie, „What If There Are Only 30,000 Human Genes?" *Science* 291 (2001), 1 255–1 257.

Vlákno čtrnácté: Síťová ekonomika

Str. 191 Obecné diskuse o úloze sítí v obchodě a ekonomice viz E. Bonabeau, *The Alchemy of Networks: Network Science Applied to Business* (připravuje se).

Str. 191 Spojení Time-Warner a AOL podrobně popisuje Daniel Okrent, „Happily Ever After?" *Time*, 24. ledna 2000. Viz také obsáhlý společný rozhovor se Stevem Casem z AOL a Jerrym Levinem z Time-Warner v tomtéž čísle magazínu.

Str. 191 Historie fúze firem Daimler-Benz a Chrysler viz Bill Vlasic a Bradley A. Stertz, *Taken for a Ride: How Daimler-Benz Drove Off with Chrysler* (New York, William Morrow, 2000).

Str. 192 Ne všechny fúze jsou důsledkem rostoucího trhu a ekonomiky - ve skutečnosti začala první vlna slučování po celosvětové depresi roku 1883. Stručný historický přehled slučování viz David Besanko, David Dranove a Mark Shanley, *Economics of Strategy* (New York, John Wiley, 2000), 198–199.

Str. 192 Hierarchická organizace má více než stoletou historii. „V našem schématu po našich lidech nechceme iniciativu... Nevyžadujeme nic víc, než aby poslouchali příkazy, které jim dáváme, dělali, co říkáme, a dělali to rychle," napsal Frederick Winslow Taylor, otec vědeckého managementu, na začátku 20. století, a shrnul tím filozofii, z níž vyrůstá bohatství a materiální kultura, jak je známe. Jak píše Brink Lindsey v knize *The Man with the Plan* (Reason Online, 1998, www.reason.com), před Taylorem se výroba řídila řemeslným systémem. Tajemství řemesla se dobře uchovávalo a předávalo dál, bez velké ochoty, od mistra k učedníkovi. Skutečný pracovní potenciál dílny si řemeslníci přísně střežili, protože systém plateb byl založený na počtu vyrobených kusů a nikoli na hodinové mzdě. Taylor to změnil vlastními silami a se stopkami v ruce. Rozčlenil celý výrobní proces na jednoduché prvky, standardizoval pracovní úkony a platby za ně. Tento převratný přístup k výrobě proměnil Bethlehem Steel v nejmodernější továrnu na světě a snížil počet dělníků v hale z 500 na 140 při současném zdvojnásobení výroby. Nakonec se však stal obětí svého vlastního úspěchu a byl odvolán kvůli rozhořčení, které vyvolalo propouštění. Ale po něm už nedokázala žádná továrna obstát v soutěži, aniž by plně přijala jeho metody. Taylor zavedl jasné oddělení hodností a dělníky redukoval na slepé vykonavatele příkazů. Zavedl funkci „bílých límečků", zodpovědných za plánování každého jednotlivého výrobního kroku a zajišťujících, že dělníci je přesně provedou. Jeho nejdůležitějším odkazem je to, čemu říkáme vertikální organizace, která přetrvala beze změny po celé století ve struktuře sítě uvnitř firmy. Život a dílo Fredericka W. Taylora se staly námětem několika životopisů a vědeckých monografií. Viz Robert Kanigel, *The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and the Enigma of Efficiency* (New York, Viking Penguin, 1997). Standardní Taylorův životopis viz Frank Barkley Copley, *Frederick W. Taylor, Father of Scientific Management*, 2 sv. (New York, Taylor Society, 1923). Taylorovo vlastní vlivné dílo je kniha *The Principles of Scientific Management* (New York, Harper & Brothers, 1915; reprint, Mineola, N.Y., Dover, 1998).

Str. 193 Fordovy závody sehrály i klíčovou roli při zrodu moderní výroby. Právě tam byl vyvinut pohyblivý výrobní pás, klíčová složka všech zařízení masové produkce. Stručné shrnutí historie vývoje u Forda a postav, které stály v pozadí vývoje výrobního pásu, viz Joseph B. White, *The Line Starts Here* (www.wsj.com/public/current/articles/SB915733342173968000.htm, Wall Street Journal Interactive, 2000).

Str. 193 Klasická ekonomická teorie se dívá na organizace, firmy a korporace jako na optimalizované sítě snažící se dosáhnout co nejvyššího finančního výkonu s co nejnižšími zdroji. To je Taylorův odkaz, podle něhož je provozování firmy optimalizační proces zaměřený na zvyšování zisku. Takováto optimalizace zaměřená na zisk zvýhodňuje stromovou strukturu. Je-li tedy prvotním cílem společnosti výroba, dají se náklady výrazně zredukovat tím, že se všechny opakující se specializované úkony přidělí méně placeným dělníkům. Nedávné studie naznačují, že také informace se nejlépe zpracovávají v rámci hierarchické organizace, neboť strom se vyhýbá zbytečnému zdvojování informace a komunikace. Protože aktivita každé firmy je kombinací výroby a zpracování informací, zdá se, že struktura pyramidy by měla přetrvat. Detailní rozbor hierarchického stromu v rámci firmy viz Patrick Bolton a Mathias Dewatriport, „The Firm as a Communication Network", *Quarterly Journal of Economics* 109 (1994), 809–839.

Str. 194 Obecná diskuse o posunu směrem k síťové organizaci firmy viz speciální dvojčíslo *Business Week* „The 21st Century Corporation", 21.–28. srpna 2001.

Str. 194 Stručný přehled teorií sítí v organizacích viz Peter R. Monge a Noshir S. Contractor, „Emergence of Communication Networks", in: *The New Handbook of Organizational Communication*, ed. Fredric M. Jablin a Linda L. Putnam (Thousand Oaks, Calif., Sage Publications, 2001), 440–502.

Str. 194 Jordanova úloha ve skandálu Clinton-Lewinská viz Eric Pooley, „The Master Fixer Is a Fix", *Time*, 2. února 1998.

Str. 195 Spíše oblastní příklad provázaného členství ve správních radách v okolí Chicaga viz Melissa Allison, „Directors Weave a Complex Web", *Chicago Tribune*, 17. června 2001, oddíl 5, str. 1–2.

Str. 196 Detailní rozbor sítě korporací viz Gerald F. Davis, Mina Yoo a Wayne E. Baker, „The Small World of the Corporate Elite" (preprint, únor 2001).

Str. 196 Matematická analýza sítě členů správních rad viz M. E. J. Newman, S. H. Strogatz a D. J. Watts, „Random Graphs with Arbitrary Degree Distributions and Their Applications", *Physical Review E* 64 (2001), 026118.

Str. 197 Pokud jde o Jordanovu kariéru ve světě korporací, viz 12. kapitolu v autobiografii Vernona E. Jordana, Jr., napsané společně s Annette Gordon-Reedovou, *Vernon Can Read (A Memoir)*, (New York, Public Affairs, 2001), a výše citovanou práci Davise, Yooa a Bakera.

Str. 197 Pokud jde o vliv sítí v Silicon Valley, viz Emilio J. Castilla, Hokyo Hwang, Ellen Granovetter a Mark Granovetter, „Social Networks in Silicon Valley", in: *The Silicon Valley Edge: A Habitat for Innovation and Entrepreneurship*, ed. Chong-Moon Lee, William F. Miller, Marguerite Gong Hancock a Henry S. Rowen (Cambridge, Cambridge University Press, 2001), 218–247.

Str. 198 Walter W. Powell, Douglas White a Kenneth W. Koput, „Dynamics and Movies of Social Networks in the Field of Biotechnology: Emergent Social Structure and Process Analyses" (preprint, 12. dubna 2001).

Str. 199 Detailní matematická analýza sítí farmaceutického průmyslu viz M. Riccaboni, F. Pammolli a G. Caldarelli, „Complexity of Connections in Social and Economical Structures" (preprint, 2001).

Str. 200 Další příklad malých světů v ekonomice viz Bruce Kogut a Gordon Walker, „The Small World of Germany and the Durability of National Networks", *American Sociological Review* 66 (2001), 317–335.

Str. 200 Kromě bezškálovosti je pro síťovou ekonomiku charakteristické také shlukování. Především existuje silné shlukování dané zeměpisně. *Globalizace*, oblíbené slovo posledního desetiletí, ve skutečnosti znamená šíření dalekodosahových vazeb, které nedbají na geografii – společností, které si nehledají zákazníky a prodejce lokálně, ale celosvětově. Existuje i shlukování založené na druhu podnikání – společnosti na témž trhu nebo v témž oboru sdílejí mnoho vazeb. Takové vazby, ačkoli jsou zatíženy geografií, snadno překonávají velkou vzdálenost. Jak je pro ekonomii charakteristické shlukování, bylo nedávno dokumentováno v práci Bruce Kogut a Gordon Walker, „The Small World of Germany and the Durability of National Networks", *American Sociological Review*, 66 (2001), 317–335. Autoři zkoumají vlastnictví firem v Německu a mapují vazby mezi 500 nefinančními korporacemi, 25 bankami a 25 pojišťovnami. V této síti jsou dvě firmy spojeny, pokud mají společného vlastníka. Získaná síť se svým způsobem podobá síti herců, kde herci odpovídají společnostem a filmy vlastníkům. Typický vlastník vlastní mnoho společností, právě tak jako v jednom filmu je mnoho herců. Analýza získané sítě společností jasně ukazuje, že německé firmy jsou součástí malého světa. Průměr sítě je 4,81, tedy většina těchto společností je spojena skrze řetězec o 4 vlastnících. Kogut a Walker nalezli také velmi vysoký koeficient shlukování. Kdyby firmy tvořily náhodnou síť, čekalo by se, že pravděpodobnost existence vazby mezi dvěma sousedy nějaké firmy je 0,5 %. Naproti tomu v reálné síti má každá dvojice sousedů nějaké firmy pravděpodobnost 67 %, že má společného vlastníka. To je bezesporu podstatný rozdíl, který je základem vysokého stupně shlukování charakterizujícího ekonomiku.

Str. 200 Walter W. Powell, „Inter-Organizational Collaboration in the Biotechnology Industry", *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 512 (1996), 197–215.

Str. 200 Jedním z průkopníků myšlenky, že na ekonomiku máme nahlížet jako na vyvíjející se síť, je Alan Kirman z univerzity v Aix-Marseille. Jeho články podávají skutečně vynikající rozbor nevýhod současného ekonomického myšlení a úlohy sítí v ekonomických teoriích. Viz „The Economy as an Evolving Network", *Journal of Evolutionary Economics* 7 (1997), 339–353; „Aggregate Activity and Economic Organization", *Revue européenne des sciences sociales* 37, č. 113 (1999), 189–230, a „The Economy as an Interactive System", in: *The Economy as an Evolving Complex System II* (Proceedings of the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, vol. 27), ed. W. Brian Arthur, Steven N. Durlauf a David A. Lane (Reading, MA, Addison-Wesley, 1997), 491–532.

Str. 201 Asijská ekonomická krize byla široce komentována jak v tisku, tak ve vědeckých článcích. Pro přehled událostí, jak šly za sebou den po dni, viz webové stránky, které spravuje Nouriel Roubini, profesor ekonomie a mezinárodního obchodu na Sternově obchodní fakultě Newyorské univerzity. Stránky, které nesou název „Chronology of the Asian Currency Crisis and Its Global Contagion", jsou na adrese http://www.stern.nyu.edu/~nroubini/asia/AsiaChronology1.html. Rozbor příčin krize viz Giancarlo Corsetti, Paolo Pesenti a Nouriel Roubini, „What Caused the Asian Currency and Financial Crisis?" *Japan and the World Economy*, září 1999, 305–373.

Str. 202 *Economic Report of the President* (Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1999).

Str. 202 Paul Krugman, *What Happened to Asia?* (leden 1998) http://web.mit.edu/krugman/www/DISINTER.html.

Str. 203 Podrobná diskuse o vlivu subdodavatelského systému a historie zahrnující Cisco, Compaq a další apoštoly síťové ekonomiky viz Bill Lakenan, Darren Boyd a Ed Frey, „Why Cisco Fell: Outsourcing and Its Perils", *Strategy + Business* (3. čtvrtletí 2001), 54–65.

Str. 204 Historii Hotmailu popisuje Steve Jurvetson, partner ve firmě zaměřené na rizkový kapitál, která Hotmailu poskytla počáteční finance, v článku „Turning Customers into Sales Force", *Business 2.0*, 1. listopadu 1998. Viz také medailon Sabeera Bhatii v: Stuart Whitmore „Driving Ambition", asiaweek.com, http://www.asiaweek.com/asiaweek/technology/990625/bhatia.html.

Str. 207 V akademické literatuře pozorujeme vzrůstající zájem o sítě. Některé reprezentativní příklady v této oblasti viz Matthew O. Jackson a Alison Watts, „The Evolution of Social and Economic Networks", *Journal of Economic Literature* (2001); Alison Watts, „A Dynamic Model of Network Formation", *Games and Economic Behavior* 34 (2001), 331–341; Matthew O. Jackson a Alison Watts, „On the Formation of Interaction Networks in Social Coordination Games", *Journal of Economic Literature* (2001); Venkatesh Bala a Sanjeev Goyal, „A Noncooperative Model of Network Formation", *Econometrica* 68 (2000), 1 181–1 229; „Learning, Network Formation and Coordination" (preprint); „A Strategic Analysis of Network Reliability", *Review of Economic Design* 5 (2000), 205–228; Nigel Gilbert, Andreas Pyka a Petra Ahrweiler, „Innovation Networks: A Simulation Approach", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4, č. 3 (2001); Lawrence E. Blume a Steven N. Durlauf, *The Interactions-Based Approach to Socioeconomic Behavior*, http://www.ssc.wisc.edu/econ/archive/wp2001.htm; Nicholas Economides, „Desirability of Compatibility in the Absence of Network Externalities,", *American Economic Review* 78 (1989), 108–121; „Compatibility and the Creation of Shared Networks", in: *Electronic Services Networks: A Business and Public Policy Challenge*, ed. Margaret Guerin-Calvert a Steven Wildman (New York, Praeger, 1991); „Network Economics with Application to Finance", *Financial Markets, Institutions*

and Instruments 2 (1993), 89–97; Nicholas Economides a Steven C. Salop, „Competition and Integration Among Complements and Network Market Structure", *Journal of Industrial Economics* 40, č. 1 (1992), 105–123. Viz také D. McFadzean, D. Stewart a L. Tesfatsion, „A Computational Laboratory for Evolutionary Trade Networks", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 5 (2001), 546–560; L. Tesfatsion, „A Trade Network Game with Endogenous Partner Selection", in: *Computational Approaches to Economic Problems*, ed. H. M. Amman, B. Rustem a A. B. Whinston (Kluwer Academic, 1997), 249–269. Viz též webové stránky Leigha Tesfatsiona, http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/netgroup.htm, a Nicholase Economidese, http://www.stern.nyu.edu/networks/site.html, obsahující řadu odkazů na vědce a články zaměřené na síťovou ekonomiku.

Str. 207 Rychle se dnes rozvíjí jeden podobor fyziky, který si klade za cíl zkoumat kvantitativně ekonomické jevy s použitím nástrojů statistické mechaniky: ekonofyzika. Stručný úvod viz Rosario N. Mantegna a H. Eugene Stanley, *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance* (Cambridge, Cambridge University Press, 2000); Jean-Phillipe Bouchaud a Marc Potters, *Theory of Financial Risk: From Statistical Physics to Risk Management* (Cambridge, Cambridge University Press, 2000). Viz také J. Doyne Farmer, „Physicists Attempt to Scale the Ivory Towers of Finance", *IEEE Computing in Science and Engineering* (listopad–prosinec 1999), 26–39. Většina vědců z této sítě se soustřeďuje na to, jakým způsobem kolísají ceny akcií. Pokud jde o vztah mezi sítěmi a burzou, viz Hyun-Joo Kim, Youngki Bee, Im-mook Kim a Byungnam Kahng, „Scale-Free Networks in Financial Correlations", http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107449.

Str. 207 Řada firem experimentuje ze zaváděním síťových myšlenek v rámci rozličných modelů podnikání. Například Ecrush.com po vás chce, abyste jim řekli, zda jste do někoho blázen. Vašemu vyvolenému/vyvolené pošlou tajnou zprávu s textem „někdo vás má rád" a vyzvou jej/ji, aby se také zapojil(a). Jestliže se váš vyvolený/á zapojí a uvede vás také jako svou vyvolenou/vyvoleného, program vás dá dohromady. Pokud vás váš vyvolený/á neuvede, nelze nikdy zjistit, kdo to byl, kdo se s ním/ní sblížil. ICQ.com, jiná začínající firma posedlá sítěmi, která se chlubí neuvěřitelnými 116 miliony uživatelů, je méně ambiciózní a více se drží při zemi. Nabízí vám prostředí, v němž můžete efektivně aktivovat své vazby. Bezplatný software monitoruje seznam vašich přátel a říká vám, kdo z nich je právě připojen na síti, a tím vám poskytuje možnost ihned se s ním spojit.

Str. 207 Interakce mezi ekonomickými institucemi a ovlivňováním politiky viz P. Cooke a K. Morgan, „The Networks Paradigm: New Departures in Corporate and Regional Development", *Environment and Planning, D: Society and Space* 11 (1993), 543–564.

Str. 207 O politických sítích viz David Marsh, ed. *Comparing Policy Networks* (Buckingham, Open University Press, 1998); Dirk Messner, *The Network*

Society (London, Frank Cass, 1997); Manuel Castell, *The Rise of the Network Society* (London, Blackwell, 1996).

Vlákno poslední: Pavučina bez pavouka

Str. 212 O síti v pozadí teroristické buňky zodpovědné za útok z 11. září viz www.orgnet.com, webovou stránku Valdise Krebse. Viz také Thomas A. Steward, „Six Degrees of Mohamed Atta", *Business* 2.0, prosinec 2001, 63.

Str. 213 O boji proti nepřátelské síťové organizaci ve válce sítí viz John Arquilla a David F. Ronfeldt, edd., *Networks and Netwars* (Santa Monica, CA, RAND Corp., 2001), a Thomas A. Steward, „America's Secret Weapon", *Business* 2.0, prosinec 2001, 58–68.

Str. 214 Práce Christa a Jeanne-Claude je námětem mnoha knih a monografií. Viz Jacob Baal-Teshuva, *Christo and Jeanne-Claude* (Cologne, Taschen, 2001). Fráze „zjevení skrytím" pochází od Davida Bourdona, *Christo* (New York, Abrahams, 1970).

Str. 215 Je třeba vzít v úvahu, že komplexita je nesmírně široký obor a mnoho vědců, od fyziků přes matematiky až po biology, pracuje na různých přístupech ke komplexitě. Seznam knih pokrývajících tyto rozličné přístupy najdete v poznámkách k 1. kapitole.

Rejstřík

Adamicová, Lada 167
ADP (adenosindifosfát) 180
Afrika 137
Achillova pata 110–122, 150, 186
AIDS, virus 134–140
- centra 129
- Dugas 123–124
- prahový model 126
- webové komunity 166
viz také viry
Airbus 97
Akin, Gump, Strauss, Hauer & Feld 197
Albertová, Réka 37, 84, 92, 112, 209
- grantový projekt pro DARPA 112
- její článek o granulárních materiálech 209
Albright College 62
Alexa, internetový vyhledávač 171–172
alexandrijská knihovna 171
algoritmy 87, 160, 166, 209
Al-Káida 212
Allen, Paul 106
Alltheweb.com 160
AltaVista, internetový vyhledávač 37, 87, 97
alternativní sestřih 252
Alzheimerova choroba 175
Amaral, Luis 92, 136
Amazon.com 9, 61, 115, 171, 203, 207
American Express 197
American Journal of Sociology 46
American Sociological Review 46
Ani trh ani hierarchie: Síťové formy organizace (Powell) 200
AOL (America Online) 191, 207
Apple, počítače 97, 107–108, 127, 129, 203
Argonnská národní laboratoř 179
architektura
- buňky 177, 181, 182
- ekonomiky 201
- komplexita 14, 95
- Lessig o ní 168, 170
- používání pojmu 168
- rozdíl mezi ní a programem 168–169
- sítí 112, 142, 152, 171
-webu 61
ARPA (Agentura pro pokročilé výzkumné projekty) 143–145
asijská finanční krize 200–202
astronomie 16
aš-Šehhi, Marwan 212
AT&T (American Telephone & Telegraph) 67, 143, 151
atomy 13, 19;
- Boseho-Einsteinova kondenzace 102
- genetika 176
- korelační délka 78–80
- pravidlo 80/20 78–80
ATP (adenosintrifosfát) 66, 176, 180
Atta, Muhammad 212

aukce na webových stránkách 168
autorita, poslušnost k 33

Bacon, Kevin 62–66, 83
„Baconovo orákulum", webová stránka 63
viz také Bacon, Kevin
Baker, Wayne E. 196
Bakerová, Lynn 111
bakterie 180, 181, 189;
- *Escherichia coli* 177, 178
- *Helicobacter pylori* 183
balon 16
BankAmerica 192
Bankers Trust 197
bankomaty 131
Baran, Paul 141–145, 151
Barcelona 118, 132
Bar-Ilanova univerzita 115
básně 31
BBN 146, 149
Belgie 131
Bell Atlantic 192
Bellovy laboratoře 145
ben-Avraham, Daniel 115
Berlín 16, 69, 213
berlínská univerzita 69
berlínská zeď 151
Berners-Lee, Tim 36, 86
bezškálové sítě 199, 211
- bratři Faloutsosové 148, 150
- centra 129
- epidemie AIDS 129
- fenomén bohatnutí bohatých 88, 91–95
- fenomén bohatnutí zdatnějších 105, 107
- fragmentace world wide webu 158
- genetika 178–186
- Google 97
- identické uzly v nich 97
- inovace 134
- jaderné zbraně 151
- Microsoft Windows 107
- mocninné zákony 148
- model se zdatností 100, 105, 107
- pravidlo 80/20 70, 74, 79–81
- sítě typu vítěz bere vše 105–106
- topologická stabilita 112–119
- viry 129, 135–137
- zrod 90
viz také škálová invariance
Bhatia, Sabeer 204
Bianconiová, Ginestra 99–100, 103–105
bigraf 237
Bin Ládin, Usáma 212
biologie 54–55, 93, 109, 133, 147
- centra 67
- genetika 175–178
- robustnost 111–112
- shlukování 55
biotechnologické firmy 192, 198–199
bioterorismus 139; viz také terorismus
Blanc, Mel 64
Blass, Thomas 34
bludiště 19, 43,
Boeing 97
bohatnutí bohatých, fenomén 83–95
Bollobás, Béla 28
bonnevillská energetická správa 111
Borges, Jorge Luis 12
Bose, Satyendranath 101–109
Boseho-Einsteinova kondenzace 102–109
Bostonská univerzita 72, 81, 92, 93, 136
Brenner, Sidney 54

British Petroleum 192
Brockman, Jay 83, 153
Broder, Andrei 162
Brooks, John 196
Brooksova univerzita 180
Budapešť 20, 26, 31, 32, 41, 49, 53
Bůh 11, 24, 175
Bundestag 213
buněčné sítě 184, 186, 189
viz také buňky
buňky 13, 23, 50
- centra 67
- genetika 174–190
- kvasinky 117, 182, 189
- metabolismus 177–184, 187, 211
- oddělení chemickými reakcemi 39
- robustnost 112
- synchronizace 50
viz také buněčné sítě; metabolismus
Burch, Hall 145
burza 9, 33, 201–202
Bush, George W. 132

Caeonorhabditis elegans, hlístice 39, 54, 83, 190
CAIDA (Sdružená asociace pro analýzu internetových dat) 145
Caldarelli, Guido 199
Callaway, Duncan 117
Camdessus, Michel 201
Cantorův důkaz 20
Carnegieho Mellona, univerzita 148
Carradine, John 64
Case, Steve 191
Celanese Corporation 196
Celera Genomics 175
Centocor 199
centra 59–68, 81, 83
- definice 61
- epidemie AIDS 137
- fázové přechody 81
- fenomén bohatnutí bohatých 83–95
- fragmentace world wide webu 172
- genetika 179–181, 183
- inovace 128
- mocninné zákony 73
- pravidlo 80/20 73–75
- sítě typu vítěz bere vše 105
- topologická stabilita 113–115
- topologie typu hvězdy 106
- tvůrci veřejného mínění 129
- viry 134
Centrum pro pokročilou vesmírnou analýzu 145
ceny, systém 200
CERN (Evropské středisko jaderného výzkumu) 35, 36
cesty
- mezi neurony v mozku 25
- náhodné sítě 21
- pojem vzdálenosti 35, 39–40
- teorie grafů 18–19
Cisco Systems 203–204
citační síť 72, 95, 164
Citicorp 192
Clarksonova univerzita 115
Clinton, Bill 175, 194–195, 201
CNN.com 9, 88, 92, 162
COCOM 151
Code Red, virus 152
Cohen, Reuven 115
Coleman, James 128
Collins, Francis 175
Collins, Mike 124–125
Columbijská univerzita 50, 121, 128
Compaq 107, 162, 203
Cornell, Eric A. 103
Cornellova univerzita 50, 79, 117

crackeři 116–117, 121, 152
Cross, Neal C. 126–127
Cruise, Tom 62
Current Contents 47
cvrčci 50
Cybermaps.com 145

„Články řetězu" (Karinthy) 32

Daimler-Benz 191
dálniční systémy 73, 113
- genetika 180
- pravidlo 80/20 73
- vojenské sítě 145
DARPA (Armádní agentura pro pokročilé výzkumné projekty) 112, 118, 145
Davies, Donald 144
Davis, Gerald F. 196
De Havilland (firma) 97
Dell Computer 107
demokracie 15, 29, 60, 87, 89, 153, 158, 165, 169, 214
Dezső, Zoltán 138,
dinosauři 111
dluh v eurech 200
DNA 175, 177–181, 183–185, 187–189
viz také geny
Dodge, Martin 145
Dorogovcev, Sergej 93
DOS (operační systém) 107–108
Draper, Tim 205
drogové kartely 213
druhá světová válka 17, 26
druhy 39, 54, 111, 118, 184
Dugas, Gaetan 123–124, 126, 129, 136–137

E*Trade 9, 87
eBay 9, 115, 203, 207
Ego 47
Einstein, Albert 24, 52, 96, 101–106
Eisenhower, Dwight D. 143
ekonomika 12, 14–15, 191–208
- Erdősovo číslo 52
- kaskádová selhání 120, 202
- shlukování 54
- standardní model 200
- topologická stabilita 120, 122
- zákon 80/20 69, 75
ekosystémy 13, 173;
- centra 68
- internet, podobnost 143
- kaskádová selhání 120
- odolnost k chybám a selháním 111
- shlukování 54
- topologická stabilita 118
elektrorozvodné sítě 83, 110–111, 116, 120,
Ellinghaus, William M. 197
Eötvösova univerzita 53
EpidemicMarketing.com 87, 206
Erdős, Paul 20–24
- Granovetter 48
- Karinthy 31
- koeficient shlukování 52
- mocninné zákony 72
- narození 31
- problém malého světa 48, 51–53
viz také Erdősův-Rényiho náhodný světonázor
Erdősová, Anna 31
Erdősův-Rényiho náhodný světonázor 210
- centra 66
- fenomén bohatnutí bohatých 83
- genetika 178
- pojem vzdálenosti od sebe 32
- pravidlo 80/20 71
- prostředníci 59–60
- topologická stabilita 113

viz také Erdős, Paul; Rényi, Alfréd
Erez, Keren 115
Ericsson 203
Escherichia coli, bakterie 177–180
eukaryontní buňky 182
eukleidovský prostor 45, 157
Euler, Leonhard 16–19, 22
evoluce 14
- genetika 178, 181
Evropské mediální laboratoře 183
Evropský ústav bioinformatiky 183
Excite, internetový vyhledávač 9
exponenty
- kritické 78
- rozdělení konektivity 71–73
- pravidlo 80/20 71–73
- fenomén bohatnutí bohatých 85, 89
Exxon 191

Faloutsos, Christos 148, 150
Faloutsos, Michalis 148, 150
Faloutsos, Petros 148, 150
farmaceutický průmysl, databáze 199
Fass, Craig 62
FAST 160
fázové přechody 24, 25, 76–80
FBI (Federální úřad pro vyšetřování) 10
Fell, David A. 180, 181
feromagnetický kov 77
Fields, Stanley 182
Filipíny 131, 201
finále amerického fotbalu 87, 206
Finance One 201
Fisher, Michael 79
Flake, Gary 166
Floydová, Sally 147
Fordovy automobilové závody 32, 193
Fortune 1000 společnosti 192
viz také společnosti
fotoelektrický jev 101
fotony 101
fraktální množiny 76, 150
Francie 124, 168
Freeh, Vincent 153
Fujitsu-Siemens 107
fúze 191–192
fyzika 16, 23, 38, 51, 53, 104
- Boseho-Einsteinova kondenzace 102–109
- Erdősovo číslo 52
- fázové přechody 77–80
- fenomén bohatnutí bohatých 93, 95
- kvantová teorie 101
- newtonovská 69
- shlukování 57
- teorie perkolace 24, 115
- topologická stabilita 115

Gates, William H. („Bill") 52, 106–107, 137, 204
Gateway 203
Genentech 199
genetika viz geny
genom 54, 175, 184, 189
viz také geny
geny 13–15, 54, 118, 185
- DNA 177–178, 183–184, 187, 189
- duplikace 184
- funkční role 177
- maniodepresivní psychóza 174, 176
- Projekt lidského genomu 175, 176
- redukcionismus 14
- topologická stabilita 182
viz také genom
Genzyme 199
Giles, Lee 216

Gilliat, Bruce 172
Gillis, Joseph E. 52
Ginelly, Mike 62
Gladwell, Malcolm 59, 66
Goldbachova hypotéza 26–27
Gomes, Jean-Jacques 168
Google, internetový vyhledávač 36, 37, 96–98, 160
- model se zdatností 98–100, 105–106
- studie firmy NEC 160
Granovetter, Mark 46–49, 51, 53, 57–58, 165
granulární materiály 209
Gretzky, Wayne 49
Grossman, Jerry 52
GTE 192
Guare, John 34–35, 38–39

hackeři 9–10, 13, 146;
- buněčná biologie 186
- MafiaBoy 10, 12, 15, 25, 115–116
- Microsoft 107
- rozsáhlé útoky 152
- topologická stabilita 116
viz také crackeři, viry
Handspring 129
Harvardova univerzita 33, 46, 149
Havlin, Shlomo 115
hazardní hry 28
Helicobacter pylori, bakterie 183
hemoglobin 177, 184
Herzfeld, Charlie 144
Heston, Charlton 65
Hewlett-Packard 107, 203
histogramy 28, 70–71
hollywoodská síť 55, 64, 66, 84
- fenomén bohatnutí zdatných 109
- pravidlo 80/20 70, 72, 84, 86, 89, 211
homosexuální kultura 123–124, 126
viz také virus AIDS
Hongkong 131
HotBot 158–159
Hotmail 204–207
hustota populace 150
hvězda, topologie typu 210, 108

Chamberlain, Wilt 136
Channingová, Stockard 34
chaos 50, 76
- fázové přechody 80
- mocninné zákony 76
- molekuly vody 77
- pravidlo 80/20 75–81
- zamrzání kapalin 77
Chaplin, Charlie 63
chemie 23, 46, 60, 178
Cheng, Richard 132
Cheswick, Bill 145
Chicagská univerzita 165
Chiron 199
Chomsky, Noam 52
Christo 214
chromozomy 174
Chrysler 191
chřipka 126, 140, 188
chyby
- jejich důsledky 111
- odolnost 114
- rozpad sítí 112
- topologická stabilita 114, 121
viz také selhání
IBM (International Business Machines) 42, 83, 84, 107, 133, 162, 209
- studie world wide webu 162
- subdodavatelský systém 203
Illinoiská univerzita 79
IMDb.com (internetová databáze filmů) 63
inflace 200

informační ekonomika 193
Inktomi 96, 160,
inovace 126–129
- módní vlny 139
- prahový model 130, 132–133
- předepisování léků 128
- rychlost šíření 130
- síťové ekonomiky 205
- tvůrci veřejného mínění 129
Inquirus, robot 158–159
viz také roboti
internet
- databáze filmů (IMDb.com) 63
- Národní vědecký fond 146
- optimální struktura, Baranovy modely 141–142
- poskytovatelé 150–151
- používání termínu 144
- protokol (IP) 153
- topologie 141–156
viz také world wide web
Internet Archives 96, 171–172
internetové vyhledávače 9, 37;
- fragmentace world wide webu 158, 162–163
- Inktomi 96
- jakožto centra 61
- metavyhledávače 158
- studie firmy NEC o nich 158–160
- základní popis 37
intuice 41, 45, 104
Iowa State College 126
IP (internetový protokol) 153
Izraelská fyzikální společnost 115

Jacobsová, Jane 222
jaderné zbraně 141–143
JC Penny 197
Jeanne-Claude 214
Jeong, Hawoong 37, 53, 64, 149, 153, 157, 182, 210
- genetika 179
- grantový projekt pro DARPA 112
- hra Kevina Bacona 65
- pravidlo 80/20 70
Ježíš Kristus 11–12
ježovky 118
Jobs, Steve 130
Jon Stewart, televizní pořad 62
Jordan, Vernon 194–197, 207
judaismus 11

Kadanoff, Leo 79–80
Kahle, Brewster 170–172
Kalifornská univerzita 148–149
Kamra, divadlo 49
kapacita linky 149
kapaliny
- vypařování 78
- zamrzání 77
kapesní počítače 97, 127, 129–130
Kaposiho sarkom 123
karikatury 124
Karinthy, Frigyes 31–34, 41–42, 44, 49
kaskádová selhání 120–122, 151, 202, 213
Kaskádové hory 119
Katalánská polytechnická univerzita 118
katastrofální úspěch, fenomén 147
Katz, Elihu 128
Kirman, Alan 255
Kleinfeldová, Judith S. 223
Kleinrock, Leopard 148
Kline, Charley 148
Kód a další zákony kyberprostoru (Lessig) 168
Kogut, Bruce 228, 255
Kochen, Manfred 42
Kokosy v pralese (film) 62
komplexita 14, 95, 190, 213–214

- fragmentace world wide webu 173
- genetika 189–190
- náhodné sítě 23–24, 29–30
- redukcionismus 14
- teorie grafů 26
komponenty 112
- fragmentace world wide webu 164
- genetika 175
komunity 26, 165–167, 172
Kongres (Spojených států) 201
konkurence
- model se zdatností 97–100, 105–109
- operační systémy 105–109
- síťové ekonomiky 200
kontinenty, fragmentace webu 158, 162–163
Koput, Kenneth W. 198
korelační délka 78
kostky, hra 24, 58
Kosztolányi, Dezső 41
královecký problém 17
Krapivsky, Paul 93
Krebs, Valdis 212
Krugman, Paul 202
kryptografie 166, 168
krystal, mřížková struktura 19, 76–77
křesťanství 10–12, 129, 134
viz také svatý Pavel (apoštol)
Kvantová teorie jednoatomových plynů (Einstein) 102
kvantová teorie 101–105
kvasinkové buňky 117, 182–183, 198

La Sapienza, univerzita 199
Lane, David 185
Lawrence, Steve 36, 158–159, 166
léčiva, vývoj 185–188, 198
led: krystaly 77
Lee, Christopher 65
léky na předpis 128, 188
Lessig, Lawrence 168–170
letecký průmysl 97
Levin, Jerry 191
Levine, Arnold, J. 185–186
Lewinská, Monika 194–195
Leyvraz, François 93
Liljeros, Fredrik 135–136
Linux 108
literární karikatura 31
logaritmický formát, obrázek v 70
logaritmy 35, 40
London, Tom 64
Love Bug, virus 131–133, 140, 205
viz také viry
Lucent Technologies 145, 203
Ludvík XVI. (král) 16
Lumeta 145
lusky, hrachové 69
Lycos 159

Maďarská akademie věd 53
Madison Square Garden 49
MafiaBoy, hacker 10, 12, 15, 25, 115–116
viz také hackeři
magnetismus 77–78, 81
MAI Network Services 150
Mandelbrot, Benoît 150
maniodepresivní psychóza 174, 176, 187–188
mapy leteckého provozu 73
Marine Midland Bank 197
marketing
- centra 128
- kapsení počítače Newton 97, 129
- prahový model 130
- síťové ekonomiky 193
- šíření inovací 127
- tvůrci veřejného mínění 129
- virový 205, 207
viz také reklama
Mason, Sean 182
masová produkce 193
Mathur, Rajive 159
McAdams, James 153
McCullough, Peter 197
Mendes, José 83, 93, 164
měnové krize 120–121
Menzel, Herbert 128
MessagePad 130
metabolismus 67, 95, 112, 176–183, 187, 211, 215
Mezinárodní ústav pro teoretickou fyziku 132
Microsoft Outlook 132, 205
Microsoft Windows 106–108
Microsoft 96, 106–109
- Hotmail 204–205
- viry 126, 132, 205
viz také konkrétní software
Michelangelo Buonarotti 169
Michiganská univerzita 113
Milgram, Stanley 33–35, 37–39, 41–44
MIT (Massachusettský technický institut) 33, 42, 46, 149,
Mitchum, Robert 64–65
MMF (Mezinárodní měnový fond) 120
Mobil 192
mobilní telefony 155
mocninné zákony 70–76, 78–81, 83–84, 87, 89 – 95
- síťové ekonomiky 199
- topologie internetu 148
- viry 136
model A 87
model stromu 192–194
módní vlny 59, 123–140
Mohamad, Mahathir 201
Molekulární biologie (Watson) 178
molekuly 14, 15, 22, 23, 25, 29, 39, 55, 176
- centra 66, 67
- genetika 175, 177
- mocninné zákony 72
- pravidlo 80/20 72
- voda 76
Monsieur Verdoux (film) 63
Montgolfierové, bratři 16
Montoya, José M. 118
mořské vydry 118, 120
Motorola 203
mozek 23, 24, 25, 39, 54, 145, 155, 156, 188, 190
viz také neurony
mRNA 177; viz také RNA
MSNBC.com 88
Murphyho zákon 70
mutace 118, 182, 185, 186
Myers, Mike 63

náboženství 11–12, 14, 134, 165, 174, 212
viz také svatý Pavel (apoštol)
nacismus 26, 168
náhodné grafy 23–26, 28–30, 55
viz také teorie grafů, náhodné sítě
náhodné sítě 53–56, 66, 148, 178
- centra 68
- fenomén bohatnutí bohatých 85, 87–89, 94
- formování 23
- fragmentace world wide webu 161, 164
- mocninné zákony 71–72
- pojem síly slabých vazeb 47–49
- pojem vzdálenosti 40
- pravidlo 80/20 71, 73–75, 80
- síťové ekonomiky 198
- teorie a její vývoj 21–30
- topologická stabilita 112–115

- zhroucení sítě 112–113
viz také Erdősův-Rényho náhodný světonázor, náhodné grafy
Národní bezpečnostní úřad (NSA) 116
Národní fyzikální laboratoř 144
Národní univerzita v Soulu 210
Národní ústav pro standardy 103
Národní vědecký fond 146
NASA 144
NASDAQ 191
National Public Radio 152
National Urban League 196–197
Nature (časopis) 55, 67, 118, 152, 174
- data o maniodepresivní psychóze 174
- data o výzkumu rakoviny 185–186
Naughton, John 149
Nebezpečné hry (film) 63
NEC, výzkumný ústav firmy 36, 39, 158–160
Néda, Zoltán 53
neurony 25, 29
- *Caenorhabditis elegans* 39, 54, 83, 190
- genetika 190
- pojem vzdálenosti 25, 39
New York Times, The 88
New Yorker, The 59
Newman, Mark 53–54, 117
Newton, Isaac 59
Newton, kapesní počítač 97, 127, 129–130
Nobelova cena 32, 52, 80, 101, 103, 132,
Nokia 203
Nortel 203
Northern Light 160
Norton, Barry 63
Novomexická univerzita 180
NP úplné problémy 166

„O mocninných zákonitostech v topologii internetu“ (bratři Faloutsosové) 148
Oaklandská univerzita 52
občanská práva, organizace na jejich ochranu 194
obscenita, definice 166
Oltvai, Zoltán 178–179, 182
operace „Kvalifikovaný likvidátor“ 116
operační systémy 107–109
optické kabely 144, 150
optimalizace 178, 193–194
orientované sítě 161–164, 200, 204
Osterman, Jack 143
ostrovy, použití termínu 162–163
Otevřené problémy ve výzkumu počítačových virů (White) 133
Oullet, Gilled 115
oxid uhličitý 176

p53, gen 185–187
pacemakerové buňky 50
Page, Larry 96
pakety 120, 143–144, 150–151, 154
Palm Pilot 127
Pammolli, Fabio 199
Pár správných chlapů (film) 63
paradigmata 29, 131, 140
parazitní počítání 154,
Pareto, Vilfredo 69
Paretův zákon 70
Park, Jong 183
parodie 31
Pastor-Satorras, Romualdo 132–134, 138
Patašinskij, Alexandr Z. 79
Patterson, Gene 63
Pavel (apoštol) 11–12, 15, 129, 134
Paxon, Vern 147
peacoksmap.com 145
Pensylvánská univerzita 141
Pentium, procesory 146
perkolace, teorie 24, 115
Petěrburg 16–17
Petěrburská akademie věd 16
Pfizer 128
Philosophical Magazine of the Royal Society 101
Planck, Max 101–102
Planckova formule 101–102
plavci 37
viz také roboti
Pleasence, Donald 65
plyny 71, 76, 78, 81, 101–105
PocketPC 129, 203
počet kroků od sebe 31–45, 60, 68, 161, 180, 196
- genetika 177
- Milgramovy experimenty 34
- síťové ekonomiky 196
Poissonovo rozdělení 28
Pojednání o všeobecné sociologii (Pareto) 69
pokožka, lidská 155, 176
Pokrovskij, Valerij L. 79
politika otevřeného přístupu 151
Pool, Ithiel de Sola 42
Pooley, Eric 194
pornografie 65, 168
Pôrtská univerzita 164
pořádek a fázové přechody 76–77
pořádek-nepořádek, přechod 78, 80–81
potraty 167
potravní sítě 55
- odstraňování uzlů z nich 118
- pojem vzdálenosti 39
- topologická stabilita 118
Powell, Walter W. 198–200
prahový model 130, 132–133
pravidlo 80/20 69–82
preferenční připojování 88–94, 98–99, 149, 178, 184
- fenomén bohatnutí bohatých 88–94
- růst internetu 149–150
prezidentské volby, hlasovací lístky 125
prezidentský úřad 67
Princetonská univerzita 202
Principia (Newton) 69
Pritchard, David 159
program: jeho odlišnost od architektury 169
Projekt lidského genomu 175–176, 189
viz také genom
prostředníci 59–68
- definice 59
- shlukování 60, 64
proteinová databáze 183
proteiny 67, 117–118, 147, 161, 175, 177–179, 182–188, 211
protokoly 117, 120, 144, 146–147, 152
- parazitické výpočty 153–155
- topologická stabilita 117, 120
průměrné hodnoty a náhodné sítě 28
Pruská akademie věd 102
první workshop o internetové archivaci 96, 171
psychologie 33–34, 132
Pythagorova věta 20

rakovina 13, 67, 176, 185–187, 214
RAND Corporation 141, 149
Ravaszová, Erzsébet 53, 93
Redner, Sid 72
redukcionismus 13–15
regulační sítě 112, 177, 181
Reichstag 213–214
reklama 67, 87, 166, 204–206
viz také marketing

renormalizace 80–81
Rényi, Alfréd 20
- Granovetter 47
- Karinthy 41
- koeficient shlukování 53
viz také Erdősův-Rényiho náhodný světonázor
Riccaboni, Massimo 199
rizikové podnikání 198, 205
RNA 177, 181
roboti 37–38, 58, 61, 70, 157, 172
- fragmentace world wide webu 158 – 160, 164, 170
- pravidlo 80/20 70, 72
- základní popis 157–158
robustnost 15, 75, 111–114, 118, 121–122
Romanová, Carina M. 135
Roosevelt, Franklin D. 67
Rosen, Emanuel 67
Ross, Arnold 27
rovnostářství 28, 58, 60–62, 99
rozděl a panuj, přístup 13
rubidium 103
růst 86–87, 89–92, 94, 146
- model se zdatností 98–100, 106
Ryan, Bryce 126–127
ryby, jejich druhy 184

Salam, Abdus 132
Sammi Steel 201
samoorganizované sítě 76, 81, 122, 155, 169, 173, 211–213
Samuelson, Paul 52
Samuchin, Alexandr N. 164
Santafeský institut 53
Santosová, Maria 83
SBC Communications 192
Scala, Antonio 232, 235
Science (časopis) 84, 89, 92, 158, 176, 185, 209
Science News 209
Scorsese, Martin 65
Sculley, John 129
Sebrané spisy (Euler) 16
selhání
- důsledky 109
- kaskádová 117–119
- topologická stabilita 108–120
viz také chyby
Severozápadní univerzita 178
shlukování
- *Caenorhabditis elegans* 54
- centra 68
- elektrorozvodné sítě 54
- gigantické shluky 24–25, 40
- grafy spoluprací 53
- intuitivní chápání 51
- koeficient 51, 53
- náhodné sítě 68
- pojem síly slabých vazeb 47
- pojem vzdálenosti 40
- prostředníci 59, 63
- síťové ekonomiky 199
- Wattsův-Strogatzův model 54–58, 60, 66, 86
- zhroucení sítě 113
schizofrenie 174
Schubert, András 53
Siena - univerzita 199
Síla slabých pout (Granovetter) 47
síla slabých pout, pojem 46–49, 51, 54, 110
sítě odolné k chybám 110, 115
sítě podobné rybářským 142
sítě spoluprací 53
slabé vazby, jejich síla 46–49, 51, 54, 110
sluneční soustava 172
směrovací tabulky 151
viz také směrovače
směrovače 40, 104, 113, 119–122, 144–145, 148–150, 152
- kapacita linky 149
- používání termínu internet 144
- topologická stabilita 112–122
viz také směrovací tabulky
Smith, Jack 204
sociologie 24–25, 33, 46–47, 50, 69, 93, 126, 129
- fenomén bohatnutí bohatých 93
- pojem vzdálenosti 35
- prahový model 131
- shlukování 57
- síla slabých vazeb, pojem 46–49, 51, 54, 110
- synchronizace 50
- tvůrci veřejného mínění 129
- viry 136
Solé, Ricard V. 118
Somprasong Land 200
Soriano, Marcel 132
Soros, Georgie 201
Soul 210
spojité přiblížení 91
společnosti
- biotechnologické 192, 198–199
- pravidlo 80/20 70
- reklama 87–88
- shlukování 54
- síťové ekonomiky 191–208
- správní rady 196–198
- strategické partnerství 198–199
- teorie náhodných sítí 25, 28–29
- začínající 191, 199, 205, 207
správní rady společností 192, 194–198
Sprint 150–151
Sputnik, družice 143
srdeční choroby 187
Stanfordova univerzita 96, 148, 167–168
Stanley, H. Eugene 52, 81, 93
Starr, Kenneth 195
statické modely 86, 92–94, 109, 210
Steiger, Rod 65–66
Stewart, Potter 166
Stockholm - univerzita 135
strategické partnerství 198
Strauss, Robert S. 197
streptokokové infekce 189
Strogatz, Steven 50–51, 54–58, 60, 66, 68, 75, 86, 89, 117
viz také Wattsův-Strogatzův model
Stručná historie budoucnosti (Naughton) 149
subdodavatelský systém 194, 199, 203–204
supravodiče 78, 81, 103
Sustein, Cass 165
svědomí 33
světlušky 49
Světová banka 201
svoboda slova 60, 169
synchronizace 49–50
System Development Corporation 149

šachy 19
šest kroků od sebe
viz počet kroků od sebe
Šest stupňů odloučení (Guare) 34
Šípové kříže (organizace) 26
škála, pojem 73 – 75, 80
škálová invariance 80
viz také bezškálové sítě
Špion, který mě vojel (film) 63

Tak píšete vy (Karinthy) 31–32
Tarkovskij, Andrej 65
Taylor, Bob 144
Taylor, Frederick, Winslow 253
telemetrické zařízení 155
televizní reklama 206
viz také reklamní marketing

teorie grafů 17–20, 22–30, 42, 49
- grafy spolupráce 53
- úplné grafy 47
teplota 77–78, 102–103, 110, 155
termodynamika 78, 102
terorismus 10, 14–15, 119, 122, 152, 212–213
- bio- 139
- topologická stabilita 116, 119, 122
- útoky z 11. září 115, 122, 171
viz také hackeři
terstská studie o virech 137, 140, 205
tetracyklin 128
Time (magazin) 64, 194
Time Warner 191
Tjaden, Brett 63, 83
tleskání, synchronizované 49
Tomlinson, Ray 146
topologie 60–62, 75, 83, 90
- fenomén bohatnutí bohatých 93–94
- model se zdatností 105
- typu hvězdy 106, 108, 142
viz také náhodné sítě, bezškálové sítě
Torontská univerzita 148
transfer technologie 199
Travelers Group 192
Trinity College 28
Turtle, Brian 62
tvůrci veřejného mínění 129
tvůrčí aktivita 26

University College, Londýn 145
Univerzita Notre Dame 27, 37–38, 61, 83–84, 103, 153, 209, 217
UNIX 108
Uran (planeta) 16
URL
viz vazby 36
Úřad pro aplikovaný sociální výzkum 128
Ústav molekulárních věd 54
Ústav pro pokročilá studia 53
ústřední jádro 162
Utažská univerzita 149
útok typu odepření služby 10, 120, 152
UUNet 150
uzly
- elektrorozvodné sítě 54
- fenomém bohatnutí bohatých 85–94
- fragmentace world wide webu 162 163, 170–171
- genetika 184
- kaskádová selhání 121
- měření vzdálenosti mezi 39–40
- model se zdatností 98–99, 103–106, 108–109
- na pravidelných grafech 26
- operační systémy jako uzly 107
- orientované sítě 161
- počet, v prvních letech internetu 36
- Poissonovo rozdělení 28
- pojem vzdálenosti 35, 39–40
- pravidlo 80/20 71, 73–75
- shlukování 55–58
- síťové ekonomiky 192, 194, 196, 198
- soupeření 108
- teorie grafů 18–19, 22, 27–28
- topologická stabilita 112–122
- útoky na ně 152
- vazby, stejný počet 28
- viry 139
- zhroucení sítě 112–113

vazby
- fenomén bohatnutí bohatých 88
- fragmentace world wide webu 170
- genetika 184
- interpretace 42
- konkurence 99
- měření viditelnosti pomocí jejich počtu 62
- minimální požadavek na ně, u sítí 24
- mocninné zákony 75
- model se zdatností 98
- náhodné sítě 23
- pojem vzdálenosti 33, 36, 38–40
- pravidlo 80/20 70, 76
- prostředníci 59–61, 66
- shlukování 51, 54
- síťové ekonomiky 198
- teorie grafů 17–19
- vnitřní 92
- vynález world wide webu 86
vBNS 146
včelí plástev 19, 28
vědecká revoluce 14
vědecko-fantastická literatura 157
Venter, Craig 175
vesmírný program 144
Vespignani, Alessandro 132–134, 138
Vicsek, Tamás 53
Virginská univerzita 63
Virus Bulletin 132–133
viry 15, 109, 123–140, 152
- centra 129
- ebola 126
- Love Bug 131–133, 140, 205
- marketing 131
- Microsoft 132, 205
- prahový model 130
- terstská studie o virech 132–135
viz také AIDS
vítěz bere vše, sítě typu 105–106, 108
Vítězný bod (Gladwell) 59–60
voda
- genetika 177, 180
- metabolické sítě 177
- zamrzání 81
vodík 46
Vogelstein, Bert 185
vojenský výzkum 116, 144
volby 124–126
von Schmoller, Gustav 69
Všechno je jinak (Karinthy) 32
výhonky 162–163
výpadek roku 1965 110
vývoj 13
- fenomén bohatnutí bohatých 87
- grafů 29
- preferenční připojování 90
- versus struktura 91
Výzkumné centrum T. J. Watsona 209

Wagner, Andreas 180
Wagner, Robert 63
Wasson, Glen 63
Watson, James D. 52, 178, 179
Watts, Duncan 50–51, 54–58, 60, 75, 83, 117, 121
viz také Wattsův-Strogatzův model
Wattsův-Strogatzův model 55–58, 68
viz také Watts, Duncan
Waxman, Bernard M. 245
WebTop.com 160
Weiman, Carl E. 103
White, Douglas 199
White, Harrison 46
White, Steve R. 133
Widom, Ben 79

Wilson, Kenneth 79–80
WNET 146
World wide web 209–215
- archivování 171
- článek Wattse a Strogatze 58
- fragmentovaný 163
- jako příklad katastrofálního úspěchu 147
- pojem vzdálenosti 36
- použití termínu 144
- pravidlo 80/20 70, 81
- rozdělení na čtyři velké kontinenty 162
- samoorganizovaná topologie 169
- shlukování 54
- velikost 158, 160
viz také vazby, URL, jednotlivé webové stránky
Wright, Frank Lloyd 169, 178
Wuchty, Stefan 183

Xerox 197

Yahoo! 9, 61, 68, 88, 96
- aukce 168–169
- fragmentace world wide webu 162
- model se zdatností 96
- útoky na ně 9–10, 115
Yook, Soon-Hyung 149
Yoová, Mina 196
Yucatan 111

začínající firmy 191, 199, 205, 207
zákony o směrných číslech 26
zdatnost, model se zdatností uzlů 98–100
Zeitschrift für Physik 101
zvonovitá křivka 70–72, 80, 92, 127, 129

Život v sedmém nebi (film) 63

Obsah

Vlákno první
Úvodem *(9)*

Vlákno druhé
V říši náhody *(16)*

Vlákno třetí
Šest kroků od sebe *(31)*

Vlákno čtvrté
Malé světy *(46)*

Vlákno páté
Centra a prostředníci *(59)*

Vlákno šesté
Pravidlo 80/20 *(69)*

Vlákno sedmé
Bohatí bohatnou, chudí chudnou *(83)*

Vlákno osmé
Einsteinův odkaz *(96)*

Vlákno deváté
Achillova pata *(110)*

Vlákno desáté
Viry a módní vlny *(123)*

Vlákno jedenácté
Probouzející se internet *(141)*

Vlákno dvanácté
Potrhaná pavučina *(157)*

Vlákno třinácté
Mapa života *(174)*

Vlákno čtrnácté
Síťová ekonomika *(191)*

Vlákno poslední
Pavučina bez pavouka *(209)*

Poděkování *(216)*

Poznámky *(219)*

Rejstřík *(259)*

MASARYKOVA UNIVERZITA
Fakulta sociálních studií
Joštova 10
602 00 BRNO
8B

FÉNIX

ALBERT-LÁSLÓ BARABÁSI

V pavučině sítí

Z anglického originálu Linked
vydaného nakladatelstvím Perseus Publishing
v Cambridgi (Massachusetts) roku 2002
přeložil RNDr. František Slanina, CSc.
Vydalo nakladatelství Ladislav Horáček – Paseka
v Praze a Litomyšli roku 2005
jako svou 816. publikaci
Typografie Luboš Šedivý
Kresby na přebalu Petr Čížek
Edice Fénix, svazek 13
Odpovědná redaktorka Věra Amelová
Výtvarný redaktor Bohuslav Holý
Technický redaktor Petr Čížek
Vytiskla tiskárna FINIDR, s. r. o.,
Lipová ulice, Český Těšín
280 stran. Vydání první

ISBN 80-7185-751-3

Knihy nakladatelství Paseka
žádejte u svých knihkupců anebo na adrese:
nakladatelství Paseka, obchodní oddělení
Chopinova 4, 120 00 Praha 2
e-mail: paseka@paseka.cz
tel.: 222 710 750–1

Aktuální informace o knihách nakladatelství Paseka
najdete na internetové stránce www.paseka.cz